

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Biociências

Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Linha de pesquisa em Ecologia de Paisagem

Tese de Doutorado

# **Crescimento urbano e ambiente**

**Um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**

Maurício Couto Polidori

Porto Alegre, dezembro de 2004

Título do trabalho

**Crescimento urbano e ambiente**

**Um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**

Autor

**Maurício Couto Polidori**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ecologia, Centro de Ecologia, Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Ecologia, na área de concentração em Ecologia de Paisagem

Orientador

**Romulo Krafta, PhD**

Comissão de Orientação

**Maria Luiza Porto, PhD**

**Valério Pillar, PhD**

Comissão Examinadora

**Gustavo Buzai, PhD**

**Emílio Merino, Doutor**

**Valério Pillar, PhD**

**Dedicatória**

à memória de meu irmão José Rubens, que foi exemplo de inteligência e sensibilidade

para meus pais Rubens e Lili, que desde sempre souberam unir amor e vida

para meus filhos Maria, Estela e Miguel, que me mostram o futuro a cada dia

## **Agradecimentos**

Agradeço especialmente a Romulo Krafta, orientador deste trabalho, pela oportunidade, apoio e dedicação.

Também destacadamente agradeço a Juliano Granero, que escreveu o programa de computador que integra este trabalho.

Quero agradecer também (colocando os nomes em ordem alfabética) a Almira Couto Polidori (Lili); Ana Paula Neto de Faria; Andréa Mussi; Carmem Vera Roig; Cristiane Aquino; Estela Delanoy Polidori; Ester Judite Bendjouya Gutierrez; Fabrício Vergara Mota; Heinrich Hasenack; Joana Xavier Barros; Juliana Gadret da Silva; Maria Carolina Leal Polidori; Maria Luiza Porto; Marilton Sanchotene de Aguiar; Miguel Delanoy Polidori; Míriam Benício; Mônica Acioli; Niara Palma; Nirce Saffer Medvedovski; Paulo Oliveira; Renata Requião; Ricardo Andrade Cava; Ricardo Sampaio Pintado; Rubens Brito Polidori; Sandra Maria Hartz; Simone Soares Delanoy; Valério DePatta Pillar.

E agradeço ainda (em ordem alfabética) a Agência da Lagoa Mirim – UFPel; Colegas do Programa de Pós-Graduação em Ecologia; Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAUrb; Funcionários da FAUrb – UFPel; Funcionários da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação da UFPel; Funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ecologia da UFRGS; MEC e setores encarregados; Professores da Academia Movimento; Professores da FAUrb – UFPel; Professores do Programa de Pós-Graduação em Ecologia; Secretaria Municipal de Educação; Secretaria Municipal de Planejamento Urbano; Universidade Federal de Pelotas – UFPel.

“nuestras horas son minutos  
cuando esperamos saber  
y siglos cuando sabemos  
lo que se puede aprender”

*Antônio Machado, 1964 – estrofe IV*

parece que  
sinto, sei e faço  
sou, tenho e ofereço  
tudo e nada  
ao mesmo tempo

## Resumo

Crescimento espacial tem sido um dos importantes fenômenos observados nas cidades contemporâneas, sendo a identificação de processos e padrões, de suas causas e conseqüências, um desafio para a ciência. Nesse caminho, esta pesquisa propõe um modelo de simulação de crescimento urbano dedicado a realizar simulações, incluindo de modo integrado fatores urbanos, naturais e institucionais, promovendo simultaneidade entre crescimento externo e interno a um espaço urbano preexistente, representados e modelados utilizando integradamente grafos, autômato celular e geotecnologias. Experimentos com modos de crescimento (axial, polar e difuso) e com cenários alternativos estão implementados, bem como são investigadas questões urbanas de conversão de território, de distribuição dos estoques construídos, de formação de periferias e vazios, de obsolescência e revitalização, de mono e policentralidade, de abrangência de funções urbanas e de influência da distância, de renaturalização e preservação ambiental, de limites de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos, de ponderação de atributos, de crescimento difuso, fragmentação e compacidade. Estão também incluídas possibilidades de compressão de dados e alternativas de visualização de resultados, alcançando estudos exploratórios sobre forma urbana e sustentabilidade. O trabalho está dedicado inicialmente a fundamentar, construir e apresentar o modelo de simulação de crescimento denominado SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>, depois a realizar simulações num caso real, em Pelotas, RS, quando são demonstrados os procedimentos de calibração, terminando com experimentos escolhidos para avançar na discussão do fenômeno do crescimento urbano. Esforços estão realizados para oferecer um instrumento de simulação com possibilidade de uso para além dos interesses exclusivos desta investigação, particularmente no campo do ensino e da prática do planejamento urbano municipal. Sendo assim, este argumento se dedica simultaneamente a documentar a trajetória de construção de um modelo de simulação de crescimento urbano, a explicitar sua aplicabilidade em casos de cidades reais e a contribuir para a compreensão teórica da dinâmica urbana e ambiental na cidade.

## Palavras-chave

Crescimento urbano; fatores urbanos e naturais; modelagem urbana; grafos; autômato celular; geotecnologias.

**Abstract**

Space growth has been one of the important phenomena observed in the contemporary cities, being the identification of processes and patterns, of their causes and consequences, a challenge for the science. This research proposes a model of urban growth dedicated to accomplish simulations, including urban, natural and institutional factors together, promoting simultaneity among external and internal growth to a preexistent urban space, acted and modeled using graphs, cellular automata and geo-technologies. Experiments with urban growth typologies (axial, polar and diffuse) and with alternative sceneries are implemented, as well as urban territory conversion, built forms distribution, slums and urban gaps location, obsolescence and revitalization, centrality and polycentrality, urban functions and distance influence, rehabilitation and environmental preservation, growth limits and intra-urban environmental problems, attributes valorization, diffuse growth, fragmentation and compactness. They are also included possibilities of compression of data and alternatives of visualization of results, reaching exploratory studies on urban form and sustainability. The work is dedicated initially to base, to build and to present the model of growth denominated SACI - City Environmental Simulator, later to accomplish simulations in a real case, in Pelotas, RS, Brazil, when the calibration procedures are demonstrated, finishing with chosen experiments to move forward in the discussion of the phenomenon of the urban growth. Efforts are accomplished to offer a simulation instrument with possible use beyond the exclusive interests of this investigation, particularly in the field of the teaching and of the practice of the municipal urban planning. This argument is devoted simultaneously to document the path of construction of a model of simulation of urban growth, to demonstrate its applicability in cases of real cities and to contribute for the theoretical understanding of the urban and environmental dynamics in the city.

**Key-words**

Urban growth; urban and natural factors; urban modelling; graphs; cellular automata; geo-technologies.



## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Apresentação e objetivos .....	1
1.2	Estrutura da Investigação.....	2
1.3	Antecedentes e justificativa .....	5
1.4	Epílogo do capítulo 1 .....	10
<b>2</b>	<b>Cidade, ambiente e crescimento urbano .....</b>	<b>11</b>
2.1	Introdução.....	11
2.2	Cidade e ambiente .....	11
2.3	Crescimento urbano e modelagem .....	16
2.4	Utilizando grafos, CA e geotecnologias .....	19
2.5	Conclusões .....	25
2.6	Epílogo do capítulo 2.....	26
<b>3</b>	<b>Modelando crescimento urbano.....</b>	<b>27</b>
3.1	Introdução.....	27
3.2	Descrição do território – <i>input</i> .....	27
3.2.1	Base espacial, delimitação física, entidades e variáveis utilizadas nas simulações .....	27
3.2.2	Descrição do ambiente não urbanizado.....	31
3.2.3	Descrição urbana .....	35
3.2.4	Descrição institucional.....	38
3.3	Implementação dos modelos de centralidade e potencial – processamento .....	42
3.3.1	Tensões espaciais.....	42
3.3.2	Distribuição de tensões axiais, polares e difusas .....	45
3.3.3	Centralidade celular .....	47
3.3.4	Potencial de crescimento celular .....	50
3.3.5	Crescimento celular.....	51
3.3.6	Limiar de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos .....	52
3.3.7	Probabilidades para a distribuição difusa .....	52
3.3.8	Controle da dimensão temporal .....	54
3.3.9	Distribuição de tensões e diferentes tipos de crescimento urbano .....	54
3.4	Parametrização .....	60
3.5	Obtenção de resultados – <i>output</i> .....	62

3.6	Validação do modelo .....	65
3.7	Medidas de crescimento celular .....	68
3.7.1	Medida de conversão de território .....	69
3.7.2	Medida de problemas ambientais intra-urbanos .....	69
3.7.3	Medida de fragmentação .....	70
3.7.4	Medida de compacidade .....	72
3.8	Interpretação dos resultados .....	74
3.9	Resumo dos componentes de grafos e de CA .....	74
3.10	Fluxogramas geral e detalhado .....	75
3.11	Conclusões .....	78
3.12	Epílogo do capítulo 3 .....	79
<b>4</b>	<b>O software SACI – Simulador do Ambiente da Cidade® .....</b>	<b>80</b>
4.1	Introdução .....	80
4.2	Estrutura e interface principal .....	80
4.3	Entrada de dados – <i>input</i> .....	84
4.4	Parametrização e processamento .....	86
4.5	Resultados – <i>output</i> .....	88
4.6	Conclusões .....	93
4.7	Epílogo do capítulo 4 .....	95
<b>5</b>	<b>Calibrando o modelo de simulação de crescimento .....</b>	<b>96</b>
5.1	Localização da área de estudo em Pelotas, RS .....	96
5.2	Delineamento do estudo em Pelotas, RS .....	100
5.3	Descrição urbana, natural e institucional para 1965 e 2000 .....	103
5.3.1	Dados tabulares .....	104
5.3.2	Dados gráficos .....	105
5.4	Calibração do modelo para 1965 a 2000 .....	112
5.4.1	Parametrização .....	112
5.4.2	Calibração no caso 1 .....	115
5.4.3	Calibração no caso 2 .....	119
5.4.4	Calibração no caso 3 .....	123
5.5	Conclusões sobre a aplicação do modelo para 1965 a 2000 .....	127
5.5.1	Comparação entre os resultados .....	127
5.5.2	Interpretação dos resultados alcançados .....	130
5.6	Conclusões sobre a calibração do modelo .....	132
5.7	Epílogo do capítulo 5 .....	133

<b>6</b>	<b>Especulando sobre o futuro .....</b>	<b>134</b>
6.1	Apresentação .....	134
6.2	Crescimento urbano em hipóteses inferior, intermediária e superior .....	134
6.2.1	Hipótese de crescimento urbano inferior .....	135
6.2.2	Hipótese de crescimento urbano intermediário .....	144
6.2.3	Hipótese de crescimento urbano superior .....	154
6.3	Crescimento urbano na presença de grandes pólos de atração .....	163
6.4	Crescimento urbano e zoneamento .....	172
6.5	Crescimento urbano e indução institucional de ocupação do solo .....	180
6.6	Conclusões sobre a aplicação do modelo a partir de 2000 .....	186
6.6.1	Sobre os experimentos com três hipóteses de velocidade de crescimento .....	186
6.6.2	Sobre os experimentos com crescimento urbano e grandes pólos de atração.....	187
6.6.3	Sobre os experimentos com crescimento urbano e zoneamento.....	188
6.6.4	Sobre os experimentos com crescimento urbano e indução institucional de ocupação do solo.....	188
6.6.5	Sobre todos os experimentos em conjunto.....	189
6.7	Conclusões gerais do estudo de caso .....	191
6.8	Conclusões gerais sobre o crescimento urbano .....	192
6.9	Epílogo do capítulo 6.....	193
<b>7</b>	<b>Avançando na modelagem do crescimento urbano .....</b>	<b>194</b>
7.1	Apresentação .....	194
7.2	Crescimento externo e interno integrados .....	195
7.3	Distribuição de estoques construídos .....	202
7.4	Formação de vazios urbanos .....	205
7.5	Formação de periferias urbanas .....	209
7.6	Obsolescência e revitalização no crescimento urbano .....	214
7.7	Raios de interação, raios de vizinhança, mono e policentralidade .....	218
7.8	Abrangência das funções urbanas.....	222
7.9	Influência da distância entre carregamentos.....	226
7.10	Variação da impedância.....	229
7.11	Preservação e renaturalização ambiental.....	231
7.12	Limites de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos.....	237
7.13	Ponderação e autoponderação de atributos .....	242
7.14	Crescimento difuso, fragmentação e compacidade .....	247
7.15	Conclusões sobre a simulação avançada.....	254
7.16	Epílogo do capítulo 7.....	257

<b>8</b>	<b>Simulação avançada e o caso de Pelotas, RS.....</b>	<b>258</b>
8.1	Apresentação .....	258
8.2	As regras de crescimento urbano .....	258
8.2.1	Crescimento por potencial com limiar e por potencial livre.....	259
8.2.2	Crescimento por percolação .....	263
8.3	Compressão de dados e análise de vizinhança.....	267
8.4	Alternativas de visualização para os resultados gráficos.....	272
8.5	Simulação avançada em Pelotas, RS.....	275
8.6	Conclusões da simulação avançada com o caso de Pelotas, RS.....	290
8.7	Epílogo do capítulo 8.....	291
<b>9</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>292</b>
9.1	Validade das hipóteses e alcance dos objetivos.....	292
9.2	Observações registradas na investigação .....	293
9.2.1	Quanto aos componentes de <i>output</i> do modelo .....	294
9.2.2	Quanto aos casos simulados em Pelotas, RS.....	295
9.2.3	Quanto aos experimentos com a simulação avançada .....	300
9.3	Possibilidades, limitações e continuidade .....	308
9.4	Epílogo do capítulo 9.....	313
<b>10</b>	<b>Bibliografia e recursos catalogados .....</b>	<b>314</b>
10.1	Referências bibliográficas .....	314
10.2	Periódicos de consulta .....	326
10.3	Softwares utilizados.....	327
<b>11</b>	<b>Anexo: <i>software</i> SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup> .....</b>	<b>328</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1: a) "pontes de Königsberg"; b) representação das pontes por um grafo escrito por Euler, em 1876 (Bogomolny, 2002).....	19
Figura 2.2: exemplos de dois estados de um CA básico, com dois tipos de estados (vazio e cheio), com dois tipos de vizinhança (von Neumann = azul claro; Moore = vermelho claro) e modificados pela regra "mover ao vizinho à direita"; a) no tempo t; b) no tempo t+1; (adaptado de Torrens, 2000b:22).....	21
Figura 2.3: esquema de evolução de um CA em função de aplicação de regras, tempo e observações de estados e processo. ....	21
Figura 2.4: a) células e pontos superpostos espacialmente; b) grafo, representado por pontos e vetores; c) células, pontos e vetores, representando um sistema integrado de grafo com CA. ....	24
Figura 3.1: retalho de imagem de satélite com resolução original de 15 m; a) 50.400 células de 50 m; b) 12.600 células de 100 m; c) 504 células de 500 m. ....	28
Figura 3.2: exemplos de delimitação física de sistemas urbanos em duas dimensões, com os seguintes casos: a) centro de Londres (Desyllas et al., 2003:04), com buffer de aproximadamente 30% do sistema total (sobre base vetorial); b) área urbana de Barra do Ribeiro, RS, também com buffer de aproximadamente 30% do sistema total; c) área urbana de Pelotas, RS, com buffer de cerca de 20 % do sistema total. ....	29
Figura 3.3: a) variáveis de espaço; b) variáveis de atributos. ....	30
Figura 3.4: variáveis como carregamentos ou resistências. ....	30
Figura 3.5: organização dos atributos naturais a partir da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano. ....	32
Figura 3.6: organização dos atributos urbanos a partir da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano. ....	36
Figura 3.7: organização dos atributos institucionais a partir da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano. ....	40
Figura 3.8: diagramas em formato de CA, representado: a) tensão gerada entre duas células (azul e vermelha); b) células incluídas na distribuição axial de caminho preferencial (verde); c) células incluídas na distribuição axial de buffer de caminho preferencial, com raio igual a uma célula (verde claro); d) células incluídas na distribuição de tensões do tipo polar, com vizinhança de raio igual a uma célula (azul claro e rosa); e) mesmo caso anterior, com vizinhança de raio igual a duas células f) hipótese de células incluídas na distribuição difusa (laranja = tipo 1; azul claro = tipo 2). ....	46
Figura 3.9: inputs do experimento para demonstrar o efeitos dos diferentes tipos de distribuição de tensões; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências aleatórias com valor de 1 a 10; c) superposição de carregamentos e resistências. ....	54
Figura 3.10: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial, sem a presença de resistências. ....	55
Figura 3.11: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial, com a presença de resistências aleatórias. ....	55
Figura 3.12: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial de buffer, sem a presença de resistências. ....	56
Figura 3.13: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial de buffer, com a presença de resistências aleatórias. ....	56
Figura 3.14: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente polar, sem a presença de resistências. ....	57
Figura 3.15: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente polar, com a presença de resistências aleatórias. ....	57
Figura 3.16: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 1, sem a presença de resistências. ....	58
Figura 3.17: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 1, com a presença de resistências aleatórias. ....	58
Figura 3.18: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 2, sem a presença de resistências. ....	59
Figura 3.19: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 2, com a presença de resistências aleatórias. ....	59
Figura 3.20: fluxograma geral do modelo de simulação de crescimento urbano. ....	75
Figura 3.21: fluxograma detalhado do modelo de simulação de crescimento. ....	77
Figura 4.1: a) estrutura de integração do ArcView com o módulo externo em C++; b) organização de um projeto no ArcView; em laranja os componentes utilizados na concepção do SACI. ....	81
Figura 4.2: componentes da estrutura do ArcView utilizados pelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®; a) View setup, com input gráfico; b) View com output gráfico; c) saci.apr, com a lista de view de output gráfico (iterations); d) saci.apr, com a lista de tables; e) saci.apr, com a lista de scripts; f) saci.apr, com a lista de dialogs. ....	82
Figura 4.3: interface principal do SACI. ....	83
Figura 4.4: janelas de input de atributos; a) entrada de atributos naturais; b) entrada de atributos urbanos; c) entrada de atributos institucionais; b) exemplo de janela de edição de atributo já cadastrado. ....	84
Figura 4.5: a) criação do Base-Grid; b) compactação do Base-Grid; c) função Assign. ....	84
Figura 4.6: exemplo de inputs gráficos, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM+, resolução de 15m, de fevereiro de 2000; a) conversão raster para grid: extração do tema "solos descobertos", obtida por classificação supervisionada, em classe única; c) conversão vetorial (linha) para grid: tema "sistema viário", por eixos das vias, em classe única; e) conversão vetorial (área) para grid: tema "quantidade de domicílios", em 32 classes ; b, d, f) resultado da conversão para grid, com células de 100m. ....	85
Figura 4.7: a) raios de interação e de vizinhança; b) coeficientes de valorização dos atributos; c) impedância; d) limites dos buffers; e) efeito da distância; f) efeito difuso; g) distribuição de tensões. ....	86

Figura 4.8: janela de aplicação e parametrização das regras utilizadas nas simulações de crescimento; a) mostra as três regras disponíveis e as funções de adicionar, apagar, imputar parâmetros, ativar e fechar a janela; b) mostra a janela dedicada a ajustar os parâmetros das regras Threshold Potential e Free Potential (são duas janelas idênticas, pois os parâmetros são os mesmos); c) mostra a janela dedicada a ajustar os parâmetros da regra Percolation.....	86
Figura 4.9: janelas dedicadas a acionar e controlar o processamento: a) saci.apr; b) Iteration Setup.....	87
Figura 4.10: algoritmo geral do SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®.....	88
Figura 4.11: classes (nove) e paletas de cores (hierárquica) padrão utilizadas nos outputs gráficos do modelo: a) EProbT; b) EProbl; c) ValueI; d) ValueU; ValueE; e) CellType; f) ResistI; g) ResistU; h) ResistE; h) LoadI; i) LoadU; j) LoadE; l) Potential; m) CentR2; n) CentR1; o) CentABS.....	89
Figura 4.12: exemplos de outputs gráficos do tipo grid, com células de 500m e nove classes, com variáveis binárias (a) e quantitativas (demais figuras), sobre composição de imagem de satélite Landsat 7 ETM+, resolução de 15m, de fevereiro de 2000, em Pelotas, RS (Polidori, 2003a): a) células com fenótipo urbano (CellType, no modelo); b) carregamento urbano (LoadU, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor vermelho; c) potencial de crescimento (Potential, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor laranja; d) distribuição de centralidades relativas tipo 1 (CentR1, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor azul claro; e) distribuição de centralidades relativas tipo 2 (CentR2, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor azul índigo; f) distribuição de centralidades absolutas (CentABS, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor azul escuro; g) distribuição de problemas ambientais numa iteração (EProbl, no modelo), em paleta hierárquica em escala de cor laranja; h) distribuição acumulada de problemas ambientais intra-urbanos (EProbT, no modelo), com paleta hierárquica de cor vermelho ao amarelo; i) distribuição de resistências naturais (ResistE, no modelo), em paleta hierárquica em escala de cor verde.....	90
Figura 4.13: a) e b) ferramentas Go To Next Iteration e Go To Previous Iteration; c) e d) ferramenta Export Output.....	91
Figura 4.14: tabelas de output geradas pelo SACI: a) processo, iteração, fragmentação, compacidade, conversão de território e problemas ambientais intra-urbanos; b) contagem de células totais e de borda, com fenótipo urbano; c) potenciais gerados nos processos de crescimento.....	91
Figura 4.15: exemplo de outputs gráficos do tipo histograma e do tipo gráfico linear; a) histograma por tipo de célula, a partir de um grid booleano, para os fenótipos urbano ou natural (CellType, no modelo); b) histograma por classes, a partir de um grid com variáveis quantitativas, para a intensidade de urbanização (ValueU, no modelo); c) gráfico linear, a partir variação do número total de células com fenótipo urbano (vermelho) e do número de células desse tipo localizadas na borda (verde); d) gráfico linear, a partir da variação dos potenciais de crescimento externos (verde) e internos (vermelho). 92	92
Figura 4.16: exemplo similar ao da figura anterior, referente ao conjunto de células com fenótipo urbano (CellType, no modelo): a) variação da compacidade relativa; b) variação da fragmentação relativa; c) variação da conversão de território não urbanizado em urbanizado, por iteração (em vermelho) e conversão acumulada (verde).....	92
Figura 4.17: exemplo de outputs gráficos de correlação espacial entre grids, num estado do sistema, demonstrando a semelhança entre a realidade e os resultados da simulação: a) centralidades absolutas (CentABS, no modelo), em escala log-log ( $r = 0,94$ , no exemplo); b) carregamento urbano (LoadU, no modelo), em escala 1x1 ( $r = 0,81$ , no exemplo).....	92
Figura 5.1: a) localização do município de Pelotas no Brasil e no estado do Rio Grande do sul (ponto vermelho); b) limites municipais de Pelotas (traço vermelho) e traçado dos municípios vizinhos; fonte em IBGE (2003).....	96
Figura 5.2: localização da área de estudo para simulações de crescimento urbano; a) localização no estado do RS, Brasil (traço vermelho); b) localização no município de Pelotas, RS (traço azul); fontes em Embrapa, Coleção Brasil Visto do Espaço – Rio Grande do Sul (2003), em Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15 m e no recobrimento aerofotogramétrico de 1995 e atualizações para 2003; projeções em UTM, fuso 22 sul.....	97
Figura 5.3: síntese da evolução urbana de Pelotas, RS, do ano 1815 até o ano 2000.....	97
Figura 5.4: área de estudo para simulações de crescimento urbano, em Pelotas, RS; fonte em Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15 m; projeções em UTM, fuso 22 sul.....	98
Figura 5.5: a) perímetro urbano vigente no ano 2000 (traço vermelho); b) bairros na área de estudo; fonte nos arquivos da Prefeitura Municipal de Pelotas, 2003, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15m; projeções em UTM, fuso 22 sul.....	99
Figura 5.6: a) sistema viário na área de estudo (eixos das ruas, em traço azul); b) vetores de desenvolvimento espacial noroeste, norte e nordeste (setas vermelhas); fonte no recobrimento aerofotogramétrico de 1995 e atualizações para 2003, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15m; projeções em UTM, fuso 22 sul.....	99
Figura 5.7: a) área coberta por urbanização no ano de 1965, em rosa (fonte no recobrimento aerofotogramétrico de 1965; Polidori, 2003b); b) área coberta por urbanização no ano de 2000, em vermelho (fonte em Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15 m; projeções em UTM, fuso 22 sul; c) superposição das manchas urbanas nos anos de 1965 e 2000, em rosa e vermelho, respectivamente.....	101
Figura 5.8: a) desagregação espacial com 2.160 células de 500m; b) detalhe de uma célula de 500 x 500m (destacada em azul).....	102
Figura 5.9: a) imagem aérea utilizada como fonte para os dados gráficos do ano de 1965 (fonte no recobrimento aerofotogramétrico de 1965; Polidori, 2003b); b) imagem de satélite utilizada como fonte para os dados gráficos do ano 2000 (fonte em Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15m; projeções em UTM, fuso 22 sul).....	105
Figura 5.10: carregamento em uma intensidade de urbanização; a) em 1965; b) em 2000.....	105
Figura 5.11: carregamento em três intensidades de urbanização (valores de 1, 5 e 10); a) em 1965; b) em 2000.....	106
Figura 5.12: carregamento aleatório (intervalo de valores de 1 a 10); a) em 1965; b) em 2000.....	106
Figura 5.13: a) Laguna dos Patos (em 1965 e em 2000); b) rios, arroios e canais naturais (em 1965 e em 2000).....	107
Figura 5.14: a) águas lânticas (em 1965 e em 2000); b) canais artificiais em (1965 e em 2000).....	107
Figura 5.15: a) banhados (em 1965 e em 2000); b) áreas alagáveis (em 1965 e em 2000).....	108
Figura 5.16: campos e vegetação de pequeno porte; a) em 1965; b) em 2000.....	108
Figura 5.17: matas e vegetação de grande porte; a) em 1965; b) em 2000.....	109
Figura 5.18: plantações e vegetação de pequeno porte; a) em 1965; b) em 2000.....	109
Figura 5.19: dunas; a) em 1965; b) em 2000.....	110

Figura 5.20: a) praias (em 1965 e em 2000); b) áreas não pertencentes ao município de Pelotas (em 1965 e em 2000).....	110
Figura 5.21: cobertura do sistema viário; a) em 1965; b) em 2000. ....	111
Figura 5.22: grid aleatório (valores de 1 a 1,1), em três classes. ....	111
Figura 5.23: caso 1, com uma intensidade de urbanização (carregamento igual a 1 para todas as células urbanas); a ) em 1965 ; b) em 2000 ; c) superposição de 1965 e 2000.....	115
Figura 5.24: caso 1; resultados alcançados para fenótipos urbanos, com distribuição de tensões da tabela 3; a) sem predomínio; b) predomínio axial (melhor resultado; c) predomínio polar; d) predomínio difuso; e) predomínio de composição axial e polar. ....	116
Figura 5.25: caso 1; a) células urbanas de controle para o ano 2000; b) células urbanas simuladas para o ano 2000.....	117
Figura 5.26: caso 1; a) carregamento de controle para o ano 2000; b) carregamento simulado para o ano 2000.....	117
Figura 5.27: caso 1; a) centralidade de controle para o ano 2000; b) centralidade simulada para o ano 2000.....	117
Figura 5.28: caso 1; a) potencial de controle para o ano 2000; b) potencial simulado para o ano 2000. ....	118
Figura 5.29: caso 1; a) resistências naturais de controle para o ano 2000; b) resistências naturais simuladas para o ano 2000. ....	118
Figura 5.30: caso 1; a) problemas ambientais intra-urbanos de controle para o ano 2000; b) problemas ambientais intra-urbanos simuladas para o ano 2000. ....	118
Figura 5.31: caso 2, com carregamento em três intensidades de urbanização (valores de 1, 5 e 10); a) em 1965; b) em 2000; c) superposição de 1965 e 2000. ....	119
Figura 5.32: caso 2; resultados alcançados para fenótipos urbanos, com distribuição de tensões da tabela 4; a) sem predomínio; b) predomínio axial; c) predomínio polar; d) predomínio difuso (melhor resultado); e) predomínio de composição axial e polar. ....	120
Figura 5.33: caso 2; a) células urbanas de controle para o ano 2000; b) células urbanas simuladas para o ano 2000.....	121
Figura 5.34: caso 2; a) carregamento de controle para o ano 2000; b) carregamento simulado para o ano 2000.....	121
Figura 5.35: caso 2; a) centralidade de controle para o ano 2000; b) centralidade simulada para o ano 2000.....	121
Figura 5.36: caso 2; a) potencial de controle para o ano 2000; b) potencial simulado para o ano 2000. ....	122
Figura 5.37: caso 2; a) resistências naturais de controle para o ano 2000; b) resistências naturais simuladas para o ano 2000. ....	122
Figura 5.38: caso 2; a) problemas ambientais intra-urbanos de controle para o ano 2000; b) problemas ambientais intra-urbanos simuladas para o ano 2000. ....	122
Figura 5.39: caso 3, com carregamento aleatório (intervalo de valores de 1 a 10); a) em 1965; b) em 2000; c) superposição de 1965 e 2000.....	123
Figura 5.40: caso 3; resultados alcançados para fenótipos urbanos, com distribuição de tensões da tabela 5; a) sem predomínio (melhor resultado); b) predomínio axial; c) predomínio polar; d) predomínio difuso ; e) predomínio de composição axial e polar. ....	124
Figura 5.41: caso 3; a) células urbanas de controle para o ano 2000; b) células urbanas simuladas para o ano 2000.....	125
Figura 5.42: caso 3; a) carregamento de controle para o ano 2000; b) carregamento simulado para o ano 2000.....	125
Figura 5.43: caso 3; a) centralidade de controle para o ano 2000; b) centralidade simulada para o ano 2000.....	125
Figura 5.44: caso 3; a) potencial de controle para o ano 2000; b) potencial simulado para o ano 2000. ....	126
Figura 5.45: caso 3; a) resistências naturais de controle para o ano 2000; b) resistência naturais simuladas para o ano 2000. ....	126
Figura 5.46: caso 3; a) problemas ambientais intra-urbanos de controle para o ano 2000; b) problemas ambientais intra-urbanos simuladas para o ano 2000. ....	126
Figura 6.1: hipótese de crescimento inferior; CellType, até iteração 45.....	136
Figura 6.2: hipótese de crescimento inferior; LoadU, até iteração 45.....	136
Figura 6.3: hipótese de crescimento inferior; CentR1, até iteração 45.....	137
Figura 6.4: hipótese de crescimento inferior; CentR1, até iteração 45.....	137
Figura 6.5: hipótese de crescimento inferior; Potential, até iteração 45.....	138
Figura 6.6: hipótese de crescimento inferior; ResistE, até iteração 45.....	138
Figura 6.7: hipótese de crescimento inferior, sobre output de CellType, mostrando os agrupamentos de células urbanas; a) iteração 1; b) iteração 45.....	139
Figura 6.8: hipótese de crescimento inferior, sobre output de CellType, na iteração 45, mostrando a incidência de vazios urbanos; a) vazios que separam núcleos remotos; b) vazios no núcleo principal; c) vazios fragmentados.....	139
Figura 6.9: hipótese de crescimento inferior, sobre output de LoadU na iteração 45, mostrando a distribuição de carregamentos urbanos; a) continuidade entre parcelas separadas; b) interface do ambiente urbanizado com o não urbanizado. ....	140
Figura 6.10: hipótese inferior, sobre output de CentR1 na iteração 45, mostrando distribuições de centralidade; a) centro principal, de nível 1; b) expansão do centro principal, de nível 2; c) centros de bairro, de nível 3; d) corredores de baixa centralidade, de nível 4.....	141
Figura 6.11: hipótese de crescimento inferior, sobre output de CentR2, na iteração 45, mostrando distribuições de centralidade; a) centro principal; b) expansões do centro principal na direção dos bairros Areal e Fragata.....	141

Figura 6.12: hipótese de crescimento inferior, sobre output de Potential, mostrando linhas de concentração de potencial; a) na iteração 1; b) na iteração 45.....	142
Figura 6.13: hipótese inferior, sobre output de ResistE, na iteração 45, mostrando a distribuição de resistências naturais; a) áreas de permanência; b) linhas de concentração; c) fragmentos; d) interfaces com a cidade.....	143
Figura 6.14: hipótese de crescimento intermediário; CellType, até iteração 45.....	145
Figura 6.15: hipótese de crescimento intermediário; LoadU, até iteração 45.....	145
Figura 6.16: hipótese de crescimento intermediário; CentR1, até iteração 45.....	146
Figura 6.17: hipótese de crescimento intermediário; CentR2, até iteração 45.....	146
Figura 6.18: hipótese de crescimento intermediário; Potential, até iteração 45.....	147
Figura 6.19: hipótese de crescimento intermediário; ResistE, até iteração 45.....	147
Figura 6.20: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de CellType, na iteração 45; a) agrupamentos urbanos; b) vazios urbanos.....	148
Figura 6.21: hipótese de crescimento intermediário, na iteração 45; a) crescimento centrífugo, sobre output de CellType; b) ocupação centrípeta, sobre output de LoadU.....	149
Figura 6.22: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de CentR1, na iteração 45, mostrando centralidades de diferentes hierarquias; a) centralidade de nível 1; b) centralidade de nível 2; c) centralidade de nível 3; d) centralidade de nível 4.....	150
Figura 6.23: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de CentR2, na iteração 45, mostrando a distribuição de centralidade; a) concentração de centralidade; b) vetores de expansão de centralidade.....	151
Figura 6.24: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de Potential, mostrando as linhas de concentração de potencial, a) na iteração 1; b) na iteração 45.....	151
Figura 6.25: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de ResistE, mostrando as linhas de concentração de resistências naturais; a) na iteração 1; b) na iteração 45.....	152
Figura 6.26: hipótese de crescimento superior; CellType, até iteração 45.....	155
Figura 6.27: hipótese de crescimento superior; LoadU, até iteração 45.....	155
Figura 6.28: hipótese de crescimento superior; CentR1, até iteração 45.....	156
Figura 6.29: hipótese de crescimento superior; CentR2, até iteração 45.....	156
Figura 6.30: hipótese de crescimento superior; Potential, até iteração 45.....	157
Figura 6.31: hipótese de crescimento superior; ResistE, até iteração 45.....	157
Figura 6.32: hipótese de crescimento superior; EProbT, até iteração 45.....	158
Figura 6.33: hipótese de crescimento superior, sobre output de CellType, mostrando processos de compactação (elipses) e fragmentação (quadrados); a) na iteração 1; b) na iteração 45.....	159
Figura 6.34: hipótese de crescimento superior, sobre output de LoadU, na iteração 45, mostrando a distribuição dos carregamentos; a) linhas com carregamentos elevado, nas regiões de solo convertido para urbano no processo de crescimento; b) pontos de carregamento máximo que flutuam pelo sistema; c) ocorrência de carregamentos mínimos.....	160
Figura 6.35: hipótese superior, sobre output de CentR1, mostrando a concentração de centralidade; a) na iteração 1 (início); b) na iteração 22 (meio); c) na iteração 45 (fim).....	160
Figura 6.36: hipótese de crescimento superior, sobre output de Potential, mostrando as faixas largas de incidência; a) na iteração 1 (início); b) na iteração 22 (meio); c) na iteração 45 (fim).....	161
Figura 6.37: hipótese de crescimento superior, sobre output de ResistE, mostrando a distribuição de resistências naturais; a) na iteração 1 (início); b) na iteração 22 (meio); c) na iteração 45 (fim).....	161
Figura 6.38: grandes pólos de atração urbanos e demais carregamentos utilizados na simulação; a) distrito industrial na Sanga-Funda (em magenta); b) praias da Laguna dos Patos (em amarelo); c) composição de grandes pólos de atração (zona do Foro em magenta; estrada do Laranjal em cinza; praias em amarelo).....	164
Figura 6.39: simulação de crescimento e grande pólo de atração urbano (distrito industrial na Sanga-Funda), na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem o grande pólo de atração; b) sobre output de LoadU, sem o grande pólo de atração; c) sobre output de CentR1, sem o grande pólo de atração; d) sobre output de CellType, com o grande pólo de atração; e) sobre output de LoadU, com o grande pólo de atração; f) sobre output de CentR1, com o grande pólo de atração; g) sobre output de CentR2, sem o grande pólo de atração; h) sobre output de Potential, sem o grande pólo de atração; i) sobre output de ResistE, sem o grande pólo de atração; j) sobre output de CentR2, com o grande pólo de atração; l) sobre output de Potential com o grande pólo de atração; m) sobre output de ResistE, com o grande pólo de atração.....	165
Figura 6.40: simulação de crescimento e grande pólo de atração natural (praias da Laguna dos Patos), na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem o grande pólo de atração; b) sobre output de LoadU, sem o grande pólo de atração; c) sobre output de CentR1, sem o grande pólo de atração; d) sobre output de CellType, com o grande pólo de atração; e) sobre output de LoadU, com o grande pólo de atração; f) sobre output de CentR1, com o grande pólo de atração; g) sobre output de CentR2, sem o grande pólo de atração; h) sobre output de Potential, sem o grande pólo de atração; i) sobre output de ResistE, sem o grande pólo de atração; j) sobre output de CentR2, com o grande pólo de atração; l) sobre output de Potential com o grande pólo de atração; m) sobre output de ResistE, com o grande pólo de atração.....	166
Figura 6.41: simulação de crescimento e composição de grandes pólos de atração, hipótese de equinócio, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem os grandes pólos de atração; b) sobre output de LoadU, sem os grandes pólos de atração; c) sobre output de CentR1, sem os grandes pólos de atração; d) sobre output de CellType, com os grandes pólos de atração; e) sobre output de LoadU, com os grandes pólos de atração; f) sobre output de CentR1, com os grandes pólos de atração; g) sobre output de CentR2, sem os grandes pólos de atração; h) sobre output de Potential, sem os grandes pólos de atração; i) sobre output de ResistE, sem os grandes pólos de atração; j) sobre output de CentR2, com os grandes pólos de atração; l) sobre output de Potential com os grandes pólos de atração; m) sobre output de ResistE, com os grandes pólos de atração.....	167
Figura 6.42: simulação de crescimento e composição de grandes pólos de atração, hipótese de solstício de verão, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem os grandes pólos de atração; b) sobre output de LoadU, sem os grandes pólos de atração; c) sobre output de CentR1, sem os grandes pólos de atração; d) sobre output de CellType, com os grandes pólos de atração; e) sobre output de LoadU, com os grandes pólos de atração; f) sobre output de CentR1, com os grandes pólos de atração; g) sobre output de CentR2, sem os grandes pólos de atração; h) sobre output de Potential, com os grandes pólos de atração.....	167



- sobre output de Potential, sem os grandes pólos de atração; i) sobre output de ResistE, sem os grandes pólos de atração; j) sobre output de CentR2, com os grandes pólos de atração; l) sobre output de Potential com os grandes pólos de atração; m) sobre output de ResistE, com os grandes pólos de atração. .... 168
- Figura 6.43: zonas e demais carregamentos utilizados nas simulações; a) zona de preservação cultural (em traço azul); b) zona de conservação natural (em verde escuro); c) zona de fragilidade ambiental (com limiar igual a 0,50 na zona verde escuro e igual a 0,75 na zona verde claro). .... 173
- Figura 6.44: simulação de crescimento e zoneamento para a preservação cultural, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem a zona de preservação cultural; b) sobre output de LoadU, sem a zona de preservação cultural; c) sobre output de CentR1, sem a zona de preservação cultural; d) sobre output de CellType, com a zona de preservação cultural; e) sobre output de LoadU, com a zona de preservação cultural; f) sobre output de CentR1, com a zona de preservação cultural; g) sobre output de CentR2, sem a zona de preservação cultural; h) sobre output de Potential, sem a zona de preservação cultural; i) sobre output de ResistE, sem a zona de preservação cultural; j) sobre output de CentR2, com a zona de preservação cultural; l) sobre output de Potential com a zona de preservação cultural; m) sobre output de ResistE, com a zona de preservação cultural..... 174
- Figura 6.45: simulação de crescimento e zoneamento para a conservação natural, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem as zonas de conservação natural; b) sobre output de LoadU, sem as zonas de conservação natural; c) sobre output de CentR1, sem as zonas de conservação natural; d) sobre output de CellType, com as zonas de conservação natural; e) sobre output de LoadU, com as zonas de conservação natural; f) sobre output de CentR1, com as zonas de conservação natural; g) sobre output de CentR2, sem as zonas de conservação natural; h) sobre output de Potential, sem as zonas de conservação natural; i) sobre output de ResistE, sem as zonas de conservação natural; j) sobre output de CentR2, com as zonas de conservação natural; l) sobre output de Potential com as zonas de conservação natural; m) sobre output de ResistE, com as zonas de conservação natural. .... 175
- Figura 6.46: simulação de crescimento e zonas de fragilidade ambiental, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem as zonas de fragilidade ambiental; b) sobre output de LoadU, sem as zonas de fragilidade ambiental; c) sobre output de CentR1, sem as zonas de fragilidade ambiental; d) sobre output de CellType, com as zonas de fragilidade ambiental; e) sobre output de LoadU, com as zonas de fragilidade ambiental; f) sobre output de CentR1, com as zonas de fragilidade ambiental; g) sobre output de CentR2, sem as zonas de fragilidade ambiental; h) sobre output de Potential, sem as zonas de fragilidade ambiental; i) sobre output de ResistE, sem as zonas de fragilidade ambiental; j) sobre output de CentR2, com as zonas de fragilidade ambiental; l) sobre output de Potential com as zonas de fragilidade ambiental; m) sobre output de ResistE, com as zonas de fragilidade ambiental. .... 176
- Figura 6.47: a) zona de indução de crescimento utilizada na simulação, em lilás; b) zona com limiar de 0,50 , em rosa..... 181
- Figura 6.48: a) zona de indução de crescimento utilizada na simulação, em traço azul; b) zona com limiar de 0,33 , em azul..... 181
- Figura 6.49: simulação de crescimento e indução em zonas não urbanizadas, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem indução em zonas não urbanizadas; b) sobre output de LoadU, sem indução em zonas não urbanizadas; c) sobre output de CentR1, sem indução em zonas não urbanizadas; d) sobre output de CellType, com indução em zonas não urbanizadas; e) sobre output de LoadU, com indução em zonas não urbanizadas; f) sobre output de CentR1, com indução em zonas não urbanizadas; g) sobre output de CentR2, sem indução em zonas não urbanizadas; h) sobre output de Potential, sem indução em zonas não urbanizadas; i) sobre output de ResistE, sem indução em zonas não urbanizadas; j) sobre output de CentR2, com indução em zonas não urbanizadas; l) sobre output de Potential com indução em zonas não urbanizadas; m) sobre output de ResistE, com indução em zonas não urbanizadas..... 182
- Figura 6.50: simulação de crescimento e indução em zonas urbanizadas, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem indução em zonas urbanizadas; b) sobre output de LoadU, sem indução em zonas urbanizadas; c) sobre output de CentR1, sem indução em zonas urbanizadas; d) sobre output de CellType, com indução em zonas urbanizadas; e) sobre output de LoadU, com indução em zonas urbanizadas; f) sobre output de CentR1, com indução em zonas urbanizadas; g) sobre output de CentR2, sem indução em zonas urbanizadas; h) sobre output de Potential, sem indução em zonas urbanizadas; i) sobre output de ResistE, sem indução em zonas urbanizadas; j) sobre output de CentR2, com indução em zonas urbanizadas; l) sobre output de Potential com indução em zonas urbanizadas; m) sobre output de ResistE, com indução em zonas urbanizadas. .... 183
- Figura 6.51: simulação de crescimento e indução em zonas não urbanizadas, mostrando detalhe na iteração 45; a) sobre output de LoadU, sem indução; b) sobre output de CentR2, sem indução; c) sobre output de LoadU, com indução; d) sobre output de CentR2, com indução; em traço lilás está a zona de indução..... 184
- Figura 6.52: simulação de crescimento e indução em zonas não urbanizadas, na iteração 45, mostrando em vermelho e laranja a incidência de problemas ambientais intra-urbanos e em traço lilás a zona de indução. .... 184
- Figura 6.53: simulação de crescimento e indução em zonas urbanizadas, na iteração 45, mostrando em vermelho e laranja a incidência de problemas ambientais intra-urbanos e em traço azul a zona de indução. .... 185
- Figura 6.54: resultados de CellType para todas as simulações realizadas a partir do ano 2000, na interação 45; a) hipótese inferior; b) hipótese intermediária; c) hipótese superior; d) grande pólo de atração do distrito industrial da Sanga Funda; e) grande pólo de atração da praia do Laranjal f) composição de pólos de atração no equinócio; g) composição de pólos de atração no solstício de verão; h) zona de preservação cultural; i) zonas de conservação natural; j) zonas de fragilidade ambiental; l) indutores externos de uso do solo; m) indutores externos de uso do solo. .... 189
- Figura 6.55: probabilidades de conversão de território não urbanizado para urbanizado, considerando todas as simulações em conjunto; a) em 32 classes, de zero a 100%; b) em 9 classes, de 70 a 100%... 190
- Figura 6.56: todas as simulações de crescimento em conjunto; a) destaque do crescimento nas bordas da cidade preexistente; b) destaque da zona de expansão à nordeste; c) expansão polinucleada no interior das bordas; d) frentes de expansão urbana..... 190
- Figura 6.57: conclusões gerais sobre a cidade de Pelotas, RS, em esquema; a) estrutura de centro dominante, eixos e núcleos remotos; b) subsistema de águas naturais; c) padrão de crescimento em forma de colar; d) superposição dos esquemas anteriores..... 191
- Figura 7.1: inputs utilizados no experimento com variações no valor de  $\rho$  (ro), para simular crescimento interno e externo simultâneos, alternados e exclusivos; a) carregamentos com valores de 10 e 9; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências. .... 196
- Figura 7.2: output da simulação utilizando  $\rho$  (ro) interno e externo com valor igual a 1,00, simulando crescimento interno e externo simultâneos, em 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE. .... 197
- Figura 7.3: output da simulação com crescimento alternado, utilizando  $\rho$  (ro) externo com valor igual a 1,00 e  $\rho$  (ro) interno com valor igual a zero, até a iteração 16 (figuras 1, 2 e 3, simulando crescimento exclusivamente externo) e depois utilizando  $\rho$  (ro) externo com valor igual a zero e  $\rho$  (ro) interno com valor igual a 1,00, da iteração 17 até a 32 (figuras 4, 5 e 6, simulando crescimento exclusivamente interno); a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE..... 198
- Figura 7.4: output da simulação com crescimento exclusivamente externo, utilizando  $\rho$  (ro) interno com valor igual a zero e  $\rho$  (ro) externo com valor igual a 1,00, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE. .... 199

Figura 7.5: output da simulação com crescimento exclusivamente interno, utilizando $\rho$ (ro) interno com valor igual a 1,00 e $\rho$ (ro) externo com valor igual a zero, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE.....	200
Figura 7.6: inputs utilizados no experimento para observar a distribuição de estoques construídos; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) resistências aleatórias com valores de 1 a 10; d) resistências aleatórias com valores de 1 a 100.....	202
Figura 7.7: output da simulação com resistências aleatórias com valores de 1 a 2, mostrando 6 estados de 60 iterações; a) CellType; b) LoadU.....	203
Figura 7.8: output da simulação com resistências aleatórias com valores de 1 a 10, mostrando 6 estados de 60 iterações; a) CellType; b) LoadU.....	203
Figura 7.9: output da simulação com resistências aleatórias com valores de 1 a 100, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU.....	203
Figura 7.10: inputs utilizados no experimento com variações no valor de $\psi$ (phi), para simular vazios urbanos; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1 e aleatórias com valor de 1 a 2; c) superposição de carregamentos e resistências.....	205
Figura 7.11: output da simulação sem indução de formação de vazios, utilizando $\psi$ (phi) igual a 0,00, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE.....	206
Figura 7.12: output da simulação com indução de formação de vazios, utilizando $\psi$ (phi) igual a 0,50, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE.....	207
Figura 7.13: inputs utilizados no experimento com variações no valor das tensões, para simular formação de periferias; a) carregamentos com valor igual a 1, com quatro células no centro do grid; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) resistências com valores de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7; d) superposição dos carregamentos e das resistências com valores de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.....	209
Figura 7.14: outputs das simulações com distribuições de tensões de 20% para todos os tipos (axial, axial de buffer, polar, difuso tipo 1 e difuso tipo 2; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	210
Figura 7.15: outputs das simulações com distribuições de tensões de 100% para difuso tipo 1; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	210
Figura 7.16: outputs das simulações com distribuições de tensões de 100% para difuso tipo 2; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	210
Figura 7.17: localização provável de periferias urbanas (3) considerando carregamentos urbanos (1) e centralidades (2), a partir de álgebra de mapas; a) para o caso de periferias do tipo urban sprawl; b) para o caso de periferias do tipo baixa renda; os carregamentos urbanos e as centralidades estão mostrados por 1/4 do desvio padrão da média; os outros dois são booleanos.....	213
Figura 7.18: inputs utilizados nos experimentos com variações no valor de $\mu$ (mi), para simular obsolescência e revitalização dos estoques construídos; a) carregamentos com valores de 10 e 9; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.....	214
Figura 7.19: outputs das simulações de obsolescência nula dos estoques construídos, utilizando $\mu$ (mi) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	215
Figura 7.20: outputs das simulações de obsolescência dos estoques construídos, utilizando $\mu$ (mi) igual a 0,90; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	215
Figura 7.21: outputs das simulações de obsolescência dos estoques construídos, utilizando $\mu$ (mi) igual a 0,80; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	215
Figura 7.22: outputs das simulações de revitalização nula dos estoques construídos, utilizando $\mu$ (mi) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	216
Figura 7.23: outputs das simulações de revitalização dos estoques construídos, utilizando $\mu$ (mi) igual a 1,10; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	216
Figura 7.24: outputs das simulações de revitalização dos estoques construídos, utilizando $\mu$ (mi) igual a 1,20; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	216
Figura 7.25: outputs das simulações de revitalização dos estoques construído, mostrando os problemas ambientais intra-urbanos acumulados; a) utilizando $\mu$ (mi) igual a 1,00; b) utilizando $\mu$ (mi) igual a 1,10; c) utilizando $\mu$ (mi) igual a 1,20.....	217
Figura 7.26: inputs utilizados nos experimentos com variação de raios de interação e de vizinhança, de modo a simular mono e policentralidade; a) carregamentos aleatórios com valores de 1 a 10; b) carregamentos com 16 células, num único núcleo com valor igual a 1; c) resistências aleatórias com valores de 1 a 10; d) superposição do carregamento com um núcleo e das resistências aleatórias.....	218
Figura 7.27: outputs das simulações utilizando input aleatório e diferentes raios, mostrando 7 estados de 64 iterações; a) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; b) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; c) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; d) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; e) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; f) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; g) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo; h) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo.....	219

Figura 7.28: outputs das simulações utilizando input com um centro, mostrando 7 estados de 64 iterações; a) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; b) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; c) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; d) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; e) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; f) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; g) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo; h) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo. ....	220
Figura 7.29: análises de vizinhança (representando cada células pela média de uma vizinhança retangular de raio igual a 15 células), realizadas sobre os resultados de CentR2, a partir do experimento 1, com carregamentos e resistências dispersos no grid, em 64 iterações; a) raio de interação máximo (todo o grid) e monocentralidade; b) raio de interação mínimo (igual a 1) e policentralidade.....	221
Figura 7.30: inputs utilizados no experimento com variação no valor dos buffers, para simular diferentes áreas de abrangência nas distribuição de tensões; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências. ....	223
Figura 7.31: output da simulação com variação nos valores dos buffers, utilizando o buffer máximo igual a 1 célula (padrão do modelo, mostrando 6 estados de 32 iterações); a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE.....	224
Figura 7.32: output da simulação com variação nos valores dos buffers, utilizando o buffer máximo igual a 2 células, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE. ....	225
Figura 7.33: inputs utilizados no experimento com variações no valor de K (ka), para observar a influência da distância nas simulações; a) carregamentos com valores de 9 e 10; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências. ....	227
Figura 7.34: outputs das simulações utilizando o efeito de distância (K) igual a 1,00(neutro); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	228
Figura 7.35 :outputs das simulações utilizando o efeito de distância (K) igual a 2,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	228
Figura 7.36: outputs das simulações utilizando o efeito de distância (K) igual a 4,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	228
Figura 7.37: inputs utilizados no experimento com variações no valor da impedância, para observar seus efeitos nas simulações; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências com valores aleatórios entre 1 e 2 e impedâncias variáveis (impedância igual ao somatório das resistências na área em tons de verde claro e igual a 10 na área em tons de verde escuro); c) superposição dos carregamentos e das resistências. ....	229
Figura 7.38: outputs das simulações utilizando a impedância igual ao somatório das resistências (padrão do modelo) para todos os themes; a) CellType na iteração 10; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 10; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 10; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 10; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 10; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 10; m) ResistE na iteração 32. ....	230
Figura 7.39: outputs das simulações utilizando a impedância igual ao somatório das resistências (padrão do modelo) para o theme 1 e igual a 10 para o theme 2; a) CellType na iteração 10; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 10; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 10; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 10; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 10; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 10; m) ResistE na iteração 32. ....	230
Figura 7.40: inputs utilizados nos experimentos para simular preservação e renaturalização de células com atributos naturais; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1(verde escuro) e aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências. ....	231
Figura 7.41: outputs das simulações sem preservação (todos os themes são removable), utilizando $\theta$ (teta) igual a 1,0; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	232
Figura 7.42: outputs das simulações com preservação de nível superior (theme freezing), utilizando $\theta$ (teta) igual a 1,0; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	232
Figura 7.43: outputs das simulações com preservação de nível intermediário (theme com peso = 10), utilizando $\theta$ (teta) igual a 1,0; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	232
Figura 7.44: outputs das simulações de renaturalização nula, utilizando $\theta$ (teta) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	233
Figura 7.45: outputs das simulações de renaturalização, utilizando $\theta$ (teta) igual a 1,10 (10% por iteração); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	233
Figura 7.46: outputs das simulações de renaturalização, utilizando $\theta$ (teta) igual a 1,50 (50% por iteração); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	233
Figura 7.47: inputs utilizados nos experimentos para simular a implementação de políticas de valorização ambiental; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1(verde escuro) e aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências. ....	235
Figura 7.48: outputs das simulações utilizando $\alpha$ (alfa) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	236
Figura 7.49: outputs das simulações utilizando $\alpha$ (alfa) igual a 0,90; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	236

Figura 7.50: outputs das simulações utilizando $\alpha$ (alfa) igual a 0,80; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	236
Figura 7.51: inputs utilizados nos experimentos com variação no valor de limiares (threshold, no modelo), para observar modificações no crescimento e simular problemas ambientais intra-urbanos; a) carregamentos com valores de 9 e 10; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) células com limiar modificado para 50% (azul) e superposição dos carregamentos e das resistências. ....	238
Figura 7.52: outputs das simulações utilizando limiar igual a 1 para todas o grid (padrão no modelo); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 0; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) EProbl na iteração 1; j) EProbl na iteração 32; l) EprobT na iteração 1; m) EprobT na iteração 32; n) Potential na iteração 1; o) Potential na iteração 32; p) ResistE na iteração 1; q) ResistE na iteração 32.....	239
Figura 7.53: outputs das simulações utilizando limiar igual a 0,5 na metade esquerda do grid; a) CellType na iteração 10; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 10; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 10; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 10; h) CentR2 na iteração 32; i) EProbl na iteração 1; j) EProbl na iteração 32; l) EprobT na iteração 1; m) EprobT na iteração 32; n) Potential na iteração 10; o) Potential na iteração 32; p) ResistE na iteração 10; q) ResistE na iteração 32. ....	239
Figura 7.54: inputs utilizados no experimento com variações nos pesos dos atributos, para demonstrar os efeitos da autoponderação e observar efeitos no crescimento; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências com área 1 (azul), 2 (verde) e 3 (amarelo); c) superposição dos carregamentos e das resistências. ....	244
Figura 7.55: outputs das simulações com mesmo peso para as resistências (1 para todas as células); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	245
Figura 7.56: outputs das simulações com ponderação manual de 1, 10 e 100 para as áreas 1, 3 e 2, respectivamente ; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.....	245
Figura 7.57: outputs das simulações com autoponderação; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	245
Figura 7.58: inputs utilizados no experimento para verificar os efeitos do crescimento difuso; a) carregamentos com valor igual a 1 (quatro células contíguas); b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.....	247
Figura 7.59: outputs da simulação com 20% de distribuição de tensões para todos os tipos, mostrando 6 de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EProbl; f) EProbT; g) potential; h) ResistE.....	248
Figura 7.60: outputs da simulação com 100% de distribuição de tensões axiais, mostrando 6 de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EProbl; f) EProbT; g) potential; h) ResistE.....	249
Figura 7.61: outputs da simulação com 100% de distribuição de tensões difusas, mostrando 6 de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EProbl; f) EProbT; g) potential; h) ResistE.....	250
Figura 8.1: inputs utilizados no experimento com potencial com limiar e potencial livre (Threshold Potential e Free Potential, no modelo); a) carregamentos com valores de 10 e 9; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.....	259
Figura 8.2: outputs da simulação utilizando o Threshold Potential, mostrando 6 de 64 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EprobT; f) Potential; g) ResistE.....	260
Figura 8.3: outputs da simulação utilizando o Free Potential, mostrando 6 de 64 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EprobT; f) Potential; g) ResistE. ....	261
Figura 8.4: comparação de outputs na iteração 64, mostrando as células de duas classes com valores mais altos, de um total de nove classes; a) LoadU com a regra de potencial com limiar; b) LoadU com a regra de potencial livre; c) CentR2 com a regra de potencial com limiar; d) CentR2 com a regra de potencial livre.....	262
Figura 8.5: esquemas do processo de percolação com diferentes raios; a) raio igual a 1; b) raio igual a 2.....	264
Figura 8.6: inputs utilizados no experimento de crescimento com percolação; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1; c) superposição dos carregamentos e das resistências.....	265
Figura 8.7: outputs da simulação de crescimento com a regra de percolação inativa, mostrando 8 de 32 iterações, com os dois atributos ativos, mostrando ResistE e LoadU superpostos.....	265
Figura 8.8: outputs da simulação de crescimento com a regra de percolação ativa, mostrando 8 de 32 iterações, somente com o atributo natural sujeito à percolação ativo. ....	266
Figura 8.9: outputs da simulação de crescimento com a regra de percolação ativa, mostrando 8 de 32 iterações, com os dois atributos ativos, mostrando ResistE e LoadU superpostos.....	266
Figura 8.10: esquema de compressão de dados no grid base, para o caso de Cluster igual a 1, com a identificação das células nodo e transferência de dados (setas); a) operação de acumulação: células nodo recebem informações para serem usadas no processamento; b) operação de distribuição: células nodo transmitem informações processadas. ....	269
Figura 8.11: inputs utilizados no experimento para testar o recurso de Cluster; a) carregamentos com valor igual a 1; b) grid com resistência aleatória, com valores de 1 a 10; c) superposição de carregamentos e resistências.....	269
Figura 8.12: outputs das simulações utilizando Cluster igual a zero; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	270
Figura 8.13: outputs das simulações utilizando Cluster igual a 1; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	270
Figura 8.14: outputs das simulações utilizando Cluster igual a 2; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32. ....	270
Figura 8.15: outputs das simulações mostrando as diferenças causadas pelo uso do Cluster 1, em relação ao Cluster zero, com análise de vizinhança pela média e raio 3; a) CellType com Cluster zero; b) CellType com Cluster 1; c) LoadU com Cluster zero; d) LoadU com Cluster 1; e) CentR1 com Cluster zero; f) CentR1 com Cluster 1.....	271

- Figura 8.16: outputs das simulações mostrando as diferenças causadas pelo uso do Cluster 2, em relação ao Cluster zero, com análise de vizinhança pela média e raio 3; a) CellType com Cluster zero; b) CellType com Cluster 2; c) LoadU com Cluster zero; d) LoadU com Cluster 2; e) CentR1 com Cluster zero; f) CentR1 com Cluster 2..... 271
- Figura 8.17: exemplo de mapas estáticos gerados no modelo e a alternativa de visualização por animação seqüencial (ver em C:\Animacoes\_Tese\CellType.gif ou C:\Animacoes\_Tese\CellType.ppt). ..... 272
- Figura 8.18: alternativas de visualização para resultados das simulações de crescimento urbano; a) output para CellType padrão do modelo, com células de 500m em vermelho; b) transformação do resultado anterior por redimensionamento das células para 50m e análise de vizinhança com raio igual a 20, em paleta de cores do vermelho ao cinza; c) output padrão do modelo, com células de 500m; d) transformação do resultado anterior por análise de vizinhança com raio igual a 3; e) vista em 3D do resultado anterior, com animação por rotação (ver em C:\Animacoes\_Tese\Visualizacoes\movie1.avi); f) output para CentR1, em 3D, em escala vertical de 10.000 vezes; g) mesmo caso anterior, em escala vertical de 20.000 vezes; h) mesmo caso anterior, em escala vertical de 4.000 vezes.... 273
- Figura 8.19: alternativas de visualização para resultados das simulações de crescimento urbano; a) output para CentR1, em 3D, em escala vertical de 5.000 vezes; b) mesmo caso anterior, utilizando como base uma imagem de satélite Landsat 7 ETM+, com resolução de 15 metros. .... 274
- Figura 8.20: alternativas de visualização para resultados das simulações de crescimento urbano; a) output para ResistE, em 3D, em escala vertical de 5.000 vezes; b) mesmo caso anterior, utilizando como base uma imagem de satélite Landsat 7 ETM+, com resolução de 15 metros. .... 274
- Figura 8.21: temas de entrada (input) na simulação avançada de crescimento em Pelotas, RS, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM+, de fevereiro de 2000; a) área urbanizada; b) cobertura do sistema viário; c) distribuição de densidades urbanas (IBGE, 2000); d) laguna; e) águas lênticas; f) águas lólicas; g) canais artificiais; h) áreas alagáveis; i) banhados. .... 278
- Figura 8.22: temas de entrada (input) na simulação avançada de crescimento em Pelotas, RS, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM+, de fevereiro de 2000; a) altitudes; b) campos e vegetação de pequeno porte; c) matas e vegetação de grande porte; d) dunas; e) solo agriculturado; f) praias; g) solo descoberto; h) área pertencente aos municípios de Capão do Leão e Rio Grande; i) grid aleatório. .... 279
- Figura 8.23: vinte estados da simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 1, denominado de "crescimento sustentável", com 45 iterações (equivalentes ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo). .... 280
- Figura 8.24: ampliação da iteração 45, na simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 1, denominado de "crescimento sustentável", (equivalente ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo). .... 281
- Figura 8.25: vinte estados da simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 2, denominado de "crescimento convencional", com 45 iterações (equivalentes ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo). .... 282
- Figura 8.26: ampliação da iteração 45, na simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 2, denominado de "crescimento convencional", (equivalente ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo). .... 283
- Figura 8.27: efeito da compressão de dados através do recurso de Cluster igual a 1 (nove células agrupadas e representadas por uma célula central); a) desagregação espacial de input e output, com 13.500 células de 200 metros; b) desagregação espacial utilizada no processamento, com 1.485 células de 600 metros. .... 284
- Figura 8.28: simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, comparando resultados para o caso 1 e caso 2, na iteração 45; a) carregamentos urbanos para o caso 1; b) carregamentos para o caso 2; c) problemas ambientais intra-urbanos para o caso 1; d) problemas ambientais intra-urbanos para o caso 2 (conjunto vazio); e) fatores naturais no caso 1; f) fatores naturais no caso 2. .... 287
- Figura 8.29: sinopse da simulação de crescimento urbano de Pelotas, RS, mostrando células com processo de urbanização completo (com a área urbanizada no ano 2000 em primeiro plano), em 45 iterações, equivalentes a 45 anos, de 5 em 5 anos, em paleta de cores do vermelho ao azul; a) cenário 1, que representa o "crescimento sustentável"; b) cenário 2, que representa o "crescimento convencional". .... 288
- Figura 8.30: relevo diferenciando o cenário urbano e não urbano (em relevo alto e baixo, respectivamente) simulado para Pelotas, RS, no ano 2045, para o caso denominado de "crescimento sustentável", utilizando como base uma imagem de satélite Landsat 7 ETM+, com resolução de 15 metros, em escala vertical de 1.000 vezes; a) vista sudoeste; b) vista noroeste. [ver animação em C:\Animacoes\_Tese\Cenarios\EPSN0006b..mov] ..... 289

## Lista de tabelas

Tabela 3.1: classificação dos atributos naturais.....	32
Tabela 3.2: lista indicativa de atributos naturais. ....	34
Tabela 3.3: classificação dos atributos urbanos. ....	36
Tabela 3.4: lista indicativa de atributos urbanos. ....	37
Tabela 3.5: classificação dos fatores institucionais.....	39
Tabela 3.6: lista indicativa de fatores institucionais. ....	41
Tabela 3.7: exemplo de determinação de probabilidades para a distribuição difusa, para um sistema com três células, com valores arbitrários de centralidade e de resistência celulares. ....	53
Tabela 3.8: resumo dos parâmetros vinculados aos atributos; valores com "*" são recomendados como limites. ....	60
Tabela 3.9: resumo dos parâmetros vinculados às regras de crescimento; valores com "*" são recomendados como limites.....	61
Tabela 3.10: modelo genérico de transcrição de grids numa matriz. ....	67
Tabela 3.11: resumo dos indicadores de semelhança utilizados na calibração. ....	68
Tabela 3.12: resumo dos componentes de CA. ....	75
Tabela 4.1: resumo de outputs de tipo grid gerados pelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®.....	89
Tabela 5.1: resumo dos atributos utilizados nas simulações. ....	104
Tabela 5.2: resumo dos parâmetros utilizados nas simulações (linhas sombreadas destacam os parâmetros variáveis conforme processo de calibração; valores com asterisco são limites recomendados). ....	114
Tabela 5.3: caso 1; resumo dos melhores resultados da calibração (com uma intensidade de urbanização e com a participação de todos os atributos naturais cadastrados); melhor resultado no processo "b" (predomínio de crescimento axial, linha com resultados sombreados, na tabela).....	115
Tabela 5.4: caso 2; resumo dos melhores resultados da calibração (com três intensidades de urbanização e com a participação de todos os atributos naturais); melhor resultado no processo "d" (predomínio de crescimento difuso, linha com resultados sombreados, na tabela).....	119
Tabela 5.5: caso 3; resumo dos melhores resultados da calibração (com intensidade de urbanização aleatória e com a participação de todos os atributos naturais); melhor resultado no processo "a" (sem predomínio; linha sombreada, na tabela). ....	123
Tabela 5.6: resumo dos melhores resultados da calibração nos três casos estudados.....	127
Tabela 5.7: comparação entre as frequências de correlações máximas e mínimas obtidas na calibração, para os tipos de crescimento urbano, nos três casos simulados; melhor resultado para a linha "b", predomínio axial (linha sombreada). ....	129
Tabela 5.8: comparação entre as frequências de correlações máximas e mínimas obtidas na calibração, para as variações de input no carregamento urbano, nos três casos simulados; melhor resultado para o "caso 2", três intensidades de urbanização (linha sombreada).....	129
Tabela 7.1: output das simulações utilizadas no experimento para verificar os efeitos de alternância entre compactidade e fragmentação; a) caso com distribuição de tensões de 20% para todos os tipos; b) caso com distribuição de tensões 100% axiais; c) caso com distribuição de tensões 100% difusas. ....	251



## Lista de equações

Equação 2.1: função de transformação das células num autômato celular.....	22
Equação 3.1: tensão entre as células $i$ e $j$ .....	43
Equação 3.2: simplificação da tensão entre as células $i$ e $j$ .....	43
Equação 3.3: peso da célula $i$ .....	43
Equação 3.4: peso da célula $j$ .....	43
Equação 3.5: tensão de cálculo entre as células $i$ e $j$ .....	44
Equação 3.6: peso de cálculo da célula $i$ .....	44
Equação 3.7: peso de cálculo da célula $j$ .....	44
Equação 3.8: modos de distribuição das tensões entre as células $i$ e $j$ .....	47
Equação 3.9: relação entre as quantidades relativas de modos de distribuição de tensões.....	47
Equação 3.10: centralidade celular da célula $i$ na interação $l$ .....	47
Equação 3.11: detalhamento da centralidade celular da célula $i$ na interação $l$ .....	48
Equação 3.12: centralidade celular absoluta da célula $i$ .....	49
Equação 3.13: centralidade celular relativa 1, da célula $i$ .....	49
Equação 3.14: centralidade celular máxima virtual do sistema.....	49
Equação 3.15: centralidade celular relativa 2, da célula $i$ .....	49
Equação 3.16: potencial de crescimento da célula $i$ .....	51
Equação 3.17: crescimento celular da célula $i$ quando $ResistE \neq zero$ .....	51
Equação 3.18: crescimento celular da célula $i$ quando $ResistI \neq zero$ .....	51
Equação 3.19: crescimento celular da célula $i$ quando $ResistU \neq zero$ .....	51
Equação 3.20: crescimento celular da célula $i$ quando $ResistE + ResistI + ResistU = zero$ .....	51
Equação 3.21: crescimento celular da célula $i$ quando $LoadU > Limiar$ .....	51
Equação 3.22: probabilidade da célula receber tensão de tipo difuso C1.....	53
Equação 3.23: probabilidade da célula receber tensão de tipo difuso C2.....	53
Equação 3.24: relação entre células de mesmo fenótipo.....	66
Equação 3.25: relação entre células de borda de mesmo fenótipo.....	66
Equação 3.26: coeficiente de correlação.....	67
Equação 3.27: covariância entre $Y_1$ e $Y_2$ .....	67
Equação 3.28: conversão de território no tempo $t+1$ .....	69
Equação 3.29: problemas ambientais intra-urbanos na célula $i$ na interação $l$ .....	69

Equação 3.30: problemas ambientais intra-urbanos totais na célula i .....	70
Equação 3.31: problemas ambientais intra-urbanos do sistema na iteração l .....	70
Equação 3.32: problemas ambientais intra-urbanos totais do sistema .....	70
Equação 3.33: fragmentação absoluta do sistema u .....	71
Equação 3.34: fragmentação máxima do sistema u .....	71
Equação 3.35: fragmentação relativa do sistema u .....	71
Equação 3.36: detalhamento da fragmentação relativa do sistema u .....	71
Equação 3.37: compacidade absoluta .....	72
Equação 3.38: compacidade absoluta num grid celular .....	72
Equação 3.39: compacidade máxima do sistema u .....	73
Equação 3.40: compacidade relativa do sistema u .....	73
Equação 3.41: detalhamento da compacidade relativa do sistema u .....	73
Equação 7.1: crescimento celular total efetivo .....	196
Equação 7.2: crescimento celular efetivo interno .....	196
Equação 7.3: crescimento celular efetivo externo .....	196
Equação 7.4: <b>buffer axial</b> .....	222
Equação 7.5: <b>buffer polar</b> .....	222
Equação 7.6: distribuição axial das tensões para a célula p, considerando o efeito da distância k .....	226
Equação 7.7: distribuição axial de buffer das tensões para a célula p, considerando o efeito da distância k .....	226
Equação 7.8: função do peso do atributo i pelo processo de autponderação .....	243
Equação 7.9: peso do atributo i pelo processo de autponderação .....	243
Equação 7.10: peso do atributo i pelo processo de autponderação, com transformação escalar .....	244
Equação 8.1: resistência natural gerada pelo processo de percolação .....	264
Equação 8.2: número de iterações num sistema celular, sem compressão de dados .....	267
Equação 8.3: número de iterações num sistema celular, com compressão de dados .....	268
Equação 8.4: número de células nodo .....	268





## Convenções de linguagem

- 1) Considerando que grande parte dos termos técnicos relativos a simulações, inteligência artificial, sistemas de informações geográficas e informática provém do inglês, sendo a maior parte dos verbetes assimilada pela língua brasileira, sendo inclusive dicionarizada<sup>1</sup>, optei por mantê-los sem tradução, com o tradicional uso da fonte em itálico. Esses verbetes são os seguintes: *input; output; buffer; grid; software; hardware; cluster; feedback; raster; vector*. Nomes próprios estrangeiros de pessoas ou coisas foram mantidos na sua grafia original e sem o uso da fonte em itálico.
- 2) Ao me referir aos *outputs* do modelo, coloquei seus nomes em português seguidos dos nomes em inglês, tal como estão no programa de computador que foi produzido; nas legendas das figuras, dos gráficos e das tabelas utilizei diretamente a nomenclatura em inglês, para simplificar.
- 3) Os símbolos e as abreviaturas utilizados no corpo do texto estão transcritos por extenso na primeira vez em que aparecem, em cada capítulo; no caso das equações, seus significados estão sempre referidos como complemento dos enunciados.
- 4) De modo a ajustar as referências bibliográficas aos padrões internacionais, usei o sistema “autor-data”, o que implica no seguinte padrão geral: SOBRENOME, Nome (ano). **Título da publicação**. Complemento. Local: Editora. nº ou intervalo de páginas. Quando se trata de material disponível na Internet, coloquei entre colchetes a data da consulta e o endereço na rede.
- 5) Citações indiretas estão no corpo do texto, entre parênteses, mediante o sistema “autor-data”.



---

<sup>1</sup> Os dicionários utilizados como base são o “Dicionário Eletrônico Houaiss da Língua Portuguesa” (Houaiss, 2001) e o “Dicionário Aurélio Eletrônico – Século XXI” (Ferreira, 1999).

# 1 Introdução

Neste capítulo estarei apresentando o tema da pesquisa, a delimitação da abordagem e os objetivos principal e secundários do trabalho; no andamento estarei expondo a estrutura da investigação, sistematizando as perguntas e hipóteses centrais, bem como os demais assuntos que serão tratados no corpo da tese; a seguir apresentarei como antecedentes trabalhos que perseguiram objetivos semelhantes e como justificativa as principais contribuições alcançáveis no campo de conhecimento.

## 1.1 Apresentação e objetivos

Estudos dedicados à dinâmica urbana consideram que a cidade está em permanente mudança, comportando-se como uma peregrina obra inacabada (Batty, Xie e Sun, 1999), cuja compreensão exige observar não só um momento, mas sim um processo de transformação ao longo de um determinado intervalo de tempo (Torrens e O'Sullivan, 2001a). Nessa mudança permanente, alteram-se conjuntamente a paisagem da qual a cidade faz parte e ela própria, posto que seu processo de produção consome recursos, produz lugares novos e gera externalidades (Allen, 1997), provocando uma modificação no conjunto que integra, o que pode ser chamado de crescimento urbano.

Uma dessas modificações ocorre na forma da cidade, que assume determinadas feições em função do processo de crescimento, impondo ao mesmo tempo um novo aspecto à paisagem (Houng, 1998), o que pode ser estudado nos domínios disciplinares da morfologia urbana (Lamas, 1993; Krüger, 1996) e da ecologia de paisagem (Forman e Godron, 1986). Todavia, se parece evidente reconhecer que ocorrem mudanças na morfologia urbana e na paisagem em função do crescimento urbano, não é evidente o modo como ocorrem, para o que interessam estudos exploratórios, com suporte em teoria de sistemas, modelagem, teorias de complexidade e de auto-organização, direcionadas para as questões da cidade (Schuschny, 1998; Torrens, 2000c; Portugali, 2000).

O processo de crescimento urbano é de difícil apreensão pela elevada quantidade de fatores presentes na cidade e na paisagem que integra, pelas suas interinfluências e diferentes escalas, pelo grande tamanho da cidade e pela ocorrência de mudança no curto e no longo prazo (O'Sullivan, 1999; Batty e Longley, 1994; Allen, 1997, respectivamente). Para enfrentar essas dificuldades, um caminho é o de reproduzir a cidade e a paisagem artificialmente, construindo um modelo e realizando simulações, de modo a auxiliar na construção de explanações morfológicas sobre a dinâmica urbana. Para isso, este trabalho se encaminha para a vertente da modelagem urbana (Reif, 1973; Batty, 1976 e 1998), juntando conceitos derivados da ciência do espaço, modelos urbanos, teoria de sistemas e ecologia de paisagem, bem como da instrumentação propiciada por teoria dos grafos, dinâmica celular autômata, geocomputação e SIG – sistema de informações geográficas (Dillion, 1983; Forman e Godron, 1986;

O'Sullivan e Torrens, 2000; Burrough, 1998; Câmara, 2001, respectivamente), cujas especificidades disciplinares contribuem para o arranjo necessário aqui.

Para a construção de um modelo de simulação como enunciado anteriormente, interessam esforços simultâneos de racionalização e abstração, com interação entre realidade e ideação (Stevens, 1990). Para isso, são realizadas simulações em casos controlados e em situações imaginárias, bem como é adotado um caso concreto de cidade e de paisagem, que fornece uma base empírica para a investigação, onde exercícios de calibração e legitimação são realizados. Uma vez construído o modelo, é possível simular alternativas de crescimento urbano numa cidade concreta, verificando a capacidade de o modelo aproximar-se da realidade, apresentando possibilidades de transformação e de futuro, bem como testar, discutir e desenvolver teorias sobre crescimento urbano.

Sendo assim, este trabalho se organiza através de um objetivo principal, centrado no campo mais instrumental (a) e dois secundários, nos campos mais empírico e mais teórico (b; c, respectivamente), a saber:

- a) construir um modelo de simulação de crescimento urbano que integre fatores urbanos, naturais e institucionais, o que faz o trabalho assumir um viés de pesquisa experimental, na qual aparecem componentes de teoria e de prática, de criatividade e de projeto, de concepção e implementação de descoberta instrumental e tecnológica (como aparece nos Capítulos 2, 3 e 4);
- b) aplicar o modelo de simulação de crescimento a um caso de cidade e de paisagem reais, o que permite verificar empiricamente a validade do modelo (como está nos Capítulo 5, 6 e 8);
- c) utilizar o modelo para construir entendimentos teóricos sobre crescimento urbano e suas relações com a paisagem, o que é feito mediante desenvolvimento de capacidades de o modelo reproduzir fenômenos reais em situações imaginárias e controladas (o que é mostrado no Capítulo 7), bem como para discutir relações entre forma da cidade, crescimento urbano e sustentabilidade (o que é feito no Capítulo 8).

## **1.2 Estrutura da Investigação**

O título da pesquisa, “Crescimento urbano e ambiente – Um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade” expressa a questão do crescimento urbano como ponto central do trabalho, o que vai direcionar os esforços para compreender o modo como a cidade cresce e os processos de mudança inter-relacionados. Na esteira, a cidade é considerada como parte de um ambiente maior, o qual inclui, nos limites deste trabalho, o território adjacente às áreas urbanas preexistentes (também chamado de território peri-urbano, com está em Lamas, 1993), que se altera diretamente com o crescimento da cidade, isto é, com a conversão de solo não urbanizado em urbanizado (Clarke, Hoppen e Gaydos, 1997; Rietkerk et al., 2002). O título revela ainda a intencionalidade exploratória (Martin, March e Echenique, 1972) e a preocupação com o futuro da cidade, o que vai implicar no formato das hipóteses, nos instrumentos e nos métodos, como aparece neste projeto.

A abordagem delimita-se disciplinarmente no campo da morfologia urbana (Vance, 1994; Krüger, 1996) isto é, o crescimento, as mudanças ambientais, as explorações e as alternativas de futuro estão referidas à forma da cidade. Ao lado colocam-se duas especificações disciplinares, encaixando a investigação em dois campos, a saber: a) no campo dos estudos configuracionais urbanos<sup>2</sup>, mediante abordagem sistêmica interessada em investigar a estruturação do espaço e suas relações com a sociedade (Martin, March, e Echenique, 1972; Soja, 1985); b) no campo da ecologia de paisagem (Naveh e Lieberman, 1994; Palang, Mander e Naveh, 2000), com direcionamento para o campo da ecologia urbana (N.F.S., 2001; Terradas, 2001), enquanto dedicada a estudar relações entre a produção do espaço da cidade e o território não urbanizado (Echenique, 1999), ou, como será dito daqui para frente, para tratar de questões ambientais diretamente ligadas com o crescimento urbano.

Dessa delimitação temática emerge a necessidade de fazer interagirem saberes das ciências sociais, onde reside a maioria dos estudos relativos a áreas urbanas, com saberes das ciências ambientais, onde está a maioria dos estudos em áreas não urbanas. Essa circunstância é usada agora para ajudar na construção da problematização teórica inscrita na pesquisa, a qual aponta para a insuficiência de estudos de base morfológica para o crescimento urbano, incluindo variáveis urbanas e naturais integralmente. Sendo assim, pode ser enunciada uma primeira pergunta: como a cidade cresce, considerando integralmente fatores urbanos e naturais ?

Do ponto de vista metodológico, o problema central a ser enfrentado é o da dificuldade instrumental para trabalhar com o crescimento da cidade, considerando simultaneamente crescimento interno e externo, bem como incluindo variáveis urbanas e naturais, tradicionalmente tratadas separadamente. De fato, para assumir os compromissos registrados aqui, é preciso dispor de meios não só para descrever o espaço, como também para explorar alternativas de futuro, bem como para avaliar essas alternativas, particularmente em função das relações da cidade com o ambiente natural (Royal, 2000). Sendo assim, o caminho a trilhar é o da construção de um instrumento novo, o que vai ser buscado com o auxílio de recursos de modelagem urbana (Batty, 1976; Schuschny, 1998), como está mais adiante. Deste modo, interessa enunciar uma segunda pergunta: como simular crescimento espacial da cidade, interno e externo simultaneamente, integrando fatores urbanos e naturais ? Como foi anteriormente mencionado nos objetivos e como será visto ao longo deste trabalho, a construção de um modelo de simulação assume papel principal na pesquisa, com o desafio de ser concebido, testado e utilizado na produção de conhecimento.

Ao lado das dimensões teóricas e instrumentais, problemas empíricos acompanham a investigação, referentes a alternativas de futuro para a cidade, considerando seu crescimento e implicações no ambiente natural adjacente. Esse problema será abordado através de exercícios de simulação, entendidos como uma metodologia auxiliar na descoberta e na comprovação de hipóteses, funcionando como meio de demonstração (Axelrod, 1997a). Deste modo, pode ser então formulada uma terceira pergunta: como aproximar as simulações de crescimento do que de fato ocorre numa cidade e numa paisagem reais ?

---

<sup>2</sup> Estudos configuracionais urbanos estão referidos como dedicados à compreensão da produção do espaço urbano, com suas especificidades, sua autonomia disciplinar e suas relações com a sociedade [disponível em <http://www.ufrgs.br/propur>, em 20 de setembro de 2003].

Para balizar a construção das respostas às perguntas anteriores estão enunciadas hipóteses, seguindo os nexos mais teóricos, mais instrumentais e mais empíricos, as quais operam como respostas possíveis e dão rumo aos esforços de investigação (Cruz e Ribeiro, 2003).

A hipótese acerca do crescimento da cidade e suas relações com a paisagem natural está desenvolvida nos capítulos 2 e 3, sendo buscada na combinação de três assertivas, a saber: a) forças de atração e de resistência ocorrem nas cidades, gerando tensões de crescimento e resistindo a elas, simultaneamente; b) tensões de crescimento são distribuídas no território de modo axial, polar e difuso; c) localizações são decididas em função da busca de vantagens locacionais, representadas por fatores urbanos, naturais e institucionais. Mas como testar a validade dessas assertivas? O caminho adotado é o de realizar simulações experimentais de crescimento urbano, explorando possibilidades e observando os resultados (como está nos capítulos 6, 7 e 8).

Para perseguir a hipótese anterior é necessário construir um instrumento de simulação que integre os fatores urbanos e naturais referidos anteriormente, o que será buscado descrevendo a cidade e a paisagem, reproduzindo o processo de crescimento e de mudança e testando os resultados, como aparece nos capítulos 3, 4 e 5. Para capturar e reproduzir tensões de crescimento urbano e diferenciar o espaço por vantagens locacionais, serão reeditados os modelos de centralidade e de potencial elaborados por Krafta (1994 e 1999), ajustando-os para um ambiente celular e os modificando para conter atributos urbanos e naturais. Para integrar entrada de dados, processamento, visualização e análise de resultados, serão utilizados recursos de geocomputação, reunindo possibilidades de SIG – sistema de informações geográficas, programação computacional e animação digital (Burrough, 1998). Tal como aparece no enunciado do modelo, mais adiante, a hipótese central dedicada à questão instrumental é a seguinte: crescimento espacial da cidade integrando variáveis urbanas e naturais pode ser simulado através da reedição dos modelos de centralidade e potencial de Krafta, produzindo um modelo novo em ambiente digital, integrando recursos de grafos, autômato celular e geotecnologias. Mas como saber se o modelo funciona e é capaz de reproduzir as complexas relações e os variados resultados que aparecem no crescimento urbano? Para isso está proposto um estudo de caso com uma cidade real, de modo a aferir e desenvolver as possibilidades de resposta do modelo, como aparece nos capítulos 5 e 7.

Para aproximar as simulações de crescimento do que de fato ocorre numa cidade real, está realizado um estudo de caso com a área urbana e entorno de Pelotas, RS, o que é realizado no Capítulo 5, cumprindo com três condições principais: a) uso de parâmetros que permitam a regulagem do modelo, de modo quantitativo e qualitativo; b) realização de simulações prospectivas, de modo a simular o presente a partir de condições do passado; c) obtenção de calibragem do modelo, com a melhor aproximação entre simulação e realidade, a qual é obtida por correlações espaciais e aproximações sucessivas.

Os materiais e métodos a utilizar estão centrados na construção e testes do modelo de simulação de crescimento, o que inclui reescrever os modelos de centralidade e potencial e desenvolver novas capacidades, o que é feito em ambiente celular e com apoio em geotecnologias, incluindo a produção de um programa de computador e recursos de SIG – sistema de informações geográficas. Para realizar o estudo de caso em Pelotas, RS, estão utilizadas informações dos arquivos de instituições locais

(Prefeitura Municipal de Pelotas e Agência da Lagoa Mirim - UFPel), em imagens de satélite e em mapas de evolução urbana recente, produzidos neste trabalho; uma vez calibrado o modelo, situações de futuro serão simuladas, explorando possibilidades e discutindo cenários de futuro. Ao cabo, é esperada a possibilidade de dar uso continuado ao modelo de simulação de crescimento urbano, o que poderá interessar para além dos limites da experiência acadêmica.

Avançando sobre a questão da simulação de crescimento urbano, no Capítulo 7 são tratadas treze questões específicas que integram os enfoques teórico, instrumental e empírico, formulando perguntas, construindo hipóteses e delineando experimentos para cada caso, a saber: a) crescimento interno e externo integrados; b) distribuição dos estoques construídos; c) formação de vazios urbanos; d) formação de periferias urbanas; e) obsolescência e revitalização nos estoques urbanos construídos; f) raios de interação, raios de vizinhança, mono e policentralidade; g) abrangência das funções urbanas; h) influência da distância entre pólos de atração; i) variação da impedância; j) renaturalização e preservação ambiental; l) limites de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos; m) ponderação de atributos; n) particularmente avança sobre a questão do crescimento difuso, fragmentação e compacidade.

Na seqüência, o Capítulo 8 apresenta dois grupos de experimentos, dedicados a três questões teórico-instrumentais e à discussão da questão da sustentabilidade. As três questões são as seguintes: a) modificações nas regras de crescimento urbano; b) compressão de dados e análise de vizinhança; c) alternativas de visualização. A questão da sustentabilidade está apresentada através de simulações de crescimento integrando diversos recursos desenvolvidos ao longo do trabalho e com particular interesse pelas questões de compacidade e fragmentação do tecido urbano, simulando cenários alternativos para o futuro de Pelotas, RS. Encerrando o trabalho estão as conclusões e as referências bibliográficas, respectivamente nos Capítulos 9 e 10. Como anexo está o programa de computador, em mídia digital.

### **1.3 Antecedentes e justificativa**

Esforços realizados pelo grupo de pesquisa de sistemas configuracionais urbanos<sup>3</sup> têm conseguido demonstrar possibilidades de apreender e analisar a estrutura espacial, utilizando modelos configuracionais, com diversos estudos sobre centralidade espacial, dinâmica espacial urbana e crescentes abordagens sobre potencial de desenvolvimento intra-urbano (resumos de trabalhos podem ser acessados em <http://www.ufrgs.br/propur> ); recentemente vem sendo desenvolvido um programa de análise e avaliação espacial utilizando vetores e teoria de grafos, permitindo a aplicação de modelos de acessibilidade, centralidade e desempenho (Polidori, Krafta e Granero, 2001; uma versão livre do programa está disponível em <http://medidasurbanas.cjb.net> ). Nesse caminho, este trabalho quer contribuir nos seguintes pontos: a) desenvolver possibilidades de modelagem dinâmica, identificadas a partir do modelo de Potencial (Krafta, 1999); b) integrar variáveis naturais nos trabalhos de modelagem; c) desen-

---

<sup>3</sup> O grupo de pesquisa de sistemas configuracionais urbanos é liderado pelo professor Romulo Krafta [disponível em <http://lattes.cnpq.br/censo2002>, em 07 de setembro de 2004].

volver ambiente de simulação espacial do tipo autômato celular; d) carrear recursos de SIG – sistema de informações geográficas e geocomputação para os exercícios de simulação pretendidos.

Estudos de ecologia de paisagem têm avançado na tentativa de incluir o sistema humano e a cidade na paisagem, realizando movimentos científicos e práticos em conjugação com trabalhos de larga abrangência (Palang, Mander e Naveh, 2000), mas com dificuldades para ingressar na problemática urbana. Avaliações de adequação multicritérios e análises difusas (*fuzzy*) têm-se preocupado com a incorporação de novas áreas à dinâmica urbana e com o uso do solo decorrente, seguidamente com preocupações de preservação da natureza, porém sem facilidade em capturar os interesses imobiliários reinantes na cidade (Ribeiro, 1996). Por seu turno, sistemas especialistas (*expert systems*, como está em Kalogirou, 2002) podem reproduzir a ação dos produtores do espaço urbano, porém muitas vezes apresentando excessiva tendência de cima-para-baixo (*top-down*, *ibidem*), o que dificulta a representação de múltiplos produtores do espaço (O’Sullivan, 2000a).

Instituições internacionais vinculadas à pesquisa e à consultoria têm realizado movimentos importantes para a modelagem da dinâmica urbana, incluindo variáveis naturais, o que é perseguido através deste projeto. O CUE (Center for Urban Ecology, <http://www.nps.gov/cue/cueintro.html>) tem-se dedicado à questão da integração urbano-ambiental, porém não destaca o papel estruturante do mercado e da renda da terra; o CASA (Centre for Advanced Spatial Analysis, <http://www.casa.ucl.ac.uk>) trabalha com a dinâmica e com a produção da cidade, mas tem apresentado interesse secundário pela integração ambiental; o grupo conhecido como CALResCo (The Complexity and Artificial Life Research Concept, <http://calresco.org>) trabalha com inteligência artificial, complexidade e dinâmica, porém não se aproxima das questões urbanas mais diretamente. Concomitantemente, não encontram base nacional similar instituições de investigação e de trabalho como os disponíveis em RMA (Resource Modeling Association, [www.resourcemodeling.org](http://www.resourcemodeling.org)), em IALE (International Association for Landscape Ecology, [www.iale.de](http://www.iale.de)), em CUPEM (The Centre of Urban Planning & Environmental Management, [www.hku.hk/cupem](http://www.hku.hk/cupem)), em SPARTACUS (System for Planning and research in Towns na Cities for Urban Sustainability, <http://fpiv.meap.co.uk/fpiv/spartacu.htm> ou <http://www.ltcon.fi/spartacus/default.htm>) ou em USGS / HILT (Unit States Geological Survey / Human-Induced Land Transformation Project, <http://landcover.usgs.gov/urban/umap>). Esses estudos e instituições, embora sem atuação direta no Brasil, podem ser usados como auxiliares na produção de trabalhos nacionais, juntando o conhecimento já produzido à realidade local.

Modelos interessados em capturar aspectos dinâmicos da natureza vêm aplicando recursos de autômatos celulares, como é o caso do alastramento de fogo, crescimento de vegetação, desenvolvimento de algas, vôo de pássaros e escoamento de águas superficiais (como respectivamente pode ser encontrado em Arcebispo, 2002; Fox, 2002; Hill e Coquillard, 1997; Wolff e Fishwick, 2003; van der Gaast e Kroes, 1999). Modelos dedicados à dinâmica urbana igualmente têm utilizado as possibilidades dos autômatos celulares, procedendo a adaptações para o caso das cidades (Batty, 1998; Torrens e O’Sullivan, 2001a); esforços particularmente dedicados ao crescimento urbano têm sido realizados, como aparece nos trabalhos de White, Engelen e Uljee (1997), de Clarke, Hoppen e Gaydos (1997), de Wu (1996 e 1998), de Xie (1996), de Xie e Sun (2000), de Li e Yeh (2000) e Yeh e Li (2001). Um resumo de suas características pode ser encontrado no trabalho de Simone Leão (2002) e na apresentação de Xie e Sun (2000), de onde estão extraídas e adaptadas as seguintes descrições:

- a) o modelo de White, Engelen e Ujsee (1997) pode ser considerado como precursor na simulação utilizando autômato celular estendido à questão urbana, tendo sido construído através do caso da cidade de Cincinnati, nos EUA; pretende representar genericamente o crescimento urbano, calculando um potencial de transição de transformação de cada célula, que considera seu estado e as características das células vizinhas (112 células, dispostas circularmente em relação à célula central, num raio igual a 6); as células são consideradas ativas ou inativas (com e sem possibilidade de conversão), estando as ativas sujeitas à transição em função de três variáveis: uso do solo urbano, topografia e acessibilidade; a cada iteração são calculadas probabilidades de transição, sendo convertidas as células com maior valor, até um limite de crescimento informado pelo usuário; a calibração é feita por repetição do processo e diminuição de erro, ajustando o peso das variáveis que determinam as probabilidades de transição; os melhores resultados são encontrados medindo a distância média dos diferentes usos do solo ao centro principal da cidade, estando o horizonte temporal das simulações entre 15 e 25 anos; o tamanho das células é fixo, com 250 por 250 metros;
- b) os mesmos autores aperfeiçoaram o trabalho anterior ao integrar variáveis sociais e naturais, buscando representar a dinâmica urbana das ilhas do Caribe; para isso desenvolveram o modelo chamado “The Island Model”, incluindo um sub-modelo demográfico-econômico para gerar a demanda de transição celular, bem com um sub-modelo climatológico, que considera riscos de alteração na temperatura e no nível do mar; as células podem assumir seis usos humanos (agricultura, agricultura mista, residencial, residencial rural, residencial turístico ou aeroporto) e cinco usos naturais (praia, mangue, floresta primária, floresta secundária ou capoeiras); os estados e o tamanho das células, o modo de determinar a transição e a verificação dos resultados são os mesmos do modelo anterior, não havendo um processo de calibração dedicado; o horizonte temporal tem sido fixado em 40 anos, acompanhando os prognósticos demográficos e econômicos da entrada de dados;
- c) Clarke, Hoppen e Gaydos (1997) desenvolveram o modelo “UGM” (Modelo de Crescimento Urbano) como parte do programa norte americano de pesquisa em dinâmica urbana do Instituto Geológico dos Estados Unidos; o modelo aponta probabilisticamente as células não urbanas que serão convertidas para urbanas, considerando quatro variáveis na célula central e nas 8 células vizinhas (vizinhança de Moore): a inclusão ou exclusão na simulação; o estado atual de cada célula (se são ou não são urbanas); a declividade do solo; a proximidade do sistema viário (neste caso o raio de vizinhança pode ser maior); são assumidos quatro tipos de crescimento urbano, regulados em função do crescimento histórico de cada local: por expansão orgânica (que ocorre com contigüidade das células urbanas preexistentes); por difusão (que ocorre por espalhamento); por modo espontâneo ou auto-geração (que ocorre em sítios remotos e distantes); por influência do sistema viário (que atrai a urbanização); o processo de calibração é realizado através de técnicas de Monte Carlo, em três etapas, com desagregação espacial crescente (células de 200, depois 100 e depois 50 metros), repetindo as simulações e comparando com dados reais através de indicadores (os decisivos são o número de células urbanas, a quantidade de células urbanas de borda e o número de núcleos urbanos independentes); o modelo pretende um horizonte temporal de 100 anos, tendo sido inicialmente aplicado ao caso da baía de São Francisco, depois à região de Washington e Baltimore, ambos nos EUA, sendo posteriormente utilizado em diversos outros casos;



d) Wu (1996 e 1998) propôs o modelo conhecido como “SimLand”, com aplicação na cidade de Guangzhou, na China, integrando simulação com autômato celular, avaliação multicritérios e processos analíticos hierárquicos, num ambiente de SIG; as células podem assumir os estados de urbano e não-urbano, considerando uma vizinhança de 8 células (vizinhança de Moore) e três variáveis: áreas urbanizadas, áreas com distritos industriais e sistema viário; o modelo funciona mediante três regras de transição: adequabilidade de a célula assumir o estado urbano (por avaliação multicritérios); ponderação dos critérios utilizados (por análise hierárquica); efeito de aglomeração (por imputação de um número de células de vizinhança a determinarem a conversão); a taxa de crescimento e o grau de atratividade de cada variável são determinados pelo usuário, sendo as simulações dedicadas a estudos exploratórios com diferentes cenários (conseguidos manipulando a importância das variáveis), respondendo a questões do tipo “se então”;

e) o modelo concebido por Xie (1996), depois Xie e Sun (2000), é conhecido como “DUEM” (Modelo de Evolução e Dinâmica Urbana), pretendendo simular crescimento em cidades imaginárias (seguindo diferentes padrões, como circular, ondulado e linear) e em cidades reais (como é o caso das cidades de Ann Arbor, Detroit e Hong Kong); as variáveis são o uso do solo e o sistema viário e a declividade, sendo que o modelo considera quatro estados possíveis para as células urbanas: habitacional, industrial, comercial, uso especial e vacante; esses estados sofrem quatro tipos de transições: duplicação, mutação, sobrevivência ou morte, que são afetados pelo tempo de permanência de cada estado no sistema (ou idade das células), pelo estado da vizinhança (uso do solo e proximidade do sistema viário) e por um mapa de restrições (que aceita condicionantes provenientes de características do território e de aplicação de políticas públicas); a transformação celular é probabilística e controlada por regras de transição, de direção, de densidade e distância, devendo o usuário informar a taxa de crescimento e adotar uma de quatro funções de crescimento: inverso da distância (linear), exponencial negativo, produto inverso da distância ou combinação das duas últimas; o padrão de quantidades de células é de 257 por 359 e o raio de vizinhança é regulável, sendo a calibragem realizada por simulações iterativas e comparação com séries históricas;

f) o modelo de Li e Yeh (2000), depois Li e Yeh (2001), pretende auxiliar na indicação da melhor forma urbana para o desenvolvimento sustentável, conseguido através dos critérios de maximização da compacidade da área urbanizada e minimização de perdas de solos agriculturáveis; as células assumem valores contínuos de 0 a 1 (de 0 a 100% de adequabilidade para a urbanização), considerando probabilidades determinadas por quatro variáveis: uso do solo urbano, uso do solo não urbano, demografia e declividade; o modelo trabalha com células de 50m e vizinhança de 2 células ao redor da célula central, sendo a taxa de crescimento controlada pelo usuário; a calibração é obtida por repetição de simulações com diferentes pesos para as variáveis (utilizando análise multicritérios), comparando os resultados com estados atuais, o que foi testado através do caso da cidade de Dongguan, na China.

Se por um lado esses trabalhos são precursores na modelagem de crescimento urbano, por outro revelam problemas ainda não resolvidos nesse campo do conhecimento, a saber: a) os modelos têm dificuldade para explicitarem as teorias subjacentes à lógica de produção do espaço urbano, sendo predominante estocásticos; b) fatores naturais têm inclusão limitada nas representações dos modelos, com restrições às variáveis (somente os atributos naturais previstos na estrutura do modelo podem participar) e ao papel que exercem no crescimento urbano (atuam somente como restrições ao crescimento); c) fatores urbanos também têm inclusão limitada, pois precisam-se ajustar à pré-classificação dos modelos, dificultando a inclusão das peculiaridades locais; d) fatores institucionais são raramente incluídos, o que traz dificuldades para a discussão de planos e políticas de crescimento; e) alguns modelos são inclusive restritos a um determinado local, não sendo aplicáveis em outras situações, quer reais quer abstratas; f) a desagregação espacial e a quantidade de entidades são limitadas pelos modelos, o que dificulta os delineamentos experimentais; g) os modelos exigem plataformas computacionais sofisticadas, freqüentemente exigindo do usuário conhecimento em programação; h) os modelos são indisponíveis no Brasil, ao mesmo tempo em que acumulam vantagens tecnológicas com exclusividade para as culturas de origem.

Sendo deste modo, esta pesquisa quer fazer avançar o conhecimento no campo da configuração urbana e da ecologia de paisagem, para o quê propõe um modelo de simulação de crescimento e se justifica pelo enfrentamento das questões anteriores e pretende, como será mostrado no desenvolvimento deste trabalho, resumidamente, o seguinte: a) aproveitar e desenvolver possibilidades dos modelos de centralidade e potencial (Krafta, 1999), capazes de representar a produção do espaço urbano, mediante integração de técnicas de grafos, autômato celular e geocomputação, construindo um modelo dinâmico de simulação de crescimento urbano; b) capacitar a modelagem para trabalhar em função da teoria urbana, incluindo sua lógica no processo de mudança, evitando simulações exclusivamente estocásticas; c) incluir num mesmo modelo aspectos das ciências sociais e das ciências ambientais, integrando fatores urbanos e naturais, bem como crescimento urbano interno e externo à cidade preexistente; d) permitir a livre inclusão de variáveis, de modo a oferecer ao usuário a possibilidade de aproximação a diferentes lugares e de delinear os experimentos de simulação conforme seus objetivos e a disponibilidades de dados; e) possibilitar a classificação e a ponderação das variáveis conforme os objetivos da simulação, decidindo interativamente o papel dessas variáveis na simulação (se atraem ou repelem crescimento urbano), bem como sua importância no conjunto; f) permitir o uso em múltiplos locais ou casos reais, mediante a inclusão de parâmetros de regulação e recursos de calibração e através da livre inclusão de variáveis, como já mencionado; g) oferecer livre escolha da desagregação espacial, com o tamanho das células, dimensões e proporções da área da simulação decididos em função das características de cada local, dos objetivos de cada experimento, da disponibilidade e tipo das informações e da capacidade computacional disponível; h) facilitar a espacialização das simulações, implementando o modelo em ambiente de SIG – sistema de informações geográficas e disponibilizando seus recursos para representação, entrada de dados, análises espaciais, visualização e arquivamento; i) dar operacionalidade ao modelo em ambiente computacional convencional, permitindo o uso em computadores simples e com sistemas operacionais comumente utilizados nas instituições locais; j) desenvolver tecnologia localmente, podendo o modelo vir a ser disponibilizado para a comunidade.

#### 1.4 Epílogo do capítulo 1

Neste capítulo tratei de introduzir ao assunto da dinâmica urbana, delimitando o tema da investigação no campo do crescimento e da morfologia da cidade; apontei o objetivo central no campo instrumental, de modo a construir um modelo de simulação de crescimento urbano que integre fatores urbanos e naturais, permitindo simultaneidade entre crescimento interno e externo à cidade preexistente, o qual pode ser utilizado para casos reais e para construir entendimentos teóricos sobre crescimento urbano e suas relações com a paisagem; apresentei trabalhos correlacionados e modelos com objetivos semelhantes como antecedentes e assumi como justificativa as possibilidades de contribuir na produção de conhecimento nesse campo, através dos resultados alcançáveis com a produção e aplicação do modelo.



No capítulo seguinte enfocarei a cidade, o ambiente e o crescimento urbano, desenvolvendo conceitos e pressupostos que dão suporte ao trabalho. Particularmente estarei tratando de relações entre cidade e ambiente, de crescimento urbano, teorias da urbanização, modelagem e geosimulação, bem como dos recursos de grafos, autômatos celulares e geotecnologias que suportam a investigação.

## 2 Cidade, ambiente e crescimento urbano

No capítulo anterior apresentei o tema do crescimento urbano, os objetivos da pesquisa, sua estrutura, antecedentes e justificativa, tratando fundamentalmente de questões de metodologia. Neste capítulo trato de conceitos e técnicas dão suporte à pesquisa, mostrando relações entre cidade e ambiente, bem como crescimento urbano com teoria da urbanização, modelagem e geosimulação, explicitando ao final o uso de grafos, CA – autômato celular e geotecnologias, sobre cujas possibilidades será construído o modelo de simulação.

### 2.1 Introdução

Sistemas ecológicos e urbanos raramente têm sido considerados de modo integrado, embora os avanços nos campos das ciências ambientais e sociais (Alberti, 1999) e os novos recursos tecnológicos disponíveis (Bian, 2004). Para buscar a integração, conceitos e técnicas precisam ser discutidos e compatibilizados, questionando os modos tradicionais de pensar e de fazer, bem como identificando relações e interinfluências entre a cidade e a paisagem que integra. Um caminho possível é o oferecido pela modelagem urbana, ecologia de paisagem e utilização de geotecnologias, o que inclui geocomputação, sistemas de informações geográficas e geosimulação.

### 2.2 Cidade e ambiente

A tradição do planejamento do espaço da cidade tem sido a de trabalhar com a separação entre a cidade e a natureza, entre o espaço urbanizado e o não urbanizado, pois enquanto que a maioria dos estudos de urbanismo limitam-se às áreas construídas, as abordagens do planejamento ambiental têm dificuldade para incluir a realidade e a influência da cidade (Santos, 2004); o resultado é a dificuldade na compreensão dos problemas urbanos e ambientais, é o não reconhecimento das qualidades e potencialidades dos lugares, é a incompreensão da amplitude do conceito de qualidade de vida, o qual tende a se limitar a contar atributos exclusivos da espécie humana ou a conceber o homem como externo ao mundo natural (CUE, 2001). Todavia, na atualidade essa tradição tende a mudar, pois os pesquisadores dos campos das ciências sociais e ambientais, bem como os encarregados de realizar planejamento urbano e ambiental, estão crescentemente desafiados pela necessidade de integrar dados urbanos e naturais para compreender o estado atual das cidades e para avaliar alternativas de futuro (Alberti, 1999). Essa integração é necessária tanto para os planos de desenvolvimento como para as políticas de controle e de manejo, sob pena de resultados de pouca validade e de difícil aplicação. Ademais, a crescente conversão de solo rural em solo urbano, associada a escassez de áreas naturais, impõe pressões inéditas ao ecossistema global e local, o que pode ser percebido principalmente nas contingências de mudança nos fluxos de matéria e de energia (Santos, 2004).

Embora os impactos do desenvolvimento urbano freqüentemente sejam locais, eles causam mudança em larga escala e em tempos dilatados. Nesse processo, o ambiente natural tem restado reduzido e fragmentado, espécies exóticas têm sido introduzidas sem ganhos e os ciclos de nutrientes têm sido severamente modificados (Alberti, 1999). Apesar dos esforços para compreender a realidade urbana e a ambiental sejam realizados, poucos resultados são alcançados com relação a suas interinfluências; de mesmo modo, métodos de descrição e avaliação de impacto sobre o ambiente e modelos para abordar crescimento urbano têm sido desenvolvidos, mas ambos são ainda primitivos na sua habilidade em representar mudanças e dinâmicas urbanas e naturais (Spellerberg, 1994; Baylei, 1997).

Se por um lado os modelos urbanos eram predominantemente dedicados às questões de produção de habitação, transporte e uso do solo (Wegener 1994 e 1995), com as variáveis biofísicas exógenas e normalmente tratadas como constantes, por outro os modelos ecológicos tratavam os sistemas humanos como estáticos e dependentes quase exclusivamente de fatores econômicos, normalmente determinísticos (Lawrence, 2000); nesses procedimentos, era comum ignorar as mudanças ambientais, a degradação da natureza, o esgotamento dos recursos e as possibilidades de restauração (ibidem). Embora as primeiras tentativas de avaliação globais remontem à década de 60, somente com as crescentes mudanças ambientais globais no planeta é que novas abordagens começaram a aparecer, sendo que a integração de fatores biológicos, físicos e socioeconômicos emergiram somente a partir da década de 90, com particular interesse na questão climática (Meadows et al., 1972; Alberti, 1999). Esses trabalhos, embora importantes, não conseguiram representar a heterogeneidade de uso do solo, as diferenças de comportamento humano e as desiguais condições a que estão submetidas diferentes sociedades (Vainer e Smolka, 1991).

Recentes progressos no campo dos SIGs – Sistemas de Informação Geográfica (Longley e Batty, 2003) e nos estudos de sistemas complexos (Giordano, 2004) têm trazido possibilidades de melhorar a integração de dados espaciais, facilitando abordagens urbanas e ecológicas. Todavia, esses recursos ainda estão sendo usados separadamente por planejadores e ecologistas, mantendo cada grupo sua visão tradicional, sem alterar o distanciamento mantido entre as ciências ambientais e as ciências sociais. São métodos, variáveis, instrumentos de medida, autores, congressos e publicações diferentes, o que indica que a separação entre cidade e ambiente corresponde uma cisão acadêmica e instrumental, sendo a produção do saber mais responsável pelo seu afastamento do que pela sua aproximação. Embora movimentos no campo da ecologia urbana sejam visíveis desde o início do Século XX (Munford, 1961; Kohlsdorf, 1985) e não desapareçam desde então, permanece o desafio de romper as barreiras disciplinares, construídas desde o ensino básico e mantidas no ensino superior. Descobrir interfaces entre os diversos campos do conhecimento que precisam comparecer numa abordagem integrada urbana e ambiental pode ser considerada uma tarefa urgente, na busca de contribuir para os problemas de qualidade de vida (Santos, 2004).

Alberti (1999) oferece uma visão inovadora para abordar a cidade, a partir de conceitos gerais de sistemas, de ecologia e de urbanismo, representando uma alternativa à tradicional abordagem da cidade como ecossistema, iniciada por Odum e com diversos seguidores (Odum, 1963; Boyden et al, 1981; Douglas, 1983). Essa abordagem tradicional apontou a cidade como um ecossistema heterotrófico, dependente de grandes ingressos de matéria e energia, com enorme capacidade de realizar emis-

sões de poluentes e de produzir resíduos, exclusivamente. Essa visão metabólica da cidade, embora importante como precursora, especialmente por enunciar equações de balanço energético e de ciclo de materiais, é demasiadamente esquemática no trato de questões da cidade e na escala urbana, não oferecendo elementos para representar os processos pelos quais os humanos afetam a natureza e são afetados por ela. Ao cabo, planejadores e tomadores de decisão não conseguem utilizar esses modelos ecológicos para as tipicidades urbanas, mantendo-se a tradição da separação, na prática. As novas abordagens partem da complexidade entre as interações urbano-ecológicas, reconhecendo diversos subsistemas interligados e complexos em si próprios. Entretanto, desenvolvimento urbano é reconhecido como determinante estrutural, afetando de modo muito significativo os sistemas naturais. Essa hierarquia pode ser reconhecida em função das seguintes questões principais (Alberti, 1999): a) é crescente a conversão de solos naturais em solos modificados pelo homem, tanto pela agricultura (cujo principal centro consumidor é a cidade) como pelas funções urbanas propriamente ditas, isto é, pelas áreas urbanizadas; é fato mundial o crescimento territorial das cidades, que se concentra em países com menor desenvolvimento econômico e tecnológico (Batty, 2002); b) a cidade é o grande demandante de recursos naturais, tanto em função da concentração demográfica como tecnológica; a subsistência das populações urbanas associada às atividades de transformação faz da cidade um pólo de consumo que comanda a transformação da natureza; c) paralelamente, a cidade concentra importantes e decisivos serviços para a sobrevivência e aperfeiçoamento da espécie humana, advindos do mesmo processo de danificação da natureza; d) esse conjunto complexo de práticas e de relações, embora se realize localmente, termina por afetar globalmente o planeta, indiferenciando os efeitos para diferentes causadores, bem como exigindo uma articulação das ações parciais; e) por fim, decisões são tomadas e praticadas a partir da cidade, no que se incluem as estratégias de manejo e as políticas de desenvolvimento.

Reconhecida a necessidade de integrar as abordagens dedicadas ao ambiente urbano com as formuladas para o ambiente natural, é preciso superar os procedimentos meramente aditivos e fundar mecanismos de integração mais efetivos. Para isso, cinco indicações podem ser feitas para as abordagens integradas, que serão perseguidas neste trabalho: a) a cidade deve ser estudada através de cenários dinâmicos, sendo a descrição e a compreensão de suas modificações fundamental para as abordagens integradas entre os sistemas urbanos e os naturais; b) as interinfluências entre os sistemas urbanos e naturais são cumulativas, desencadeando mecanismos de retroalimentação; c) os processos dinâmicos, cumulativos e retroalimentados podem induzir o aparecimento de padrões espaciais auto-organizados, os quais podem ser examinados como fenômenos instáveis; d) a dinâmica urbana e suas relações com a paisagem demanda estudos em diferentes níveis de desagregação espacial, com participação de diferentes atributos e considerando situações intermediárias entre o que parece irretorquível ou imprevisível, evitando a dualidade entre determinismo e aleatoriedade, assumindo deste modo as mudanças na cidade e no ambiente como fenômenos complexos; e) a continuidade secular da cidade sugere elevada capacidade de adaptação, sendo seus mecanismos internos de produção e seus modos de relacionamentos com a paisagem capazes de garantir sua permanência e sua durabilidade.

Embora a cidade venha sendo reconhecida como um fenômeno dinâmico, com transformações permanentes e com resultados instáveis (Portugali, 2000), há efetiva dificuldade de aproximar teorias e práticas dessa dimensão. Para trabalhar com a mudan-

ça, é preciso apreender os processos que a provocam e capturar os fatores que a condicionam ou a determinam, produzindo conhecimento sobre os modos como a cidade muda, as regras subjacentes às mudanças e os padrões que emergem de cada situação (Torrens, 2000b). Mudanças urbanas não ocorrem como se a cidade fosse um objeto isolado, havendo interinfluência permanente das realizações sociais, econômicas, culturais e tecnológicas (Barrios, 1986), com as características do território não urbanizado, modificados ou não pela ação do homem (Santos, 1988). Ademais, a urbanização não extingue plenamente os atributos naturais, nem o território não urbanizado exclui plenamente os atributos urbanos (Alberti, 1999). Além disso, novos atributos naturais podem aparecer com a urbanização, como é o caso da cobertura vegetal e dos padrões de insolação locais, bem como são desejáveis atributos urbanos fora da cidade, como por exemplo equipamentos urbanos e infra-estruturas.

Interessa aqui declarar três tipos de interinfluências: a) mudanças urbanas que provocam mudanças no ambiente não urbanizado, as quais aqui se referem à conversão de território (*conversion land cover*, conforme Clarke, Hoppen e Gaydos, 1997:247); b) características do ambiente não urbanizado que implicam mudanças urbanas, as quais aqui se especificam pela adequação ambiental (*environment suitability*, conforme Yeh e Li, 2001:738); c) mudanças urbanas que ocasionam outras mudanças urbanas, normalmente associadas a problemas ambientais, por superação de limiares (*breach of a capacity*, como está em Jenks, Burton e Willians, 1998:344).

Dois tipos de esforços vêm sendo realizados, nativos nas ciências sociais e nas ciências ambientais, na tentativa de incluir variáveis naturais em modelos urbanos e de incluir variáveis urbanas em modelos ambientais (Alberti, 1999). Todavia, como vem sendo argumentado por pesquisadores de ecologia urbana, não basta apenas acrescentar variáveis naturais em modelos urbanos ou vice-versa (Campbell, 1996; Christofletti, 1999; Alberti e Waddell, 2000). Além disso, escalas muito pequenas podem tornar a dinâmica urbana invisível, assim como escalas muito grandes podem dificultar a representação de atributos naturais (Green, 1995). Sendo assim, é preciso desenvolver instrumentos novos que não contenham a separação original entre ambiente e cidade, sendo para essa direção que esta investigação aponta.

São comuns referências à necessidade de conquistar equilíbrio ambiental, sendo o desequilíbrio um estado ou processo a ser evitado ou contornado (Rueda, 1998b; Carvalho e Romero, 1999). Concepções baseadas no chamado paradigma do equilíbrio (Pessis-Pasternak, 1991) projetavam tendências e construíam simulações alinhadas de forma linear, tomando a cidade como um sistema equilibrado, eventualmente perturbado por externalidades e que retornava ao equilíbrio após um processo de absorção daqueles estímulos. Noutro caminho, a dinâmica espacial urbana tem sido tratada recentemente de modo distinto, sendo os sistemas urbanos preferencialmente considerados como de natureza dinâmica fora do equilíbrio, ou seja, são instáveis e apresentam mudanças permanentes (Allen, 1997).

Esse estado dominante de não-equilíbrio não implica, todavia, em desordem imponderável ou em ausência de padrão; ao contrário disso, esses sistemas apresentam a propriedade de se auto-organizarem, comportando-se como sistemas complexos (Portugali, 2000), podendo a aparente desordem ser considerada como um modo superior de organização (Pena-Veja, 2003). Sistemas auto-organizáveis operam com independência de um núcleo central prescritor de regras, sendo que resultados emergem da dinâmica instaurada, podendo ser observados em seu processo evolutivo; no campo dos estudos da cidade e de sua

dinâmica, esse conceito se aplica na construção de explicações para a produção do espaço e para as morfologias resultantes. Sistemas complexos normalmente apresentam a propriedade de auto-organização, sendo que as chamadas teorias ou ciências da complexidade aplicadas à cidade (O'Sullivan, 2001b) assumem que os estados de um sistema urbano não são nem determinísticos, como os previstos nas teorias causais tradicionais, nem aleatórios, isto é, absolutamente imprevisíveis (Lucas, 2000). Essas idéias desafiam modelos e modelistas urbanos a representarem o espaço de modo mais próximo de sua realidade (Batty, 1998) e é isso que está sendo buscado aqui.

As noções de sustentabilidade referidas à cidade estão freqüentemente associadas a idéias de escassez de recursos, de não-poluição, de diminuição ou de extinção, centrando-se os argumentos na necessidade de permanência de recursos ou de qualidade de vida adequada para as próximas gerações (Carvalho e Romero, 1999). Apesar disso, as cidades vêm perdurando e crescendo ao longo da história, tanto em tamanho como em quantidade (Santos, 1988; Gonçalves, 1989; Batty, 2002). É fato que desde as primeiras aglomerações urbanas, há milhares de anos, a cidade vem-se firmando como um dos processos mais permanentes que a sociedade conheceu, resistindo a mudanças energéticas, econômicas, políticas, culturais e ideológicas (Lamas, 1993; Portugali, 2000). Mais ainda, é patente o fenômeno de urbanização que se apresenta no mundo, particularmente nos países em desenvolvimento, onde é conhecida a tendência de concentração em centros urbanos, associada à formação de extensas periferias a ao crescimento populacional (Campos Filho, 1989; Moreira, 1995; Andrade e Serra, 1997). Ademais, não há evidências de que a cidade possa ser suplantada por outra forma de ocupação do território e controle do ambiente humano, podendo-se dizer então que a cidade, sob o ponto de vista estrutural, vem experimentando cabal continuidade histórica e durabilidade (Pena-Veja, 2003), sendo seu desaparecimento enquadrável como caso de exceção (Argan, 1991).

Por outro lado, não há dúvida que a cidade pode ser vinculada a variados tipos de mudança, as quais podem estar associadas a dano na qualidade de vida, depreciação ambiental, diminuição no patrimônio cultural, pobreza e injustiça social (Saule Júnior e Silva, 1993), interessando pautar neste trabalho três questões fundamentais: a) diferentes formas urbanas consomem ou convertem mais ou menos território na sua trajetória histórica, transformando assim mais ou menos o ambiente preexistente; b) diferentes formas urbanas colaboram mais ou menos para a preservação de determinados recursos naturais, excluindo-os ou os incluindo no ambiente urbano; c) diferentes formas urbanas geram mais ou menos problemas ambientais, como é o caso de efluentes de infra-estruturas e efeitos do sistema de circulação. Mas apesar disso, como foi dito anteriormente, a cidade resiste, cresce e se consolida como parte integrante e inseparável do processo social e da paisagem, apesar das guerras, das crises, das enchentes, da poluição e da escassez.

Deste modo, pode-se depreender que a cidade, entendida como fenômeno ao mesmo tempo ambiental, social e físico (Christofletti, 1999; Soja, 1985 e 1989; Santos, 2004), mantém dispositivos que lhe têm conferido continuidade, sob pena de ter entrado em falência ou em extinção. Simultaneamente à necessidade de rever processos urbanos para garantir o melhor futuro para a cidade e para seus moradores (Echenique, 1999), alternativas morfológicas têm aparecido nas mais adversas condições, desde as favelas do chamado terceiro mundo, desde os centros das grandes metrópoles mundiais (Rapoport, 1977; Lynch, 1981; Batty, 2002), até as expansões urbanas conhecidas como *urban sprawl* (Torrens e Alberti, 2000; Chin, 2002). Entretanto, se es-



sa assertiva pode ser enunciada por evidências empíricas, o mesmo não ocorre com relação aos mecanismos que se encarregam de manter sua continuidade; é justamente aí que a presente pesquisa quer contribuir, auxiliando na compreensão desses dispositivos.

Um dos possíveis dispositivos para a permanência da cidade é que ocorram alterações de fragmentação / desfragmentação e de descompactação / compactação, cumprindo etapas diferenciadas no tempo e no espaço, isto é, em distintos momentos da evolução urbana ou em diferentes lugares da cidade, o que se dá através de expansões e de renovações urbanas (crescimento externo e interno simultâneos), ao converter território e ao promover mudanças de densidade. Esse processo tende a negar a assertiva de que a dispersão da cidade no território seria um indicador de decadência e de destruição, mas sim seria evidência de um dispositivo para a sua continuidade, podendo inclusive auxiliar na sua sustentabilidade. Assim como pode ser esperado que nas cidades mais fragmentadas ocorra maior consumo de território, pode ser também que nas cidades mais compactas ocorram problemas internos com maior intensidade, o que pode indicar esgotamento de infra-estrutura e de equipamentos urbanos, poluição e diminuição da qualidade ambiental urbana.

Parece seguro que desse processo de continuidade e crescimento advêm seqüelas ambientais, sociais, culturais e econômicas, as quais serão observadas na investigação, enriquecendo o elenco de perguntas e respostas alcançáveis com o trabalho. Pode-se acreditar, todavia, que são possíveis medidas que evitem, no todo ou em parte, os efeitos maléficos e o prejuízo às comunidades e ao próprio planeta, sendo a compreensão daqueles mecanismos de expansão um importante desafio para a pesquisa. Embora sejam conhecidos estudos que sugerem alternativas para combater insustentabilidade urbana, como as idéias de policentralidade, interfaces e espaços abertos (Pesci, 1999), assim como referências às cidades compactas (Jenks, Burton e Willians, 1998) e à diversidade morfológica (Costa, 1999; Mascaró, 1994), como também estudos na linha do urbanismo ecológico (Ruano, 1999), é preciso melhorar o conhecimento sobre as lógicas configuracionais explicativas da dinâmica de constituição dos tecidos urbanos.

### **2.3 Crescimento urbano e modelagem**

Esforços importantes têm sido empreendidos para melhorar a compreensão sobre os mecanismos de produção e de reprodução da cidade, no campo teórico da configuração urbana, como é o caso das idéias vinculadas ao desenvolvimento desigual (como enunciado por Harvey, 1975 e 1989), à auto-organização (como os trabalhos desenvolvidos por CALResCo – Complexity, Artificial and Self-Organizing Group<sup>4</sup>; Holland, 1998; Portugali, 1997 e 2000) e aos estudos sobre sistemas complexos (Allen, 1997; Lucas, 1999a e 1999b; O'Sullivan, 2001b). Na mesma direção, estudos de morfologia urbana têm representado satisfatoriamente a cidade pelo espaço construído, através de métodos de diferenciação capazes de descrever e de medir o desempenho de um determinado estado da cidade num determinado tempo, considerando as formas construídas e suas conexões através dos

---

<sup>4</sup> Ver em <http://calresco.org/> [disponível em 12 de dezembro de 2003].

espaços abertos ou públicos (Tekleberg, Timmermans e Borges, 1997). Nessa direção, a estrutura urbana pode ser representada por diferentes graus de centralidade, cujos valores estão correlacionados com vários indicadores de atividade do sistema urbano, como presença de pedestres, fluxo de veículos e concentração de atividades comerciais, podendo ser tomada como um indicador de qualificação locacional (Krafta, 1994 e 1999).

Conforme a concepção de Krafta (1994), centralidade é uma medida morfológica de diferenciação espacial, gerada por tensões entre unidades de forma construída alocadas em parcelas espaciais discretas e conectadas pelo tecido urbano, sendo considerada mais central a parcela que participa com maior intensidade da rota de ligação mais eficaz entre cada um dos espaços com todos os outros, considerando caminhos preferenciais e atritos de percurso; deste modo, o espaço urbano pode ser representado e diferenciado de maneira sintética e operacional, através das formas construídas, de suas conectividades e da medida de centralidade. Essa acepção pode ser alargada com a consideração de células como geradoras de tensões, as quais estão conectadas mediante um *grid* contínuo, possibilitando extrair a medida de centralidade de um território que inclui a cidade e a paisagem, rumando para a integração entre os sistemas urbano e natural.

Uma vez considerada a centralidade como uma possível expressão de diferenciação espacial, capaz de representar vantagens locacionais, podem ser derivados vetores de transformação e de produção de novos espaços urbanos, assumindo que a medida de centralidade pode conter uma implícita descrição do potencial de mudança (Krafta, 1994). A produção do espaço urbano é então assumida como a expressão da busca de maximização de renda, o que é potencializado por vantagens locacionais. Todavia, essa busca não implica simplesmente na eleição dos locais de maior centralidade, pois é esperada para esses locais uma coincidência com os maiores valores de aquisição de solo para construir, o que induz a busca permanente por novas localizações. Como sugere Harvey (1985), vantagens locacionais poderiam ser consideradas como inovações tecnológicas, transformando-se em possibilidade de lucro excedente; deste modo, os produtores urbanos procedem de modo semelhante aos demais produtores no mercado capitalista, buscando permanentemente inovações tecnológicas, dentre as quais estão as inovações ou invenções de localização. Como essas descobertas locacionais são prontamente seguidas pelos demais competidores, o processo torna-se iterativo, permanente e complexo, pois as vantagens iniciais tendem a mudar com a dinâmica urbana. Sendo assim, maiores potenciais de mudança se concentram onde houver maior diferença entre valores de centralidade entre um lugar e seu entorno, juntando vantagens de localização com menor custo do solo, de modo a reproduzir a referida “invenção de localização” e a conseqüente maximização de renda.

Estudos de ecologia de paisagem vêm absorvendo conceitos de acessibilidade e desenvolvendo modelos derivados das experiências com o espaço urbano, aplicando técnicas de resistência mínima acumulada (*MCR – minimal cumulative resistance*, como está em Yu, 1996), utilizando operações semelhantes às usadas em modelos dedicados ao espaço urbanizado, o que pode ser resumido como resistência espacial. Em caminho semelhante estão trabalhos dedicados a avaliar paisagens para a conservação ambiental, indicando um gradiente de valor ecológico e de impacto de atividades para diferentes usos do solo (Spellerberg, 1994:213-216). Noutras palavras, o espaço que intermedeia tensões de crescimento urbano exerce papel de restritor ou facilitador, participando ativamente do sistema.

Modelagem urbana tem sido usada satisfatoriamente para representar a cidade de modo simplificado (Martin, March e Echenique, 1972), facilitando a compreensão de determinados aspectos e suas relações com o conjunto. Mesmo assim, modelar mudança e crescimento urbano tem sido um desafio para a pesquisa contemporânea, reunindo esforços de diversos campos do conhecimento, como é o caso dos modelos de representação de sistemas ecológicos dinâmicos, como os propostos por Parton (1996) e por Waddell e Alberti (1998), dos modelos de conversão de território não urbanizado em urbanizado, como os propostos por Clarke, Hoppen e Gaydos (1997) e por Xie e Sun (2000) e dos modelos de alteração no uso do solo, como os propostos por Arai e Akiyama (2004) e por Liu e Andersson (2004).

Ao tratar de crescimento urbano, interessa representar o processo de produção espacial, convertendo solo não urbanizado em urbanizado e acrescentando (ou substituindo) edificações, capturando fisicamente o processo de evolução urbana. Uma vez capturado e reproduzido artificialmente esse processo, exercícios de simulação podem ser realizados (Krafta, 1995; Axelrod, 1997a) e auxiliarem na construção de teorias sobre como ocorre o crescimento urbano e suas relações com o ambiente, bem como aproximações com situações reais podem vir a ser divisadas.

Na interface do urbanismo com a ecologia, com influência da discussão sobre limites de crescimento (Meadows et al., 1972; Cole e Masini, 2001), ocorrem descrições sobre problemas decorrentes da exaustão dos recursos naturais (Allen, 1997; Ortega, 2001) e ocasionados pela superação da capacidade da infra-estrutura instalada na cidade. Em ambos os casos, a idéia parece confluir para a impossibilidade do crescimento ilimitado, o que implica na existência de limiares naturais e tecnológicos (Breheny, 1992), cuja superação pode estar associada à presença de problemas ambientais. Os limiares podem ser representados por um teto limite de urbanização, à semelhança dos coeficientes de aproveitamento do solo utilizados em planos urbanos.

Conceitos e técnicas de CA – autômato celular, estendido às demandas da cidade e às intenções dos pesquisadores urbanos (Torrens e O'Sullivan, 2001a) têm oferecido um ambiente com chances para operacionalizar essa convergência entre a possibilidade de modelar o ambiente urbanizado e o não urbanizado por diferenciação morfológica, por resistência espacial e por análise de limiares. Essas chances são maximizadas pelas possibilidades dinâmicas dos CAs, pela sua capacidade de capturar processos derivados da vizinhança espacial, pela natural compatibilidade com os *grids* usados em SIGs, pela crescente disponibilidade de imagens de satélite e pela popularização de conhecimentos em geocomputação (Ehlen, Caldwell e Harding, 2002). Sendo assim, CAs como os pretendidos aqui poderiam ser chamados de CS (*cell-space*, como está em Batty, Couclelis e Eichen, 1997) ou simplesmente de modelos celulares.

Modelos com técnicas de grafos e CA integrados têm conseguido superar a tradicional deficiência desses modelos de trabalharem em múltiplas escalas, quando usados separadamente (O'Sullivan, 2001a). Enquanto grafos permitem apreensões da estrutura geral (ou na escala global) de um sistema, CAs têm origem nas relações de vizinhança (ou na escala local), podendo implicar na emergência de padrões globais. O artifício de integração permite utilizar medidas de centralidade e potencial (Krafta, 1994 e 1999) no ambiente celular, bem como dar operacionalidade às resistências naturais e antrópicas à urbanização, engendrando um modelo híbrido de produção espacial.

Em resumo, é possível então representar a cidade como um campo de oportunidades de obtenção de renda, mediadas pelo espaço, o qual é composto integradamente por atributos urbanos e naturais, que funcionam como carregamentos ou como resistências para o crescimento urbano. A configuração espacial e a distribuição desses atributos geram tensões que diferenciam o espaço qualitativa e quantitativamente – através da medida de centralidade (construída com o apoio de técnicas de grafos), vindo a provocar crescimento em lugares com maior potencial de desenvolvimento (determinado com a ajuda de técnicas de CA). Crescimentos acima de determinados limiares são considerados problemas ambientais, gerados e superados no mesmo processo de produção do espaço urbano. Iterações desse processo oferecem um comportamento dinâmico ao sistema, posto que a realização dos potenciais implica em novos valores de centralidade e assim sucessivamente.

#### 2.4 Utilizando grafos, CA e geotecnologias

Segundo Sánchez (1998), a teoria de grafos provém da topologia, a qual se dedica a estudar relações entre pontos, linhas e superfícies, a partir de suas conexões. Um grafo pode ser considerado como um conjunto finito de elementos ou vértices, conectados por arestas ou arcos. Diversas medidas podem ser tomadas de um grafo (como conectividade, acessibilidade, sinuosidade ou centralidade), tendo-se tornado importante recurso para o estudo de redes, tanto antrópicas como naturais (ibidem). A possibilidade de representar a sociedade e o ambiente natural através de redes tem sido continuada, desde os trabalhos Euler, no Século XIX (Bogomolny, 2002; ver figura 2.1, adiante), até os pioneiros enfoques de Freeman para a estrutura social (1979, 1991), Alexander sobre padrões espaciais e ordem (1964, 1988 e 1998), depois Capra e seus conceitos sobre os sistemas vivos (1986 e 2002). Propriedades diversas dos grafos têm sido utilizadas para auxiliar na resolução de problemas urbanos com representação possível através de redes, como é o caso de da montagem de árvores de caminhos mínimos (*minimal spanning tree* ou busca de caminhos, como está em Mariani, 2001), que são freqüentes em estudos de sintaxe espacial (Hillier, 1998) e de morfologia urbana (Tekleberg, Timmermans e Borges, 1997).

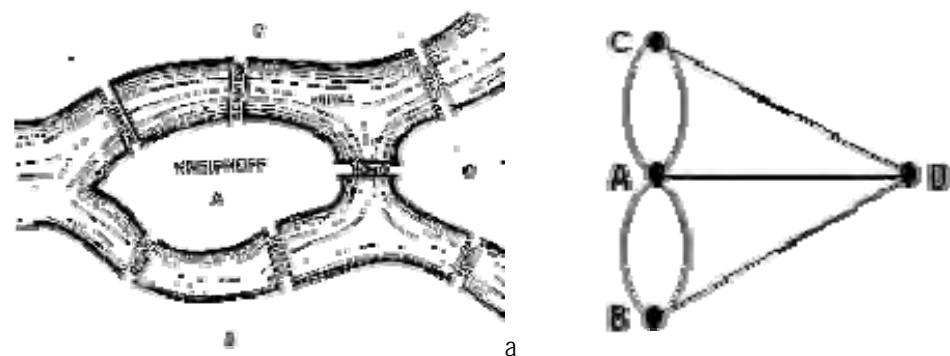


Figura 2.1: a) “pontes de Königsberg”; b) representação das pontes por um grafo escrito por Euler, em 1876 (Bogomolny, 2002).

Como está em Torrens (2000b), o uso de CA está ligado ao desenvolvimento da computação, da inteligência e da vida artificiais, o que vem sendo divisado desde os primeiros trabalhos de John von Neumann (precursor da computação e da teoria de jogos) e Stanislaw Ulmam (um dos primeiros desenvolvedores das técnicas de Monte Carlo), na década de 1940, até os mais recentes argumentos de Stephen Wolfram (reconhecido teórico contemporâneo em computação, matemáticas e CA, como está em Greco, 2002). Antes disso, na década de 30, Alan Turing já pensava na “Máquina Universal de Turing”, como mais tarde ficou conhecido; por ser um autômato hipotético, isso impulsionou o pensamento da década de 40, dando origem à criação dos computadores, que seguiram os mesmos princípios lógicos e conceituais. A idéia era de criar um “computador universal”, que nunca precisaria ser reconstruído, só reprogramado; uma tarefa imaginada para essa máquina seria “duplicar a si mesmo” ou replicar-se, (Maddox, 1983), o que interessa tanto ao domínio dos fenômenos ambientais quanto ao dos sociais e espaciais (Axelrod, 1997a). As chamadas “Máquinas de Turing” indicariam um rol de regras para os CA aplicáveis mediante ciclos determinados no tempo, em cujos intervalos (ou estados) e processos (ou dinâmicas) o mundo poderia ser examinado.

Uma definição objetiva de CA vem sendo traçada de modo dedicado por Stephen Wolfram desde a década de 80 do Século XX, a qual diz que CAs são representações matemáticas de sistemas físicos celulares, cujas características são especificadas pelos valores das células em cada estado, nos quais espaço, tempo e valores são discretos; nos CAs, os valores que cada variável assume são afetados pelos valores da sua vizinhança no tempo anterior, sendo os novos valores atualizados simultaneamente, de acordo com regras locais (Wolfram, 1983:601-643).

Resumidamente, CAs básicos (figura 2.2, adiante) podem ser considerados como um espaço finito composto por parcelas ou células, organizadas numa trama ou *grid*. Essas células mudam de estado automaticamente (por isso o termo autômato), seguindo certas regras de transição, em função dos estados das células vizinhas. Podem apresentar uma, duas ou três dimensões, sendo que os componentes de um CA podem ser classificados (segundo Wolfram, 1985) nos seguintes: a) *grid*; b) células-estado (ou simplesmente células); c) vizinhança; d) regras de transição; e) tempo. O *grid* é o espaço finito no qual o CA existe, reproduzindo a quantidade e dimensões das células, podendo ser quadrado, retangular, hexagonal ou ter a forma de qualquer polígono; as células são a unidade espacial do *grid*, onde residem ou se manifestam os estados possíveis de serem assumidos, que nos CAs básicos se resumem a um ou zero, porém podem assumir valores diferentes em aplicações ambientais e urbanas, como aparecerá adiante; a vizinhança é a região que é considerada de influência para o próximo estado de cada célula, a qual normalmente se restringe a quatro ou oito, porém tem sido ampliada para representar melhor determinados processos; as regras de transição são os mecanismos de mudança, conhecidos pela seqüência “*if-then-else*” (se-então-muda), normalmente representadas por enunciados simples, que ao se repetirem geram resultados complexos; o tempo é uma grandeza discreta, isto é, os tempos posteriores não mantêm relações com os anteriores, podendo ser dito que a evolução “destrói” a dependência com o estado inicial.

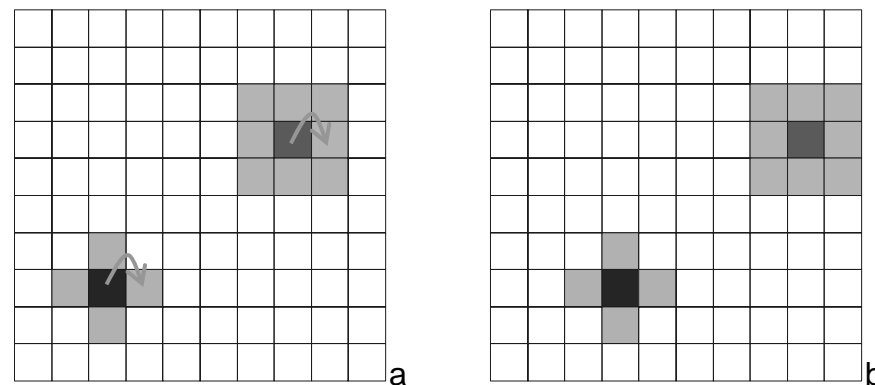


Figura 2.2: exemplos de dois estados de um CA básico, com dois tipos de estados (vazio e cheio), com dois tipos de vizinhança (von Neumann = azul claro; Moore = vermelho claro) e modificados pela regra “mover ao vizinho à direita”; a) no tempo  $t$ ; b) no tempo  $t+1$ ; (adaptado de Torrens, 2000b:22).

Um CA pode ser assumido como uma representação abstrata de uma realidade em transformação, cujas regras de transição podem ser apreendidas e replicáveis com o passar do tempo, o que permite observação sistemática e iterativa, interessando aos trabalhos científicos e seus esforços em conhecer os processos de mudança. Neste caminho, partindo os CAs dos mesmos princípios da computação universal, uma de suas possibilidades seria a de auto-reprodução mediante a aplicação de determinadas regras, o que seria passível de controle, observação, apropriação dos resultados, construção de interpretações e de conclusões (Batty, Couclelis e Eichen, 1997), como está representado esquematicamente na figura 2.2, a seguir.

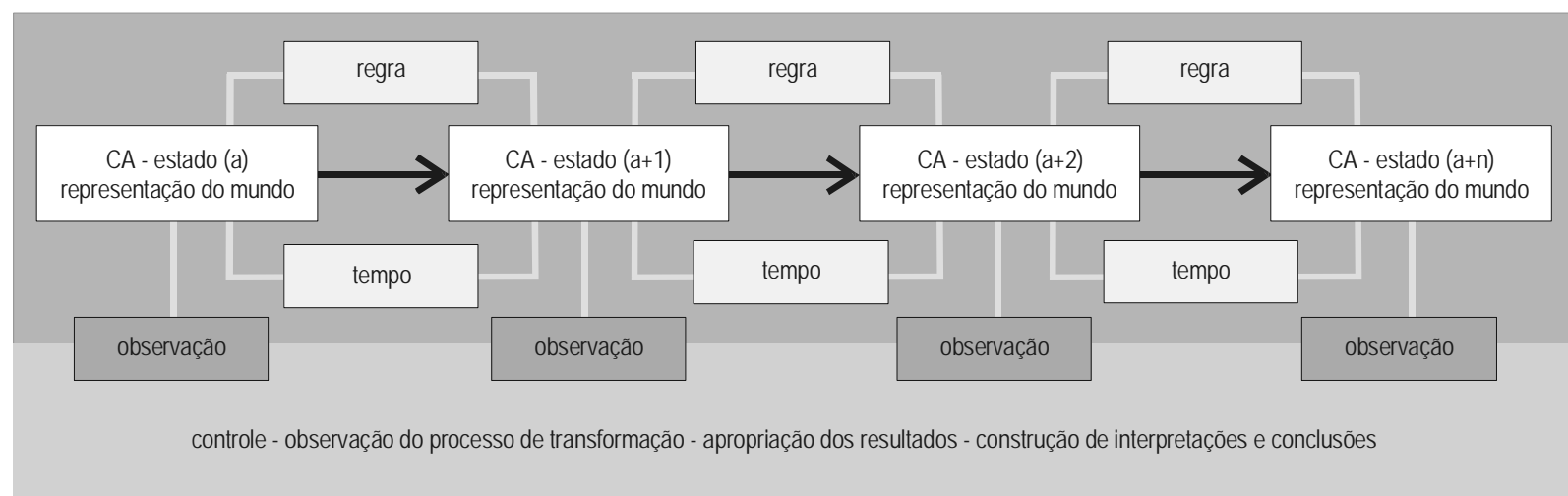


Figura 2.3: esquema de evolução de um CA em função de aplicação de regras, tempo e observações de estados e processo.

Os CAs podem ser representados matematicamente, sendo a que a notação básica é a seguinte (equação 2.1):

*Equação 2.1: função de transformação das células num autômato celular*

$$Cel_i(t+1) = f\{[Cel_{Viz} S(t)] \cdot (Regra_{Viz})\}$$

*onde se lê:*

*o estado da célula i no tempo t mais um é função do estado das células vizinhas do sistema S no tempo t (tempo atual, anterior a t+1), vezes a regra de transformação vinculada à vizinhança*

*sendo:*

*Cel<sub>i</sub> : célula i*

*(t+1) : unidade de tempo seguinte*

*Cel<sub>Viz</sub> S : células da vizinhança*

*t : tempo atual, anterior a t+1*

*Regra<sub>Viz</sub> : regra de transformação vinculada à vizinhança*

As possibilidades de espacialização e de representar processos dinâmicos com CAs têm sido usadas como auxiliares na resolução de inúmeros problemas ambientais e urbanos, como é o caso do crescimento espacial (Ward, Murray e Phinn, 2000). CAs apresentam vantagens para sua utilização em simulações urbanas, especialmente quando comparados com modelos tradicionais (Batty e Xie, 1994), apresentando possibilidades de integrar requisitos de eficiência com equidade, de incorporar espacialidade absoluta (ou Cartesiana) e relativa (ou Leibnitziana), de promover abordagens descentralizadas, de permitir integração com SIGs, de integrar forma e função, de trabalhar com atenção ao detalhe, de ser simples, de permitir o ingresso de outras teorias, de permitir adequada visualização e de, principalmente, representar processos dinâmicos (Torrens, 2000b:33-41). Para representar a cidade e seu processo de transformação, os CAs devem ter algumas de suas características adaptadas, o que recebe o nome de autômato celular estendido, sendo recorrentes as seguintes adaptações (a partir de Batty e Xie, 1994; Wu, 1996; White et al. 1999; White e Engelen, 2000): a) o *grid* não é considerado contínuo, sendo que as células de um lado da borda não são consideradas vizinhas das células de um outro lado; b) as células têm o tamanho ajustado à escala do espaço que se pretende representar, bem como seus estados representam atributos espaciais, os quais podem ser registrados por números fracionários; c) a vizinhança não se restringe às tradicionais 4 ou 8 células adjacentes à célula central (vizinhança de von Neumann e Moore, respectivamente), podendo ser regulada com raios variáveis por funções e associados a áreas de abrangência; d) as regras tentam replicar processos reais que ocorrem na cidade e na paisagem, representando conceitos e teorias sobre as transformações urbanas e ambientais; e) o tempo é transcrito em tempo real, representando a evolução urbana e os horizontes dos cenários que se pretende simular.

Sendo deste modo e considerando os objetivos deste trabalho, simulações utilizando CA aparecem como opção viável, considerando suas possibilidades de modelagem dinâmica, sua capacidade de representação espacial, a possibilidade de inclusão de atributos urbanos e naturais, a relativa simplicidade das simulações e as suas possibilidades de ajuste para as tipicidades da cidade (Wolfran, 1994 e 2002; Batty, 1998). O uso de CA aplicado ao espaço da cidade e da paisagem pode ainda ser melhorado por integração com grafos (O'Sullivan, 2001a) e pelo uso de geotecnologias, o que inclui ferramentas de SIG, recursos de geocomputação e geosimulação, cujos conceitos estão recuperados resumidamente, a seguir.

Geotecnologias podem ser compreendidas como um conjunto de recursos dedicados à compreensão do território, cujas ferramentas e abordagens transdisciplinares permitem redescobrir o mundo (Cerdán, 1999), o que pode ser particularmente feito em relação à cidade e seu desenho (Batty, Dodge, Jiang e Smith, 1998) e ao ambiente e suas características (Bian, 2004). As possibilidades das geotecnologias são tomadas menos como um conjunto de ferramentas computacionais e mais como um novo paradigma que alicerça estudos espaciais (Boido, 1999), como sugere Buzai (1999), ao encadear as ações de inventário, diferenciação, interação, significância e temporalidade.

Os SIGs se destacam no campo técnico e operacional, facilitando a aquisição, o tratamento, as análises e o arquivamento das informações espaciais (Câmara, 2001). Operações de elevada complexidade são realizadas rotineiramente por *softwares* de SIG, compatibilizando informações e agilizando as análises espaciais. Atualmente podem ser diferenciados os SIGs em SIGsys e SIGsci (SIG *systems* e SIG *science*, respectivamente), sendo os primeiros mais dedicados às rotinas técnicas e os segundos às demandas da investigação científica, em muito coincidindo com a idéia de geocomputação (Longley, Goodchild, Maguire e Rhind, 2001).

Geocomputação tem sido referida como o uso de diferentes tipos de dados espaciais e como o desenvolvimento de ferramentas geoespaciais, de modo a potencializar a solução de diversos tipos de problemas, assumindo grande importância para a investigação científica (Ehlen, Caldwell e Harding, 2002). Essas ferramentas enriquecem as abordagens espaciais com recursos de inteligência artificial, permitem a inclusão de teorias e a verificação de hipóteses, com intenso uso de recursos computacionais (ibidem).

O campo das simulações espaciais tem experimentado franca evolução nas últimas duas décadas, o que é notadamente representado pelos esforços de modelagem com diversas técnicas, destacadamente com CA, apresentando modelos dinâmicos e multiescalares, particularmente dedicados à ecologia, economia e ciências sociais (Benenson e Torrens, 2004). Trabalhos dedicados a capturar e interpretar a estrutura espacial através de modelos baseados em objetos oferecem crescentes possibilidades de compreender o mundo real através de simulações e do uso de inteligência artificial; nesse caminho, geosimulação pode ser compreendida como um emergente campo de modelagem dedicada a responder a demandas da investigação voltada para as ciências ligadas ao espaço, fundada na teoria de sistemas complexos, nas possibilidades de SIGsci e nos recursos de programação orientada a objetos (ibidem).



Integrações de grafos, CAs e geotecnologias (representadas pelos SIG, geocomputação e geosimulação) podem potencializar estudos ambientais e urbanos, com compensação entre possibilidades e limitações, do seguinte modo:

- a) integração de grafos com CAs: como foi anotado anteriormente, enquanto grafos trabalham com entidades espaciais e suas conexões, mantendo a capacidade de representar estruturas espaciais a partir de relações globais, CAs trabalham com entidades espaciais e suas relações de vizinhança, mantendo a capacidade de representar estruturas espaciais a partir de relações locais; sendo assim, a integração de grafos com CAs implica em integrar relações globais com relações locais;
- b) integração de grafos e CAs com SIG: sistemas de informação geográfica trabalham com representações vetorial e raster, sendo as primeiras próprias para o uso de grafos e as segundas para o uso de CAs; sendo deste modo, as representações tradicionais dos SIGs atendem às necessidades da integração entre grafos e CAs, o que facilita a aquisição de informações, sua preparação para processamento, a obtenção e a visualização de resultados e a guarda de informações;
- c) integração de grafos, CAs e SIG com geocomputação: geocomputação inclui a possibilidade de avançar para além dos recursos tradicionais dos SIGs, normalmente expressos na forma de um *software* comercial; a idéia da geocomputação é agregar recursos de programação, estatística e análise espacial, o que neste trabalho vai facilitar a construção de aplicativos que permitam a imersão dos recursos de grafos, CAs e SIGs em teorias que comandem as representações, as relações e as análises espaciais;
- d) integração de grafos, CAs, SIG e geocomputação com geosimulação: a aproximação entre realidade e constructos teóricos tem sido alcançada através de simulações do espaço geográfico, possibilitando operacionalizar a integração entre grafos e CAs, bem como superar a o modo estático de funcionamento dos SIGs tradicionais e a abstração com que são empreendidos os esforços em geocomputação, permitindo abordagens de fenômenos dinâmicos e a construção de cenários de futuro.

A figura 2.4, abaixo, mostra em esquema a integração de grafos e CAs num hipotético ambiente de SIG, mostrando células, pontos superpostos, depois pontos conectados por linhas, depois células, pontos e linhas superpostos.

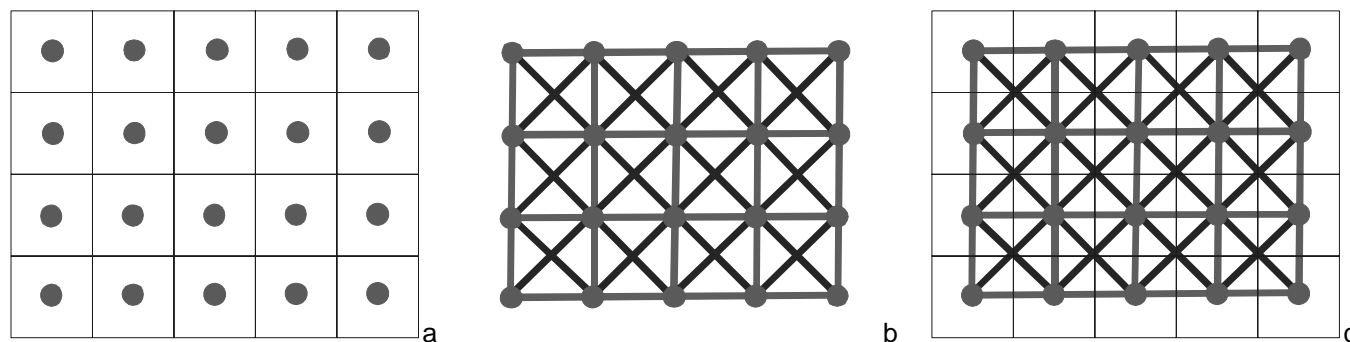


Figura 2.4: a) células e pontos superpostos espacialmente; b) grafo, representado por pontos e vetores; c) células, pontos e vetores, representando um sistema integrado de grafo com CA.

## 2.5 Conclusões

Do argumento sobre a cidade, o ambiente e o crescimento urbano, tratados pela necessidade de integração de sistemas urbanos e ecológicos, pela alternativa da modelagem com uso conjunto de grafos, CAs e geotecnologias, podem ser recuperadas as seguintes conclusões principais:

- a) embora a tradição das abordagens do espaço urbano e natural seja de manter separados cidade e ambiente, abordagens integradas podem qualificar a compreensão da cidade e da paisagem, bem como melhorar conceitos e práticas de planejamento urbano e ambiental;
- b) abordagens integradas podem superar a visão exclusivamente metabólica de cidade e incluir sua influência na conversão de território, nas mudanças na paisagem e na estruturação interna da cidade, que concentra serviços essenciais para a sobrevivência humana;
- c) para promover abordagens integradas, é importante que cidade e paisagem sejam consideradas como cenários dinâmicos, com interinfluências cumulativas, com processos retroalimentados e fora do equilíbrio, mediante mecanismos complexos e auto-organizáveis;
- d) crescimento urbano pode ser estudado pela conversão de território natural em território crescentemente urbanizado, pela adequação da paisagem ao processo de mudança e pelos limites de crescimento que o conjunto oferece;
- e) o processo milenar de continuidade da cidade tem demonstrado efetiva capacidade de adaptação, sugerindo que existem dispositivos que têm assegurado sua durabilidade, cujo conhecimento pode auxiliar na busca da sustentabilidade;
- f) um dispositivo provável que dá suporte à permanência da estrutura espacial da cidade é a alternância físico temporal de processos de fragmentação e compactação, podendo a difusão da cidade no território ser um recurso de sobrevivência e não um sinal de decadência ou de um problema a superar;
- g) para enfrentar os desafios da abordagem integrada, uma possibilidade é a de modelar a dinâmica de crescimento urbano incluindo variáveis urbanas e naturais, o que está proposto fazer através de modelos de centralidade e potencial, resistência mínima acumulada e de análise de limiares;
- h) para modelar o crescimento urbano, interessa capturar os processo de produção espacial global e local, o que é possível através de representação por grafos e por CAs, as quais por sua vez têm afinidade com os ambientes vetorial e raster, em sistemas de informação geográfica;

i) o uso de geotecnologias pode prover meio eficaz para a representação em abordagens que pretendem integrar cidade e ambiente, possibilitando a espacialização dos dados conjuntamente, a implementação de modelos através de geocomputação e a geração de cenários de futuro por exercícios de geosimulação.

## 2.6 Epílogo do capítulo 2

Neste capítulo apontei a necessidade de integrar as abordagens relativas ao espaço urbano e natural, que constituem sistemas interinfluentes, para o quê indiquei o estudo da cidade e da paisagem através de cenários dinâmicos, com influências cumulativas e retroalimentadas entre os sistemas urbano e ecológico, considerando que as mudanças podem ser complexas e auto-organizáveis, podendo operar como em sistemas fora do equilíbrio, o que é importante para compreender o processo de crescimento urbano. Para enfrentar essas questões adotei a modelagem urbana e ecológica como caminho, na intenção de capturar e reproduzir artificialmente o crescimento da cidade e as mudanças na paisagem que compõe, adotando modelos de centralidade, potencial e resistência mínima acumulada, a partir dos quais uma abordagem integrada é possível. Considerei também a possibilidade de discutir a questão da sustentabilidade urbana, observando particularmente a difusão do tecido urbano no território, a qual pode ser interpretada como um mecanismo de suporte à durabilidade milenar das cidades; por fim apontei como instrumentos as representações através de grafos e de autômatos celulares, implementadas com apoio em geotecnologias, o que inclui sistemas de informações geográficas, geocomputação e geosimulação.



No próximo capítulo estarei construindo um novo modelo de simulação de crescimento urbano que considera atributos urbanos e naturais integradamente, considerando ainda a possibilidades de juntar atributos institucionais; para isso reescreverei os modelos de centralidade e potencial originalmente propostos por de Krafta (1994 e 1999) e atualizados por Polidori, Krafta e Granello (2001) e acrescentarei recursos de modelagem ecológica, produzindo um modelo híbrido e apoiado em grafos, autômato celular e geotecnologias.

## 3 Modelando crescimento urbano

No capítulo anterior tratei de relações entre cidade e ambiente e crescimento urbano com teoria da urbanização, modelagem e geosimulação, explicitando o uso de grafos, CA – autômato celular e geotecnologias. Neste capítulo me dedico a construir um modelo de simulação, considerando integradamente atributos naturais, urbanos e institucionais, de maneira a representar de modo dinâmico a cidade e a paisagem através de medidas de centralidade, potencial de crescimento e resistências acumuladas, revelando ao mesmo tempo a evolução do espaço convertido para o uso urbano, as distribuições dos estoques construídos, os remanescentes naturais e os problemas ambientais intra-urbanos; para isso mostrarei as possibilidades para entrada de dados (*input*), processamento, obtenção de resultados (*output*), o método de validação e recomendações para a interpretação de resultados; ao final mostrarei medidas que são informadas pelo modelo e apresentarei uma síntese, na forma de fluxogramas.

### 3.1 Introdução

A modelagem de crescimento urbano começa com as tradicionais etapas de delimitação do sistema, definição do nível de desagregação e entitação (Wilson, 1985) e é continuada com as regras de transição e os procedimentos para geração de resultados. Para isso é necessário: a) assumir uma base espacial, delimitar fisicamente o sistema, determinar as entidades que o compõem e as associar com os atributos que participam das simulações; b) reescrever e implementar os modelos de centralidade e potencial, adequando-os ao ambiente celular e às demais características deste trabalho; c) determinar os resultados a extrair das simulações; d) estabelecer mecanismos de regulação e de validação do modelo; e) indicar procedimentos para as interpretações dos resultados. Considerando os interesses desta investigação, o modelo aparece habilitado a implantar limiares de crescimento urbano e a gerar, sem tabulações posteriores ou pós-processamento, medidas de fragmentação, compacidade, conversão de território e problemas ambientais intra-urbanos.

### 3.2 Descrição do território – *input*

#### 3.2.1 Base espacial, delimitação física, entidades e variáveis utilizadas nas simulações

O modelo assume como base espacial um ambiente com células quadradas de qualquer tamanho, resolvida como um *grid* bidimensional de um SIG – sistema de informações geográficas, com características operacionais de um CA, o que pode ser conseguido sobre fotos de aerofotogrametria, imagens de satélite, cartas geográficas escaneadas ou mapas vetoriais. Como o tamanho das células implica no tamanho final do sistema e na visibilidade das informações, as células podem ser maiores ou meno-

res por três motivos: a) pela capacidade de processamento computacional, pois os esforços aumentam exponencialmente em função do número de células do sistema, particularmente em decorrência dos procedimentos vinculados a grafos (Diestel, 2000); b) pela desagregação espacial necessária para modelar adequadamente cada caso, pois determinados fenômenos podem ser observáveis numa escala e não ser noutra (Enquist e Earsom, 1996; Rietkerk et al., 2002); c) pela disponibilidade de informações, cujo padrão de detalhamento e acuidade precisa manter correspondência com o tamanho das células. Como regra geral pode ser indicado utilizar o maior número possível de células (ou células com o menor tamanho possível), o que deve ser ajustado ao equipamento e tempo disponível para processamento e aos resultados esperados, bem como deve ser considerado que tamanhos diferentes de células podem ser derivados por pós-processamento. A figura 3.1, a seguir, ilustra o grau de detalhe com células de diferentes tamanhos.

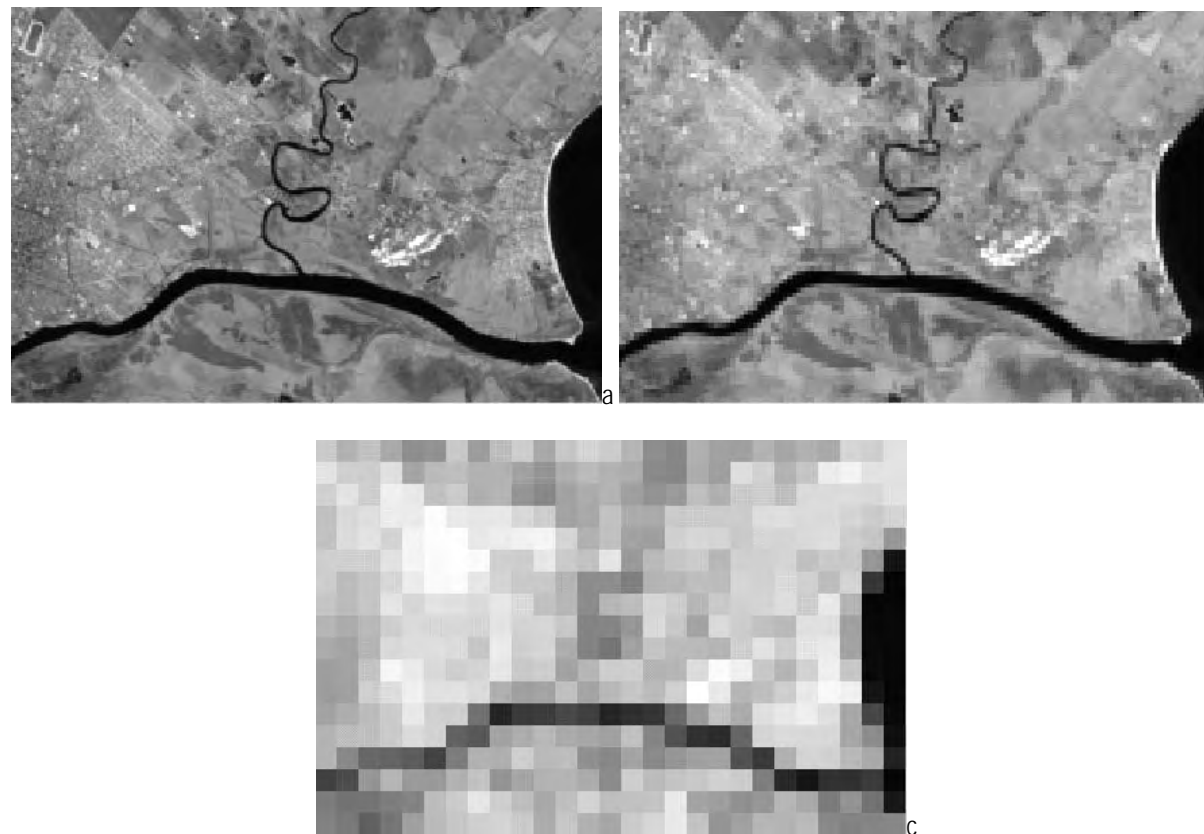


Figura 3.1: retalho de imagem de satélite com resolução original de 15 m; a) 50.400 células de 50 m; b) 12.600 células de 100 m; c) 504 células de 500 m.

Trabalhos de modelagem com CA, pela natureza discreta e finita de sistemas celulares (Wolfran, 1985, 1994, 2002; Batty, Xie e Sun, 1999), necessitam ser delimitados física ou espacialmente, restando claro qual o tamanho do *grid* e das células que representam o sistema, o que é feito de modo exato e incontestável (Benguigui et al., 2000). Todavia, esses limites não são iguais ao de um sistema baseado nos chamamos autômatos celulares puros, que opera como se os limites estivessem conectados, simulando um *grid* contínuo; no caso da cidade, concebendo um *grid* retangular representado em projeções transversas de Mercator (UTMs), as células da aresta da esquerda não se conectam diretamente com as da aresta da direita, nem as de baixo com as de cima, sendo assim, os limites das áreas que integram as simulações se constituem em limites precisos dos sistemas.

Experimentos com sistemas urbanos têm demonstrado possibilidades de mal-funcionamento nos seus limites físicos, sendo a validade dos resultados menos significativa nessas regiões do que nas demais (Reif, 1973). Conhecido isso, a solução indicada passa por delimitar o sistema urbano a modelar com um acréscimo externo (ou um *buffer*) para o qual os resultados da modelagem não são adotados ou interpretados de mesmo modo como o restante do sistema, embora esse *buffer* participe normalmente do processo de modelagem. É possível representar essas áreas como uma faixa larga ao final das áreas de estudo, com as dimensões do *buffer* determinadas heurísticamente e experimentadas nas simulações, sendo esperado que variem de 10 a 30% da dimensão maior do sistema (como usa Desyllas et al., 2003, bem como sugerem estudos empíricos de Polidori (2004a e 2004b), em Barra do Ribeiro e Pelotas, RS). A figura a seguir mostra três exemplos de delimitação física e área de *buffer* de sistemas a modelar.

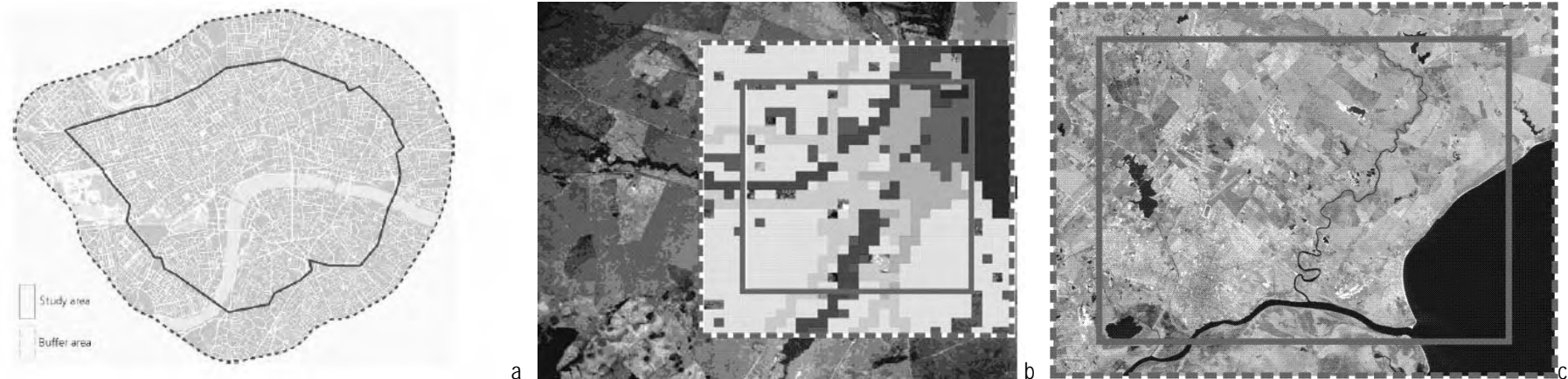


Figura 3.2: exemplos de delimitação física de sistemas urbanos em duas dimensões, com os seguintes casos: a) centro de Londres (Desyllas et al., 2003:04), com *buffer* de aproximadamente 30% do sistema total (sobre base vetorial); b) área urbana de Barra do Ribeiro, RS, também com *buffer* de aproximadamente 30% do sistema total; c) área urbana de Pelotas, RS, com *buffer* de cerca de 20 % do sistema total.

Como vem sendo exposto, as células são as entidades espaciais fundamentais da modelagem com CAs, podendo neste trabalho representar dois tipos básicos de espaços: a) o ambiente não urbanizado, dado pelo território natural e pelo ocupado pelas atividades rurais; b) o ambiente urbanizado, que pode ser desde um vazio urbano até áreas de alta densidade. Esses tipos de espaços são determinados pelo estado de uma célula num tempo específico, podendo ser chamados de dimensões fenotípicas, sendo que os atributos que codificam as características de cada célula podem, por seu turno, ser chamados de dimensões genotípicas (Steadman, 1983; Hillier e Hanson, 1984); sendo assim, uma combinação de determinados atributos (ou um genótipo) implica num determinada apresentação espacial (ou fenótipo), o que permite admitir que espaços urbanos contenham atributos não urbanos e vice-versa.

As variáveis utilizadas nas simulações são de dois tipos principais: a) de espaço; b) de atributo. As variáveis de espaço podem mudar em tamanho, quantidade e localização, sendo materializadas pelas células que compõem o *grid*, que constituem a base espacial da simulação, como foi mostrado anteriormente. As variáveis de atributo podem ser do tipo natural, urbano ou institucional, do seguinte modo: b.1) as variáveis de tipo natural representam os fatores do ambiente natural, modificados ou não pela ação antrópica, como é o caso das águas, das matas, dos campos e das áreas usadas para agricultura, por exemplo; b.2) as de tipo urbano representam a cidade e seus espaços adaptados, como é o caso das funções habitacionais, comerciais, industriais e dos equipamentos urbanos, por exemplo; b.3) as de tipo institucional representam as práticas e recursos utilizados nas políticas de uso e ocupação do solo e no processo de planejamento, como é o caso dos índices urbanos, do regime de usos e do zoneamento, por exemplo. A figuras 3.3 mostra essas possibilidades, em esquema.

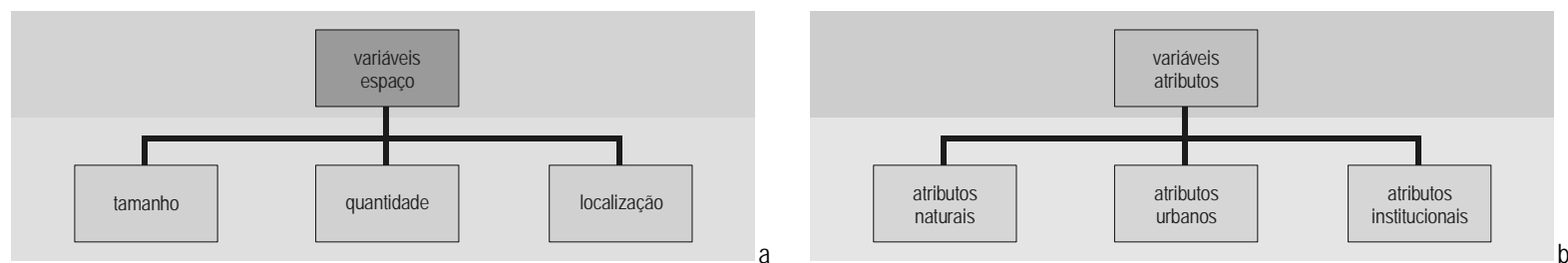


Figura 3.3: a) variáveis de espaço; b) variáveis de atributos.

O modelo assume os atributos como de dois tipos fundamentais, como está em esquema na figura 3.4, abaixo: a) carregamentos; b) resistências. Os carregamentos são os responsáveis pela geração de tensões que geram diferenciação espacial (através da medida de centralidade, como será mostrado adiante) e posterior crescimento urbano (pela medida de potencial, que será detalhada na seqüência). Os atributos que se caracterizam como resistências opõem-se ao crescimento urbano, consumindo tensões de crescimento urbano ao se afastarem de seu estado natural e serem crescentemente modificados pela ação do homem. Nesse processo de atração e resistência, tensões de crescimento são abstrações que representam esforços ou investimentos em modificação do território, aumentando o grau de urbanização; essas tensões podem estar associadas a fluxos de energia, de veículos, de pessoas ou de informações, representando mecanismos semelhantes aos utilizados em modelos de interação espacial e de acessibilidade (Torrens e Alberti, 2000; Waddell et al., 2001; Weber, 2003).

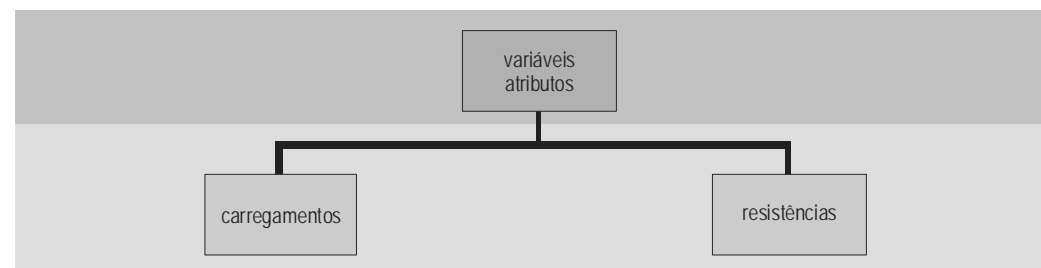


Figura 3.4: variáveis como carregamentos ou resistências.

### 3.2.2 Descrição do ambiente não urbanizado

O modelo descreve o ambiente não urbanizado pelos seus atributos naturais, que se vinculam a cada célula, com a possibilidade de apresentar duas características iniciais: a) oferecer resistência à urbanização, pelo que são denominados de resistência natural ou simplesmente *ResistE*; ou b) oferecer atração à urbanização, possuindo assim a capacidade de gerar tensões espaciais, pelo que são denominados de carregamento natural ou simplesmente *LoadE*. Os atributos naturais podem ser especificados ainda mediante dois critérios: c) capacidade de impedir o crescimento urbano; d) possibilidade de ser removido pelo processo de urbanização. Essas características e critérios implicam em seis tipos finais de atributos naturais:

- 1) atributos naturais que oferecem resistência suficiente para impedir sua transformação pela urbanização, não dispendo de capacidade de gerar tensões espaciais (a água do mar, por exemplo); são chamados de atributos resistentes-freezing;
- 2) atributos naturais que também oferecem resistência para impedir a transformação das células por urbanização, porém dispendo de capacidade de gerar tensão espacial, sob determinadas condições, normalmente dada por proximidade de outra área urbanizada (uma praia, por exemplo, que não pode ser urbanizada, porém atrai ocupação); são chamados de carregamentos-freezing;
- 3) atributos naturais que oferecem alguma resistência à urbanização, porém não a impedem, como nos casos anteriores; esses atributos, uma vez modificados ou superados pela urbanização, são removidos do sistema (mata plantada ou campo, por exemplo); são chamados de resistentes-instáveis;
- 4) atributos naturais que oferecem resistência à urbanização, como no caso anterior, porém não são removidos do sistema, exigindo esforços permanentes para sua superação, reeditados a cada transformação (a declividade, por exemplo); são chamados de atributos resistentes-estáveis;
- 5) atributos naturais que implicam em alguma atração à urbanização, a qual é ativada por uma determinada circunstância, normalmente dada pela distância; se a circunstância não aparece, o efeito também não aparece (é o caso de áreas com vista para um vale, com paisagem privilegiada ou similar); esses atributos, desde que próximos de áreas urbanizadas, são capazes de gerar tensões e de provocar desenvolvimento urbano, porém desaparecem com a realização da urbanização; são chamados então de carregamentos-instáveis;
- 6) atributos naturais semelhantes ao tipo anterior, isto é, capazes de atrair crescimento urbano sob determinadas circunstâncias, porém não são sujeitos a remoção no processo de urbanização (como é o caso de uma rampa com orientação solar ideal); esses atributos geram tensões permanentes, sendo chamados de carregamentos-estáveis; a tabela 3.1 e a figura 3.5, adiante, sintetizam as possibilidades anteriores.



Síntese dos atributos naturais				
tipo ↓	característica ↓	Critérios de classificação		
		a) crescimento	b) remoção	c) tensão espacial
A1	resistentes- <i>freezing</i>	impedido	não ocorre	não gera
A2	carregamentos- <i>freezing</i>	impedido	não ocorre	gera
A3	resistentes-instáveis	não impedido	ocorre	não gera
A4	resistentes-estáveis	não impedido	não ocorre	não gera
A5	carregamentos-instáveis	não impedido	ocorre	gera
A6	carregamentos-estáveis	não impedido com restrição espacial	não ocorre	gera

Tabela 3.1: classificação dos atributos naturais.

Partindo da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano, os atributos naturais podem ser organizados como mostra o seguinte diagrama (figura 3.5):

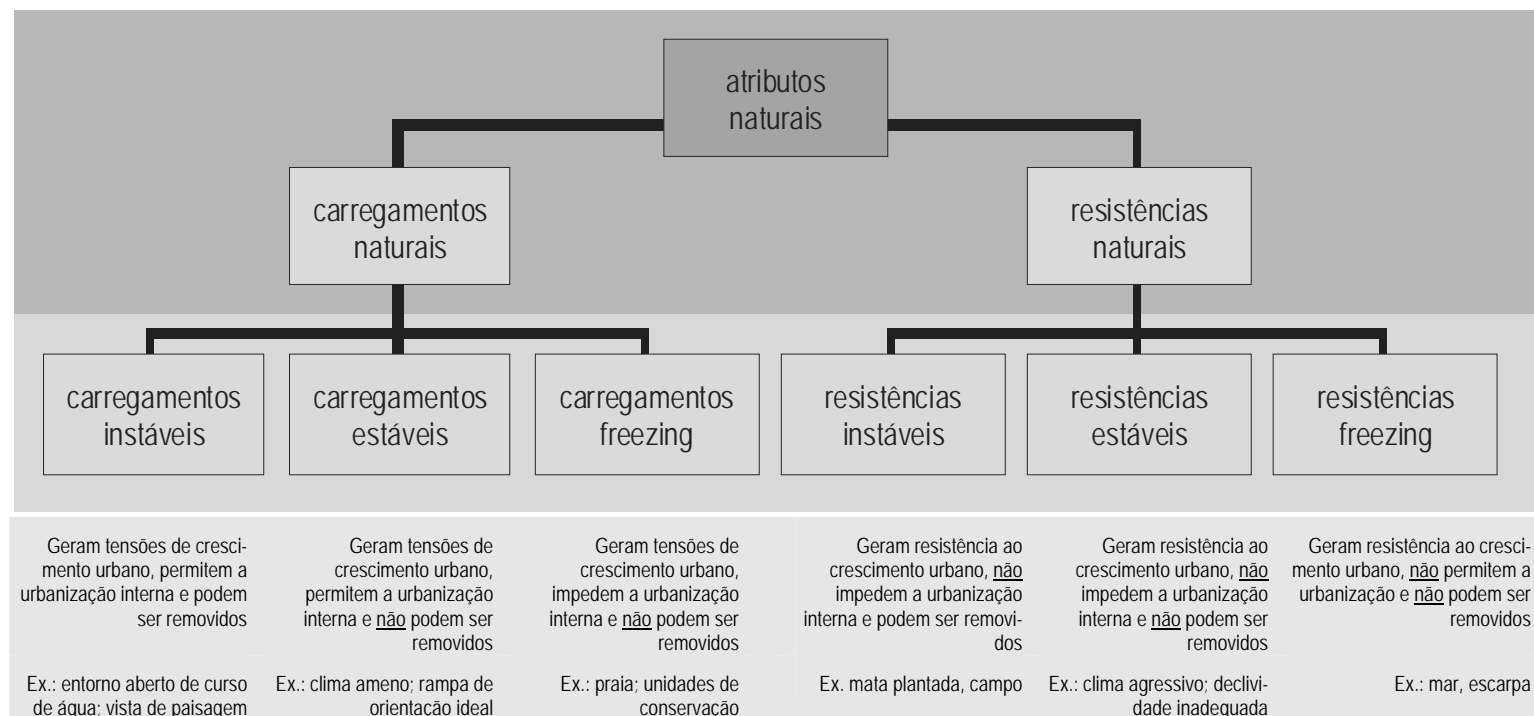


Figura 3.5: organização dos atributos naturais a partir da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano.

Essa descrição pode ser construída de três modos: a) classificação de imagem de satélite; b) ingresso de mapa(s) temático(s); c) manipulação de banco de dados. Os atributos naturais podem ter qualquer valor (positivo), recebendo na célula um valor absoluto (a intensidade com que ocorre) e no sistema um valor relativo (peso ambiental do atributo). O valor relativo ou peso ambiental do atributo pode estar associado a tabelas temáticas, como por exemplo: a) relação do atributo com padrões de segu-

rança em áreas de conservação, onde núcleos, corredores, e passagens podem ser considerados (Yu, 1996); b) valores de transformidade, onde se beneficia o tema da energia (Ortega, 2001); c) adequabilidade geral para urbanização, onde podem ser mediados interesses de mudança e conservação (Spellerberg, 1994); d) escassez na paisagem, como será aplicado neste trabalho, adiante (capítulos 5 e 8, adiante). A implementação desses valores relativos permite diferentes graus de reconhecimento e valoração de unidades ambientais, cuja eficácia conservacionista e demais efeitos sobre o sistema urbano podem ser experimentados e testados, questão será tratada com especificidade nos subtítulos 7.11 e 7.13, mais adiante.

Assumindo o conceito de paisagem como tridimensional e que inclui atributos biológicos, físicos e cognitivos (Forman, 1995; Costa, Montovani e Novaes, 2000; Thompson, 2002; Silva 2004), uma lista indicativa<sup>5</sup> para os atributos naturais pode ser construída, como está a seguir (tabela 3.2).

Lista de atributos naturais			
Categoria	Nome	Tipo	Peso sugerido
Unidade ambiental	Águas lânticas	A1 (ou A3)	100
	Águas lólicas	A1 (ou A3)	100
	Praia	A2	100
	Banhado	A3 (ou A1)	100
	Mata nativa	A3 (ou A1)	100
	Mata plantada	A3	50
	Campo	A1 (ou A3)	50
	Campo misto	A3	50
	Dunas sem vegetação	A3 (ou A1)	100
	Dunas com vegetação	A3 (ou A1)	100
	Outros	n	p
Solo e subsolo	Solo com produção agrícola ou pastoril	A3	25
	Solo descoberto	A3	10
	Solo erodido	A3	5
	Afloramento de rocha não superficial	A3	50
	Afloramento de rocha superficial	A3	25
	Rocha sub-superficial	A3	10
	Subsolo classe 1	A4	50
	Subsolo classe 2	A4	25
	Subsolo classe n	A4	10

<sup>5</sup> O modo como está sendo construído o modelo de simulação de crescimento neste trabalho não comporta uma lista de atributos definitiva ou mesmo sugerida como mais adequada, o que deve ser decidido caso-a-caso, considerando a paisagem local, as informações disponíveis e os interesses de cada simulação; essa característica confere, inclusive, importante capacidade de adaptação do modelo a diferentes casos, podendo aproximar os resultados de cada situação.

	Outros	n	p
Topografia	Declividade <sup>6</sup> 0 a 2 %	A4	10
	Declividade 2 a 5 %	A4	0
	Declividade 5 a 15 %	A4	10
	Declividade 15 a 30 %	A4	25
	Declividade 30 a 45 %	A4	50
	Declividade 45 % ou +	A4	100
	Altitude <sup>6</sup> classe 1 (0 a 2 m)	A4	50
	Altitude classe 2 (2 a 7 m)	A4	25
	Altitude classe 3 (7 a 100 m)	A4	0
	Altitude classe 4 (mais de 100 m)	A4	25
	Outros	n	p
Proximidade	<i>Buffer</i> <sup>6</sup> de laguna, lagoa, lago, rio, canal e duna	A5	100
	<i>Buffer</i> de arroio, riacho, curso d'água, nascente	A5	100
	<i>Buffer</i> de mata nativa e banhado	A5	100
	<i>Buffer</i> de linha de drenagem ou talvegue	A5	100
	<i>Buffer</i> de praia ou lugar com paisagem de especial interesse	A6	100
	Outros	n	p
Outros		...	...

Tabela 3.2: lista indicativa de atributos naturais.

Computando todos os seus atributos naturais, cada célula assume um então um valor quantitativo, calculado em função das intensidades de cada atributo em cada célula e de seu peso ambiental, operação que implica numa transcrição dos atributos em linguagem verbal para linguagem matemática, aumentando o nível de abstração da descrição da realidade ambiental. Dos valores parciais dos atributos naturais referidos como resistências deriva-se outro, chamado de resistência natural ou simplesmente de *ResistE*, que fica aderido às células do sistema; *ResistE* é normalizado (de zero a 1) e elevado a um coeficiente  $\alpha$  (alfa), que pode ser direto (diminuindo o resultado) ou inverso (aumentando o resultado). O valor de  $\alpha$  minimiza ou maximiza a resistência natural de um determinado sistema ou subsistema, sendo um valor exógeno que permite três recursos: a) ajustar matematicamente o valor de *ResistE*, de modo que os resultados fiquem mais legíveis; b) em escala menor, permite contextualizar o território da cidade no ecossistema que integra, informando sobre a importância daqueles atributos naturais numa região maior; c) em escala maior, permite diferenciar lugares no interior do sistema urbano, aparecendo como uma possibilidade de diferenciação de unidades ambientais ou subsistemas, utilizando o saber local. Computando os valores parciais dos atributos naturais

<sup>6</sup> As classes de declividade, altitude e *buffers* de proximidade são válidas para regiões planas e com altitudes moderadas, como é o caso de Pelotas, RS, que tem a área urbana implantada sobre uma planície costeira (Rosa, 1985).

referidos como capazes de atrair urbanização, deriva-se outro valor, chamado de carregamento natural ou simplesmente de *LoadE*, que também fica aderido às células do sistema; *LoadE* é normalizado de zero a 1 (um) e elevado a um coeficiente  $\alpha'$  (alfa-linha), que pode ser direto (diminuindo o resultado) ou inverso (aumentando o resultado), tal como foi descrito para *ResistE*.

O território a modelar pode ser hipotético, representação da realidade ou um misto entre eles; o primeiro é mais importante para especular teoricamente, o segundo para legitimar o modelo e melhorar a compreensão da realidade e o terceiro para testar hipóteses. A descrição do ambiente natural gera um elenco de mapas temáticos: a) a incidência dos atributos; b) os valores quantitativos totais de cada célula; c) os valores de *ResistE*; d) os valores de *LoadE*.

### 3.2.3 Descrição urbana

Além dos atributos naturais, o modelo descreve o território pelos seus atributos urbanos, que também se vinculam a cada célula e apresentam as mesmas duas características iniciais: a) gerar tensões espaciais, pelo que são chamados de carregamento urbano ou simplesmente *LoadU*; b) dificultar a geração de tensões espaciais, pelo que são chamados de resistências urbanas, ou simplesmente *ResistU*. Os atributos urbanos podem ser especificados ainda pelos seguintes critérios: c) permissão ou impedimento de crescimento urbano; d) possibilidade de remoção pelo processo de urbanização. Essas características e critérios implicam em seis tipos finais de atributos urbanos:

- 1) atributos urbanos que permitem que as células mudem com o tempo, além de gerar tensões de crescimento (áreas comuns da cidade, ocupadas por habitação, comércio, serviços, indústria, equipamentos etc); a mudança pode tanto gerar desenvolvimento urbano como gerar problemas ambientais; são chamados de carregamentos-instáveis;
- 2) atributos urbanos que permitem que as células mudem e gerem tensões, tal como as anteriores, porém têm a possibilidade de crescimento mais limitada que as outras (como áreas de interesse para a preservação, áreas de risco por excesso de densidade etc); esse limite pode ser: a) um percentual do caso anterior (isto é, um valor relativo) ou b) pode ser um valor dedicado ao caso específico, conforme o conhecimento disponível (isto é, um valor absoluto); esses são chamados carregamentos-estáveis;
- 3) atributos urbanos que geram resistência ao crescimento da cidade, porém não impedem a mudança, pela qual podem ser removidos (como é o caso de áreas com deficiência de infra-estrutura ou equipamentos urbanos); esses atributos são chamados de resistentes-instáveis;
- 4) atributos urbanos que geram resistência ao crescimento da cidade sem impedir mudanças, como no caso anterior, porém sem poder ser removidos pelo processo de crescimento e exigindo repetição dos esforços de urbanização a cada tempo (como no caso de parcelamento do solo num determinado tempo, por exemplo); esses atributos são chamados de resistentes-estáveis;
- 5) atributos urbanos que impedem a dinâmica de crescimento das células; além disso, não geram tensões de crescimento, o que pode ser considerado como uma função de repulsa ou resistência (como no caso de um depósito de lixo urbano a céu aberto, por exemplo); esses atributos são chamados resistentes-freezing;

6) atributos urbanos que também impedem o crescimento das células, porém geram tensões de crescimento (áreas tombadas, por exemplo); esses atributos são chamados carregamentos-freezing; a tabela 3.3 e a figura 3.7, adiante, sintetizam as possibilidades anteriores.

Síntese dos atributos urbanos				
tipo ↓	característica ↓	Critérios de classificação		
		a) crescimento	b) remoção	c) tensão espacial
U1	carregamentos instáveis	não impedido	ocorre	gera
U2	carregamentos estáveis	não impedido com restrição espacial	ocorre	gera
U3	resistentes-instáveis	não impedido	ocorre	não gera
U4	resistentes-estáveis	não impedido	não ocorre	não gera
U5	resistentes-freezing	impedido	não ocorre	não gera
U6	carregamentos-freezing	impedido	não ocorre	gera

Tabela 3.3: classificação dos atributos urbanos.

Assim como no caso dos atributos naturais e partindo da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano, os atributos urbanos podem ser organizados pelo seguinte diagrama (figura 3.6):

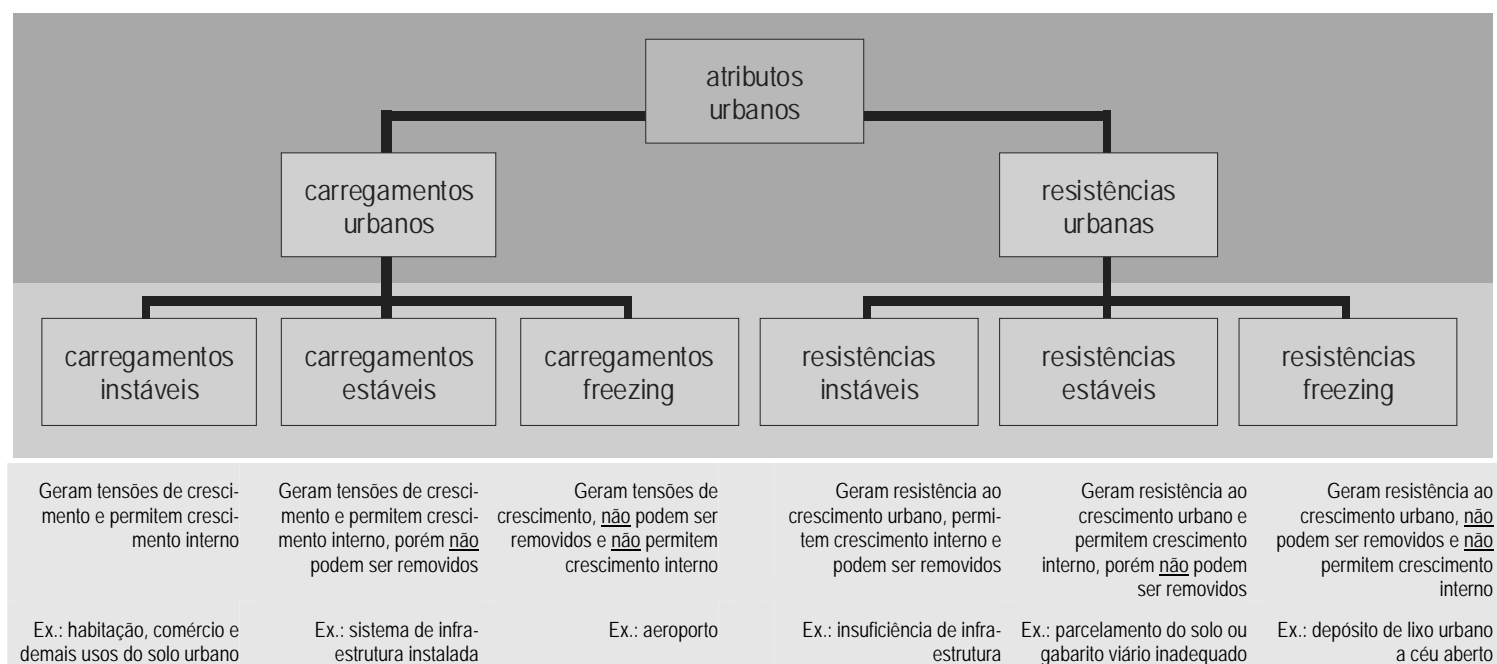


Figura 3.6: organização dos atributos urbanos a partir da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano.

Tal como no caso dos atributos naturais, os atributos podem ter qualquer valor positivo, recebendo na célula um valor absoluto (a intensidade com que ocorre) e no sistema um valor relativo (peso urbano do atributo). O valor relativo ou peso urbano do atributo pode estar associado a diversos fatores, como por exemplo: a) fatores funcionais (usos comerciais, industriais, institucionais e habitacionais têm atratividade decrescente, de um modo geral; Rigotti, 1955; Prins, 1984); b) hierarquias viárias (vias principais, secundária e locais têm atratividade decrescente; Vasconcelos, 2000); c) expectativas de geração de externalidades (externalidades positivas ou negativas aumentam ou diminuem a atratividade, respectivamente; Stover, 1994). A implementação desses valores relativos permite diferentes graus de reconhecimento e valoração de subsistemas urbanos, cuja influência no conjunto pode ser experimentada e testada.

Uma lista de atributos urbanos atualizada e confiável depende da constância e da qualidade das atividades de mapeamento e cadastro realizadas pelas municipalidades (Bogaerts e Zevenbergen, 2001), estando a seguir uma lista indicativa, com dois níveis de desagregação (tabela 3.4).

Lista de atributos urbanos			
Nível de desagregação 1	Nível de desagregação 1	Tipo	Peso sugerido
Funções urbanas	Habitação	U3	25
	Comércio	U3	100
	Serviço	U3	50
	Indústria	U3	25
	Praça	U3	100
	Lazer	U3	50
	Equipamento comunitário	U3	50
	Equipamento urbano	U3	25
	Uso n	Un	p
	Uso n+1	n	p
Circulação urbana	sistema principal	U3	100
	sistema coletor	U3	50
	sistema local	U3	10
	outro	Un	p
Demografia	Densidade 1	U1	100
	Densidade 2	U2	50
	Densidade 3	U5	25
	Densidade n	n	p
Outros		...	...

*Tabela 3.4: lista indicativa de atributos urbanos.*

Computando todos os seus atributos urbanos, cada célula tem então um valor quantitativo, calculado em função das intensidades de cada atributo em cada célula, associado ao seu peso urbano, em transcrição para linguagem matemática, tal como no caso dos atributos naturais. Computando os valores parciais dos atributos urbanos capazes de gerar atração, deriva-se outro, chamado carregamento urbano ou simplesmente *LoadU*, que fica aderido às células do sistema; esse valor é encarregado de gerar as tensões espaciais que serão mote do crescimento urbano, como aparecerá adiante; *LoadU* é normalizado (de zero a 1) e elevado a um coeficiente  $\beta$  (beta), que pode ser direto (diminuindo o resultado) ou inverso (aumentando o resultado). O uso de  $\beta$  permite ajustar o *LoadU* a tipicidades de cada local de estudo, permitindo três possibilidades: a) clarificar resultados da modelagem, por ajustes sucessivos; b) diferenciar cidades na região (diferenciar o sistema inteiro); c) diferenciar áreas da cidade, como bairros ou zonas especiais (diferenciar subsistemas territoriais); o uso de  $\beta$  inicialmente é 1 (um), sendo seu uso diferenciado dedicado à experimentação. Computando os valores parciais dos atributos urbanos referidos como resistências, se deriva outro, chamado resistência urbana ou simplesmente *ResistU*, que também fica aderido às células do sistema; esse valor representa problemas ambientais urbanos e é normalizado (de zero a 1), sendo elevado a um coeficiente  $\beta'$  (beta-linha), o qual pode ser direto (diminuindo o resultado) ou inverso (aumentando o resultado).

O território a modelar pode ser hipotético, real ou misto dos dois tipos; pode ser um sistema urbano embrionário (com poucas células urbanas), desenvolvido (com numerosas células urbanas) ou misto dos dois tipos; pode ser um sistema mono ou polinucleado, com ou sem vazios intercalados. A descrição urbana gera um elenco de mapas temáticos: a) a incidência dos atributos; b) os valores totais dos atributos urbanos; c) os valores de *LoadU*; d) os valores de *ResistU*.

#### 3.2.4 Descrição institucional

Fatores institucionais podem intervir no processo de crescimento urbano de modo independente dos fatores naturais e urbanos (Sampford, 2002), sendo particularmente importantes em simulações que pretendem testar os efeitos de planos urbanos e políticas em cenários de futuro (Chin, 2002). Os fatores institucionais operam do mesmo modo que os atributos urbanos e naturais enunciados anteriormente, diferenciando-se pelas suas origem e especificações, pois podem partir de políticas ou projetos institucionais, bem como podem representar circunstâncias sob as quais o operador do modelo tem interesse de realizar simulações; as especificações podem representar políticas fiscais e extra-fiscais, regimes urbanos, planos e programas em geral, podendo também replicar atributos naturais ou urbanos. Assim como nos casos anteriores, os atributos institucionais podem ser de seis tipos diferentes:

- 1) fatores institucionais que geram tensões espaciais indutoras de crescimento urbano e permitem que as células mudem com o tempo (imposto progressivo, por exemplo); são chamados de carregamentos-instáveis;
- 2) fatores institucionais que geram tensões como as anteriores, porém impõem um limiar diferenciado ao crescimento urbano (como em zonas de densidade controlada, por exemplo); esse limiar pode ser: a) um percentual do caso anterior (isto é, um valor relativo) ou b) pode ser um valor referente ao caso específico, (isto é, um valor absoluto); esses são chamados de carregamentos-estáveis;
- 3) fatores institucionais que geram resistência ao crescimento da cidade, porém não impedem a mudança, pela qual podem ser removidos (como é o caso de áreas com regime de uso de solo restritivo, por exemplo); esses atributos são chamados de resistentes-instáveis;
- 4) fatores institucionais que geram resistência ao crescimento da cidade sem impedir mudanças, como no caso anterior, porém sem poder ser removidos pelo processo de crescimento e exigindo repetição dos esforços de urbanização a cada mudança (como é o caso dos coeficiente de aproveitamento do solo, taxas de ocupação e de impermeabilização, por exemplo); esses atributos são chamados de resistentes-estáveis;
- 5) fatores institucionais que impedem a dinâmica de crescimento das células e não geram tensões de crescimento, o que pode ser considerado como uma função de repulsa ou resistência (como no caso de áreas não edificáveis, por exemplo); esses atributos são chamados resistentes-freezing;
- 6) fatores institucionais que também impedem o crescimento das células, porém geram tensões de crescimento (áreas de conservação, por exemplo); esse atributos são chamados de carregamentos-freezing; a tabela 3.5 e a figura 3.7, adiante, sintetizam as possibilidades anteriores.

Síntese dos fatores institucionais				
tipo ↓	característica ↓	Critérios de classificação		
		a) crescimento	b) remoção	c) tensão espacial
11	carregamentos-instáveis	não impedido	ocorre	gera
12	carregamentos-estáveis	não impedido com restrição espacial	ocorre	gera
13	resistentes-instáveis	não impedido	ocorre	não gera
14	resistentes-estáveis	não impedido	não ocorre	não gera
15	resistentes-freezing	impedido	não ocorre	não gera
16	carregamentos-freezing	impedido	não ocorre	gera

Tabela 3.5: classificação dos fatores institucionais.



Partindo da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano, os atributos institucionais podem ser organizados pelo seguinte diagrama (figura 3.7):

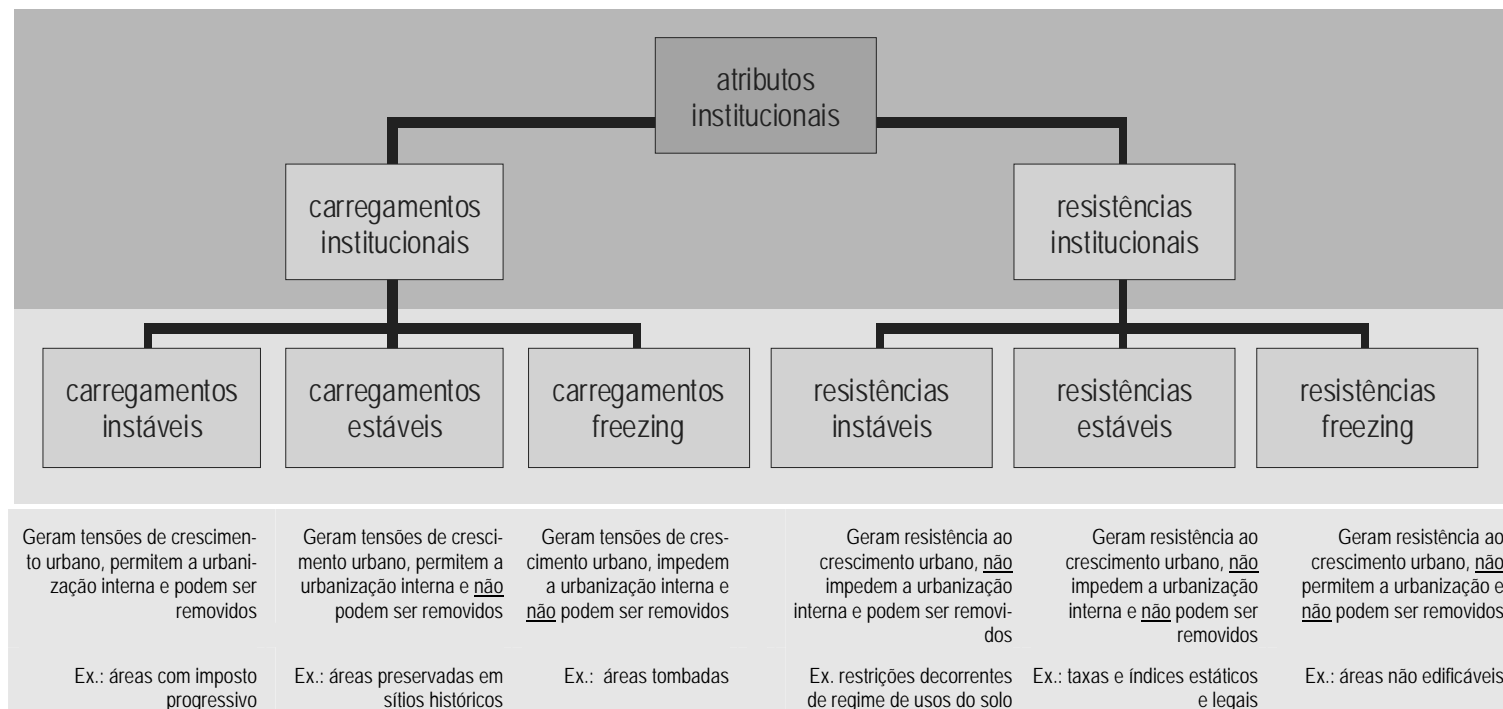


Figura 3.7: organização dos atributos institucionais a partir da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento urbano.

A descrição dos atributos institucionais é construída em três passos: a) determinação dos instrumentos urbanos a utilizar; b) ingresso de mapa(s) temático(s); c) manipulação de banco de dados. Os atributos institucionais, assim como os demais atributos, podem ter qualquer valor positivo, recebendo na célula um valor absoluto (a intensidade com que ocorre) e no sistema um valor relativo (peso institucional do atributo), os quais podem estar associados à variáveis quantitativas (como o uso extra-fiscal dos impostos, por exemplo) ou qualitativas (como o valor cultural, por exemplo). A implementação desses valores relativos permite especular sobre a influência dos fatores institucionais na simulação de crescimento, cuja participação no conjunto pode ser experimentada e testada, podendo, uma lista indicativa de atributos institucionais pode ser construída, como está na tabela 3.6. a seguir.

Lista de fatores institucionais			
Categoria	Nome	Tipo	Peso sugerido
Política fiscal e extra-fiscal	IPTU <sup>7</sup> diferenciado (maximizado)	I1	50
	IPTU diferenciado (minimizado)	I1	50
	IPTU progressivo (crescente)	I1	100
	IPTU progressivo (crescente)	I1	100
	ISQN <sup>6</sup> diferenciado (maximizado)	I4	50
	ISQN diferenciado (minimizado)	I4	50
	ISQN progressivo (crescente)	I4	100
	ISQN progressivo (decrescente)	I4	100
	outros	In	p
Índices Urbanos	Taxa de ocupação x n <sup>8</sup>	I4	50
	Taxa de impermeabilização x n	I4	50
	Coefficiente de aproveitamento x n	I4	100
	Altura máxima x n	I4	50
	Recuo x n	I4	25
	Uso proibido x n	I4	75
	Uso incentivado x n	I1	50
	Reserva de área x n	I3	100
	Outros	n	p
Zoneamento	Zona de conservação 1	I6	100
	Zona de conservação n	I6	50
	Área não edificável	I5	100
	Zona de renovação	I1	25
	Zona de preservação cultural	I3	50
	Zona de ocupação prioritária	I1	25
	Zona de densidade limitada	I2	50
	Outros	n	p
Valor cultural	Valor cultural nível 1	I2	100
	Valor cultural nível 2	I2	50
	Valor cultural nível 3	I2	25
	Valor cultural nível n	n	p
Outros	...	...	...

*Tabela 3.6: lista indicativa de fatores institucionais.*

<sup>7</sup> IPTU: imposto predial e territorial urbano; ISQN: imposto sobre serviços de qualquer natureza.

<sup>8</sup> A expressão "x n" significa "em n possibilidades".

Computando todos os seus fatores institucionais, cada célula tem então um valor quantitativo, calculado em função das intensidades de cada fator em cada célula, associado ao seu peso institucional. Computando os valores parciais dos fatores institucionais referidos como capazes de gerar atração, deriva-se outro, chamado carregamento institucional ou simplesmente *LoadI* que contribui para a geração das tensões espaciais que ocorrem no modelo; *LoadI* é normalizado (de zero a 1) e elevado a um coeficiente  $\Omega$  (ômega), que pode ser direto (diminuindo o resultado) ou inverso (aumentando o resultado), o que permite ajustar o *LoadI* a características institucionais de cada local de estudo, permitindo especular sobre os efeitos mais ou menos intensos dos planos e dos mecanismos de controle urbano. Computando os valores parciais dos fatores institucionais referidos como resistências se deriva outro, chamado resistência institucional ou simplesmente *ResistI*, que fica vinculado às células do sistema e é normalizado (de zero a 1); como no caso de *LoadI*, é elevado a um coeficiente  $\Omega'$  (ômega-linha), que pode ser direto (diminuindo o resultado) ou inverso (aumentando o resultado).

O cenário a construir com os fatores institucionais pode ser imaginário, representação de um plano ou projeto real ou misto dos dois tipos; cenários diferentes podem ter seus efeitos comparados, bem como cenários iguais podem ser experimentados em estados diferentes de uma mesma cidade. Como nos casos anteriores, os fatores institucionais geram um grupo de mapas temáticos: a) a incidência dos fatores institucionais; b) os valores totais; c) os valores de *LoadI*; d) os valores de *ResistI*.

### 3.3 Implementação dos modelos de centralidade e potencial – processamento

Uma vez conhecidos os atributos naturais, urbanos e institucionais iniciais, assumidos seus pesos e os valores para  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$ ,  $\beta'$ ,  $\Omega$  e  $\Omega'$ , realiza-se uma etapa de processamento preliminar, encarregada de gerar os valores de *LoadE*, *ResistE*, *LoadU*, *ResistU*, *LoadI* e *ResistI*. A partir desses valores e das demais condições do modelo são calculadas as tensões espaciais, a centralidade celular, o potencial de crescimento celular e o crescimento celular propriamente dito, como está nos subtítulos a seguir.

#### 3.3.1 Tensões espaciais

É assumido então que entre cada par de células que possui algum carregamento desenvolve-se uma tensão, como nos modelos de Acessibilidade, Centralidade e Desempenho (Krafta, 1994; Polidori, Krafta e Granero, 2001); a tensão é calculada através do produto do carregamento total de cada célula pelo carregamento total de cada uma das outras que lhe são alcançáveis, de modo semelhante ao que ocorre em modelos de interação espacial (Wilson, 1985; Torrens, 2000a), porém sem limitações referentes a origem e destino.

O enunciado matemático para o cálculo da tensão gerada por um par de células é o seguinte (equações 3.1 a 3.4):

*Equação 3.1: tensão entre as células i e j*

$$T_{ij} = (\text{LoadE}_i + \text{LoadU}_i + \text{LoadI}_i) \cdot (\text{LoadE}_j + \text{LoadU}_j + \text{LoadI}_j)$$

*onde se lê:*

*a tensão entre as células i e j é igual ao produto da soma dos carregamentos natural, urbano e institucional da célula i pela soma dos carregamentos natural, urbano e institucional da célula j*

*ou simplesmente:*

*Equação 3.2: simplificação da tensão entre as células i e j*

$$T_{ij} = P_i \cdot Q_j$$

*onde:*

*Equação 3.3: peso da célula i*

$$P_i = \text{LoadE}_i + \text{LoadU}_i + \text{LoadI}_i$$

*e:*

*Equação 3.4: peso da célula j*

$$Q_j = \text{LoadE}_j + \text{LoadU}_j + \text{LoadI}_j$$

*sendo:*

*T<sub>ij</sub> : tensão entre as células i e j*  
*LoadE<sub>i</sub> : carregamento natural da célula i*  
*LoadU<sub>i</sub> : carregamento urbano da célula i*  
*LoadI<sub>i</sub> : carregamento institucional da célula i*  
*LoadE<sub>j</sub> : carregamento natural da célula j*  
*LoadU<sub>j</sub> : carregamento urbano da célula j*  
*LoadI<sub>j</sub> : carregamento institucional da célula j*  
*P<sub>i</sub> : peso da célula i*  
*Q<sub>j</sub> : peso da célula j*

Estando os valores dos carregamentos normalizados entre zero e 1 (um), é necessário transformá-los para números maiores ou iguais a 1, de modo a evitar inconsistência na multiplicação (dois números menores que 1 multiplicados resulta num número menor que os multiplicandos, que não é o procurado na operação), o que é conseguido por uma transformação escalar exponencial dos dados, gerando valores de cálculo, como está a seguir (equações 3.5, 3.6 e 3.7).

*Equação 3.5: tensão de cálculo entre as células i e j*

$$Tc_{ij} = Pc_i \cdot Qc_j$$

*onde se lê:*

*a tensão de cálculo entre as células i e j é igual ao produto do carregamentos de cálculo da célula i pelo carregamento de cálculo da célula j*

*onde:*

*Equação 3.6: peso de cálculo da célula i*

$$Pc_i = 10^{P_i} \quad \text{ou} \quad P_i = \log Pc_i$$

*Equação 3.7: peso de cálculo da célula j*

$$Qc_j = 10^{Q_j} \quad \text{ou} \quad Q_j = \log Qc_j$$

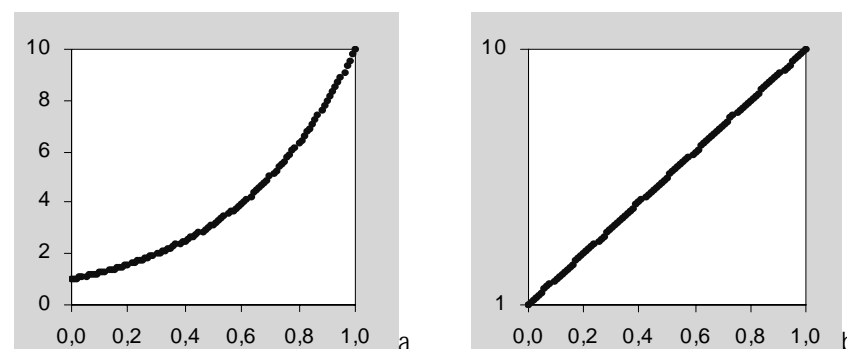
*sendo:*

*Tc<sub>ij</sub> : tensão de cálculo entre as células i e j*

*Pc<sub>i</sub> : peso de cálculo da célula i*

*Qc<sub>j</sub> : peso de cálculo da célula j*

Os gráficos abaixo mostram os efeitos dessa transformação, cuja influência é o realce dos carregamentos em extratos superiores (gráfico 3.1).



*Gráfico 3.1: efeito da transformação escalar exponencial de base 10 (dez) dos carregamentos, utilizada para o cálculo das tensões; no eixo horizontal estão os valores de carregamento provenientes de normalizações entre zero e 1 (um) e no eixo vertical os valores transformados; o gráfico b está linearizado por transformação logarítmica.*

Tensões podem ser geradas incluindo todas as células com todas as outras (que têm atributos naturais, urbanos ou institucionais que gerem tensões) ou mediante raios (que podem ser topológicos ou geométricos), limitando fisicamente as tensões a serem geradas. O resultado é um produto a ser distribuído para as células do sistema, por três modos: a) para aquelas células que estão no caminho preferencial entre o par de células que participam da interação; b) para aquelas células que estão na vizinhança de cada célula geradora da interação; c) para células dispersas no sistema, escolhidas por sorteio que considera suas características tipo-morfológicas. Esses modos ou tipos de distribuição são implementados pelo usuário do modelo, em porcentagens que variam desde zero até 100% (inexistência ou exclusividade do tipo de distribuição de tensão, respectivamente), podendo ser resumidos nos seguintes: A) distribuição axial; B) distribuição polar e C) distribuição difusa. Como aparecerá adiante, aos tipos de distribuição de tensões correspondem tipos de crescimento, o que assumirá particular importância qualitativa no processo de calibração.

### 3.3.2 Distribuição de tensões axiais, polares e difusas

A distribuição axial é dedicada a capturar as rotas preferenciais de ligação entre as células do sistema, estando associada ao sistema de circulação urbana e sendo dividida em dois subgrupos: A1) referente às células do caminho preferencial propriamente dito; A2) referente a células encontradas na vizinhança do caminho preferencial (ou num *buffer* do caminho preferencial). No caso de A1, a rotina de caminhos preferenciais é resolvida considerando uma heurística de desvios mínimos associada à técnica de *minimal spanning tree*, considerando ainda atritos internos de cada célula (ou impedância, como no caso de modelos anteriores; Polidori, Krafta e Granero, 2001). No caso de distribuição tipo A2, trata-se de aproveitar os resultados obtidos para o tipo A1 e computar um entorno às células escolhidas anteriormente, de modo a representar uma certa área de influência do caminho preferencial.

A distribuição polar evidencia diferenciações espaciais na escala mais local, no entorno imediato do atributo gerador de tensões; pode ser dividida em subgrupos, organizados por áreas de abrangência diferentes, decorrentes das diferentes capacidades de atração concedidas a cada célula, através de seu carregamento.

A distribuição difusa pretende capturar aspectos com maior imprevisibilidade locacional no tecido urbano, porém especificável segundo dois padrões: padrão C1) referente à promoção imobiliária formal e padrão C2) referente aos processos de autopromoção imobiliária e promoção imobiliária informal. O padrão C1, chamado daqui para frente de “tipo 1”, é típico dos espaços produzidos por agentes que reinterpretam as regras de mercado com criatividade (Batty, 1998) e consumidos por classes econômicas superiores e médias-superiores, sendo a probabilidade de ocorrência diretamente proporcional à localização privilegiada e às características da vizinhança (o que eleva o custo do solo); essa probabilidade maior de uma célula ser escolhida aleatoriamente é diretamente proporcional à centralidade celular máxima e à resistência mínima de cada célula, sendo que o fator qualidade

de localização tem primazia em relação ao fator preço. O padrão C2, chamado daqui para frente de “tipo 2”, é típico dos espaços produzidos através do mercado informal (Maricato, 2001) e utilizados por classes econômicas inferiores e médias-inferiores, incluindo a formação das chamadas periferias urbanas (ibidem), sendo a probabilidade de ocorrência diretamente proporcional ao baixo custo do solo; essa probabilidade é diretamente proporcional à centralidade celular mínima e à resistência máxima de cada célula, sendo o fator preço prioritário em relação ao fator localização.

A figura 3.8, a seguir, exemplifica as distribuições de tensões espaciais referidas anteriormente, implantadas numa representação típica de CA, sendo que a cada modo ou tipo de distribuição se destina um percentual das tensões geradas no processo de diferenciação descrito anteriormente, o que é decidido pelo usuário do modelo, em função dos objetivos da simulação.

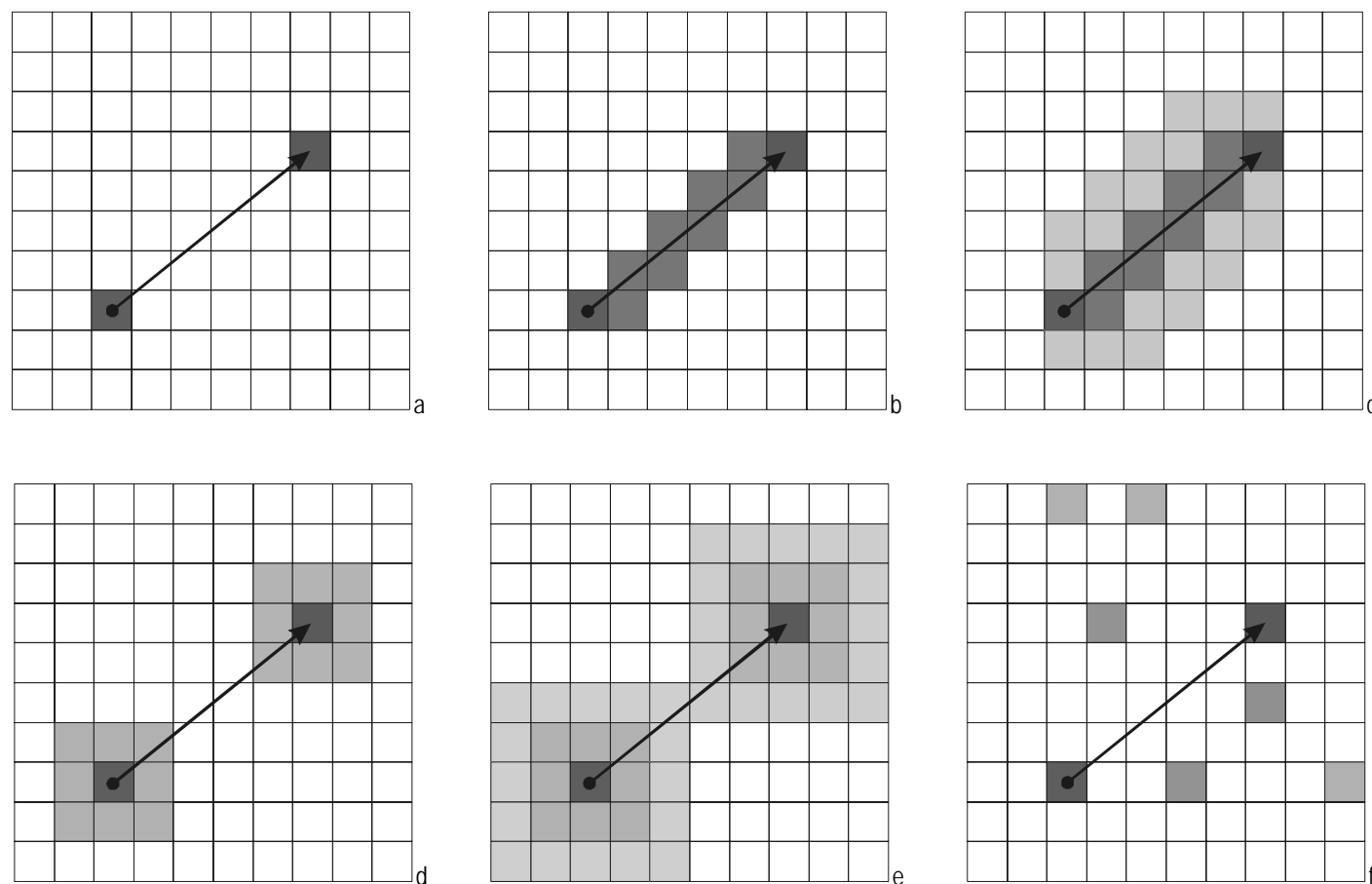


Figura 3.8: diagramas em formato de CA, representado: a) tensão gerada entre duas células (azul e vermelha); b) células incluídas na distribuição axial de caminho preferencial (verde); c) células incluídas na distribuição axial de buffer de caminho preferencial, com raio igual a uma célula (verde claro); d) células incluídas na distribuição de tensões do tipo polar, com vizinhança de raio igual a uma célula (azul claro e rosa); e) mesmo caso anterior, com vizinhança de raio igual a duas células f) hipótese de células incluídas na distribuição difusa (laranja = tipo 1; azul claro = tipo 2).

A distribuição das tensões nos modos referidos anteriormente pode ser enunciada pelas equações 3.8 e 3.9, a seguir.

*Equação 3.8: modos de distribuição das tensões entre as células i e j*

$$T_{ij} = \frac{A1_{ij}}{x} = \frac{A2_{ij}}{y} = \frac{B_{ij}}{z} = \frac{C1_{ij}}{w} = \frac{C2_{ij}}{q}$$

*onde se lê:*

*a tensão entre as células i e j é igual a cada tipo de distribuição dividido pelo seu grau de participação no sistema*

*Equação 3.9: relação entre as quantidades relativas de modos de distribuição de tensões*

$$x + y + z + w + q = 1$$

*onde se lê:*

*a soma das quantidades relativas do tipo de distribuição de tensões axial, axial de buffer, polar, difusa de tipo 1 e difusa de tipo 2 é igual a um*

*sendo:*

*T<sub>ij</sub> : tensão entre as células i e j*

*A1<sub>ij</sub> : distribuição axial*

*A2<sub>ij</sub> : distribuição axial de buffer*

*B<sub>ij</sub> : distribuição polar*

*C1<sub>ij</sub> : distribuição difusa de tipo*

*C2<sub>ij</sub> : distribuição difusa de tipo 2*

*x, y, z, w, q = quantidades relativas distribuições tipo axial, axial de buffer, polar de buffer, difusa de tipo 1 e difusa de vizinhança tipo 2, respectivamente*

### 3.3.3 Centralidade celular

Uma vez calculadas as tensões, seus resultados parciais são acumulados em cada célula e geram a medida de centralidade celular, ou simplesmente *CentCel*, cuja disponibilidade no banco de dados e visualização em ambiente celular se caracteriza como importante resultado intermediário do modelo. *CentCel* pode ser enunciada matematicamente, como está na equação 3.10 e seguintes.

*Equação 3.10: centralidade celular da célula i na interação I*

$$CentCel_{iI} = x.A1 + y.A2 + z.B + w.C1 + q.C2$$

*onde se lê:*

*centralidade celular da célula i na interação I é igual à soma ponderada dos tipos de distribuição de tensões A1, A2, B, C1 e C2*



ou

*Equação 3.11: detalhamento da centralidade celular da célula i na interação I*

$$\text{CentCel}_{iI} = \{x.(P.Q) . (\text{pref } c_{pq})^{-1}\} + \{y.(P.Q) . [\Delta_{\text{buffer}}(\text{pref } c_{pq})]^{-1}\} + \{z.(P.Q) . [\Delta_{\text{buffer}}(\text{Cel}_{pq})]^{-1}\} + \{w.(P.Q) . [n^{\circ} \text{ random}_w]^{-1}\} + \{q.(P.Q) . [n^{\circ} \text{ random}_k]^{-1}\}$$

onde se lê:

*centralidade celular da célula i na interação I é igual*

*à parcela x do produto dos carregamentos das células p e q multiplicado pelo inverso do número de células do caminho preferencial entre as células p e q, mais a parcela y do produto dos carregamentos das células p e q multiplicado pelo inverso do número de células do buffer do caminho preferencial entre as células p e q, mais a parcela z do produto dos carregamentos das células p e q multiplicado pelo inverso do número de células do buffer das células p e q, mais a parcela q do produto dos carregamentos das células p e q multiplicado pelo inverso do número de células escolhidas de modo difuso, mais a parcela w do produto dos carregamentos das células p e q multiplicado pelo inverso do número de células escolhidas de modo difuso*

sendo:

*CentCel<sub>iI</sub> : centralidade celular da célula i na interação I*

*A1, A2, B, C1 e C2: distribuições de tensões tipo axial, axial de buffer, polar de buffer, difusa de vizinhança de tipo 1 e difusa de vizinhança tipo 2, respectivamente*

*x, y, z, w, q : quantidades relativas de distribuições tipo axial, axial de buffer, polar de buffer, difusa de tipo 1 e difusa de vizinhança de tipo 2, respectivamente*

*P e Q : carregamentos das células p e q*

*p e q : células que realizam interação espacial*

*pref c<sub>pq</sub> : células que integram o caminho preferencial entre p e q*

*Δ<sub>buffer</sub> (pref d<sub>pq</sub>) : células que integram o buffer do caminho preferencial entre p e q*

*Δ<sub>buffer</sub> (Cel<sub>pq</sub>) : células que integram o buffer das células p e q*

*n<sup>o</sup> random<sub>w</sub> : número de células escolhidas de modo difuso para a distribuição vinculada à w*

*n<sup>o</sup> random<sub>k</sub> : número de células escolhidas de modo difuso para a distribuição vinculada à q*

Calculados os valores de *CentCel* para cada interação, o resultado total absoluto (*CentABS*, no modelo) é alcançado através do somatório dos resultados parciais (equação 3.12). Valores relativos podem ser derivados, o que está feito por dois métodos: a) normalizando o valor da centralidade pela centralidade máxima, o que fica denominado de centralidade relativa 1, ou simplesmente *CentR1* (equação 3.13); b) normalizando o valor da centralidade pelo somatório das centralidades de todas as células (o que é denominado de centralidade máxima virtual do sistema) e é alcançado através de uma transformação logarítmica, recebendo o nome de centralidade relativa 2, ou simplesmente *CentR2* (equações 3.14 e 3.15).

Equação 3.12: centralidade celular absoluta da célula  $i$

$$\text{CentCel}_{\text{ABS } i} = \sum_{i=1}^i \text{CentCel}_{iI}$$

onde se lê:

centralidade celular absoluta da célula  $i$  é igual ao somatório das centralidades celulares da célula  $i$  em todas as interações  $I$ , de  $i$  a  $j$ , sendo o primeiro  $i$  igual a 1

sendo:

$\text{CentCel}_{\text{ABS } i}$  : centralidade celular absoluta da célula  $i$   
 $\text{CentCel}_{iI}$  : centralidade celular da célula  $i$  na interação  $I$

Equação 3.13: centralidade celular relativa 1, da célula  $i$

$$\text{CentCel}_{\text{R1 } i} = \text{CentCel}_{\text{A } i} \cdot \text{CentCel}_{\text{Amáx}}^{-1}$$

onde se lê:

centralidade relativa 1 da célula  $i$  é igual à centralidade absoluta da célula  $i$ , multiplicada pelo inverso da centralidade absoluta máxima do sistema

sendo:

$\text{CentCel}_{\text{R1 } i}$  : centralidade celular relativa 1 da célula  
 $\text{CentCel}_{\text{A } i}$  : centralidade celular absoluta da célula  $i$   
 $\text{CentCel}_{\text{Amáx}}$  : centralidade celular absoluta máxima do sistema

Equação 3.14: centralidade celular máxima virtual do sistema

$$\text{CentCel}_{\text{MVS}} = \sum_{i=1}^{ij} \text{CentCel}_{ij}$$

onde se lê:

centralidade celular máxima virtual do sistema é igual ao somatório das centralidades celulares de todas as células em todas as interações  $I$ , de  $i$  a  $j$ , sendo o primeiro  $i$  igual a 1

sendo:

$\text{CentCel}_{\text{MVS}}$  : centralidade celular máxima virtual do sistema  
 $\text{CentCel}_{iI}$  : centralidade celular da célula  $i$  na interação  $I$

Equação 3.15: centralidade celular relativa 2, da célula  $i$

$$\text{CentCel}_{\text{R2 } i} = \log (\text{CentCel}_{\text{A } i} + 1) \cdot \log (\text{CentCel}_{\text{MVS}} + 1)^{-1}$$

onde se lê:

centralidade celular relativa da célula  $i$  é igual ao logaritmo da centralidade celular absoluta da célula  $i$  mais 1, multiplicado pelo inverso do logaritmo da centralidade celular máxima virtual do sistema mais 1

sendo:

$\text{CentCel}_{\text{R2 } i}$  : centralidade celular relativa 2 da célula  
 $\text{CentCel}_{\text{A } i}$  : centralidade celular absoluta da célula  $i$   
 $\text{CentCel}_{\text{MVS}}$  : centralidade celular máxima virtual do sistema

### 3.3.4 Potencial de crescimento celular

Seqüencialmente, é assumida a premissa de que o crescimento urbano se dá prioritariamente em locais com maiores possibilidades de renda, como foi apresentado no subtítulo 2.3, anteriormente; essa renda máxima é conseguida mediante a melhor localização, pelo menor custo de aquisição, com maior possibilidade de construção; o lugar onde se dá o crescimento urbano, bem como sua intensidade, são então calculados pelo seu potencial de crescimento celular, ou simplesmente *PoteCel*.

O potencial de crescimento celular é a diferença entre a máxima *CentCel* da vizinhança e a *CentCel* de cada célula, o que pode implicar em crescimento interno ou externo às células urbanas preexistentes; deste modo, apresentam maior potencial aquelas células que apresentarem menor *CentCel* própria, combinada com maior *CentCel* na vizinhança. Assumindo os valores das centralidades relativas *CentR1* como descritoras, o valor do potencial de crescimento celular é sempre entre zero e 1 (um).

O cálculo do potencial celular como enunciado acima, em função de sua relação com a vizinhança (e não com todo o sistema) opera como uma inovação em relação ao modelo original proposto por Krafta (1994 e 1999), aproximando a operação do funcionamento típico dos modelos baseados em CA; isso equivale a reconhecer: a) que os agentes urbanos envolvidos no processo de produção espacial tomam decisões com conhecimento parcial do sistema, ao invés de instruídos por uma leitura total e completa e/ou então que: b) a busca de locais para novos empreendimentos é influenciada de modo determinante pelo entorno, em cujos limites se realiza a busca por vantagens locais.

O *PoteCel* é elevado a um expoente  $\lambda$  (lambda), de modo a comprimir ou descomprimir seu valor, o que pode ser usado para simular cenários econômicos diferenciados, onde as mesmas diferenças de *CentCel* podem implicar em diferentes valores de *PoteCel*. O parâmetro  $\lambda$  pode ser diferenciado para as células com fenótipo urbano ou natural, permitindo regular independentemente o potencial para o espaço intra-urbano e para o espaço ainda não urbanizado. Como será mostrado adiante, o parâmetro  $\lambda$  assumirá fundamental importância na calibração do modelo, ajustando quantitativamente o crescimento urbano.

O *PoteCel* opera no sistema como uma espécie de “esforço de urbanização”, podendo representar modificações tanto no espaço já urbanizado como no ainda não urbanizado, bem como incidir no espaço público ou privado, que estão agregados no modelo; ocasiona prioritariamente a diminuição das resistências (primeiro as *ResistE*, depois as *ResistI* e depois as *ResistU*) e, uma vez superadas as resistências, causa o aumento do carregamento urbano (*LoadU*), não sendo os carregamentos natural e institucional (*LoadE* e *LoadI*) alterados pelo *PoteCel*; o resultado dessa operação implica no crescimento celular, ou simplesmente *GrowthCel* (equações 3.17 a 3.21, adiante) gerando novos resultados a cada tempo (t), (t+1), (t+2), até (t+n).

Em cada iteração, o número de células que atinge crescimento pode ser parametrizado por um valor  $\rho$  (rô), que é um percentual de células que poderão crescer, variando de zero a 100% das que têm algum potencial; o parâmetro  $\rho$  pode ser interno ou externo, atuando seletivamente sobre células com fenótipo urbano ou natural.

Potencial de crescimento celular (*PoteCel*) e crescimento celular (*GrowthCel*) podem então ser enunciados matematicamente, como está a seguir (equação 3.16):

*Equação 3.16: potencial de crescimento da célula i*

$$PoteCel_i = [(CentCel_{Max \Delta buffer i}) - (CentCel_i)]^\lambda$$

*onde se lê:*

*potencial de crescimento celular da célula i é igual à centralidade celular máxima do buffer da célula i menos a centralidade celular da célula i, elevado ao coeficiente  $\lambda$  (lambda)*

*sendo:*

*PoteCel<sub>i</sub> = potencial de crescimento celular da célula i*  
*CentCel<sub>Max Δbuffer i</sub> = centralidade celular máxima do buffer da célula i*  
*CentCel<sub>i</sub> = centralidade celular da célula i*  
 *$\lambda$  (lambda) : coeficiente de descompressão de PoteCel*

### 3.3.5 Crescimento celular

A equação do crescimento celular (*GrowthCel*) varia de acordo com o genótipo de cada célula, havendo cinco possibilidades aplicadas seqüencialmente, na ordem mostrada pelas equações 3.17 a 3.21, a seguir. No caso de *GrowthCel* resultar em valor negativo, esse resultado é convertido em potencial de crescimento celular (*PoteCel*) positivo e aplicado na seqüência das equações de crescimento; para o caso da superação de limiares (equação 3.21), *GrowthCel* negativo é desprezado.

*Equação 3.17: crescimento celular da célula i quando ResistE ≠ zero*

$$GrowthCel_i = ResistE_i - PoteCel_i$$

*Equação 3.18: crescimento celular da célula i quando ResistI ≠ zero*

$$GrowthCel_i = ResistI_i - PoteCel_i$$

*Equação 3.19: crescimento celular da célula i quando ResistU ≠ zero*

$$GrowthCel_i = ResistU_i - PoteCel_i$$

*Equação 3.20: crescimento celular da célula i quando ResistE + ResistI + ResistU = zero*

$$GrowthCel_i = LoadU_i + PoteCel_i$$

*Equação 3.21: crescimento celular da célula i quando LoadU > Limiar*

$$GrowthCel_i = LoadU_i - PoteCel_i$$

*onde se lê, na Equação 3.17: crescimento celular da célula i é igual à resistência celular natural da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i*  
*onde se lê, na Equação 3.18: crescimento celular da célula i é igual à resistência celular institucional da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i*  
*onde se lê, na Equação 3.19: crescimento celular da célula i é igual à resistência urbana da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i*  
*onde se lê, na Equação 3.20: crescimento celular da célula i é igual ao carregamento urbano da célula i mais o potencial de crescimento celular da célula i*  
*onde se lê, na Equação 3.21: crescimento celular da célula i é igual ao carregamento urbano da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i*

*sendo:*

*GrowthCel<sub>i</sub> : crescimento celular da célula i*  
*ResistE<sub>i</sub> : resistência natural da célula i*  
*ResistU<sub>i</sub> : resistência urbana da célula i*  
*LoadU<sub>i</sub> : carregamento urbano da célula i*  
*PoteCel<sub>i</sub> : potencial de crescimento celular da célula i*

### 3.3.6 Limiar de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos

Como foi enunciado anteriormente, o crescimento celular é obtido por aplicação do potencial de crescimento e pode provocar três efeitos diferenciados: a) diminuição das resistências; b) aumento do carregamento urbano; c) diminuição do carregamento urbano. A diminuição das resistências implica em antropização crescente (no caso de atributos naturais) ou em superação de restrições institucionais ou de incomodidades urbanas; por sua vez, o aumento do carregamento urbano indica intensidades de urbanização crescentes, manifestas de modo agregado por investimentos e melhorias públicas e privadas. Todavia, se essa intensidade de urbanização ultrapassar um valor limiar, o potencial de crescimento da próxima iteração será usado para rebaixar esse valor, ao invés de aumentá-lo; esse excesso de carregamento é registrado como um problema ambiental intra-urbano, gerado e corrigido por mecanismos de *feedback*.

Esse mecanismo, que suspende o crescimento urbano temporariamente e que simula a destinação de investimentos para mitigar os problemas decorrentes do excesso de urbanização, pode ser um importante indicador de sustentabilidade urbana; deste modo, um espaço que registra mais problemas ambientais intra-urbanos (ou que demanda mais investimentos para manter-se sem problemas ambientais urbanos) é menos sustentável que outro que registra menos problemas (ou que demanda menos investimento para manter-se livre de problemas). Esse procedimento é semelhante ao empregado para medir a “pegada ecológica” das cidades (*urban ecological footprint*, como está em Rees e Wackernagel, 1996), com a diferença fundamental de que no caso da pegada ecológica a energia dissipada na cidade provém do entorno não urbanizado, excedendo assim a dimensão geográfica da cidade, enquanto que no modelo a energia dissipada provém do próprio processo de urbanização. Embora um raciocínio não invalide o outro (isto é, pode a cidade dissipar energia exógena e endógena simultaneamente), está sugerido que a solução dos problemas urbanos é endógena, não dependendo da escravização do ambiente circundante ou da destruição da natureza; noutras palavras, se é provável que ao crescimento urbano corresponda consumo de recursos naturais, também é que os problemas decorrentes do processo de urbanização não serão resolvidos com o aumento desse consumo. Como será mostrado adiante (Capítulo 8), esse mecanismo integra a regra padrão de crescimento desenvolvida no modelo, sendo também possível realizar simulações sem o registro e a mitigação de problemas ambientais intra-urbanos; os procedimentos para cálculos estão no subtítulo 3.7.2, adiante.

### 3.3.7 Probabilidades para a distribuição difusa

Como foi anotado anteriormente, a distribuição das tensões que diferenciam as células pela medida de centralidade celular (*CentCel*) e que originam o potencial de desenvolvimento celular (*PoteCel*) pode ocorrer de modo difuso; esse modo de distribuição de tensões se orienta por sorteio probabilístico, conforme os tipos de distribuição denominadas C1 e C2. A distribuição difusa tipo C1 é dedicada à produção formal do espaço urbano, que se orienta pelas demandas das classes econômicas superiores; no ambiente do modelo, a probabilidade de uma célula ser sorteada e receber uma fração de tensão espacial é diretamente proporcional a sua centralidade e inversamente proporcional a sua resistência no tempo anterior. A distribuição difusa tipo C2 é

dedicada à produção informal do espaço urbano, que se orienta pelas demandas das classes econômicas inferiores; no ambiente do modelo, a probabilidade de uma célula ser sorteada e receber uma fração de tensão espacial é inversamente proporcional a sua centralidade e diretamente proporcional a sua resistência no tempo anterior.

Sendo deste modo, trata-se de associar a cada célula um valor que represente as probabilidades, em função das relações com a centralidade e com as resistências, conforme está enunciado nas equações 3.22 e 3.23, a seguir. Uma vez conhecidas as probabilidades de cada célula, um sorteio probabilístico é implementado da seguinte forma: a) normalizando as probabilidades de modo que seu somatório seja igual a 1; b) definindo intervalos numéricos representantes das probabilidades normalizadas, com limite 1; c) gerando um número aleatório de zero a 1; d) extraíndo a célula cujo intervalo numérico contiver o número aleatório gerado. A tabela 3.7, adiante, exemplifica esse procedimento.

*Equação 3.22: probabilidade da célula receber tensão de tipo difuso C1*

$$\text{Prob}_{i[C1]} = (\text{CentCel}_{Ri} - \overline{\text{ResistCel}}_i + 1) / 2$$

*onde se lê:*

*a probabilidade da célula i receber fração de tensão do tipo C1 é igual à centralidade celular relativa da célula i, menos a média aritmética das resistências celulares da célula i, mais um, dividido por dois*

*Equação 3.23: probabilidade da célula receber tensão de tipo difuso C2*

$$\text{Prob}_{i[C2]} = (\overline{\text{ResistCel}}_i - \text{CentCel}_{Ri} + 1) / 2$$

*onde se lê:*

*a probabilidade da célula i receber fração de tensão do tipo C2 é igual à média aritmética das resistências celulares da célula i, menos a centralidade celular relativa da célula i, mais um, dividido por dois*

*sendo, nas equações anteriores:*

*Prob<sub>i[C1]</sub>: probabilidade de a célula i receber fração de tensão do tipo C1*

*Prob<sub>i[C2]</sub>: probabilidade de a célula i receber fração de tensão do tipo C2*

*CentCel<sub>Ri</sub>: centralidade celular relativa da célula i (ver Equação 11)*

*$\overline{\text{ResistCel}}_i$ : média aritmética das resistências da célula i*

**Cálculo de probabilidades para a distribuição difusa**

Cel	CentCel <sub>Ri</sub>	ResistCel <sub>i</sub>	C1			C2		
			Prob <sub>i[C1]</sub>	normalização	Intervalo	Prob <sub>i[C2]</sub>	normalização	Intervalo
Cel1	0,300	0,500	0,400	0,258	0 a 0,257	0,600	0,414	0,586 a 1,000
Cel2	0,500	0,500	0,500	0,322	0,258 a 0,579	0,500	0,345	0,241 a 0,585
Cel3	0,800	0,500	0,650	0,420	0,580 a 1,000	0,350	0,241	0 a 0,240
Total			1,550	1,000		1,450	1,000	

*Tabela 3.7: exemplo de determinação de probabilidades para a distribuição difusa, para um sistema com três células, com valores arbitrários de centralidade e de resistência celulares.*

### 3.3.8 Controle da dimensão temporal

Tempo é considerado um dos componentes estruturais em modelos dinâmicos (Pedrosa e Câmara 2002), particularmente nos modelos de CA, onde o tempo é tomado em unidades discretas e os resultados podem ser alcançados em parcelas e no tempo total de atividade do sistema (White e Engelen, 1997). Conforme concebido até agora, o modelo não informa um tempo real ou específico, admitindo apenas que cada iteração ocorre num tempo  $t+1$  em relação à iteração anterior. Para determinar um tempo real no sistema, pode-se então relacionar o crescimento de um conjunto de iterações obtidas no modelo com determinados crescimento e tempo reais, o que pode ser extraído de um caso empírico (Miller et al., 2004); seqüencialmente, ajustes nos parâmetros podem aproximar cada iteração do modelo da unidade de tempo desejada, sendo simulado assim seu transcurso real; escalas de tempo intermediárias podem ser registradas, possibilitando a análise da evolução simulada e a geração de animações, como será mostrado adiante.

### 3.3.9 Distribuição de tensões e diferentes tipos de crescimento urbano

Como foi enunciado anteriormente (subtítulo 3.3.1), diferentes tipos de distribuição de tensões geram diferentes tipos de crescimento urbano, os quais podem ser do tipo axial, axial de buffer, polar, difuso de tipo 1 e de tipo 2; a proposta do modelo é de trabalhar com composições desses tipos, de modo a especular sobre tecidos urbanos possíveis e a aproximar de casos reais, quando esse for o objetivo da simulação. Para demonstrar os efeitos desses diferentes tipos de distribuições de tensões, está a seguir um experimento que utiliza com exclusividade cada um dos cinco tipos, partindo de uma origem com carregamentos mínimos, representados por dois pontos de mesmo valor e de um *grid* com resistência aleatória (figura 3.9, abaixo), de 26 por 36, com 936 células. Estão realizadas duas seções nos experimentos, sendo a primeira sem e a segunda com a participação das resistências, como aparece nas figuras 3.10 a 3.19, nas quais constam 8 estados de 64 iterações.



Figura 3.9: inputs do experimento para demonstrar o efeitos dos diferentes tipos de distribuição de tensões; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências aleatórias com valor de 1 a 10; c) superposição de carregamentos e resistências.

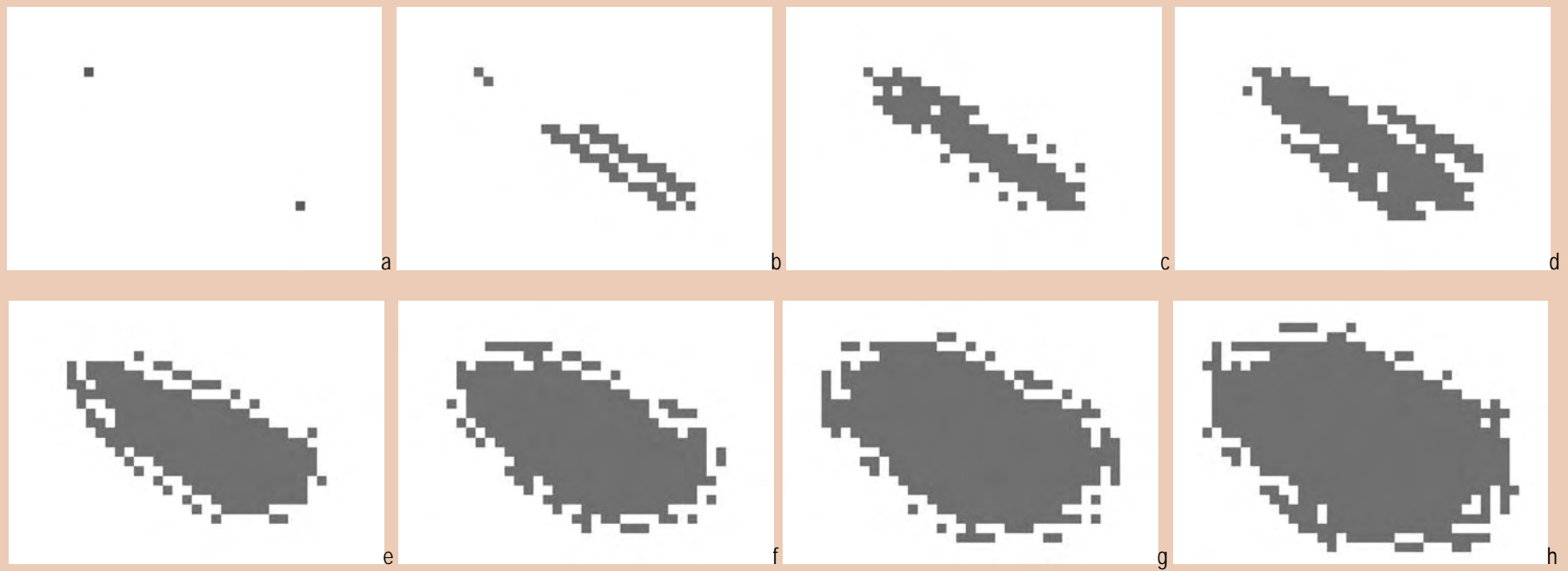


Figura 3.10: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial, sem a presença de resistências.

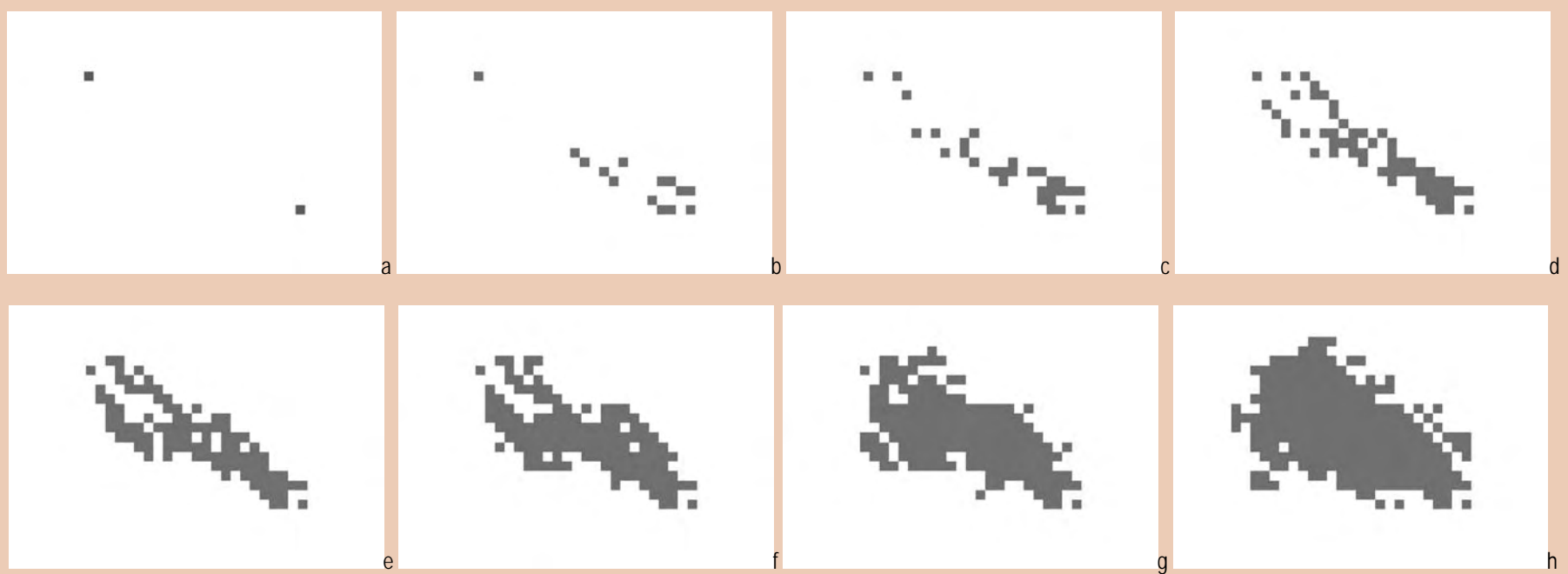


Figura 3.11: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial, com a presença de resistências aleatórias.



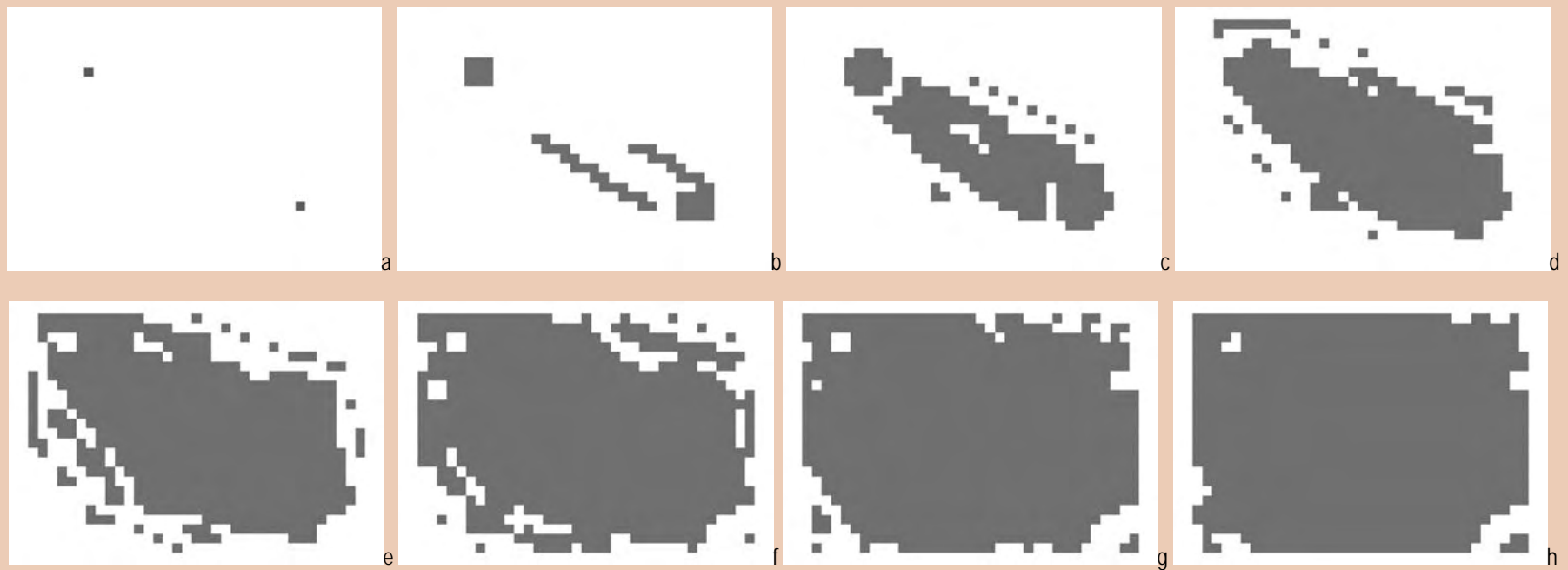


Figura 3.12: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial de buffer, sem a presença de resistências.

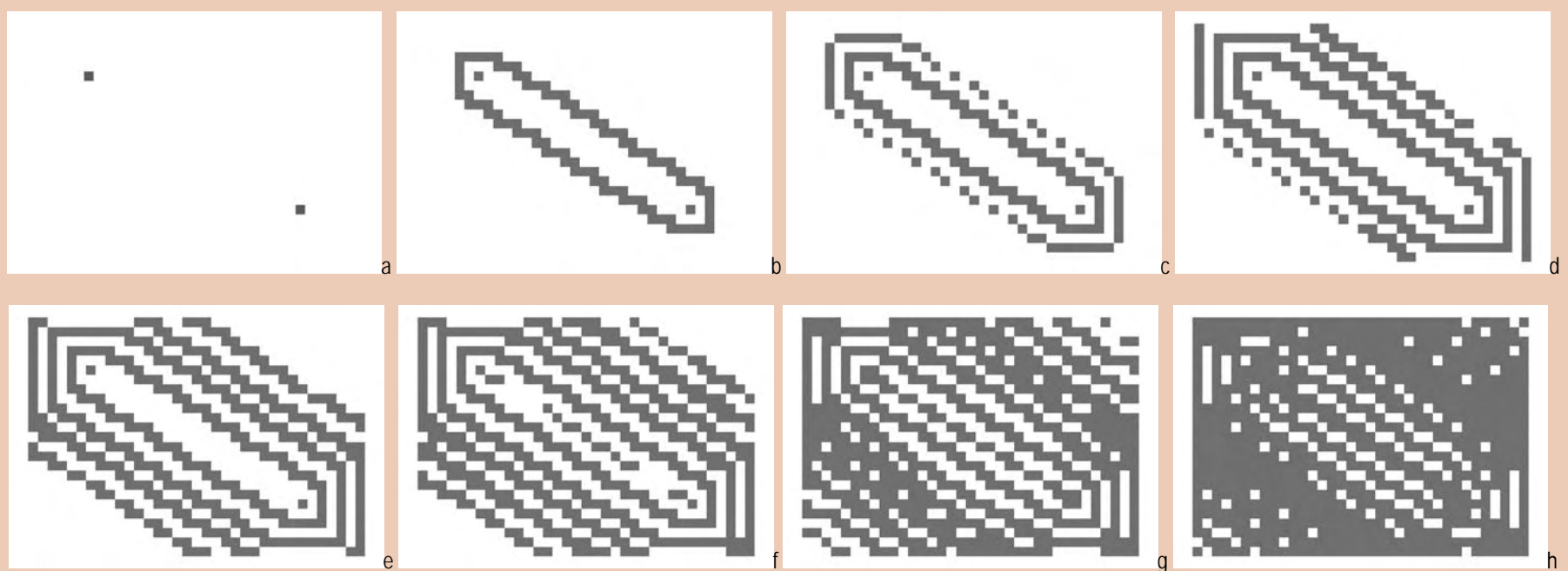


Figura 3.13: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente axial de buffer, com a presença de resistências aleatórias.

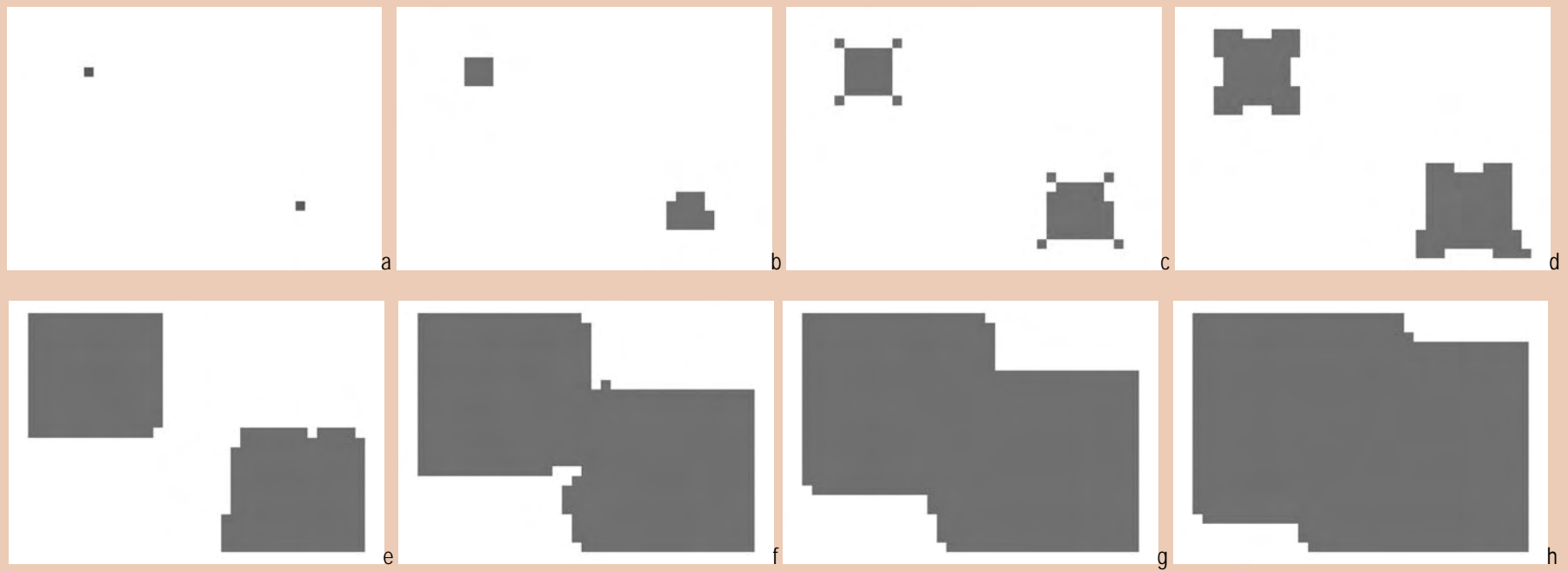


Figura 3.14: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente polar, sem a presença de resistências.

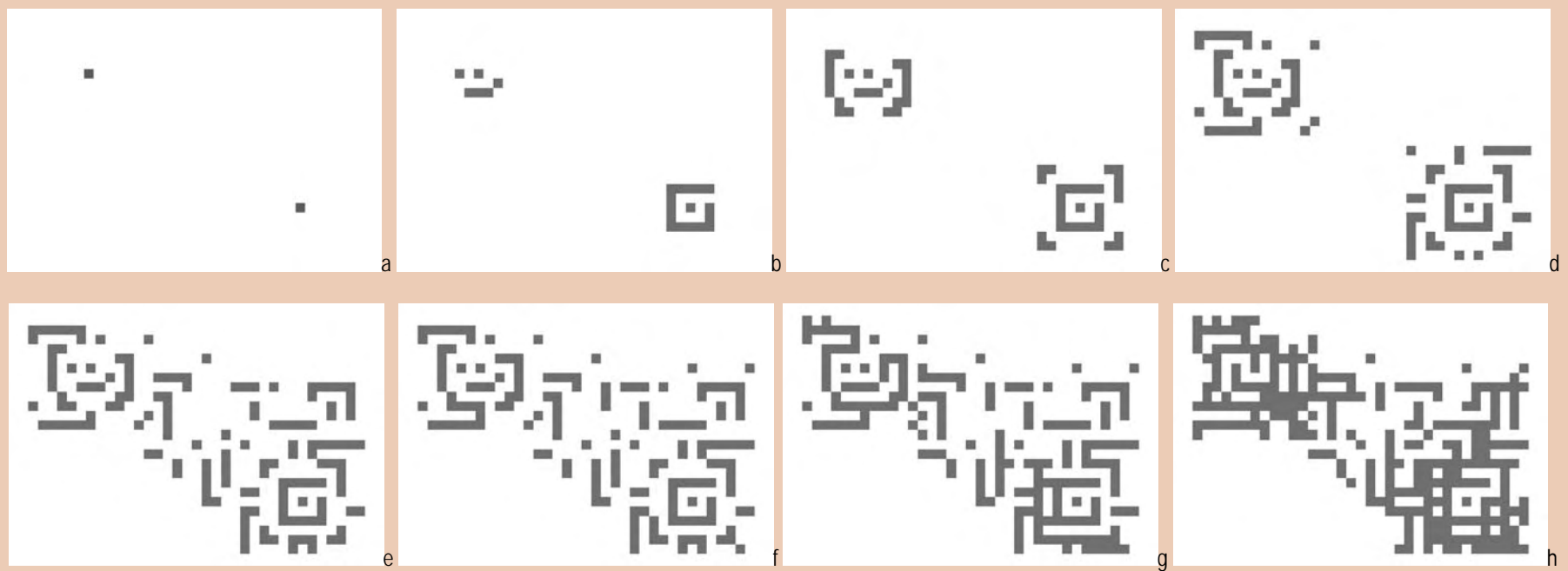


Figura 3.15: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente polar, com a presença de resistências aleatórias.

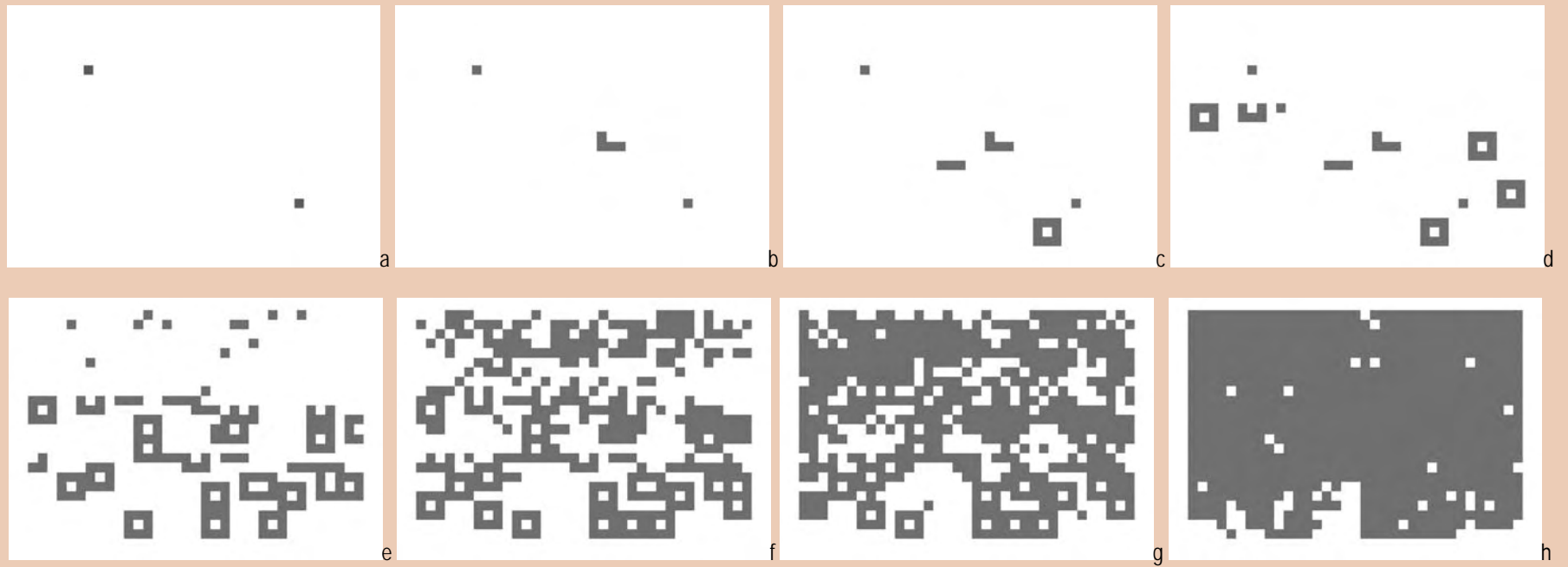


Figura 3.16: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 1, sem a presença de resistências.

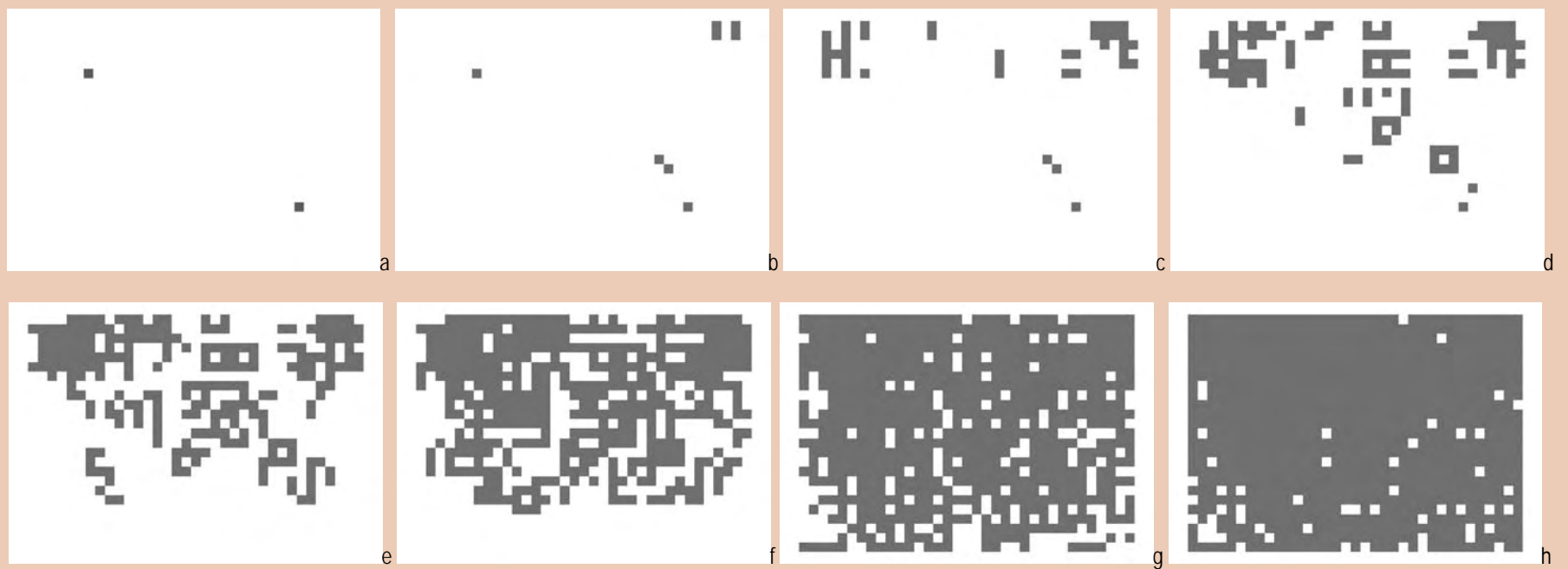


Figura 3.17: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 1, com a presença de resistências aleatórias.

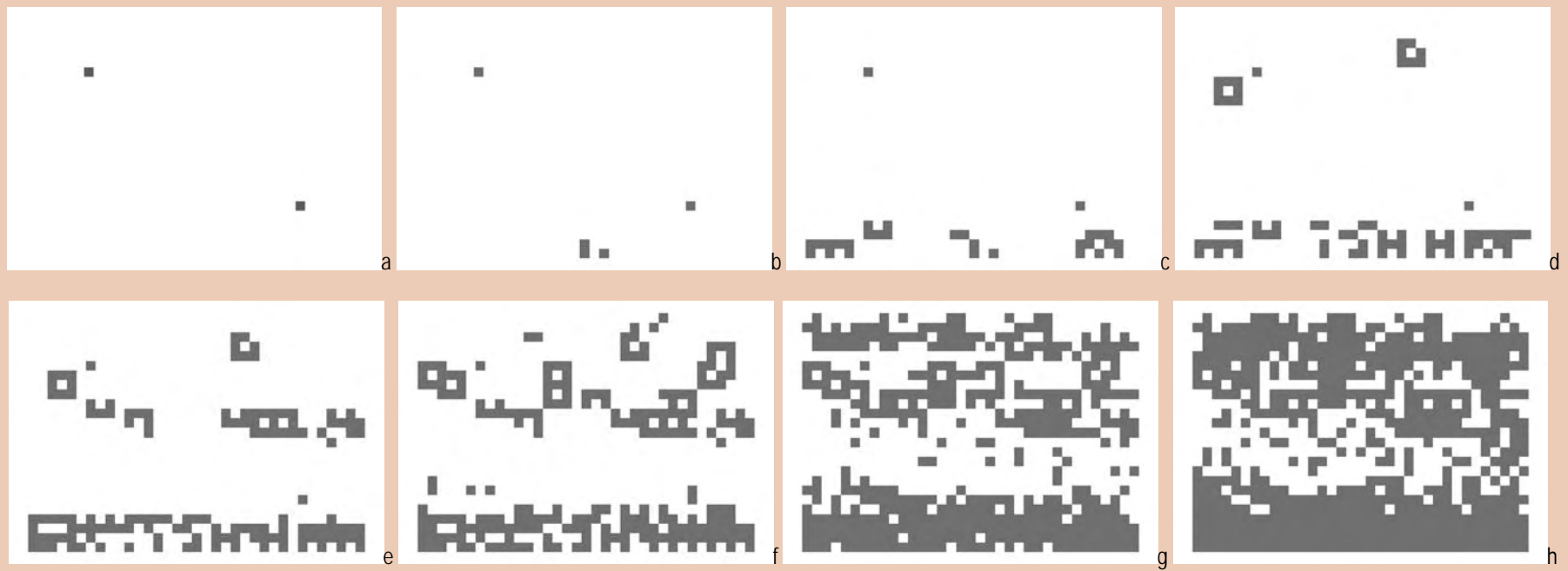


Figura 3.18: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 2, sem a presença de resistências.

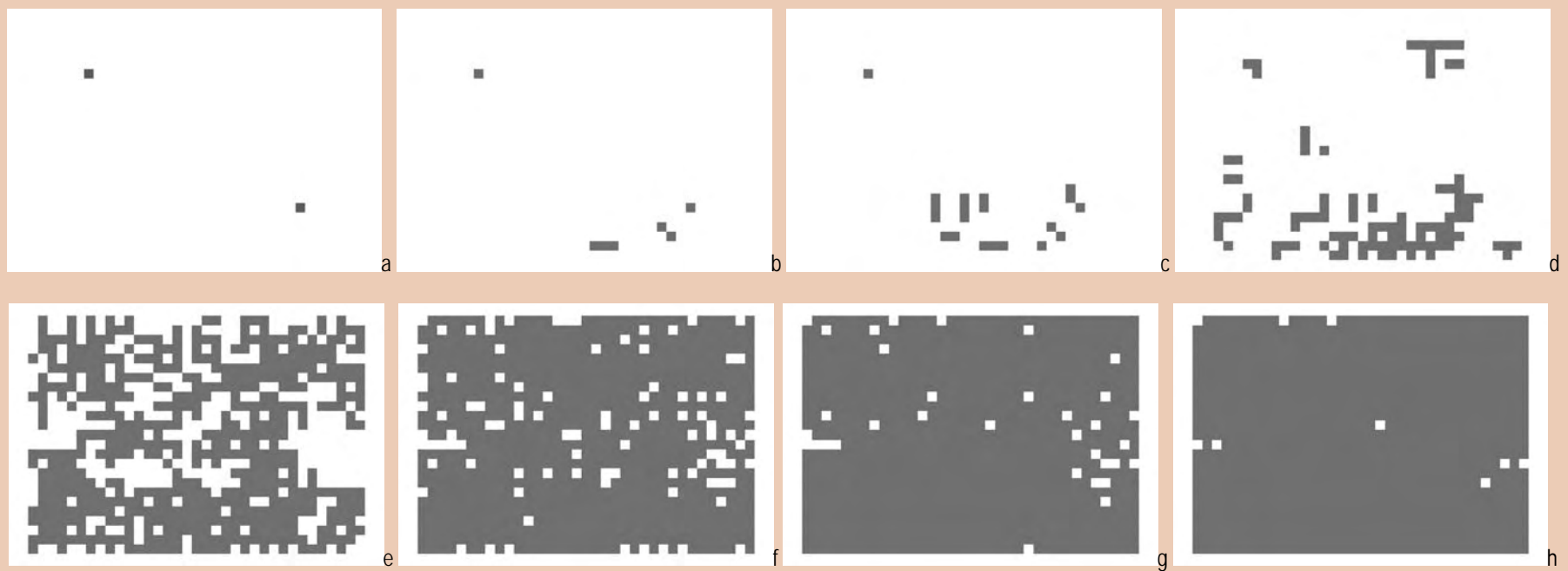


Figura 3.19: crescimento por distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo 2, com a presença de resistências aleatórias.

### 3.4 Parametrização

A parametrização consiste na imputação de valores exógenos que regulam a dinâmica instaurada nas simulações, conforme os objetivos do experimento ou as demandas de calibração (adaptado de Batty, 1976). Estão disponíveis no modelo parâmetros de dois tipos: a) vinculados aos atributos que integram a descrição do território, os quais procuram representar seu comportamento em processos dinâmicos; b) vinculados às regras de crescimento, os quais emulam fenômenos espaciais que interferem no crescimento da cidade. As tabelas 3.8 e 3.9, na seqüência, resumem as possibilidades de parametrização.

Resumo dos parâmetros vinculados aos atributos			
Parâmetro	Função		Espectro
<i>Limiar</i> <sup>9</sup> <i>Threshold</i>	informar o limite de crescimento urbano por aumento de área construída ( <i>LoadU</i> , no modelo)	permite simular o aparecimento de problemas ambientais decorrentes de excesso de urbanização; permite também diferenciar subsistemas urbanos; permite ainda simular fragilidade ambiental e melhoramentos urbanos	0 a 100*
<i>Peso</i> <sup>9</sup> <i>Weight</i>	informar o grau de importância ou peso de cada atributo cadastrado na simulação	permite diferenciar os atributos qualitativamente, de modo independente da localização	1 a 100*
<i>Raio de interação</i> <sup>9</sup> <i>Interaction radius</i>	determinar o raio de alcance para as células que realizam interação espacial; é usado nos processos de interação espacial associados ao cálculo da centralidade celular	oferece a possibilidade de regular o grau de interação, abrangência de fluxos ou pregnância de trocas nas atividades urbanas de produção espacial, emulando o grau de compartimentação total do sistema	1 a ∞
<i>Raio de vizinhança</i> <sup>9</sup> <i>Neighborhood Radius</i>	determinar o raio de alcance para as células que realizam crescimento por diferenciação de centralidade celular; é usado nos processos de CA – autômato celular que realizam o cálculo do potencial de crescimento celular	oferece a possibilidade de ajustar o tamanho da vizinhança no ambiente de CA – autômato celular, emulando a ocorrência de subsistemas locais	1 a ∞
$\alpha$ (alfa) <sup>9</sup>	minimizar ou maximizar a resistência natural de um determinado sistema ou subsistema	permite valorizar iterativamente a ação de resistência dos atributos naturais; permite também individualizar subsistemas naturais, na cidade ou na região, conforme a escala do trabalho	1/10* a 10*
$\alpha'$ (alfa-linha) <sup>9</sup>	minimizar ou maximizar o carregamento natural de um determinado sistema ou subsistema	permite valorizar iterativamente a ação de atração dos atributos naturais; permite também individualizar subsistemas naturais, capazes de gerar tensões de crescimento urbano	1/10* a 10*
$\beta$ (beta)	minimizar ou maximizar a resistência urbana de um determinado sistema ou subsistema	permite valorizar iterativamente a ação de resistência dos atributos urbanos; permite também individualizar subsistemas urbanos, na cidade ou na região, conforme a escala do trabalho	1/10* a 10*
$\beta'$ (beta-linha)	minimizar ou maximizar o carregamento urbano de um determinado sistema ou subsistema	permite valorizar iterativamente a ação de atração dos atributos urbanos; permite também individualizar subsistemas urbanos, capazes de gerar atração ao crescimento urbano	1/10* a 10*
$\Omega$ (omega)	minimizar ou maximizar fatores institucionais referidos como resistências	permite valorizar iterativamente a ação de resistência dos atributos institucionais; permite também ajustar a ação institucional como restritora de crescimento urbano	1/10* a 10*
$\Omega'$ (omega-linha)	minimizar ou maximizar fatores institucionais referidos como carregamentos	permite valorizar iterativamente a ação de atração dos atributos institucionais; permite também ajustar a ação institucional como indutora de crescimento urbano	1/10* a 10*
<i>Impedância</i> <sup>9</sup> <i>I (Impedance)</i>	atribuir valores de impedância às células ou converter os valores de resistência natural e urbana em impedância	permite informar o grau de resistência aos fluxos que ocorrem na simulação, incidindo sobre tendências de conversão de solo não urbanizado em urbanizado	0 a ∞ ou $\Sigma$ das resistências

Tabela 3.8: resumo dos parâmetros vinculados aos atributos; valores com "\*" são recomendados como limites.

<sup>9</sup> Os parâmetros limiar, peso, raios de interação, raios de vizinhança,  $\alpha$  e impedância terão seu funcionamento demonstrado no Capítulo 7, adiante.

Resumo dos parâmetros vinculados às regras de crescimento			
Parâmetro	Função		Espectro
X	especificar a porcentagem de distribuição de tensões axiais	conjuntamente com o valor de y, implementa crescimento estrutural na cidade, na escala global, com particular influência do sistema de fluxos	0 a 100 %
Y	especificar a porcentagem de distribuição de tensões axiais de <i>buffer</i>	conjuntamente com o valor de x, implementa crescimento estrutural na cidade, na escala global, representando uma área de abrangência lateral do sistema axial	0 a 100 %
Z	especificar a porcentagem de distribuição de tensões polares	implementa o crescimento na escala local, visando a área de influência de uma entidade do sistema	0 a 100 %
W	especificar a porcentagem de distribuição de tensões no modo difuso de tipo 1	implementa a promoção imobiliária formal, que “inventa” novos nichos de desenvolvimento e de mercado	0 a 100 %
Q	especificar a porcentagem de distribuição de tensões no modo difuso de tipo 2	implementa a promoção imobiliária informal, de modo dedicado o crescimento periférico, visando locais com menor valor do solo	0 a 100 %
$\rho$ ( $\rho$ ) <sup>10</sup> ext	definir a porcentagem ou a quantidade de células externas à área urbana preexistente que podem ter crescimento a cada iteração	permite ajustar a velocidade de crescimento externo do sistema	0 a 1
$\rho$ ( $\rho$ ) <sup>10</sup> int	definir a porcentagem ou a quantidade de células internas à área urbana preexistente que podem ter crescimento a cada iteração	permite ajustar a velocidade de crescimento interno do sistema	0 a 1
$\lambda$ (lambda) ext	descomprimir ou comprimir os valores de <i>PoteCel</i> de células externas à área urbana preexistente	permite ajustar o valor do potencial de crescimento urbano externo a diferentes cenários econômicos	1/10' a 10'
$\lambda$ (lambda) int	descomprimir ou comprimir os valores de <i>PoteCel</i> de células internas à área urbana preexistente	permite ajustar o valor do potencial de crescimento urbano interno a diferentes cenários econômicos	1/10' a 10'
$\mu$ ( $\mu$ ) <sup>10</sup>	introduzir depreciação no valor das construções, em função do tempo	permite regular o declínio edilício decorrente do perpassar do tempo, bem como promover revitalização	0 a 2'
$\psi$ ( $\psi$ ) <sup>10</sup>	especificar o valor do potencial mínimo a ser aplicado	permite ajustar padrões de formação de vazios urbanos orientados pela retenção fundiária	0 a 1
$\theta$ (teta) <sup>10</sup>	especificar evolução intracelular das resistências naturais	emula crescimento interno de fatores naturais	0' a 100'
P <sup>11</sup>	determinar existência e intensidade de dinâmica intercelular dos atributos naturais	emula um modo simplificada de dinâmica ambiental, por percolação	0 a 100'
PR <sup>11</sup>	determinar o raio de vizinhança onde incide "P"	permite regular o alcance do crescimento por percolação	0 até $\infty$
Limite do buffer axial <sup>10</sup> BLA ( <i>buffer limits axial</i> )	informar o grau de abrangência da distribuição de tensões axiais	emula a abrangência do sistema viário	1 até $\infty$
Limite do <i>buffer</i> polar <sup>11</sup> BLP ( <i>buffer limits polar</i> )	informar o grau de abrangência da distribuição de tensões polares	emula a abrangência dos usos ou funções urbanas que atraem crescimento	1 até $\infty$
K (ka) <sup>10</sup>	especificar a influência da distância entre as células geradoras de tensões	permite simular graus de eficácia de sistema de comunicação entre as células, emulando o sistema de circulação urbana na simulação	1' a 100'
DD <sub>1</sub> ( <i>diffusive draw 1</i> )	regular a quantidade de células que serão sorteadas na distribuição de tensões aleatórias de tipo 1	permite ajustar o modelo ao grau de inovação empresarial a ser usado na simulação,	0 até $\infty$ -- ou %
DD <sub>2</sub> ( <i>diffusive draw 2</i> )	regular a quantidade de células que serão sorteadas na distribuição de tensões aleatórias de tipo 2	permite ajustar o modelo ao grau de participação do mercado informal a ser usado na simulação	0 até $\infty$ -- ou %

Tabela 3.9: resumo dos parâmetros vinculados às regras de crescimento; valores com “\*” são recomendados como limites.

<sup>10</sup> Os parâmetros  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ , limite de *buffers* e K terão seu funcionamento demonstrado no Capítulo 7, adiante

<sup>11</sup> Os parâmetros P e PR integram a regra de crescimento por percolação, que será mostrada no Capítulo 8, adiante.

### 3.5 Obtenção de resultados – *output*

Os resultados emitidos são de dois tipos fundamentais: a) dados tabulares, no formato de tabelas; b) dados gráficos, no formato de *grids*. As tabelas informam as medidas de crescimento urbano, representadas pela conversão de território, problemas ambientais intra-urbanos, fragmentação e compacidade; essas medidas estão detalhadas adiante, no subtítulo 3.7, estando seu formato mostrado no próximo capítulo, o qual apresenta o programa de computador desenvolvido. Os *grids*, cujo formato também está no próximo capítulo, informam os resultados geograficamente localizados e para cada célula do sistema, conforme os seguintes:

- a) Problemas Ambientais Totais (acumulados; *EProbT*, no modelo): referem-se aos problemas ambientais intra-urbanos e são computados a cada iteração em que os limiares de urbanização são superados; trabalham com premissa de que os problemas ambientais são cumulativos e percebidos ao longo do tempo (Christofoletti, 1999), podendo pequenas parcelas isoladas num tempo atual representarem importantes danos ambientais no futuro, conforme sua dinâmica de reincidência (Primack e Rodrigues, 2001);
- b) Problemas Ambientais da Iteração (*EProbi*, no modelo): mostram os problemas ambientais intra-urbanos de cada iteração isoladamente, mediante a superação de limiares; sua acumulação é o mecanismo de determinação dos problemas ambientais totais, conforme alínea anterior; trabalha com a premissa de que problemas ambientais ocorrem acima de determinada capacidade de suporte (Burton, Willians e Jenks, 1998), que pode ser dada tanto por fatores naturais, como por urbanos ou institucionais (por exemplo: impermeabilização máxima do solo, disponibilidade de infra-estrutura ou provisão de equipamentos urbanos, respectivamente);
- c) Valor Institucional (*ValueI*, no modelo): representa a intensidade de fatores institucionais que incidem sobre as células, quer realizem papéis de atração ou de repulsa na dinâmica de crescimento urbano (uma visão geral das possibilidades de ação institucional no planejamento urbano pode ser encontrada em Souza, 2003); sua leitura e interpretação transcreve o grau de interferência institucional sobre o sistema, o que pode representar a ação do estado ou de outras instituições, como ONGs, associações comunitárias, conselhos de desenvolvimento, governos virtuais<sup>12</sup>, e congêneres;
- d) Valor Urbano (*ValueU*, no modelo): representa a intensidade de fatores urbanos que incidem sobre as células, quer realizem papéis de atração ou de repulsa na dinâmica de crescimento urbano; sendo assim, essa grandeza informa sobre o grau de

---

<sup>12</sup> A idéia de governo virtual já conta com algumas experiências internacionais de importância, tanto no aspecto da eficácia, como da equidade e sustentabilidade urbanas (ver por exemplo as iniciativas em Woodberry, Inglaterra [disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk/research/woodberrydown.htm>], os trabalhos para a União Européia denominados "The City of Tomorrow" [disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk/research/propolis.htm>], ou ainda os estudos sobre o futuro de Cambridge, Inglaterra disponível em <http://www.hop.co.uk/cambridgefutures/futures1/index.htm>). Esses trabalhos, mesmo que sob a forma de consulta ou especulação de cenários, representam algum avanço no forma tradicional de fazer planejamento urbano. Embora pouco difundida e discutida no Brasil, a idéia de governo virtual já conta com algumas iniciativas, embora normalmente dedicadas a questões econômicas e administrativas (ver, por exemplo, <http://www.rio.rj.gov.br/cgm/clipping/diario/julho2001/d09/governo.htm>, ou <http://www.an.com.br/2002/jun/15/0joe.htm>, ou ainda <http://www.curitiba.pr.gov.br/pmc2002/asp/home/home.asp> [ todos os sites dessa nota estavam disponíveis em 10/11/2003].

urbanização de modo independente do efeito do fator urbano, que pode ser causador de crescimento ou de seu impedimento (atributos *Mutable* ou *Freezing*, no modelo); esse valor é comparado com o valor natural (*ValueE*, no modelo), sendo que o majoritário informa sobre o fenótipo de cada célula (*CellType*, no modelo);

e) Valor Natural (*ValueE*, no modelo): representa a intensidade de fatores naturais que incidem sobre as células, quer reforcem ou se oponham ao crescimento urbano; esse valor é comparado com o valor urbano (*ValueU*, no modelo), sendo que o majoritário informa sobre o fenótipo de cada célula (*CellType*, no modelo);

f) Tipo de célula (*CellType*, no modelo): é resultado da comparação entre as grandezas anteriores (*ValueU* e *ValueE*, no modelo), informando se predominam os fatores gerados pela lógica de produção espacial da cidade ou pelo nexa da natureza (fenótipo urbano ou natural, respectivamente); ao cabo, a célula ou é ou não é urbana, independentemente da intensidade dessa urbanização, o que é representado por um *grid* booleano no qual as células assumem ou valor 1 ou valor zero; esse *grid* é o construtor da evolução do território urbano, auxiliando na difícil descrição dos limites entre as tradicionais zonas rurais e urbanas; interessa observar conjuntamente esse *output* com as intensidades de valor e carregamento urbanos (*ValueU* e *LoadU*, no modelo), que contêm informações quantitativas;

g) Resistência Institucional (*ResistI*, no modelo): indica a intensidade de presença de fatores institucionais que se opõem à urbanização, os quais precisam ser removidos antes de ocorrer crescimento urbano; essas resistências podem representar necessidades infra-estruturais, indisponibilidade de serviços, insuficiência ou implementação de políticas públicas; podem ainda emular padrões de pensamento dos agentes que interferem na produção espacial, com alguma aproximação com os modelos baseados em agentes (*agent based*, como aparece em Batty, Bin e Thurstain-Goodwin, 1998);

h) Resistência Urbana (*ResistU*, no modelo): indica a intensidade de presença de fatores urbanos que se opõem à urbanização, o que implica em conceber e tornar operacional o fato de que diversos tipos funcionais ou de intensidades de uso do solo urbano repelem a urbanização; implica também em reconhecer que certos produtos da urbanização de um determinado tempo podem operar de modo a dificultar a urbanização de um tempo futuro;

i) Resistência Natural (*ResistE*, no modelo): indica a intensidade de presença de fatores naturais que se opõem à urbanização, os quais precisam ser modificados para que ocorra o crescimento urbano; essa concepção, que é originalmente dedicada a auxiliar na captura da produção tradicional da cidade contemporânea (que modifica intensamente o ambiente preexistente, sendo essa cidade fática que o modelo intenta simular), pode também ser ajustada a fatores naturais que não podem ser removidos e/ou que podem ou devem co-existir com o ambiente da cidade, artificialmente construído (como sugere Houn, 1998), o que é conseguido pelas características de cada atributo (*Removable* e *Freezing*, no modelo);

j) Carregamento Institucional (*LoadI*, no modelo): representa a quantidade de fatores institucionais que podem apresentar a capacidade de atrair urbanização, sendo normalmente implementados através de ações indutivas, por meio de políticas de incentivo à urbanização (Del Rio, 1990);



- k) Carregamento Urbano (*LoadU*, no modelo): indica a quantidade de fatores urbanos que atraem urbanização, sendo normalmente representados pelo uso do solo, tanto pela função que desempenham como por um indicador de intensidade de atividade (tais quais as tradicionais classificações de atividades e sua área construída, respectivamente); embora seja esse o padrão do carregamento urbano, essa grandeza pode também estar associada a valores culturais, históricos, perceptivos, econômicos, políticos, ideológicos ou quaisquer outros espacializáveis, permitindo seu ingresso e sua interpretação no modelo;
- l) Carregamento Natural (*LoadE*, no modelo): representa a quantidade de fatores naturais que atraem urbanização, funcionando de modo similar a um fator urbano, no que tange à capacidade de gerar tensões que carregam esforços de urbanização; todavia, esses fatores só se tornam ativos em função da distância da urbanização mais próxima, que lhe confere um padrão de acessibilidade que permite atrair urbanização (o que é informado pelo *Neighborhood Radius*, no modelo); enquanto essa condição de proximidade não é atendida (o que pode ocorrer a qualquer tempo, com o crescimento urbano), a capacidade de gerar tensões desses fatores fica inativa;
- m) Potencial (*Potential*, no modelo): como o nome sugere, essa grandeza representa a capacidade de transformação potencial das entidades espaciais, determinada pela diferença entre a centralidade de cada célula e a centralidade máxima das células do entorno; esse *output* é gerado através de um mecanismo típico dos modelos de CA, pois o estado de cada célula é definido pelo estado das que integram sua vizinhança, aplicada a regra de mudança; tal como foi apresentado no subtítulo 3.3.4, anteriormente, o potencial admite regulação através dos parâmetros  $\lambda_{int}$  e  $\lambda_{ext}$  (lambda interno e lambda externo), que ajustam sua intensidade e fazem variar a quantidade de crescimento urbano interno e externo à área urbana preexistente;
- n) Centralidade Absoluta (*CentABS*, no modelo): mostra o somatório da distribuição de todos os tipos de tensões a que estão sujeitas as células a cada iteração, sem transformação escalar ou vetorial, tal como são obtidas pela interação entre os carregamentos de cada par de células geradas de tensões de crescimento; dessa grandeza (que tem importante papel em análises comparadas entre sistemas diferentes ou entre tempos diferentes de um mesmo sistema, ou ainda entre o comportamento do mesmo sistema sob condições diferentes), são derivadas as centralidades relativas, conforme está na seqüência;
- o) Centralidade Relativa 1 (*CentR1*, no modelo): indica um valor relativo à distribuição de todos os tipos de tensões a que estão sujeitas as células a cada iteração, sendo derivada da Centralidade Absoluta mediante transformação vetorial (Pillar, 2000) entre variáveis, através de normalização pelo total, resultando uma percentagem do total de tensões disponível na interação, que são absorvidas pelas células, individualmente (o enunciado matemático foi mostrado no subtítulo 3.3.3, anteriormente); esse valor interessa particularmente para comparar desempenhos de entidades do mesmo sistema e dentro do mesmo experimento, pois a transformação utiliza a centralidade absoluta sem transformação escalar (*ibidem*);
- p) Centralidade Relativa 2 (*CentR2*, no modelo): de mesmo modo como o exposto na alínea anterior, indica um valor relativo à distribuição de todos os tipos de tensões a que estão sujeitas as células a cada iteração, sendo derivada da Centralidade Absoluta através de transformação escalar (Pillar, 2000) logarítmica (conforme enunciados matemáticos mostrados no subtítulo

3.3.3, anteriormente); esse recurso, ao diminuir o grau de importância do distanciamento entre os valores absolutos, interessa particularmente para análise comparada entre sistemas diferentes, que normalmente são discrepantes em valores absolutos; considerando que o modelo pode ser usado em casos de cidades reais, esse valor estimula estudos empíricos entre cidades de porte diferente, tanto em extensão como em intensidade de urbanização do território.

### 3.6 Validação do modelo

A validação do modelo de simulação de crescimento pode ser alcançada por procedimentos diferentes, conforme os objetivos dos experimentos: a) quando os objetivos são de especulação teórica ou exploração em casos imaginários; b) quando os objetivos são de representar um determinado crescimento urbano real. No primeiro caso, quando o experimento pretende dar suporte a especulações teóricas, a validação é conseguida heurísticamente, experimentando e acumulando resultados, de modo a observar as reações do modelo, compará-las entre si e com alguma dimensão da realidade que está embutida no experimento (Axelrod, 1997a); exemplos desse caso estão no Capítulo 7, adiante. No segundo caso, quando o experimento pretende representar um caso de crescimento urbano real, a validação é conseguida por calibração do modelo, de modo a aproximar os resultados da simulação ao caso real em estudo; esse processo é implementado mediante a eleição de estados passados da área de estudo, em pelo menos dois tempos progressos, usando como *input* os dados do tempo (  $t - n$  ) e comparando os *outputs* com os dados do tempo (  $t$  ); obtendo sucesso na calibração, isto é, conseguindo uma aproximação suficiente entre simulação e realidade, estará alcançada a validação do modelo; como será demonstrado no Capítulo 5, à frente.

Calibração pode ser feita manual ou automaticamente, sendo freqüentemente os modelos concebidos e postos em operação através de calibração manual, alcançando processos automáticos somente após dedicados esforços de experimentação e de aperfeiçoamento. É exemplo disso o modelo internacionalmente conhecido como Urban Growth Model – UGM (disponível em [http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/project\\_gig.htm](http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/project_gig.htm) ), desenvolvido por Clarke, Hoppen e Gaydos (1997), que incorporou técnicas de tipo Monte Carlo dedicadas à calibração automática somente depois de intensa experiência acumulada pela equipe de trabalho (ibidem); é exemplo também o modelo Dinamica, desenvolvido no Brasil, que até junho de 2003 informava que a automatização da calibração seria uma possibilidade de futuro (como está disponível em <http://www.csr.ufmg.br/dinamica> ). Esse caminho, de realizar manualmente essas operações, é o adotado aqui, como está desenvolvido na seqüência.

A calibração envolve dois procedimentos fundamentais: a) regulagem do tipo e crescimento, que é determinado pela percentagem de distribuição de tensões, tal como foi mostrado anteriormente (subtítulo 3.3.2), que é considerada uma variação qualitativa; b) regulagem da intensidade de crescimento, que é determinada pelo parâmetro  $\lambda$  (lambda; ver subtítulo 3.3.4, anteriormente). Os demais parâmetros são deixados em suas posições padrão, de modo a neutralizar suas influências e permitir a detecção do efeito daqueles que estão sendo modificados.

O primeiro nível de aproximação de resultados entre simulação e realidade é visual, quando são eliminadas regulagens discrepantes e é estabelecido um conjunto de possibilidades de regulagens próximas do desejado; a partir daí um segundo nível de aproximação é implementado, utilizando cinco indicadores: a) indicador de quantidade de células de mesmo fenótipo (*CellType*, no modelo); b) indicador de quantidade células de borda com mesmo fenótipo; c) indicador de localização de células com mesmo fenótipo; d) indicador de semelhança entre os carregamentos urbanos associados a cada célula (*LoadU*, no modelo); e) indicador de semelhança entre as centralidades associadas a cada célula (*CentR1*, no modelo). Os dois primeiros são indicadores de quantidade, o terceiro de quantidade e localização, sendo o quarto e o quinto de quantidade, localização e organização interna, assumido deste modo complexidade crescente. Para os indicadores de quantidade de células total e de borda são utilizadas relações entre número de células que ocorre na situação simulada com o que ocorre na situação real; para os indicadores que consideram localização é utilizada correlação espacial, como está enunciado a seguir.

Considerando que os fenótipos das células são representados em *grids* booleanos (com valores de zero e 1), os indicadores de quantidades podem ser calculados do seguinte modo (equações 3.24 e 3.25):

*Equação 3.24: relação entre células de mesmo fenótipo*

$$Q_{cf} = \frac{\sum_{R=1}^{R=1} cel_{RR}}{\sum_{S=1}^{S=1} cels}$$

*onde se lê:*

*a relação entre a quantidade de células com mesmo fenótipo é igual ao somatório do número de células da referência com valor igual a 1 dividido pelo somatório do número de células da simulação com valor igual 1*

*sendo:*

*Q<sub>cf</sub> : relação entre a quantidade de células com mesmo fenótipo*  
*cel R : células da referência*  
*cel S : células da simulação*

*Equação 3.25: relação entre células de borda de mesmo fenótipo*

$$Q_{cb} = \frac{\sum_{R=1}^{R=1} cel_{RR}}{\sum_{S=1}^{S=1} cels}$$

*onde se lê:*

*a relação entre a quantidade de células de borda com mesmo fenótipo é igual ao somatório do número de células de borda da referência com valor igual a 1 dividido pelo somatório do número de células de borda da simulação com valor igual 1*

*sendo:*

*Q<sub>cb</sub> : relação entre a quantidade de células de borda com mesmo fenótipo*  
*cel R : células da referência*  
*cel S : células da simulação*

No caso das correlações espaciais, os indicadores são calculados mediante a transcrição dos *grids* numa matriz, sendo as células representadas pelas linhas e os atributos pelas colunas, registrando os valores da situação real e os da situação simulada, como está a seguir (tabela 3.10).

Transcrição de <i>grid</i> em matriz				
M =	ID da célula		Valores das células na situação real	Valores das células na simulação
			$Y_1$	$Y_2$
	Cel 1	$X_1$	nº real	nº real
	Cel 2	$X_2$	nº real	nº real
	Cel 3	$X_3$	nº real	nº real
	Cel n	$X_n$	nº real	nº real

Tabela 3.10: modelo genérico de transcrição de *grids* numa matriz.

O cálculo da correlação é realizado a partir da covariância, do seguinte modo (equações 3.26 e 3.27):

Equação 3.26: coeficiente de correlação

$$r = \frac{Cov(Y_1, Y_2)}{\sigma Y_1 \cdot \sigma Y_2}$$

*onde se lê:*

o coeficiente de correlação é igual à covariância dos valores de  $Y_1$  e de  $Y_2$ , dividida pelo produto dos desvios-padrão de  $Y_1$  e de  $Y_2$

*sendo:*

Equação 3.27: covariância entre  $Y_1$  e  $Y_2$

$$Cov(Y_1, Y_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{1i} - \mu Y_1) \cdot (Y_{2i} - \mu Y_2)$$

*onde se lê:*

a covariância entre  $Y_1$  e  $Y_2$  é igual ao inverso do número de unidades em  $Y_1$  e  $Y_2$  multiplicado pelo somatório dos produtos das diferenças entre as variáveis em  $Y_1$  e sua média e das variáveis em  $Y_2$  e sua média

*sendo:*

$r$  : coeficiente de correlação

$Cov$  : covariância

$Y_1$  : valores das células na situação de referência

$Y_2$  : valores das células na situação simulada

$\sigma$  : desvio padrão

$\mu$  : média aritmética

Uma vez calculados os indicadores de semelhança, é construída uma tabela com os valores alcançados, a partir da qual podem ser escolhidos os melhores resultados, representados pelos maiores valores positivos, como está a seguir (tabela 3.11). Um exercício completo e detalhado de calibração está no Capítulo 5, para o caso de Pelotas, RS.

Indicadores de semelhança - Calibração								
ID do caso	Quantidade						Quantidade e localização	Quantidade, localização e estrutura
	Quantidade de células com mesmo fenótipo			Quantidade de células de borda com mesmo fenótipo			Localização de células com mesmo fenótipo	Carregamento e Centralidade
	nº de células de referência	nº de células na simulação	Relação	nº de células de referência	nº de células na simulação	Relação	Correlação espacial entre células com mesmo fenótipo	Correlação espacial entre os carregamentos e entre as centralidades
	cel R	cel S	$Q_{RS}$	cel R	cel S	$Q_{RS}$	$r_{CellType}$	$r_{LoadU} \in r_{CentR1}$
1	nº natural	nº natural	nº racional	nº natural	nº natural	nº racional	$-1 \leq n^0 \leq 1$	$-1 \leq n^0 \leq 1$
2	nº natural	nº natural	nº racional	nº natural	nº natural	nº racional	$-1 \leq n^0 \leq 1$	$-1 \leq n^0 \leq 1$
3	nº natural	nº natural	nº racional	nº natural	nº natural	nº racional	$-1 \leq n^0 \leq 1$	$-1 \leq n^0 \leq 1$
n	nº natural	nº natural	nº racional	nº natural	nº natural	nº racional	$-1 \leq n^0 \leq 1$	$-1 \leq n^0 \leq 1$

Tabela 3.11: resumo dos indicadores de semelhança utilizados na calibração.

### 3.7 Medidas de crescimento celular

A forma resultante do crescimento urbano simulado pode ser medida, de modo a auxiliar na compreensão dos estados assumidos pela cidade e de seu processo de crescimento. Neste trabalho, as medidas estão divididas em dois grupos: a) medidas básicas; b) medidas principais. Conforme as necessidades do experimento, um terceiro grupo de medidas complementares pode ser gerado, manipulando os resultados emitidos pelo modelo<sup>13</sup>.

As medidas básicas são as vinculadas aos modelos de centralidade e potencial, as quais são alcançadas como resultados intermediários, cujos enunciados matemáticos já foram apresentados (subtítulos 3.3.3 e 3.3.4, anteriormente); essas medidas são representadas em *grids* individuais e a cada iteração do modelo, constituindo importante dado para a interpretação dos resultados. As medidas principais são as de conversão de território, de problemas ambientais intra-urbanos, de fragmentação e de compacidade, como estão enunciadas a seguir.

<sup>13</sup> A partir dos *outputs* gráficos, diversas operações podem ser realizadas entre os *grids*, através de álgebra de mapas, derivando novos resultados, como a extração de vazios ou de periferias urbanas, por exemplo; a partir dos *outputs* tabulares também podem ser derivados resultados secundários, como é o caso da entropia e da dimensão fractal do sistema urbano, por exemplo (Torrens e Alberti, 2000; Waddell, 2003).

### 3.7.1 Medida de conversão de território

A medição da conversão de território não urbanizado em urbanizado pode ser realizada mediante acumulações de células com esse tipo de transformação a cada iteração do modelo; o enunciado matemático é o seguinte (equação 3.28):

*Equação 3.28: conversão de território no tempo t+1*

$$CT_{(t+1)} = \sum \text{CellType } E_{(t)} - \sum \text{CellType } E_{(t+1)}$$

*onde se lê:*

*conversão de território no tempo t mais um é igual à diferença entre o total de células com fenótipo natural no tempo t e o total de células com fenótipo natural no tempo t mais um*

*sendo:*

*CT : conversão de território  
CellType E : células com fenótipo natural  
(t+1) : tempo t+1  
(t) : tempo t*

### 3.7.2 Medida de problemas ambientais intra-urbanos

Os problemas ambientais intra-urbanos são registrados para cada célula e para todo o sistema, a cada iteração e em modo acumulado, sendo denominados simplesmente de  $E\text{Probl}$  e  $E\text{Probt}$ , respectivamente. A medida de problemas ambientais intra-urbanos pode ser tomada para análise de dois modos: a) para observar a evolução de localização e de intensidade (nos *grids* a na tabela, respectivamente) dos problemas ambientais de uma alternativa, ao longo do tempo; b) para acumular os problemas durante um determinado tempo de crescimento de uma alternativa espacial e comparar com os resultados de outra alternativa, no mesmo período de tempo. Os enunciados matemáticos são os seguintes (equações 3.29 a 3.32):

*Equação 3.29: problemas ambientais intra-urbanos na célula i na iteração I*

$$E\text{Probl}_{iI} = \text{LoadU}_{iI} - L_i \quad \forall \quad \text{LoadU}_i > L_i$$

*onde se lê:*

*o problema ambiental intra-urbano na célula i na iteração I é igual ao carregamento urbano da célula i na iteração I, menos o limiar da célula i, para todo carregamento urbano maior que o limiar*

Equação 3.30: problemas ambientais intra-urbanos totais na célula  $i$

$$EProbT_i = \sum_{I=1}^I EProbI_{iI}$$

*onde se lê:*

o problema ambiental intra-urbano total (acumulado) na célula  $i$  é igual ao somatório dos problemas ambientais intra-urbanos na célula  $i$  em todas as iterações, a partir da iteração  $I$

Equação 3.31: problemas ambientais intra-urbanos do sistema na iteração  $I$

$$EProbI_{SI} = \sum_{i=1}^{ij} EProbI_{iI}$$

*onde se lê:*

o problema ambiental intra-urbano do sistema na iteração  $I$  é igual ao somatório dos problemas ambientais intra-urbanos de todas as células, de  $i$  a  $j$ , sendo o primeiro  $i$  igual a 1

Equação 3.32: problemas ambientais intra-urbanos totais do sistema

$$EProbT_S = \sum_{I=1}^I EProbI_{SI}$$

*onde se lê:*

o problema ambiental intra-urbano total do sistema é igual ao somatório dos problemas ambientais intra-urbanos em todas as iterações, a partir da iteração  $I$

*sendo, nas equações anteriores:*

$EProbI_{iI}$  : problemas ambientais intra-urbanos na célula  $i$  na iteração  $I$

$LoadU_{iI}$  : carregamento urbano da célula  $i$  na iteração  $I$

$L_i$  : limiar da célula  $i$

$EProbT_i$  : problema ambiental intra-urbano total na célula  $i$

$EProbI_{SI}$  : problema ambiental intra-urbano do sistema na iteração  $I$

$EProbT_S$  : problema ambiental intra-urbano total do sistema

### 3.7.3 Medida de fragmentação

Fragmentação pode ser compreendida como uma medida de dispersão espacial fundada nas entidades que compõem o sistema urbano e nas suas inter-relações, construindo uma interpretação das partes para o todo; a medida equivale ao grau de descolamento ou de não-contigüidade de cada célula em relação a suas vizinhas, computando todas as células urbanas do sistema; um conjunto de pontos num plano ou um *spray* de partículas, totalmente desconectadas, representa a máxima fragmentação, em duas ou três dimensões, respectivamente. Considerando o sistema urbano como um *grid* de células em duas dimensões, a fragmentação pode ser calculada em função da quantidade máxima de células vizinhas e da quantidade efetiva, como está enunciado nas equações 3.33 a 3.36 adiante; esse número máximo de células vizinhas pode ser regulado pelo usuário do modelo, sendo um padrão igual a oito (vizinhança de Moore).

Equação 3.33: fragmentação absoluta do sistema u

$$\text{Frag}_{\text{abs}} [u] = \sum_{i=1}^{ij} \text{Cel}_i \cdot (v_{\text{máx}} - v_{\text{ef}})$$

*onde se lê*  
 fragmentação absoluta do sistema u é igual ao somatório das células multiplicado pela diferença entre o número máximo de vizinhos e o número efetivo de vizinhos de cada célula

*sendo*  
*Frag<sub>abs</sub>* : fragmentação absoluta  
*[u]* : sistema u :: *Cel<sub>i</sub>* : célula i  
*v<sub>máx</sub>* : vizinhança máxima das células  
*v<sub>ef</sub>* : vizinhança efetiva de cada célula

Equação 3.34: fragmentação máxima do sistema u

$$\text{Frag}_{\text{máx}} [u] = \sum_{i=1}^{ij} \text{Cel}_i \cdot v_{\text{máx}}$$

*onde se lê*  
 fragmentação máxima do sistema u é igual ao somatório das células vezes o número máximo de vizinhos

*sendo*  
*Frag<sub>máx</sub>* : fragmentação máxima  
*[u]* : sistema u :: *Cel<sub>i</sub>* : célula i  
*v<sub>máx</sub>* : vizinhança máxima das células

Equação 3.35: fragmentação relativa do sistema u

$$\text{Frag}_{\text{rel}} [u] = \text{Frag}_{\text{abs}} [u] / \text{Frag}_{\text{máx}} [u]$$

*onde se lê*  
 fragmentação relativa do sistema u é igual à fragmentação absoluta dividida pela fragmentação máxima

*sendo*  
*Frag<sub>rel</sub>* = fragmentação relativa  
*[u]* : sistema u  
*Frag<sub>abs</sub>* = fragmentação absoluta  
*Frag<sub>máx</sub>* = fragmentação máxima

Ou, substituindo os valores das fórmulas e chegando ao valor final que interessa ao modelo, confinado entre zero e 1 (um):

Equação 3.36: detalhamento da fragmentação relativa do sistema u

$$\text{Frag}_{\text{rel}} [u] = \left[ \sum_{i=1}^{ij} \text{Cel}_i \cdot (v_{\text{máx}} - v_{\text{ef}}) \right] / \sum_{i=1}^{ij} \text{Cel}_i \cdot v_{\text{máx}}$$

*onde se lê*  
 fragmentação relativa do sistema u é igual ao somatório das células vezes a diferença entre o número máximo de vizinhos e o número efetivo de vizinhos de cada célula, dividido pelo somatório das células vezes o número máximo de vizinhos

*sendo*  
*Frag<sub>rel</sub>* = fragmentação relativa  
*[u]* : sistema u :: *Cel<sub>i</sub>* : célula i  
*v<sub>máx</sub>* : vizinhança máxima das células  
*v<sub>ef</sub>* : vizinhança efetiva de cada célula



### 3.7.4 Medida de compacidade

Compacidade pode ser compreendida como uma medida de dispersão espacial referida diretamente ao conjunto do sistema urbano, considerando a organização coletiva das células, construindo deste modo uma interpretação a partir da composição do conjunto; um círculo atinge a máxima compacidade para uma figura geométrica em duas dimensões (pois tem o menor perímetro para uma determinada superfície) e uma esfera atinge o máximo para três dimensões (pois tem a menor superfície para um dado volume). Considerando o sistema urbano como um *grid* de células em duas dimensões, sua compacidade pode ser calculada pela relação da área com o perímetro, normalizada pela mesma relação obtida num círculo de área idêntica, como está a seguir (equações 3.37 a 3.41).

Equação 3.37: compacidade absoluta

$$\text{Comp}_{\text{abs}} = S / p$$

*onde se lê*

compacidade absoluta é igual à superfície dividida pelo perímetro

*sendo*

$\text{Comp}_{\text{abs}}$  : compacidade absoluta

$S$  : superfície

$p$  : perímetro

Para um *grid* de células com quatro lados iguais, a fórmula assume o seguinte formato:

Equação 3.38: compacidade absoluta num grid celular

$$\text{Comp}_{\text{abs}} [u] = \frac{\sum_{i=1}^{ij} \text{Cel}_i}{\sum_{i=1}^{ij} \text{Cel}_i} \cdot (4 - v_{\text{ef}})$$

*onde se lê*

compacidade absoluta é igual ao somatório de células, dividido pelo produto do somatório da diferença entre o número máximo de vizinhos com face contígua (quatro) e o número efetivo de vizinhos de cada célula

*sendo*

$\text{Comp}_{\text{abs}}$  : compacidade absoluta

$[u]$  : sistema  $u$

$\text{Cel}_i$  : célula  $i$

$v_{\text{máx}}$  : vizinhança máxima das células

$v_{\text{ef}}$  : vizinhança efetiva de cada célula

Equação 3.39: compacidade máxima do sistema  $u$

$$\text{Comp}_{\text{máx } [u]} = \text{Comp}_{\text{abs}} \text{ do círculo de mesma superfície} = \pi R^2 / 2 \pi R = R / 2$$

*onde se lê*

compacidade máxima do sistema  $u$  é igual à compacidade absoluta do círculo de mesma superfície, o que é igual a  $\pi$  multiplicado pelo raio ao quadrado dividido por dois  $\pi$  vezes o raio, o que é igual à metade do raio do círculo de mesma superfície que o sistema  $u$

*sendo*

$\text{Comp}_{\text{máx}}$  : compacidade máxima

$[u]$  : sistema  $u$

$\text{Comp}_{\text{abs}}$  : compacidade absoluta

$R$  = raio do círculo de mesma superfície que o sistema  $u$

Equação 3.40: compacidade relativa do sistema  $u$

$$\text{Comp}_{\text{rel } [u]} = \text{Comp}_{\text{abs}} / \text{Comp}_{\text{máx}}$$

*onde se lê*

compacidade relativa do sistema  $u$  é igual à compacidade absoluta dividida pela compacidade máxima

*sendo*

$\text{Comp}_{\text{rel}}$  : compacidade relativa

$[u]$  : sistema  $u$

$\text{Comp}_{\text{abs}}$  : compacidade absoluta

$\text{Comp}_{\text{máx}}$  : compacidade máxima

Substituindo os valores das fórmulas e chegando ao valor final que interessa ao modelo, a equação assume o seguinte formato:

Equação 3.41: detalhamento da compacidade relativa do sistema  $u$

$$\text{Comp}_{\text{rel } [u]} = [2 (\pi \cdot S_{[u]})^{1/2}] / 2p_{[u]} = \sum_{i=1}^{ij} [2 (\pi \cdot \text{Cel}_i)^{1/2}] / \sum_{i=1}^{ij} (4 - v_{ef})$$

*onde se lê*

compacidade relativa de  $u$  é igual a duas vezes a raiz quadrada de  $\pi$  vezes a superfície  $S$  de  $u$ , dividido pelo perímetro de  $u$ , o que é igual a duas vezes a raiz quadrada de  $\pi$  vezes o somatório de células, dividido pela diferença entre o número máximo de vizinhos e o número efetivo de vizinhos de cada célula

*sendo*

$\text{Comp}_{\text{rel } [u]}$  : compacidade relativa de  $u$

$[u]$  : sistema  $u$

$S_{[u]}$  : superfície de  $u$

$2p_{[u]}$  : perímetro de  $u$

$\text{Cel}_i$  : célula  $i$

$v_{ef}$  : vizinhança efetiva de cada célula

### 3.8 Interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados é feita em linguagem verbal, apoiada em *grids*, tabelas, gráficos e imagens compostas para exemplificar os argumentos. As características específicas das interpretações vão depender dos objetivos da simulação, das hipóteses a perseguir e, particularmente, da complexidade do caso e dos resultados obtidos, que podem tender para padrões de convergência e de divergência que exijam esforços diferenciados de interpretação. Mesmo sendo assim, de um modo geral é esperado que as interpretações dos resultados contenham as seguintes etapas (adaptado de Stevens, 1990, com as sugestões de Cruz e Ribeiro, 2003):

- a) descrições dos resultados: consiste em descrever os resultados em linguagem verbal, destacando os conteúdos principais;
- b) observações de padrões: consiste em identificar padrões de convergência e divergência, com o aumento do aporte de teorias e de participação sistemática do usuário;
- c) interpretação dos resultados: implica em aportar raciocínios e revelar nexos espaciais contidos no conjunto de *outputs*, como num trabalho de recirculação de análises e de sínteses; nessa etapa são desejáveis novas análises espaciais, para o que os recursos de SIG podem ser poderosos auxiliares;
- d) conclusão: trata de responder às inquietações que foram o mote das simulações, preferentemente de modo direto e objetivo;
- e) discussão: permite ao usuário do modelo relacionar os resultados com estruturas complexas do conhecimento, rediscutindo os fundamentos da simulação, aportando teorias e imergindo os resultados em determinadas visões de mundo;
- f) avaliação e reprogramação: consiste em avaliar criticamente o resultado final do experimento e reprogramar a(s) próxima simulação(s).

### 3.9 Resumo dos componentes de grafos e de CA

Segundo Mariani (2001), um grafo básico é formado por um conjunto de nodos e um de arestas; neste modelo, os primeiros são as células e as segundas são as contigüidades da base celular. No caso dos CAs, conforme sugerido por White e Engelen (2000), são cinco os componentes que compõem um CA aplicado ao meio urbano (tabela 3.12, a seguir): a) um *grid*, composto por um conjunto de células; b) um conjunto de estados admissíveis para as células; c) uma definição da vizinhança das células; d) um conjunto de regras de transição; e) uma seqüência discreta de intervalos de tempo.

Resumo dos componentes de CA	
Componente	Solução neste modelo
um <i>grid</i> (ou uma imagem <i>raster</i> processável), composto por um conjunto de células	um <i>grid</i> retangular, com células quadradas de qualquer tamanho, provenientes de uma imagem ou de um desenho vetorial, transformados em <i>grid</i> num ambiente de SIG
estados admitidos para as células	fenótipos natural ou urbano ( <i>CellType</i> ); demais resultados quantitativos ( <i>EProbT</i> , <i>EProbI</i> ; <i>ValueI</i> ; <i>ValueU</i> ; <i>ValueE</i> ; <i>LoadI</i> ; <i>LoadU</i> ; <i>LoadE</i> ; <i>ResistI</i> ; <i>ResistU</i> ; <i>ResistE</i> ; <i>CentR1</i> ; <i>CentR2</i> ; <i>CentABS</i> )
uma definição da vizinhança das células	vizinhança mínima de 8 células (vizinhança de Moore); raios e <i>buffers</i> variáveis
um conjunto de regras de transição que delimitam a transformação de cada célula em função do estado de sua vizinhança	a regra padrão é o potencial de crescimento com limiar ( <i>Threshold Potential</i> ), como foi apresentado neste capítulo; também potencial de crescimento livre ( <i>Free Potential</i> ) e percolação ( <i>Percolation</i> ), como serão apresentadas no Capítulo 7, adiante
uma seqüência discreta de intervalos de tempo, no qual todas as células são atualizadas simultaneamente	cada iteração do modelo representa uma unidade de tempo mínima, sendo que o conjunto de iterações representa o tempo total; o valor desse tempo pode-se aproximar do real, empiricamente

Tabela 3.12: resumo dos componentes de CA.

### 3.10 Fluxogramas geral e detalhado

Um fluxograma geral e outro detalhado do modelo de simulação de crescimento estão nas figuras 3.20 e 3.21, a seguir.

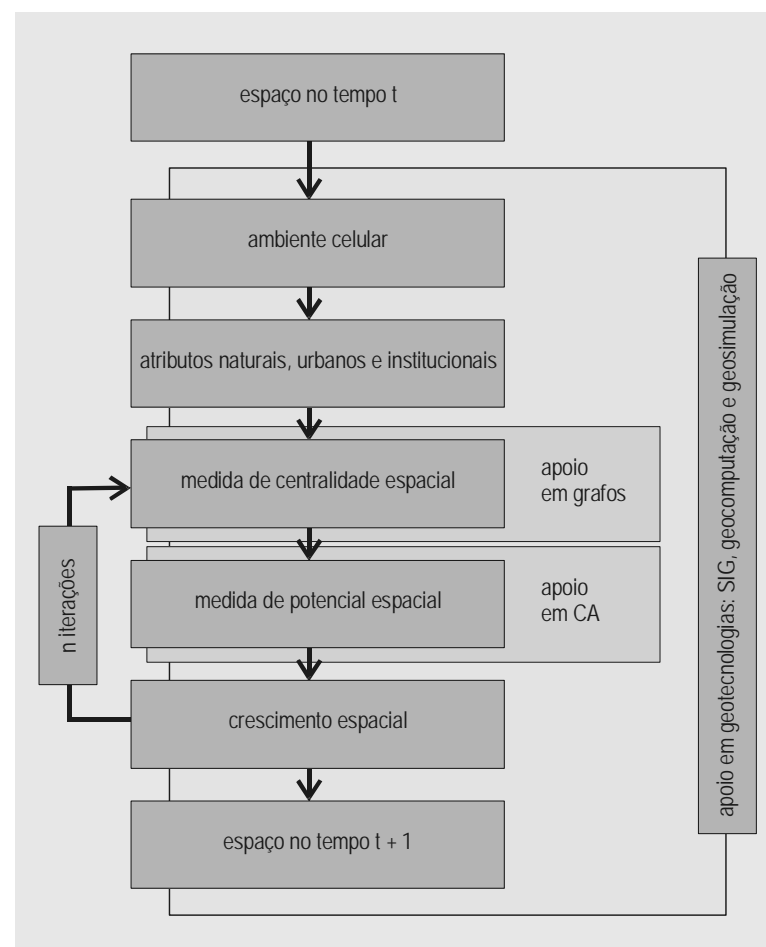
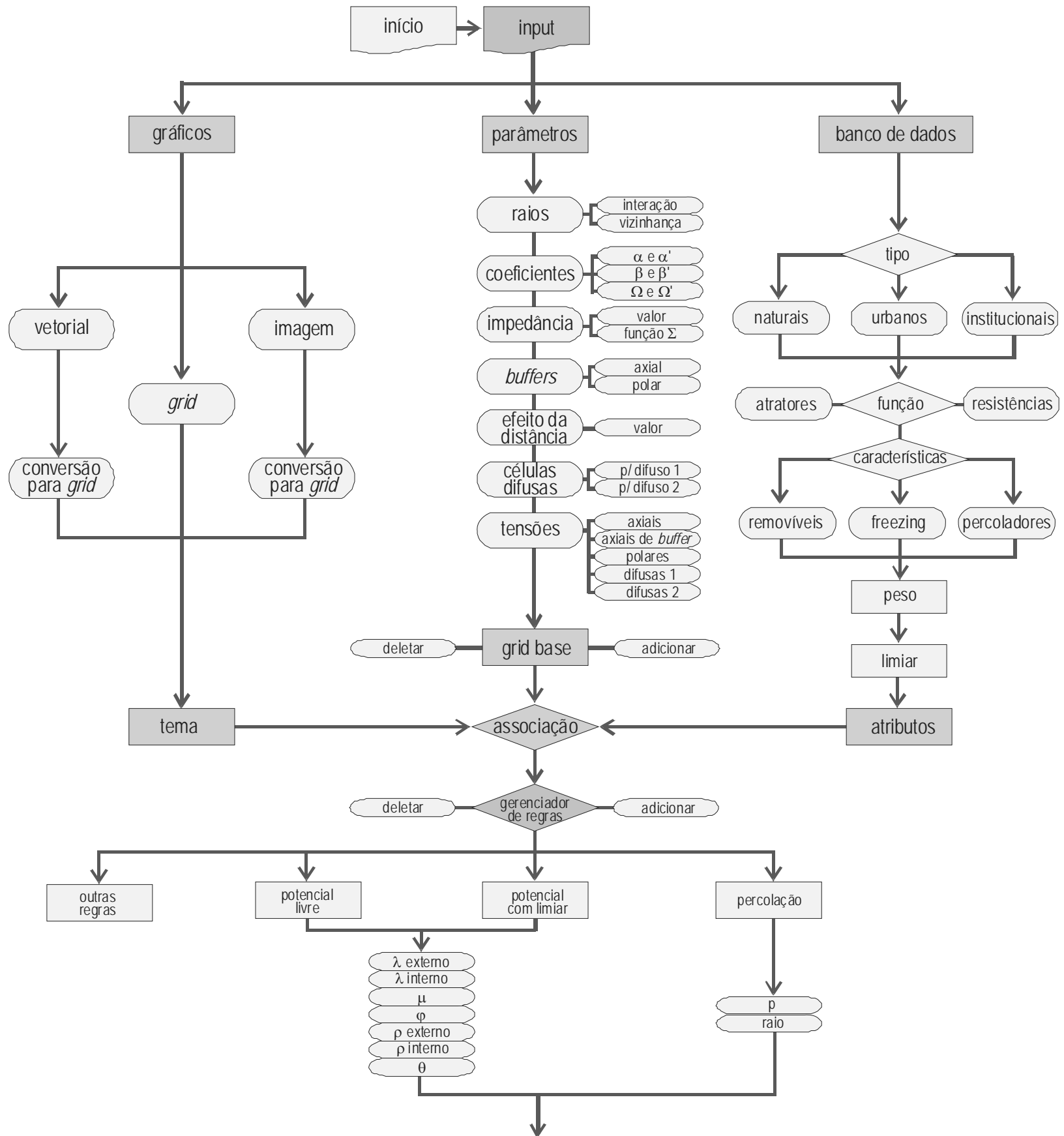


Figura 3.20: fluxograma geral do modelo de simulação de crescimento urbano.



continua na página seguinte

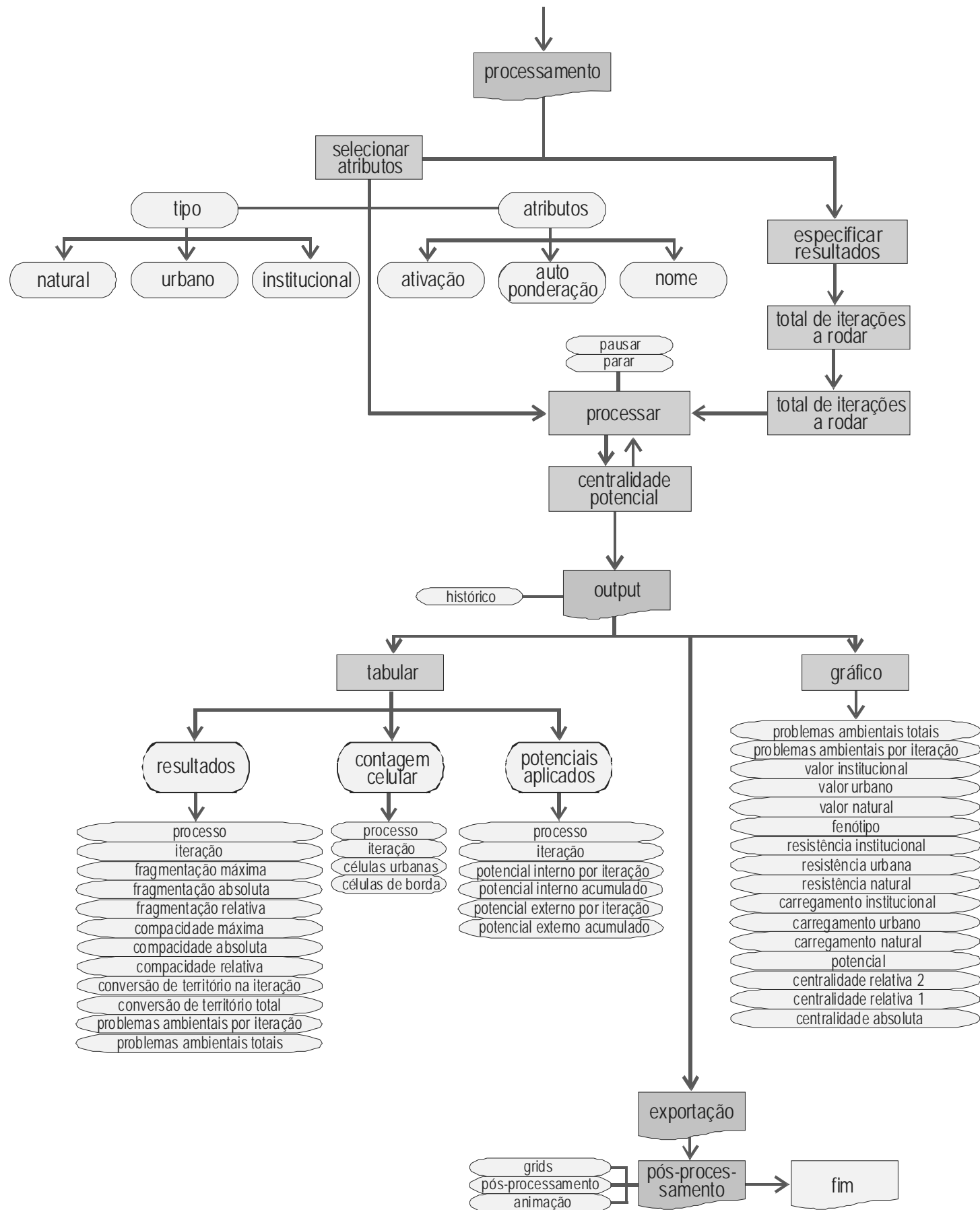


Figura 3.21: fluxograma detalhado do modelo de simulação de crescimento.

### 3.11 Conclusões

O modelo de simulação de crescimento urbano proposto mantém as seguintes características principais:

- a) capacidade de simular crescimento interno e externo à cidade preexistente simultâneos, integrados e interinfluentes, com opção de acionamento e regulagens individuais;
- b) participação de atributos naturais, urbanos e institucionais como subsistemas integrados num mesmo sistema, podendo todos ser ligados ou desligados, ponderados<sup>14</sup> e terem seus efeitos explicitados;
- c) possibilidade de o usuário do modelo poder classificar quaisquer atributos como fatores de atração ou resistência de crescimento urbano (ou indutores ou restritores), quer sejam naturais, urbanos ou institucionais;
- d) permissão da classificação dos atributos de modo que a sua presença numa entidade espacial possa ocasionar a exclusão da entidade do processo de crescimento urbano, sem sua exclusão das suas relações e interações no sistema; permitir também a classificação dos atributos de modo que possam ser consumidos ou não pelo processo de urbanização;
- e) oferecimento da possibilidade de livre vinculação dos atributos às entidades espaciais do modelo, permitindo a co-presença espacial de atributos naturais, urbanos e institucionais, com qualquer intensidade e classificação particular;
- f) permissão do ingresso (*input*) de dados de dados sobre o território a partir de fontes de tipo vetorial (*vector*) e matricial (*raster*); essa flexibilidade é particularmente importante considerando que a maior parte dos dados espaciais urbanos é tradicionalmente registrada no modo vetorial (como nos cadastros urbanos) e que a maior parte dos dados naturais é freqüentemente construída e registrada no modo matricial (como nas interpretações de imagens de satélite);
- g) oferecimento da possibilidade de entitação espacial em escala (ou resolução) definida pelo usuário, considerando a escala de interesse do experimento, o detalhe das informações disponíveis e a capacidade computacional disponível para a simulação;
- h) inclusão de limiares para o crescimento urbano, sendo a sua superação assumida como problema ambiental intra-urbano; ao mesmo tempo, reconhecimento da cidade como um ecossistema apto não só para gerar problemas ambientais como também para corrigi-los, podendo o processo de produção do espaço urbano assumir esses encargos de modo simultâneo no tempo, porém em localizações diferentes;
- i) inclusão de processos de retroalimentação (*feedback*) positiva e negativa integrados e simultâneos, sendo os primeiros alcançados antes da superação de limiares de crescimento e os segundos depois de sua superação;
- j) inclusão de mecanismos de diferenciação do sistema em escala geral (ou de área urbana total), com o apoio em teorias e técnicas de redes e de grafos (Salingaros, 1998; Mariani, 2001), diferenciando o território com apoio no modelo de Centralidade

---

<sup>14</sup> Os mecanismos de ponderação aparecerão no Capítulo 7, adiante.

(proposto originalmente por Krafta, 1991 e 1994); esses mecanismos implicam em recursos de processamento tipicamente vetorial, integrados a recursos de processamento do tipo matricial, através de CA;

k) inclusão de mecanismos de diferenciação espacial do sistema urbano em escala local (ou de vizinhança urbana), com o apoio em teorias e técnicas de CA, a partir da reedição e adaptação do modelo de Potencial (originalmente proposto por Krafta, 1991 e 1994), reescrito para o ambiente celular e para operar simultaneamente com o crescimento urbano interno e externo à cidade preexistente, com a participação de atributos naturais, urbanos e institucionais no mesmo sistema; esses mecanismos implicam em recursos de processamento matricial (típico dos modelos baseados em CA), integrados a recursos de processamento do tipo vetorial, através de grafos;

l) construção de um modelo capaz de simular crescimento de modo adaptado à quantidade de conhecimento disponível em cada experimento, interagindo com o usuário e lhe permitindo escolher ou eleger as variáveis (ou dados descritivos do território) a participarem das simulações;

m) oferecimento de um conjunto de parâmetros que permitam realizar as regulagens e calibrações necessárias aos interesses especulativos ou aplicados das simulações, facilitando a legitimação do modelo de simulação de crescimento;

n) inclusão da variável tempo mediante a concepção dinâmica e iterativa do modelo, ajustável em duração total e explicitação de estados intermediários pelo usuário;

o) extração automática de dados quantitativos que permitam ao usuário mensurar o crescimento simulado no tempo especificado, informando sobre cada estado e sobre resultados acumulados.

### 3.12 Epílogo do capítulo 3

Neste capítulo me dediquei a construir um modelo de simulação de crescimento urbano fundado em grafos e CA, considerando integradamente atributos naturais, urbanos e institucionais, de modo a representar a dinâmica urbana e a mostrar ao mesmo tempo a evolução do espaço convertido para o uso urbano, as distribuições dos estoques construídos, os remanescentes naturais e os problemas ambientais intra-urbanos; isso foi feito através da explicitação das possibilidades de *input*, parametrização, processamento, *output*, validação e interpretação de resultados, apresentando o argumento do modelo em linguagem verbal e matemática.



Mais adiante aplicarei o modelo num caso real, bem como outros recursos de simulação serão desenvolvidos (capítulos 5, 6, 7 e 8); antes disso, mostrarei a implementação do modelo crescimento urbano através como um *software*, o que é assunto do próximo capítulo.



## 4 O *software* SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>

No capítulo anterior apresentei o modelo de simulação de crescimento urbano desenvolvido nesta investigação, explicitando sua concepção lógica e suas funções fundamentais. Neste capítulo mostro a implementação do modelo como um *software*, construindo um aplicativo que utiliza uma plataforma de SIG – sistema de informações geográficas, registrando o modo como os recursos aparecem na interface com o usuário e como são emitidos os resultados das simulações.

### 4.1 Introdução

O modelo de simulação de crescimento urbano está implementado num ambiente de SIG, operando como uma extensão sobre o programa ArcView<sup>15</sup>, com o nome de SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>. A apresentação do SACI como um *software*<sup>16</sup> está estruturada pelos componentes de estrutura, interface, *input*, parametrização, processamento, *output* e interpretação dos resultados, como está nos subtítulos adiante (o Anexo 1 contém o *software* completo, que pode ser conhecido diretamente no computador).

### 4.2 Estrutura e interface principal

O SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup> está escrito mediante a integração da linguagem de programação C++ com o *software* ArcView, acrescido da extensão Spatial Analyst, que se encarregam de implementar as demandas do modelo de simulação de crescimento e de construir a interface de comunicação com o usuário, respectivamente. A estrutura do SACI vale-se do modo de organização do ArcView, funcionando cada seção de simulações como um arquivo chamado saci.apr. Esse arquivo chama um projeto do ArcView, que apresenta os seguintes componentes: a) Views (componentes gráficos); b) Tables (tabelas); c) Charts (gráficos); d) Layouts (montagens para impressão); e) Scripts (rotinas de programação em Avenue, linguagem nativa); f) 3D Scenes (cenas em 3D); g) Dialogs (janelas de diálogo para acessar o banco de dados). A figura 4.1 mostra, em esquema, a integração com o ArcView e os componentes de sua estrutura que são utilizados no SACI.

---

<sup>15</sup> ArcView é marca registrada da ESRI - Environment Systems Research Institute, devendo ser utilizada a versão 3.2 ou superior; o SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup> exige a instalação da extensão Spatial Analyst, também marca registrada da ESRI. Os principais motivos da escolha desse *software* são os seguintes: a) possibilidade de programação integrada em C++; b) facilidade de uso, disponibilidade de licença e de manuais no local de trabalho do autor; c) disponibilidade de recursos nativos suficientes para as demandas do modelo.

<sup>16</sup> O SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup> está transcrito como um *software* através da participação do programador Juliano Chaves Granero, que assumiu a tarefa de escrever o programa, tendo iniciado os trabalhos através do “Projeto de Graduação submetido como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação”, na Universidade Católica de Pelotas, com o título “Simulador da dinâmica espacial com base em células urbanas e ambientais” sob a orientação dos professores Dr. Marilton Sanchotene de Aguiar, MSc Ricardo Andrade Cava e MSc Maurício Couto Polidori (autor desta tese). Atualmente o *software* está concluído, em versão restrita ao trabalho de doutorado do autor (Polidori, 2002), sendo a versão final divulgada somente após a defesa da tese.

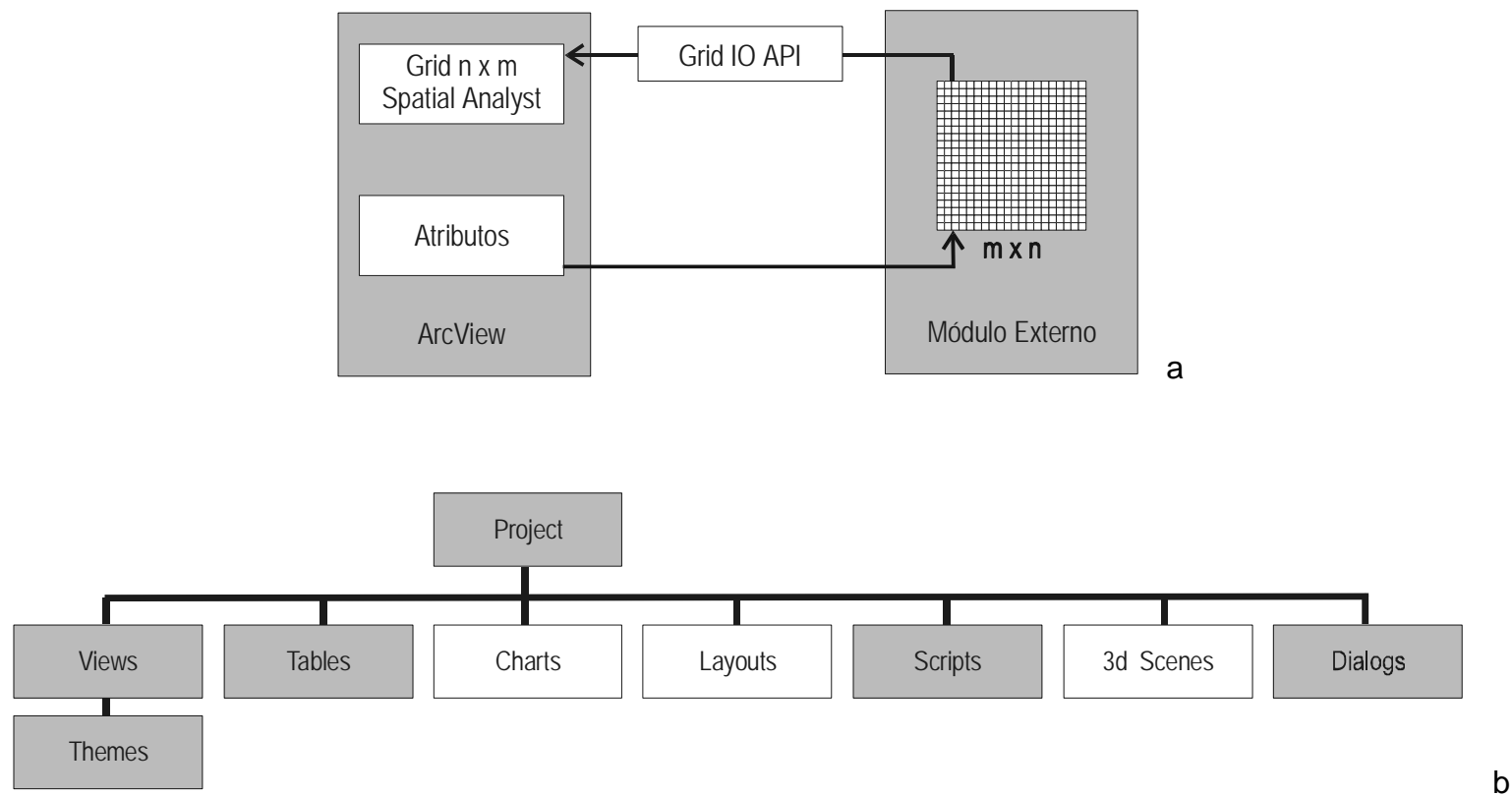


Figura 4.1: a) estrutura de integração do ArcView com o módulo externo em C++; b) organização de um projeto no ArcView; em laranja os componentes utilizados na concepção do SACI.

No SACI são utilizados cinco componentes de um projeto do ArcView, dependendo o uso dos demais dos interesses do usuário, do seguinte modo:

- Views:** integram os *inputs* e *outputs* gráficos, servindo para representar os dados de entrada (numa View padronizada com o nome de *setup*) e para representar os resultados das iterações da simulação (figura 4.2a; 4.2b; 4.2c);
- Themes:** também integram os *inputs* e *outputs* gráficos, sendo utilizados para ingressar com os temas que representam os atributos e para representar os diferentes tipos de resultados para cada iteração (figura 4.2a; 4.2b);
- Tables:** mostram os atributos, a contagem automática de células, os quantitativos de *output*, as estatísticas de potencial e as regras aplicadas (figura 4.2d);
- Scripts:** contêm os programas em Avenue que foram escritos para promover a comunicação do ArcView com o módulo de processamento externo, em C++ (figura 4.2e);
- Dialogs:** lista as janelas de diálogo utilizadas as funções do SACI (figura 4.2f).

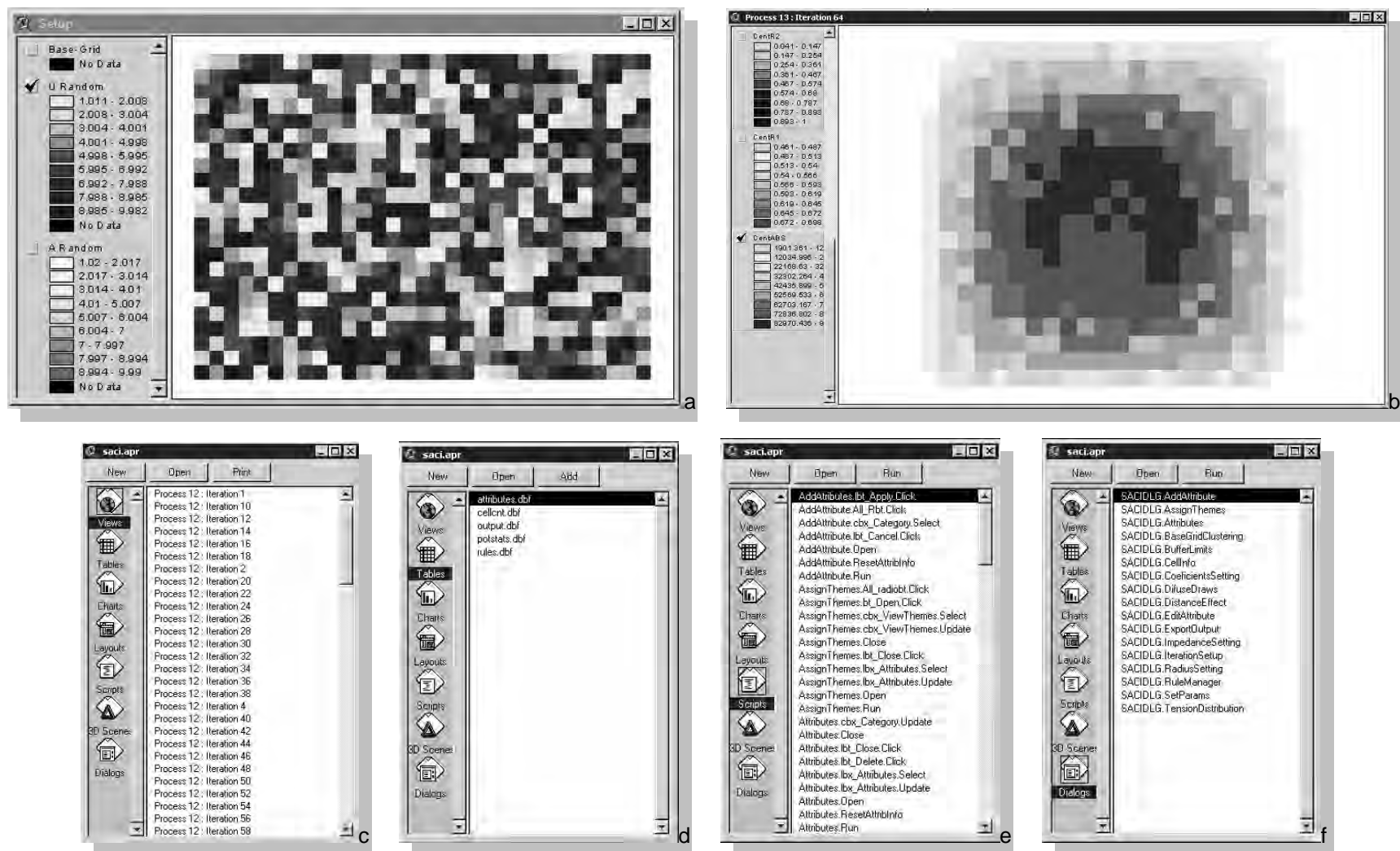


Figura 4.2: componentes da estrutura do ArcView utilizados pelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>; a) View setup, com input gráfico; b) View com output gráfico; c) saci.apr, com a lista de view de output gráfico (iterations); d) saci.apr, com a lista de tables; e) saci.apr, com a lista de scripts; f) saci.apr, com a lista de dialogs.

A interface principal do SACI aparece através do menu superior do ArcView (ver a figura 4.3, adiante), com doze funções<sup>17</sup>:

- atributos (*Attributes*): especifica os atributos que poderão fazer parte das simulações;
- gerenciador de regras (*Rule Manager*): elege e ativa / desativa a(s) regra(s) de crescimento e indica os seus parâmetros;
- criar o *grid* base (*Create Base-Grid*): cria o *grid* de comunicação entre o ArcView e o módulo de processamento em C++;
- apagar o *grid* base (*Delete Base-Grid*): apaga o *grid* de comunicação entre o ArcView e o módulo de processamento em C++;

<sup>17</sup> O *software* SACI está produzido em língua inglesa, de modo a se ajustar ao programa de SIG ArcView, que só é disponível nessa língua, bem como para facilitar seu uso, pois as expressões de SIG em língua brasileira são incomuns.

- e) associar temas a atributos (*Assign Themes to Attributes*): associa determinado atributo, que aparece no banco de dados, a um determinado *grid*, que aparece como um tema gráfico;
- f) especificar raios (*Radius Setting*): ajusta os raios de interação e de vizinhança, que são usados nos cálculos de centralidade e potencial;
- g) especificar coeficientes (*Coeficients Setting*): ajusta os coeficientes de valorização dos atributos naturais, urbanos e institucionais;
- h) especificar impedância (*Impedance Settings*): especifica a impedância celular, que é utilizada na busca de caminhos preferenciais;
- i) limite dos *buffers* (*Buffer Limits*): informa as áreas de abrangência do sistema axial e polar, que são usadas na distribuição de tensões;
- j) efeito da distância (*Distance Effect*): regula o efeito de distância, modificando indiretamente o valor das tensões em função do afastamento de cada par de células;
- k) efeito difuso (*Diffusive Draw*): informa a quantidade de células a serem sorteadas para as distribuições de tensões difusas, a cada interação entre um par de células;
- l) distribuição de tensões (*Tension Distribution*): regula a participação de cada tipo de distribuição de tensão (axial, axial de buffer, polar, difuso 1 e difuso 2), que são usadas para calcular a centralidade.



Figura 4.3: interface principal do SACI.

### 4.3 Entrada de dados – *input*

O SACI realiza a entrada de atributos alfanuméricos mediante o uso de janelas dedicadas, construindo interativamente o banco de dados que informa sobre os atributos que podem participar das simulações. O modelo oferece ao usuário a plena possibilidade de inclusão, caracterização e exclusão de atributos, conforme os seus interesses e o conhecimento disponível sobre o caso a modelar. As interfaces de *input* de atributos estão na figura 4.4, abaixo.

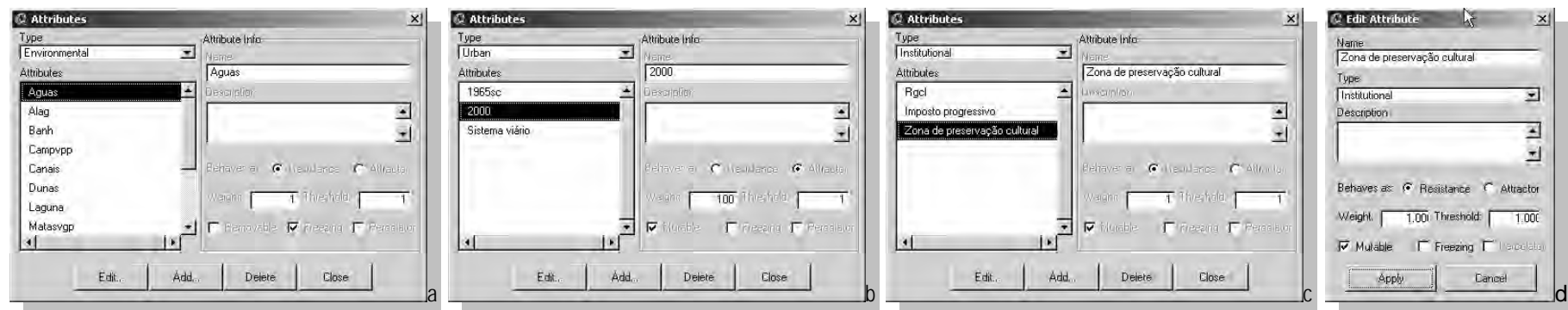


Figura 4.4: janelas de *input* de atributos; a) entrada de atributos naturais; b) entrada de atributos urbanos; c) entrada de atributos institucionais; b) exemplo de janela de edição de atributo já cadastrado.

O *input* gráfico pode partir de dados em formato *raster* ou vetorial, com um tema para cada atributo alfanumérico. No caso *raster*, que é mais comum na descrição de fatores naturais (particularmente os mapeados por análise de imagem de satélite), é necessário compatibilizar os limites e a resolução dos *grids*, tornando possíveis as operações entre os diferentes temas; no caso vetorial, o qual é comum em cadastros urbanos, é necessário converter os dados para *grid*, mantendo sempre as mesmas dimensões e tamanho de células em todos os temas. Para realizar a comunicação entre o ArcView o módulo em C++, encarregado do processamento do modelo, é construído um *grid* base (*Base-Grid*), que acumula todos os dados numa matriz auxiliar; feito isso, os atributos alfanuméricos podem ser associados aos *inputs* gráficos, através da função associar (*Assign*). A figura 4.5, abaixo, mostra as janelas de criação do *Base-Grid* e da função *Assign*; a figura 4.6, adiante, exemplifica a conversão para *grids*.

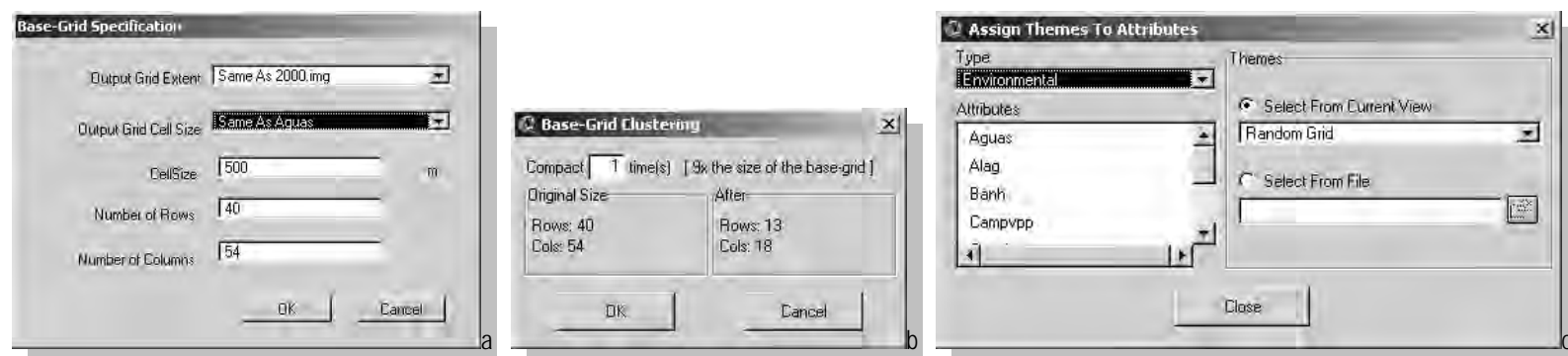


Figura 4.5: a) criação do *Base-Grid*; b) compactação do *Base-Grid*; c) função *Assign*.

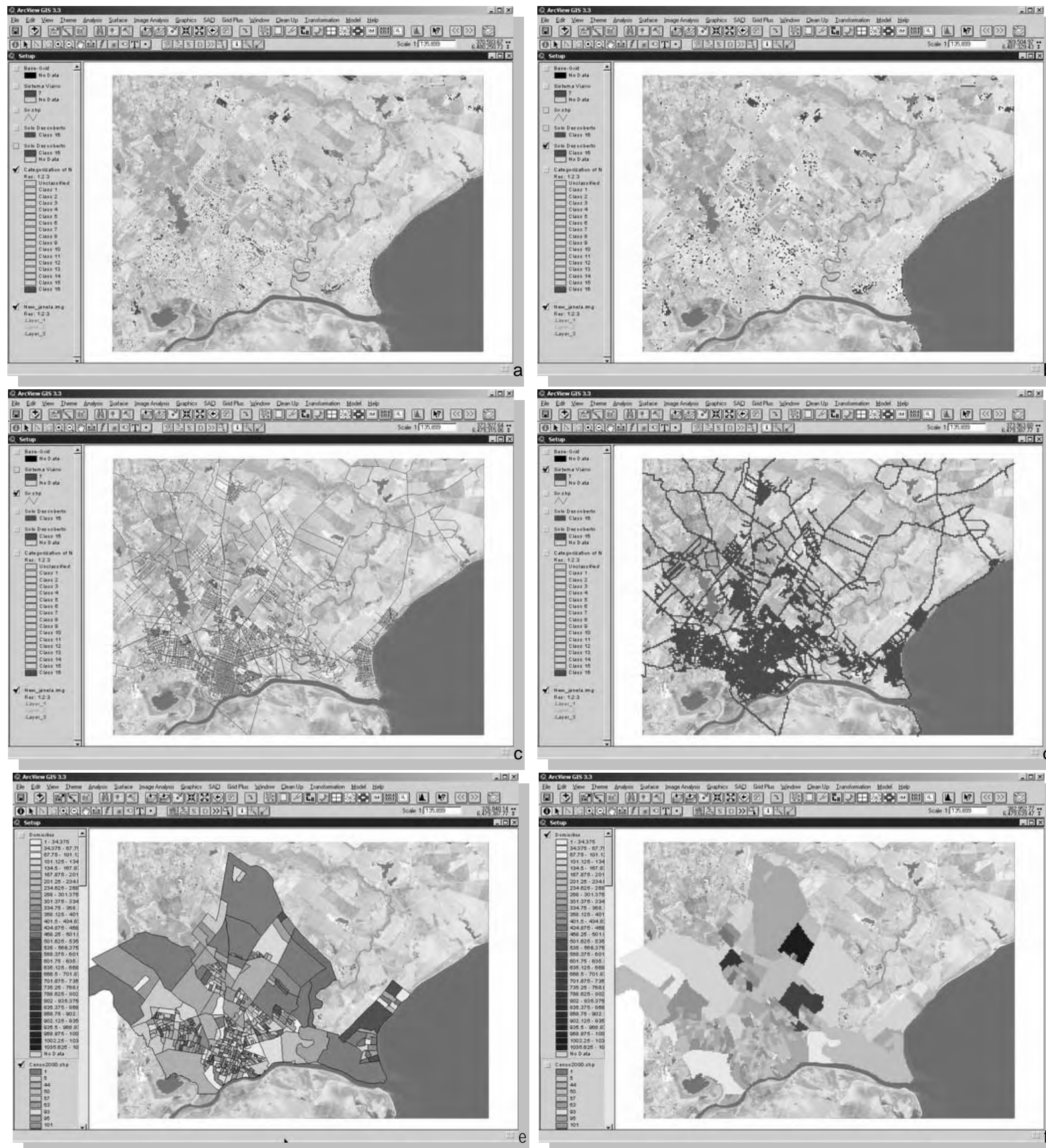


Figura 4.6: exemplo de inputs gráficos, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM+, resolução de 15m, de fevereiro de 2000; a) conversão raster para grid: extração do tema “solos descobertos”, obtida por classificação supervisionada, em classe única; c) conversão vetorial (linha) para grid: tema “sistema viário”, por eixos das vias, em classe única; e) conversão vetorial (área) para grid: tema “quantidade de domicílios”, em 32 classes ; b, d, f) resultado da conversão para grid, com células de 100m.

#### 4.4 Parametrização e processamento

O SACI trabalha com dois tipos de parâmetros (como foram apresentados no Capítulo 3, anteriormente): a) parâmetros vinculados aos atributos; b) parâmetros vinculados às regras. Os parâmetros vinculados aos atributos são implementados através de janelas derivadas da interface principal (ver figura 4.3, anteriormente), conforme mostra a figura 4.7, abaixo.

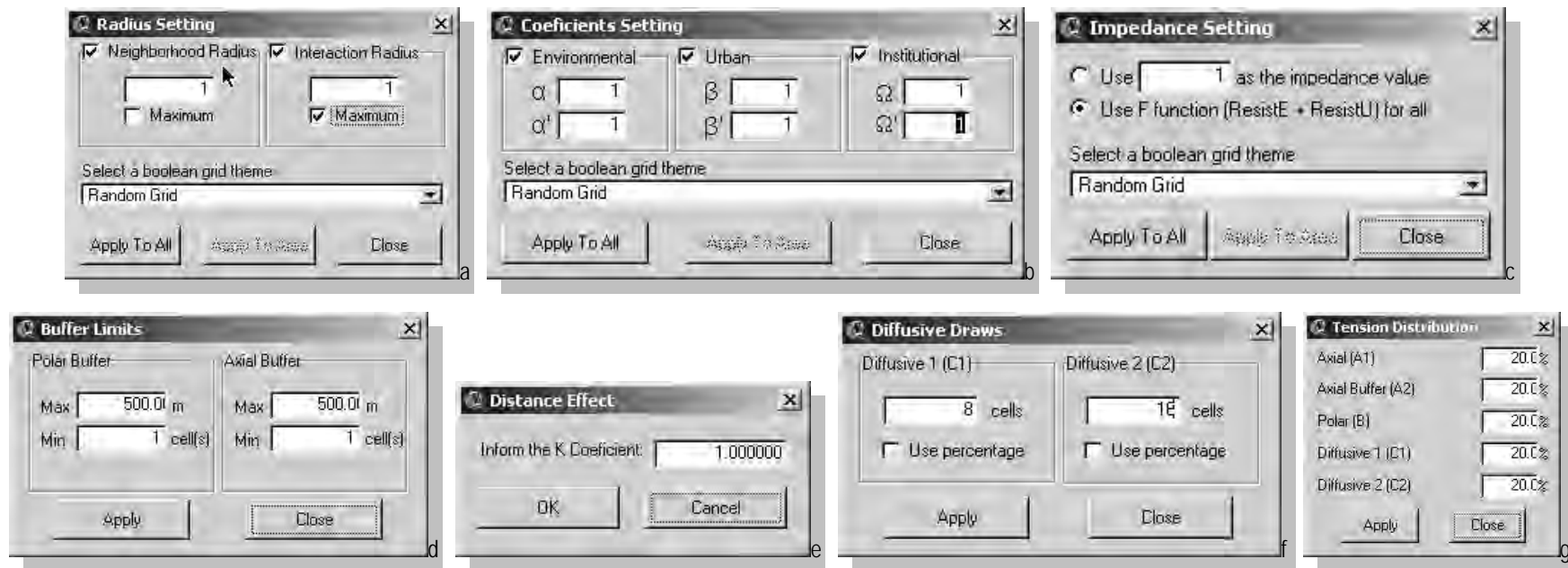


Figura 4.7: a) raios de interação e de vizinhança; b) coeficientes de valorização dos atributos; c) impedância; d) limites dos buffers; e) efeito da distância; f) efeito difuso; g) distribuição de tensões.

O processamento consiste na aplicação propriamente dita dos mecanismos que realizam o crescimento urbano, nas condições determinadas pelo modelo. Isso ocorre mediante o uso de regras de crescimento, as quais são acessadas através da interface principal, pela função gerenciador de regras (*Rule Manager*); as regras rodam cumulativamente na ordem em que estão inseridas na lista, sendo que a função de ativação (*Active*) permite escolher quais as que serão utilizadas, sem necessidade de eliminá-las da simulação. Como mostra a figura 4.8, adiante, é a partir dessa janela que os parâmetros da regra são ajustados.

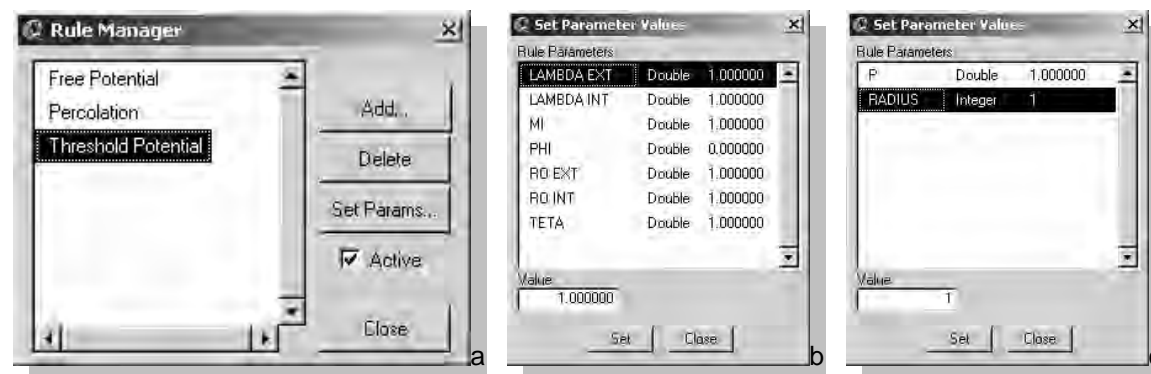


Figura 4.8: janela de aplicação e parametrização das regras utilizadas nas simulações de crescimento; a) mostra as três regras disponíveis e as funções de adicionar, apagar, imputar parâmetros, ativar e fechar a janela; b) mostra a janela dedicada a ajustar os parâmetros das regras *Threshold Potential* e *Free Potential* (são duas janelas idênticas, pois os parâmetros são os mesmos); c) mostra a janela dedicada a ajustar os parâmetros da regra *Percolation*.

O processamento é acionado e controlado pela janela do projeto *saci.apr*, na qual aparecem as seguintes funções específicas do SACI (ver figura 4.9a, abaixo): a) rodar (*Play*): encaminha para a janela de especificação do processamento (*Iteration Setup*), que permite iniciar o processamento; b) pausar (*Pause*): permite suspender e continuar o processamento a qualquer tempo, o que possibilita modificar parâmetros em tempos intermediários da simulação; c) parar (*Stop*): permite concluir o processamento a qualquer tempo; d) histórico (*History*): permite acessar um arquivo txt com o histórico da simulação.

A janela *Iteration Setup* (figura 4.9b) oferece as seguintes funções: a) selecionar atributos por tipo (*Select Attributes, Type*); b) ativar ou desativar os atributos (*Select Attributes, Active = True ou False*); c) ativar ou desativar a autoponderação (*Select Attributes, Selfweight = True ou False*); d) informar o nome dos atributos (*Select Attributes, Name*); e) especificar os resultados (*Output Setup*): aponta quais os *outputs* que serão gerados na simulação; f) rodar um total de *n* iterações e gerar resultados a cada *m* iterações (*Run a total of n iterations and Generate a View every m iterations*): permite regular o número de vezes que o modelo deve rodar (número de iterações) e os estados intermediários que serão registrados no *output*.

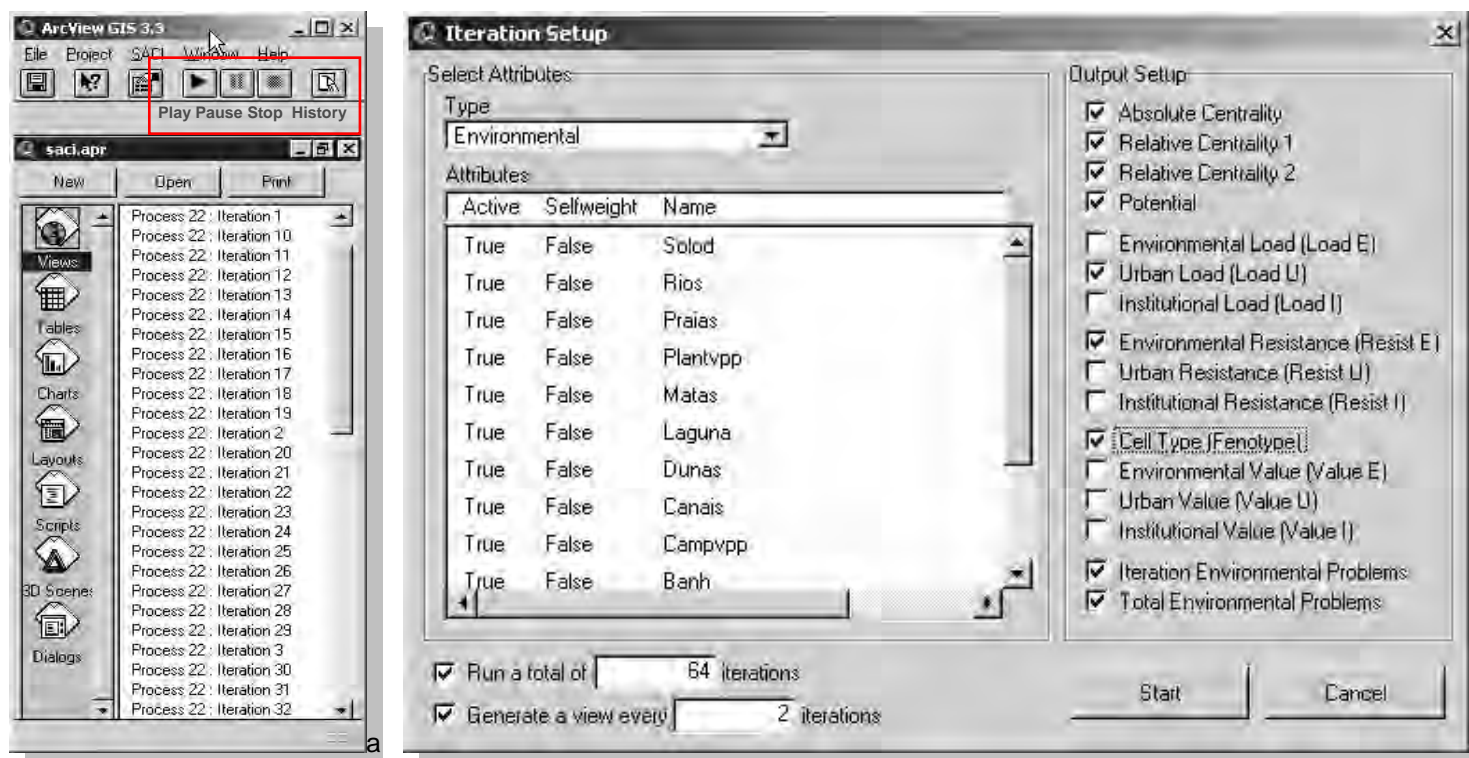


Figura 4.9: janelas dedicadas a acionar e controlar o processamento: a) *saci.apr*; b) *Iteration Setup*.

O processamento pode ser expresso na forma de um algoritmo, como está na figura 4.10, adiante.



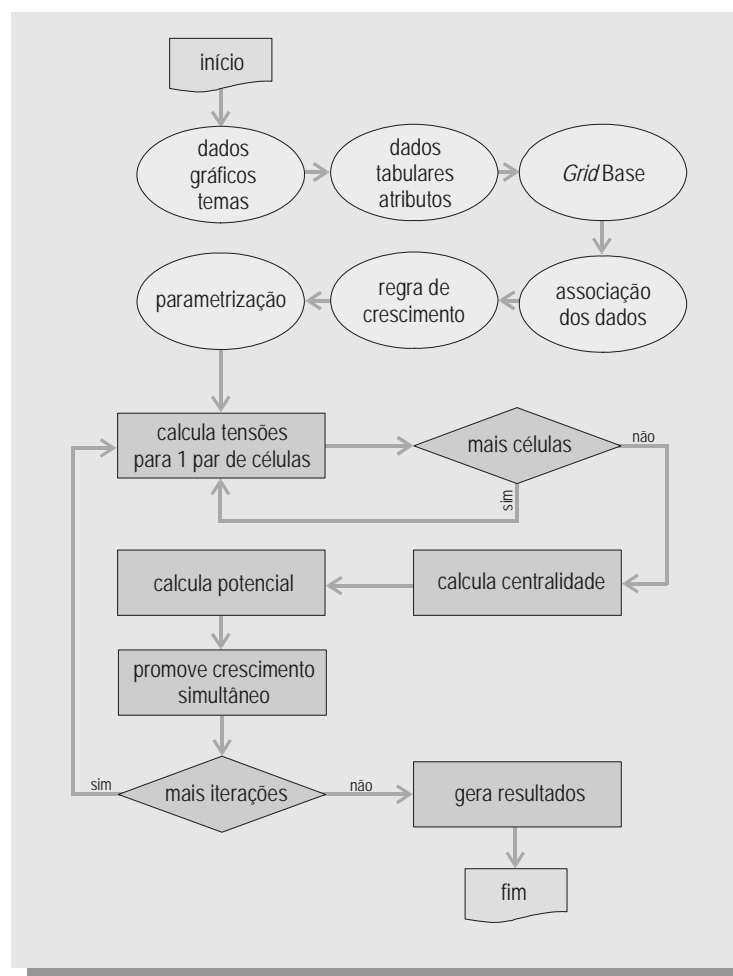


Figura 4.10: algoritmo geral do SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®.

#### 4.5 Resultados – output

O SACI – Simulador do Ambiente da Cidade® oferece 3 tipos fundamentais de *outputs*, organizados conforme a estrutura do projeto “saci.apr”: a) mapas de resultados do tipo *grids*, que podem ser considerados como *outputs* principais, pois deles demandam todos os outros; b) tabelas; c) gráficos bivariados, sendo os principais os histogramas, os lineares e os de dispersão. Análise multivariada pode ser realizada complementarmente, quer assumindo estudos entre unidades amostrais (cada célula é uma unidade amostral cativa das simulações), quer entre variáveis (que podem ser as diferentes grandezas associadas a cada célula num determinado estado do sistema, ou a mesma grandeza ao longo do tempo de simulação); particularmente podem interessar estudos de covariância múltipla entre *grids*, no processo de calibração. Os *grids* são a representação típica de um modelo baseado na lógica de CAs – autômatos celulares, unificando qualidades com quantidades através dos atributos associados a cada célula (ver figura 4.12, adiante); as qualidades podem ser tipológicas e locais, isto é: d) uma célula ou é de um ou é de outro tipo; e) uma célula com um determinado atributo ou está num lugar geográfico ou está noutro; as quantidades podem ser absolutas ou relativas, permitido, respectivamente, a análise comparada entre sistemas diferentes ou entre diferentes localizações e/ou tempos dentro de um mesmo sistema. O *grid* relativo aos fenótipos urbanos utiliza variável qualitativa booleana, enquanto os demais utilizam variáveis quantitativas, como está resumido na tabela 4.1, na próxima página.

Resumo de *outputs* de tipo *grid* gerados pelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®

Nome	Nome no modelo	Abreviatura no modelo	Conteúdo	Tipo de variável	Espectro	
Problemas Ambientais Totais (acumulados)	<i>Total Problem</i>	<i>Environmental</i>	<i>EProbT</i>	Grid de números reais contendo valores representando os problemas ambientais acumulados	Quantitativa	0 a $\infty$
Problemas Ambientais da Iteração	<i>Iteration Problem</i>	<i>Environmental</i>	<i>EProbI</i>	Grid de números reais contendo valores representando os problemas ambientais gerados na iteração	Quantitativa	0 a 1
Valor Institucional	<i>Institutional Value</i>		<i>ValueI</i>	Grid de números reais contendo quantidades de valor institucional	Quantitativa	0 a 1
Valor Urbano	<i>Urban Value</i>		<i>ValueU</i>	Grid de números reais contendo quantidades de valor urbano	Quantitativa	0 a 1
Valor Natural	<i>Environmental Value</i>		<i>ValueE</i>	Grid de números reais contendo quantidades de valor natural	Quantitativa	0 a 1
Tipo de Célula	<i>Cell Type</i>		<i>CellType</i>	Grid booleano contendo indicando a presença de células urbanas	Qualitativa	0 ou 1
Resistência Institucional	<i>Institutional Resist</i>		<i>ResistI</i>	Grid de números reais contendo valores de resistência institucional	Quantitativa	0 a 1
Resistência Urbana	<i>Urban Resist</i>		<i>ResistU</i>	Grid de números reais contendo valores de resistência urbana.	Quantitativa	0 a 1
Resistência Natural	<i>Environmental Resist</i>		<i>ResistE</i>	Grid de números reais contendo valores de resistência natural	Quantitativa	0 a 1
Carregamento Institucional	<i>Institutional Load</i>		<i>LoadI</i>	Grid de números reais contendo valores de carregamento institucional	Quantitativa	0 a 1
Carregamento Urbano	<i>Urban Load</i>		<i>LoadU</i>	Grid de números reais contendo valores de carregamento urbano	Quantitativa	0 a $\infty$
Carregamento Natural	<i>Environmental Load</i>		<i>LoadE</i>	Grid de números reais contendo valores de carregamento natural	Quantitativa	0 a 1
Potencial	<i>Potential</i>		<i>Potential</i>	Grid de números reais contendo valores de potencial	Quantitativa	0 a 1
Centralidade Relativa 2	<i>Relative Centrality 2</i>		<i>CentR2</i>	Grid de números reais contendo valores de centralidade relativa do tipo 2	Quantitativa	0 a 1
Centralidade Relativa 1	<i>Relative Centrality 1</i>		<i>CentR1</i>	Grid de números reais contendo valores de centralidade relativa do tipo 1	Quantitativa	0 a 1
Centralidade Absoluta	<i>Absolute Centrality</i>		<i>CentABS</i>	Grid de números reais contendo valores de centralidade absoluta	Quantitativa	0 a $\infty$

Tabela 4.1: resumo de *outputs* de tipo *grid* gerados pelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®.

A figura 4.11, abaixo, mostra as paletas de cores padronizadas para cada componente do *output*; a seguir, a figura 4.12 exemplifica os *grids* emitidos como resultados das simulações.

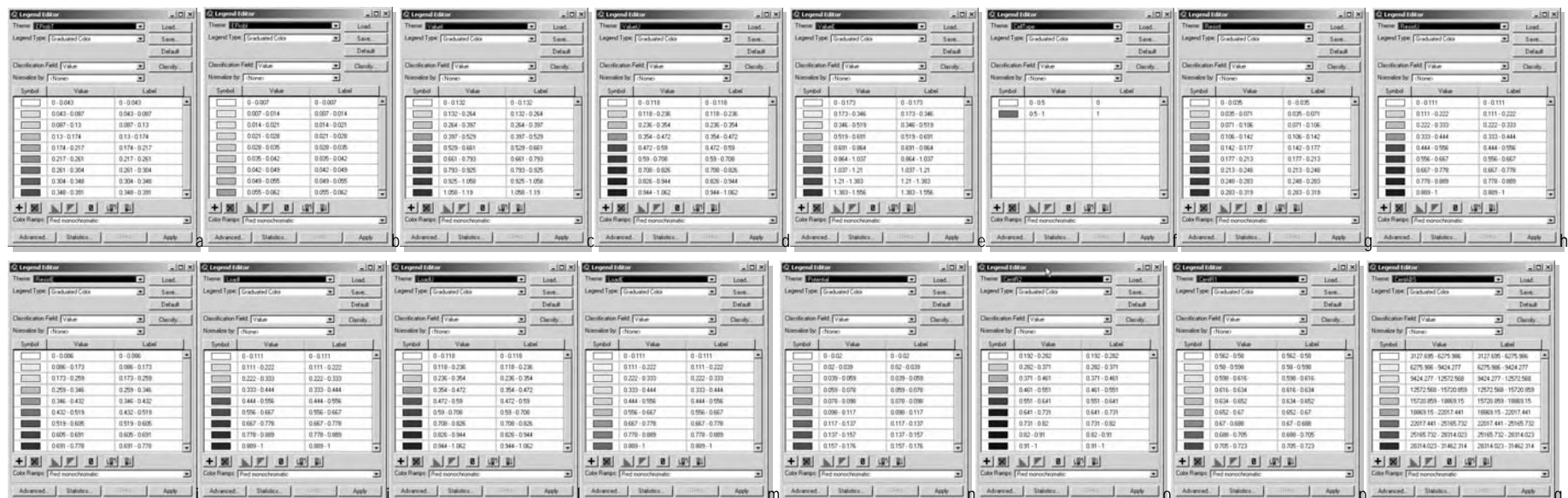


Figura 4.11: classes (nove) e paletas de cores (hierárquica) padrão utilizadas nos *outputs* gráficos do modelo; a) *EProbT*; b) *EProbI*; c) *ValueI*; d) *ValueU*; e) *ValueE*; f) *CellType*; g) *ResistI*; h) *ResistU*; i) *ResistE*; j) *LoadI*; k) *LoadU*; l) *LoadE*; m) *Potential*; n) *CentR2*; o) *CentR1*; p) *CentABS*.

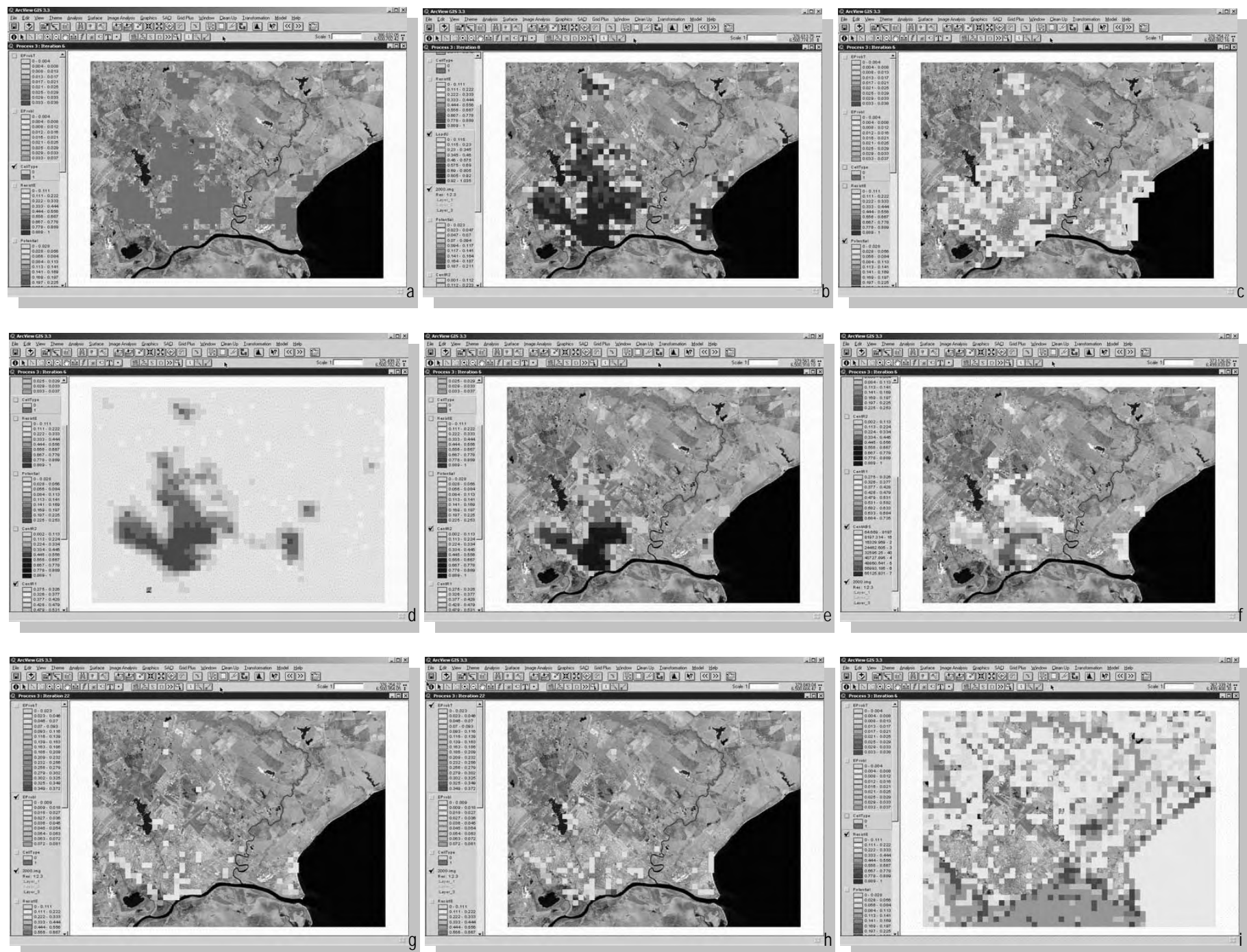


Figura 4.12: exemplos de outputs gráficos do tipo grid, com células de 500m e nove classes, com variáveis binárias (a) e quantitativas (demais figuras), sobre composição de imagem de satélite Landsat 7 ETM+, resolução de 15m, de fevereiro de 2000, em Pelotas, RS (Polidori, 2003a): a) células com fenótipo urbano (CellType, no modelo); b) carregamento urbano (LoadU, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor vermelho; c) potencial de crescimento (Potential, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor laranja; d) distribuição de centralidades relativas tipo 1 (CentR1, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor azul claro; e) distribuição de centralidades relativas tipo 2 (CentR2, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor azul índigo; f) distribuição de centralidades absolutas (CentABS, no modelo), com paleta hierárquica em escala de cor azul escuro; g) distribuição de problemas ambientais numa iteração (EProbl, no modelo), em paleta hierárquica em escala de cor laranja; h) distribuição acumulada de problemas ambientais intra-urbanos (EProblT, no modelo), com paleta hierárquica de cor vermelho ao amarelo; i) distribuição de resistências naturais (ResistE, no modelo), em paleta hierárquica em escala de cor verde.

Um reconhecido problema na utilização de *softwares* de SIG em modelagens dinâmicas é que esses ambientes têm sido concebidos para análises estáticas (Almeida et al., 2002), dedicando seus recursos para conhecer e explorar os estados de um sistema e não para examinar as mudanças e a evolução entre esses estados, o que normalmente precisa ser produzido manualmente. Como esse é o caso do ArcView, sobre o qual roda o SACI, duas ferramentas foram desenvolvidas (figura 4.13): a) visualização seriada de *outputs* de mesmo tipo (*Go To Next Iteration* e *Go To Previous Iteration*), permitindo visualizar as mudanças pela troca rápida de conteúdo, que segue automaticamente a ordem das iterações; b) exportação automática do conjunto de iterações (*Export Output*), indicando o tipo de *output* e permitindo a inserção de temas de fundo (*Background Themes*).

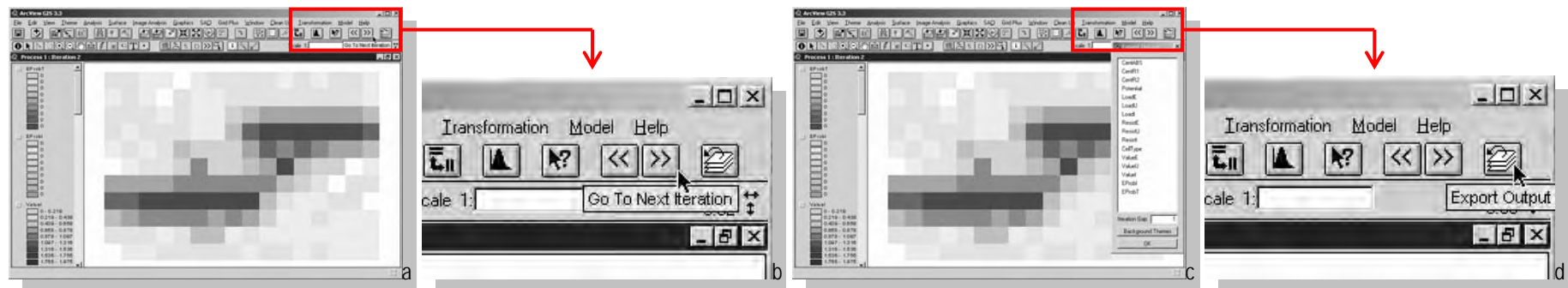


Figura 4.13: a) e b) ferramentas *Go To Next Iteration* e *Go To Previous Iteration*; c) e d) ferramenta *Export Output*.

A partir dos valores constantes nos *grids* são gerados *outputs* na forma de tabelas, sintetizando informações sobre cada iteração e permitindo uma apreensão quantitativa sinóptica da simulação de crescimento, sendo que os valores assumem seis parâmetros fundamentais nas simulações: a) registrar os experimentos através de bancos de dados alfanuméricos; b) revelar intensidades de crescimento e sua evolução iterativa; c) informar sobre grandezas geradas no processo de simulação; d) aferir a sensibilidade do modelo a mudanças de *input*; e) instrumentar a calibração do modelo; f) informar processos de verificação de hipótese. A figura 4.14, a seguir, mostra as três principais tabelas de *output* geradas pelo SACI.

Processo	Iteração	Fragmentação	Compacidade	Conversão de território	Problemas ambientais intra-urbanos
1	1	1701	683.0000000000	0.4015200000	3.8781520000
1	2	1872	728.0000000000	0.3888890000	4.0584290000
1	4	2295	977.0000000000	0.4256700000	4.5046330000
1	6	2925	1245.0000000000	0.4256410000	5.0895360000
1	8	3393	1481.0000000000	0.4364870000	5.4772900000
1	10	4249	1852.0000000000	0.4359700000	6.1286680000
1	12	4779	2115.0000000000	0.4425610000	6.5004340000
1	14	5310	2332.0000000000	0.4391710000	6.8520930000
1	16	5871	2431.0000000000	0.4363670000	7.0184370000
1	18	6048	2548.0000000000	0.4212960000	7.3127330000
1	20	6381	2671.0000000000	0.4195860000	7.5113530000
1	22	6788	2786.0000000000	0.4116430000	7.7357780000
1	24	7036	2838.0000000000	0.4032400000	7.8885730000
1	26	7353	2907.0000000000	0.3953490000	8.0631750000
1	28	7704	2985.0000000000	0.3849590000	8.2533250000
1	30	8046	3032.0000000000	0.3788330000	8.4345870000
1	32	8370	3048.0000000000	0.3641590000	8.6027350000
1	34	8754	3014.0000000000	0.3431240000	8.8129230000
1	36	9000	3020.0000000000	0.3366670000	8.9206210000
1	38	9288	3022.0000000000	0.3256680000	9.0622270000
1	40	9450	3028.0000000000	0.3204200000	9.1409160000
1	42	9657	3023.0000000000	0.3130370000	9.2404880000
1	44	9882	2970.0000000000	0.3005460000	9.3475160000
1	46	10107	2953.0000000000	0.2921740000	9.4533330000
1	48	10260	2960.0000000000	0.2884990000	9.5246160000
1	50	10413	2953.0000000000	0.2835880000	9.5953700000
1	52	10593	2935.0000000000	0.2770700000	9.6779480000
1	54	10701	2913.0000000000	0.2722180000	9.7271580000
1	56	10853	2851.0000000000	0.2623940000	9.8410260000
1	58	11052	2822.0000000000	0.2553380000	9.9854000000
1	60	11160	2738.0000000000	0.2507170000	9.9325630000

Processo	Iteração	Utilização	Fronteira
1	1	193	146
1	2	208	160
1	4	255	194
1	6	325	233
1	8	377	264
1	10	472	329
1	12	531	376
1	14	580	409
1	16	619	428
1	18	672	453
1	20	709	484
1	22	752	505
1	24	782	529
1	26	817	547
1	28	856	571
1	30	894	600
1	32	930	627
1	34	976	616
1	36	1000	624
1	38	1032	631
1	40	1050	639
1	42	1073	633
1	44	1098	625
1	46	1123	632
1	48	1140	641
1	50	1157	633
1	52	1177	641
1	54	1193	630
1	56	1217	630
1	58	1228	638
1	60	1240	638

Processo	Iteração	Potiv. 1	Potiv. 2
1	1	3.5646440000	3.5564400000
1	2	3.3913420000	7.5559860000
1	4	5.8911520000	16.5187530000
1	6	8.1886470000	33.8989150000
1	8	9.6966390000	52.6021300000
1	10	10.4421150000	73.0453350000
1	12	11.4609940000	86.9751750000
1	14	11.3440500000	118.7414830000
1	16	11.5861830000	141.8032870000
1	18	11.4324820000	164.4043100000
1	20	11.5800840000	187.5014960000
1	22	11.4189110000	210.3994430000
1	24	11.5207160000	233.4226130000
1	26	11.3201980000	256.1364560000
1	28	11.3192540000	278.6814710000
1	30	11.5084880000	301.3202550000
1	32	11.5013620000	324.3193340000
1	34	11.5550850000	347.3162300000
1	36	11.6851700000	371.3348970000
1	38	11.5173330000	394.4688420000
1	40	11.6214600000	417.6954550000
1	42	11.4885790000	440.7429300000
1	44	11.3740370000	463.6386940000
1	46	11.4957650000	486.6589430000
1	48	11.3912110000	508.4570130000
1	50	11.1715760000	531.6910290000
1	52	11.1153430000	554.1369330000
1	54	11.1040500000	576.3110300000
1	56	11.1251540000	598.9404000000
1	58	11.1068680000	621.1517230000
1	60	10.9949770000	643.1469100000

Figura 4.14: tabelas de *output* geradas pelo SACI: a) processo, iteração, fragmentação, compacidade, conversão de território e problemas ambientais intra-urbanos; b) contagem de células totais e de borda, com fenótipo urbano; c) potenciais gerados nos processos de crescimento.

A implementação sobre a estrutura do ArcView permite extrair gráficos a partir dos *grids* de *output* do SACI, na forma de histogramas, mostrando quantidades de células num estado do sistema e na forma de gráficos lineares bivariados, mostrando a variação quantitativa de células ou de outras grandezas ao longo da simulação (figuras 4.15 e 4.16, a seguir). Análises comparadas podem ser realizadas entre *grids*, através de estudos de dispersão, construindo medidas de semelhança, a utilizar na compreensão da dinâmica instaurada através da simulação e nos processos de calibração e legitimação do modelo (de um modo geral) e de seus resultados (num caso específico); adiante estão exemplificados *outputs* desse tipo de análise (figura 4.17), mostrando resultados de correlação espacial entre *grids*.

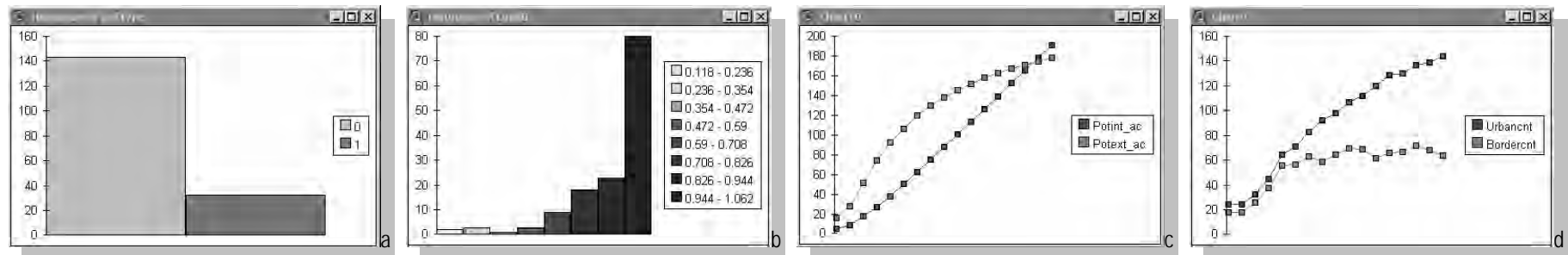


Figura 4.15: exemplo de *outputs* gráficos do tipo histograma e do tipo gráfico linear; a) histograma por tipo de célula, a partir de um *grid* booleano, para os fenótipos urbano ou natural (*CellType*, no modelo); b) histograma por classes, a partir de um *grid* com variáveis quantitativas, para a intensidade de urbanização (*ValueU*, no modelo); c) gráfico linear, a partir variação do número total de células com fenótipo urbano (vermelho) e do número de células desse tipo localizadas na borda (verde); d) gráfico linear, a partir da variação dos potenciais de crescimento externos (verde) e internos (vermelho).

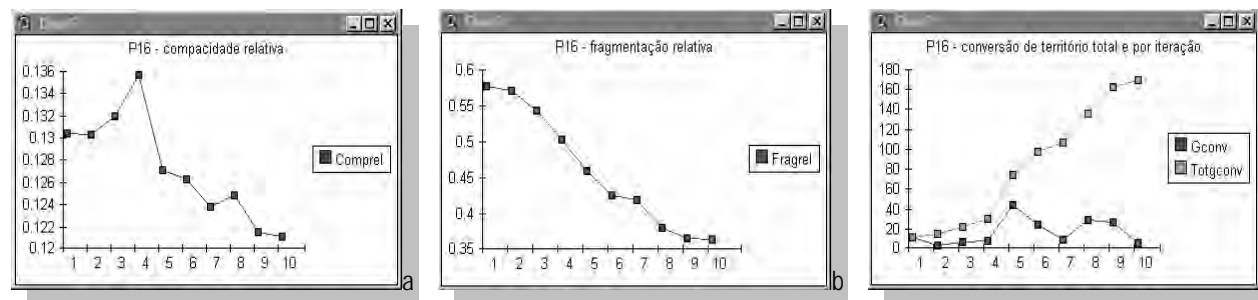


Figura 4.16: exemplo similar ao da figura anterior, referente ao conjunto de células com fenótipo urbano (*CellType*, no modelo): a) variação da compactidade relativa; b) variação da fragmentação relativa; c) variação da conversão de território não urbanizado em urbanizado, por iteração (em vermelho) e conversão acumulada (verde).

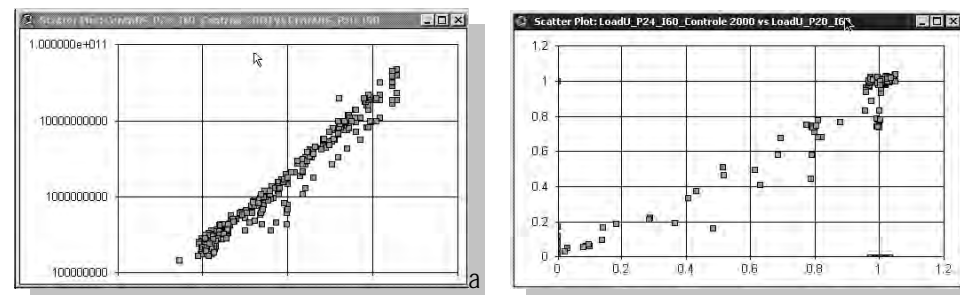


Figura 4.17: exemplo de *outputs* gráficos de correlação espacial entre *grids*, num estado do sistema, demonstrando a semelhança entre a realidade e os resultados da simulação: a) centralidades absolutas (*CentABS*, no modelo), em escala log-log ( $r = 0,94$ , no exemplo); b) carregamento urbano (*LoadU*, no modelo), em escala 1x1 ( $r = 0,81$ , no exemplo).

#### 4.6 Conclusões

Considerando os trabalhos de desenvolvimento, testes e aplicação do *software* SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>, podem ser registradas as seguintes conclusões principais:

a) o *software* é peça fundamental dos trabalhos de modelagem, particularmente pela quantidade de entidades, de características possíveis dessas entidades, das relações entre elas e do grande número de variações que cada experimento pode apresentar; no caso do SACI a importância do *software* é especialmente notável por cinco questões: a.1) o modelo é aberto, isto é, não estão predeterminados o local de estudo, a resolução espacial, as variáveis ou as regras<sup>18</sup>; a.2) o processo pode ser estocástico, se usadas as distribuições de tensões difusas, que incluem funções probabilísticas; sendo assim, aos mesmos *input*, regra e parametrização podem corresponder resultados diferentes, o que implica em rodar o modelo diversas vezes para atingir os objetivos da simulação; a.3) a quantidade de operações é inviável de ser efetivada sem apoio computacional, aparecendo acumuladas rotinas de cálculo de grafos e de CAs, as quais são realizadas iterativamente; a.4) o processo de calibração exige repetições exaustivas das simulações, alcançando resultados por aproximações sucessivas; a.5) a complexidade e quantidade de *outputs* gráficos e tabulares exige mecanismos de automação, sendo inviável utilizar expressão gráfica e cálculo não computacionais;

b) a opção por utilizar um *software* de SIG comercial preexistente apresentou a vantagem de poder utilizar os recursos desenvolvidos pelo fabricante, o que implica em importante economia de tempo de desenvolvimento e em usar ferramentas previamente testadas<sup>19</sup>; além disso, a opção por um programa simples e largamente utilizado, como é o caso do ArcView, facilita o uso por diferentes usuários, dispondo de bibliografia de apoio e de uma rede de desenvolvimento de aplicativos (conhecidos como extensões, como podem ser encontrados em <http://arcsripts.esri.com>);

c) os principais problemas registrados com o uso do ArcView foram os seguintes: c.1) limitações da linguagem de programação nativa (Avenue), que se aplica mais à automação das ferramentas preexistentes do que ao desenvolvimento de novos recursos; c.2) as possibilidades de georreferenciamento e classificação de imagens de satélite são limitadas, bem como os recursos de digitalização vetorial (o qual foi feito externamente, num programa de CAD ); c.3) as operações com os bancos de dados e com a geração de gráficos não oferecem muitas possibilidades, sendo comum a necessidade de exportar os dados e recorrer a programas externos; c.4) o programa não dispõe de recursos nativos para trabalhar com modelagem dinâmica, sendo inclusive as animações geradas em outros programas; c.5) embora não seja considerado um *software* de preço elevado, os custos de aquisição, treinamento e atualização restringem o uso institucional e os usuários particulares.

---

<sup>18</sup> Embora o SACI tenha sido usado neste trabalho com determinadas regras de crescimento urbano, sua concepção permite aportar outras possibilidades, tendo sido o gerenciador de regras (*Rule Manager*) desenvolvido com esse objetivo.

<sup>19</sup> Trabalhos anteriores de desenvolvimento do *software* Medidas Urbanas<sup>®</sup> (Polidori, Krafta e Granero, 2001) mostraram as dificuldades de produzir um programa totalmente novo, o que ficou evidente nas operações de *input* e *output* gráficos, que consumiram mais esforço computacional do que o processamento, com resultados limitados.

- d) a linguagem de programação C++ apareceu como robusta e com resultados seguros na implementação das rotinas matemáticas, realizado o esforço inicial de transcrição das lógicas e das equações do modelo; as maiores dificuldades estiveram por conta da troca de dados, sendo que o ArcView apresentou restrições para receber dados processados em C++, realizar análise espaciais e devolver os resultados ao SACI, para dar continuidade ao processamento; em função dessa severa restrição, os recursos de análise espacial do ArcView e extensões só puderam ser utilizados como pré e pós-processamento;
- e) a maior restrição do conjunto é o tempo de processamento, cujo consumo se concentra nos cálculos de centralidade, realizados por rotina seqüencial de grafos; para enfrentar essa questão, duas possibilidades podem ser consideradas para a continuidade do trabalho: e.1) desenvolver um substituto (*proxy*) da medida de centralidade em CA exclusivo, eliminando o processamento seqüencial e promovendo atualização de todas as células simultaneamente; e.2) aumentar a capacidade computacional, com três possibilidades iniciais: e.2.1) utilizar computadores pessoais de alta capacidade<sup>20</sup>; e.2.2) utilizar diversos computadores simultaneamente, agrupados em rede (*cluster*); e.2.3) utilizar um computador com diversos processadores em paralelo;
- f) um ponto a registrar é o tempo de desenvolvimento e testes para elaboração do *software*, que se estendeu por dois anos, em meia jornada de trabalho<sup>21</sup>; um produto com essa complexidade seria melhor e mais rapidamente alcançado por um grupo de pesquisa, com pessoal alocado nas diversas áreas de conhecimento (urbanismo, ecologia, geografia, economia, geoprocessamento, sensoriamento remoto e programação computacional) e com recursos alocados; particularmente pode ser indicado como continuidade do trabalho a produção de um *software* novo, para o que estão três possibilidades principais: f.1) utilizar o programa ArcGis<sup>22</sup>, que vem em substituição do ArcView e do Arclnfo, fazendo assim uma atualização no que já foi produzido; f.2) produzir um *software* novo utilizando os recursos do MapObjects, buscando um produto mais eficaz para as demandas do SACI e com interface exclusiva; f.3) utilização de outra plataforma de SIG, como é o caso do SPRING<sup>23</sup>, que é desenvolvido com tecnologia brasileira e não apresenta custos de aquisição e de atualização; f.4) produção de um programa novo e independente de outros SIGs, idealmente como um *software* livre.

---

<sup>20</sup> Neste trabalho, o SACI foi testado e as simulações foram realizadas num computador pessoal com 2000 megahertz, 512 MB ram, vídeo de 64 MB e HD de 80 GB; nesse conjunto, a maior restrição esteve por conta da velocidade de processamento, sendo que visualizações e arquivamento não apresentaram problemas. Utilizando esse equipamento e as regulagens padrão do SACI (com raio máximo para as interações espaciais, isto é, calculando tensões espaciais entre todos os pares de células), o tempo de processamento pode ser calculado como função geométrica pelo número de iterações e exponencial pelo número de células; na prática, *grids* com aproximadamente duas mil células, utilizados no estudo de caso em Pelotas, RS, consumiram em média 50 minutos por iteração.

<sup>21</sup> Observando conjuntamente os trabalhos com produção de *software* realizados nos últimos anos, pelo autor (Polidori e Kratz, 1995; Polidori, Krafta e Granero, 2001; Polidori e Granero, 2003), pode ser registrado um tempo de 30 a 50 % do total das pesquisas para desenvolvimento e testes.

<sup>22</sup> ArcGis, ArcView, Arclnfo e MapObjects são marcas registrada da ESRI - Environment Systems Research Institute.

<sup>23</sup> O *software* SPRING é desenvolvido pela equipe do INPE – Programa Nacional de Pesquisas Espaciais, no Brasil.

#### 4.7 Epílogo do capítulo 4

Neste capítulo mostrei a implementação do modelo de simulação de crescimento proposto neste trabalho como um *software*, que se chamou SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup> e que permite fazer o modelo funcionar e realizar simulações. Para isso apresentei um aplicativo computacional, produzido em linguagem de programação C++, que roda sob o programa de SIG ArcView, com a extensão Spatial Analyst, a qual permite representações na forma de *grids*. Embora as restrições do ArcView e as dificuldades de integração de análise espaciais nativas desse *software* com as rotinas em C++, o resultado foi suficiente e o modelo está implementado satisfatoriamente.



Uma vez conhecidos os fundamentos, o modelo de simulação de crescimento urbano e o *software* correspondente, nos próximos capítulos estarei realizando simulações, através das quais mostrarei os procedimentos de calibração e de geração de cenários de futuro (capítulos 5 e 6); adiante farei avançar os trabalhos de modelagem através do desenvolvimento de novos recursos e demonstrarei a possibilidade de realizar simulações avançadas, reunindo todos os recursos num só experimento (capítulos 7 e 8).



## 5 Calibrando o modelo de simulação de crescimento

Nos capítulos anteriores fundamentei a investigação, introduzi ao modelo SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup> e o implementei na forma de um programa computacional. Neste capítulo demonstrarei o processo de calibração para um caso real, o que será feito através do caso de Pelotas, RS, Brasil.

### 5.1 Localização da área de estudo em Pelotas, RS

Pelotas está situada ao sul do Estado do Rio Grande do sul, Brasil, como aparece nas figuras 5.1 e 5.2, a seguir. A área de estudo está determinada de modo a incluir a área urbana e um entorno para expansão, resultando nas seguintes coordenadas geográficas, em UTM, para o fuso 22 sul: a) limite norte: 6.500.000; b) limite sul: 6.480.000; c) limite leste: 392.000; d) limite oeste: 365.000. A superfície é de 540 km<sup>2</sup>, num retângulo de 20 km (direção norte-sul) por 27 km (direção leste-oeste), como mostram as figuras 5.4 e seguintes. A área urbana está dividida em cinco bairros, com o sistema viário e área urbanizada dispostos segundo quatro grandes eixos de desenvolvimento, como aparece nas figuras 5.5 e 5.6, respectivamente. A população urbana no ano 2000 é de 301.081 hab, com uma taxa de crescimento populacional de 1,65%aa para o período dos anos 1991 a 2000, conforme o censo do ano 2000 (IBGE, 2003). Uma síntese da evolução urbana está mostrada na figura 5.3, construída a partir dos registros do parcelamento do solo, desde 1815 (fundação da cidade), até o ano 2000.

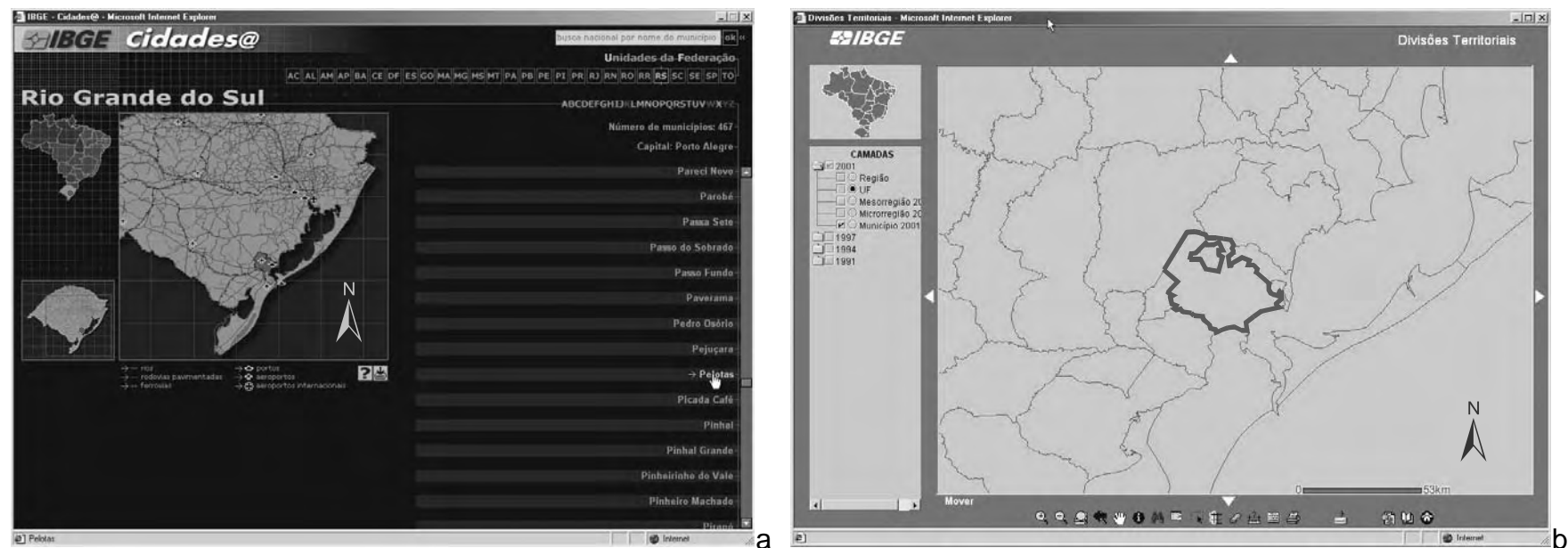


Figura 5.1: a) localização do município de Pelotas no Brasil e no estado do Rio Grande do sul (ponto vermelho); b) limites municipais de Pelotas (traço vermelho) e traçado dos municípios vizinhos; fonte em IBGE (2003).

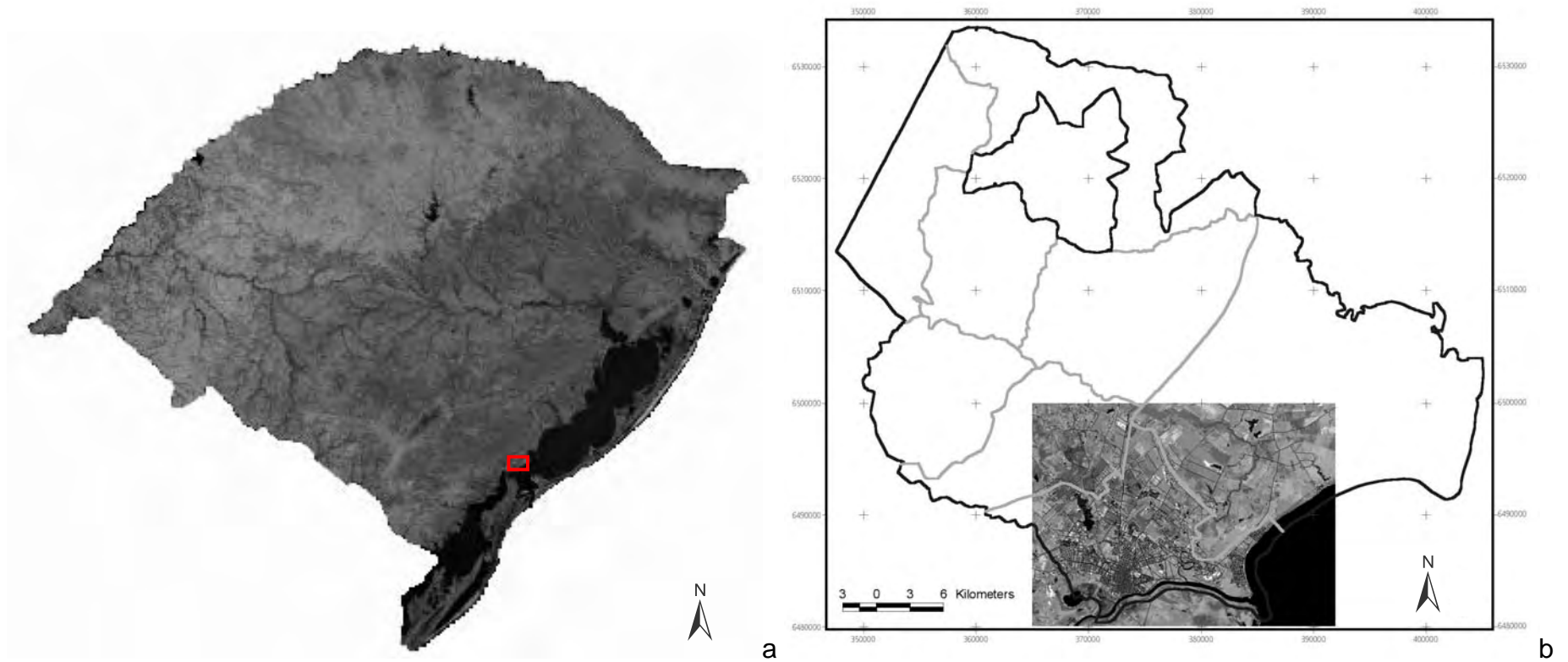


Figura 5.2: localização da área de estudo para simulações de crescimento urbano; a) localização no estado do RS, Brasil (traço vermelho); b) localização no município de Pelotas, RS (traço azul); fontes em Embrapa, Coleção Brasil Visto do Espaço – Rio Grande do Sul (2003), em Landsat 7 ETM+, de fevereiro de 2000, resolução de 15 m e no recobrimento aerofotogramétrico de 1995 e atualizações para 2003; projeções em UTM, fuso 22 sul.



Figura 5.3: síntese da evolução urbana de Pelotas, RS, do ano 1815 até o ano 2000.

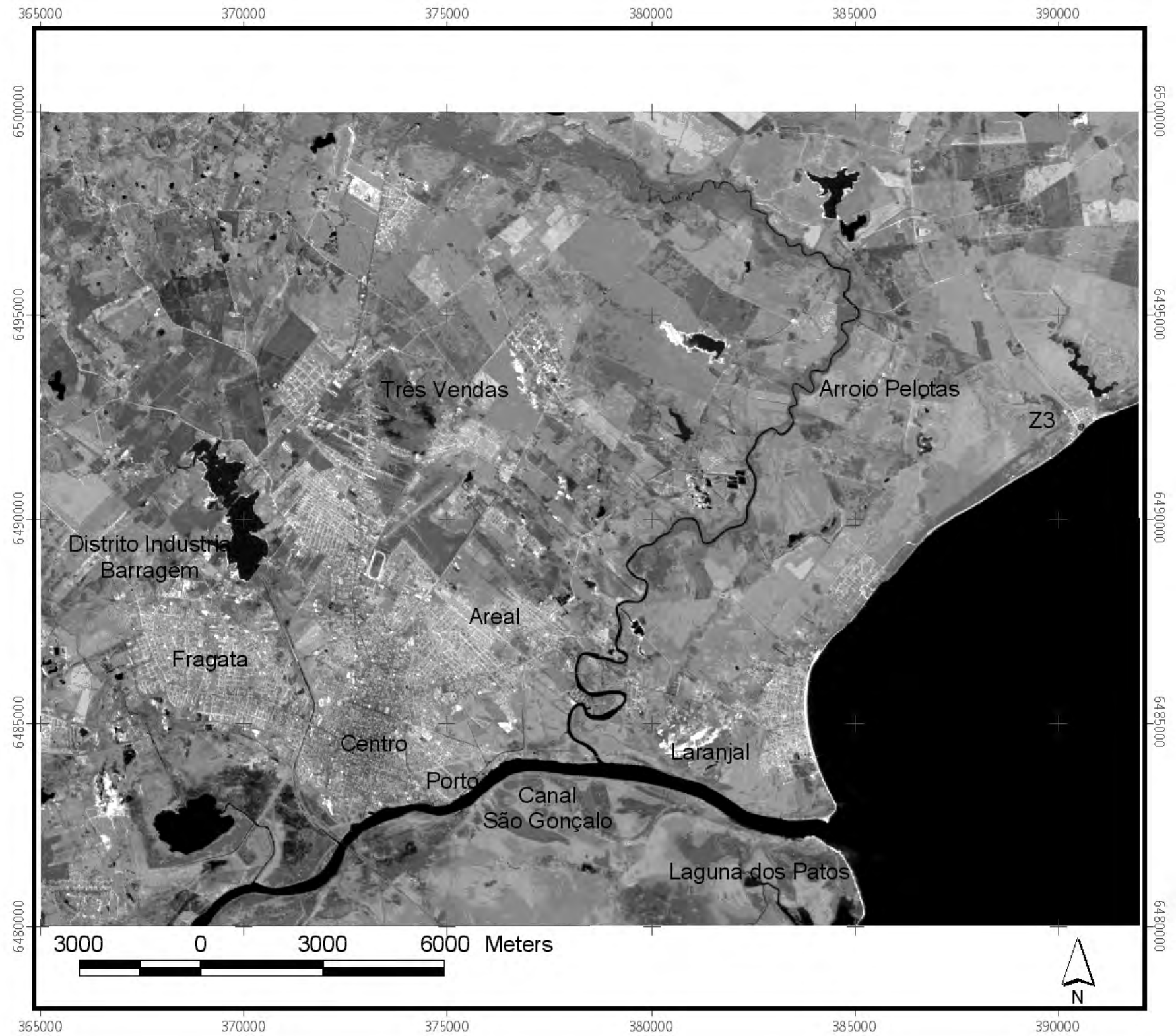


Figura 5.4: área de estudo para simulações de crescimento urbano, em Pelotas, RS; fonte em Landsat 7 ETM+, de fevereiro de 2000, resolução de 15 m; projeções em UTM, fuso 22 sul.

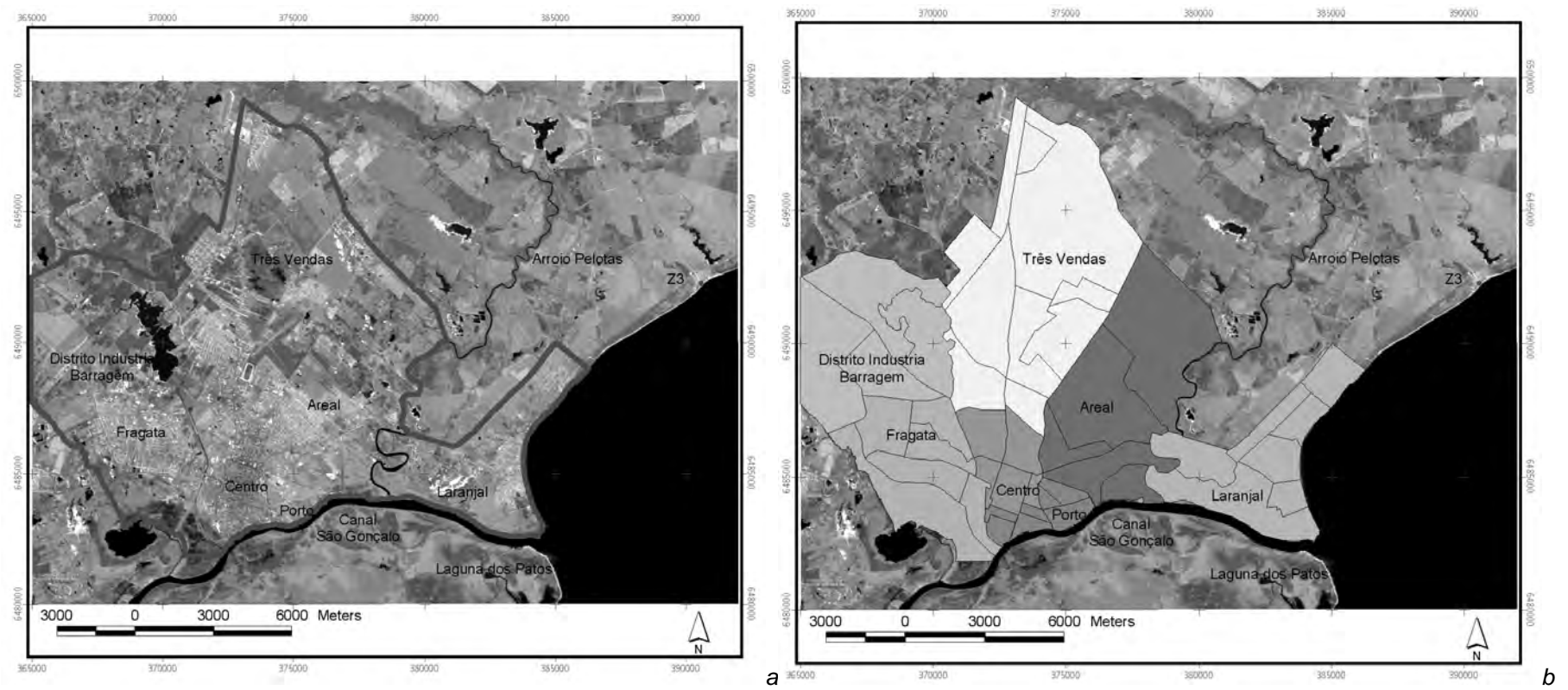


Figura 5.5: a) perímetro urbano vigente no ano 2000 (traço vermelho); b) bairros na área de estudo; fonte nos arquivos da Prefeitura Municipal de Pelotas, 2003, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15m; projeções em UTM, fuso 22 sul.

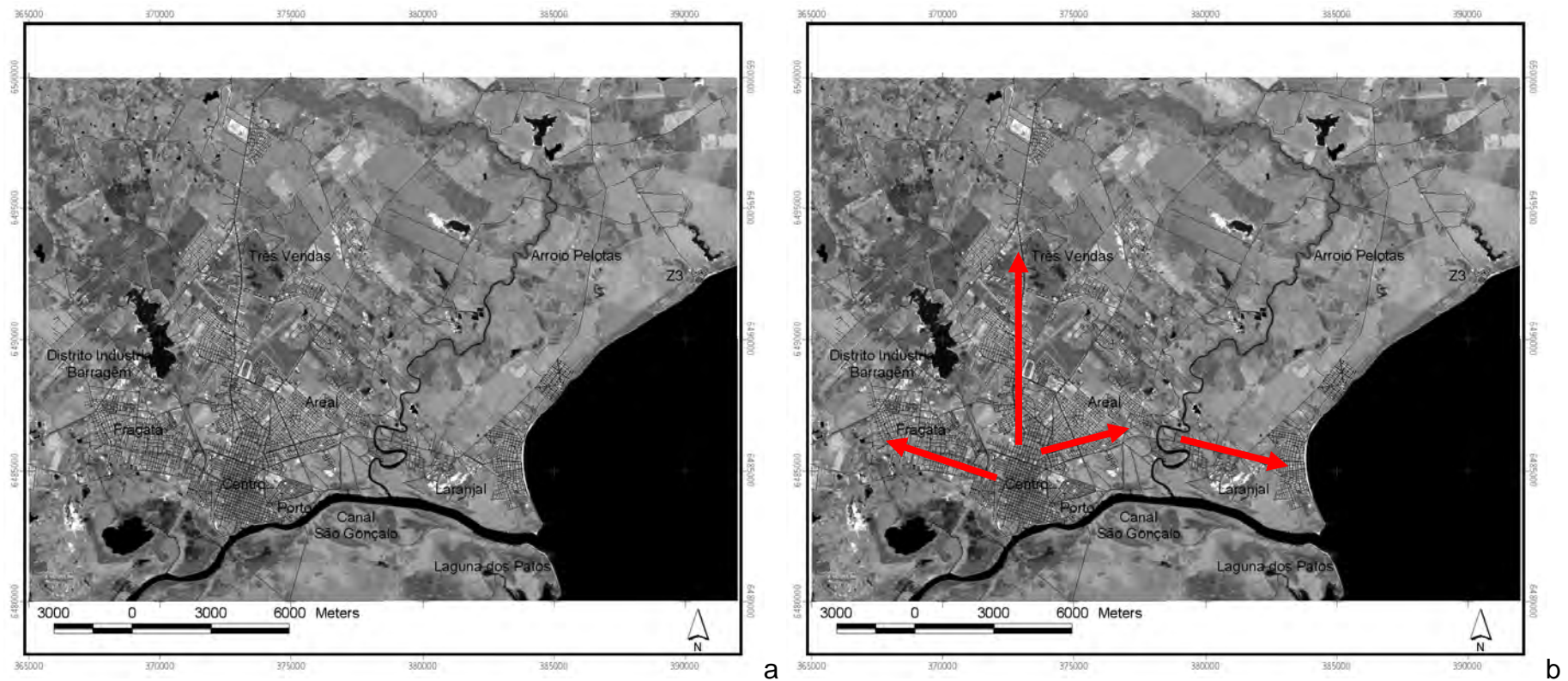


Figura 5.6: a) sistema viário na área de estudo (eixos das ruas, em traço azul); b) vetores de desenvolvimento espacial noroeste, norte e nordeste (setas vermelhas); fonte no recobrimento aerofotogramétrico de 1995 e atualizações para 2003, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15m; projeções em UTM, fuso 22 sul.

## 5.2 Delineamento do estudo em Pelotas, RS

O estudo de caso em Pelotas, RS está realizado nas seguintes condições:

- a) descrição da área de estudo no ano de 1965 e de 2000, assumidos como estado inicial e final do processo de calibração;
- b) determinação do nível de desagregação espacial, o que implica no detalhamento da área de estudo;
- c) calibração do modelo para o crescimento do período compreendido entre os anos 1965 e 2000, com diferentes tipos de carregamento urbano;
- d) aplicação do modelo a partir do ano 2000, com um horizonte de 45 anos.

Para a descrição da área de estudo no ano de 1965 e de 2000 (a figura 5.7, adiante, mostra as áreas cobertas por urbanização) estão assumidos três grupos de atributos para determinar as variáveis utilizadas, considerando sua importância como condicionantes do crescimento urbano e a disponibilidade de dados:

- a) atributos naturais: estão considerados os subsistemas de águas superficiais (laguna, rios, arroios, canais naturais e águas lânticas); de banhados e campos inundáveis; de cobertura do solo (matas nativas e matas plantadas, vegetação de grande porte, campos, solos agriculturados e vegetação de pequeno porte); de solos descobertos, dunas e praias; de canais artificiais; de áreas sujeitas a alagamento; está também implantado um fator aleatório, que representa fatores naturais sem descrição específica para o local de estudo<sup>24</sup>;
- b) atributos urbanos: estão representados na simulação pelo mapeamento de uso do solo urbano (sem diferenciação de intensidade, com diferenciação por intensidade de urbanização e com valores aleatórios) e pela cobertura do sistema viário;
- c) atributos institucionais: estão excluídas da simulação as células não pertencentes ao município de Pelotas (pertencentes aos municípios de Rio Grande e Capão do Leão).

O nível de desagregação espacial está definido mediante o uso de um *grid* com 40 linhas por 54 colunas, com 2.160 células quadradas de 500m, em função da necessidade dos experimentos e da capacidade de processamento computacional disponível, como mostra a figura 5.8, mais adiante.

---

<sup>24</sup> A prática de considerar a presença de fatores mediante descrição aleatória tem-se mostrado importante em estudos de modelagens, particularmente no caso dos fatores naturais, por duas razões principais: a) é esperado que as descrições ambientais sejam sempre incompletas, posta a complexidade dos ecossistemas (Christofolletti, 1999); b) são raras as cidades que dispõem de descrições sistemáticas sobre o ambiente em geral, particularmente no caso das cidades brasileiras (Bezerra e Fernandes, 2000).

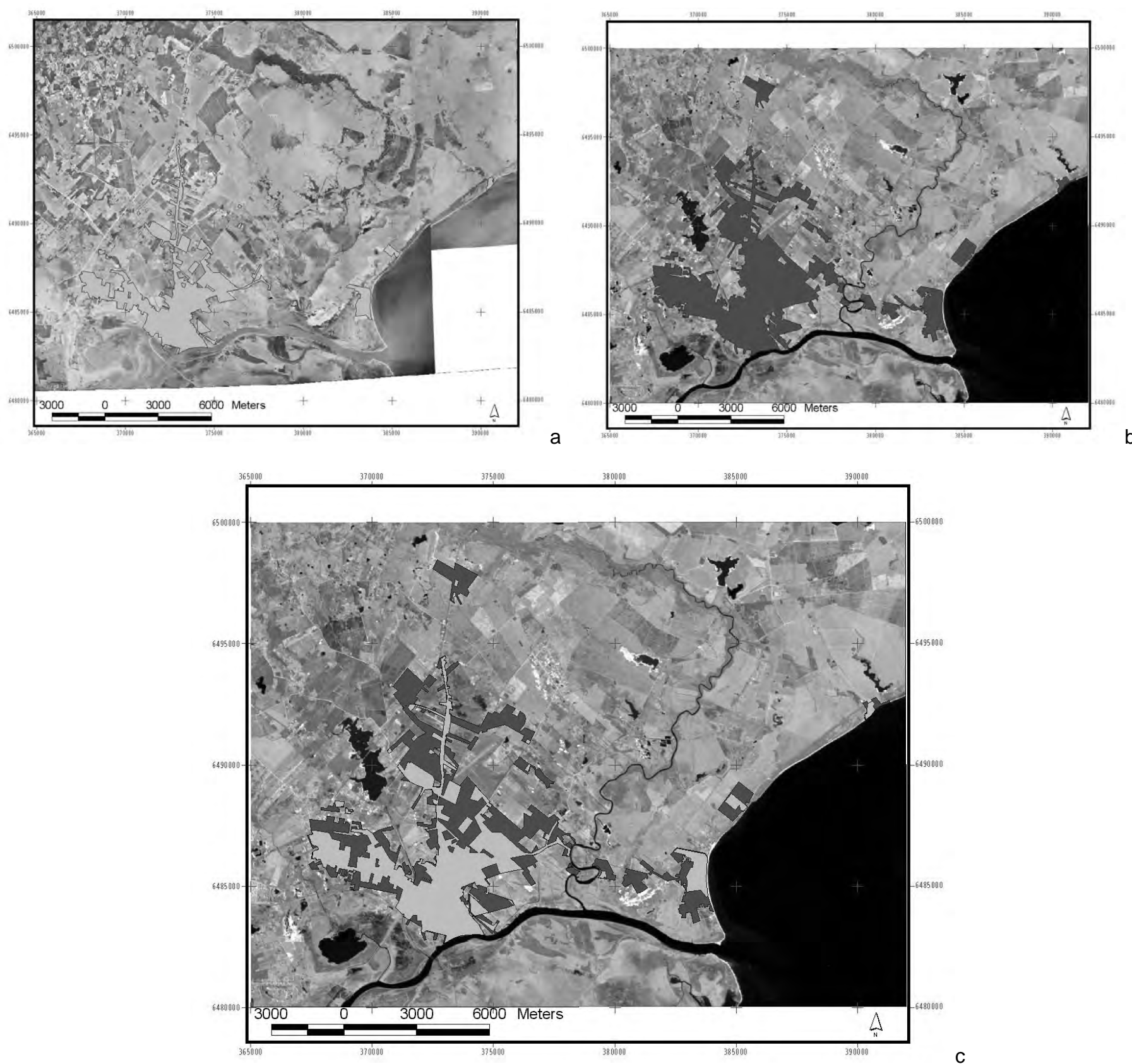


Figura 5.7: a) área coberta por urbanização no ano de 1965, em rosa (fonte no recobrimento aerofotogramétrico de 1965; Polidori, 2003b); b) área coberta por urbanização no ano de 2000, em vermelho (fonte em Landsat 7 ETM+, de fevereiro de 2000, resolução de 15 m; projeções em UTM, fuso 22 sul; c) superposição das manchas urbanas nos anos de 1965 e 2000, em rosa e vermelho, respectivamente.

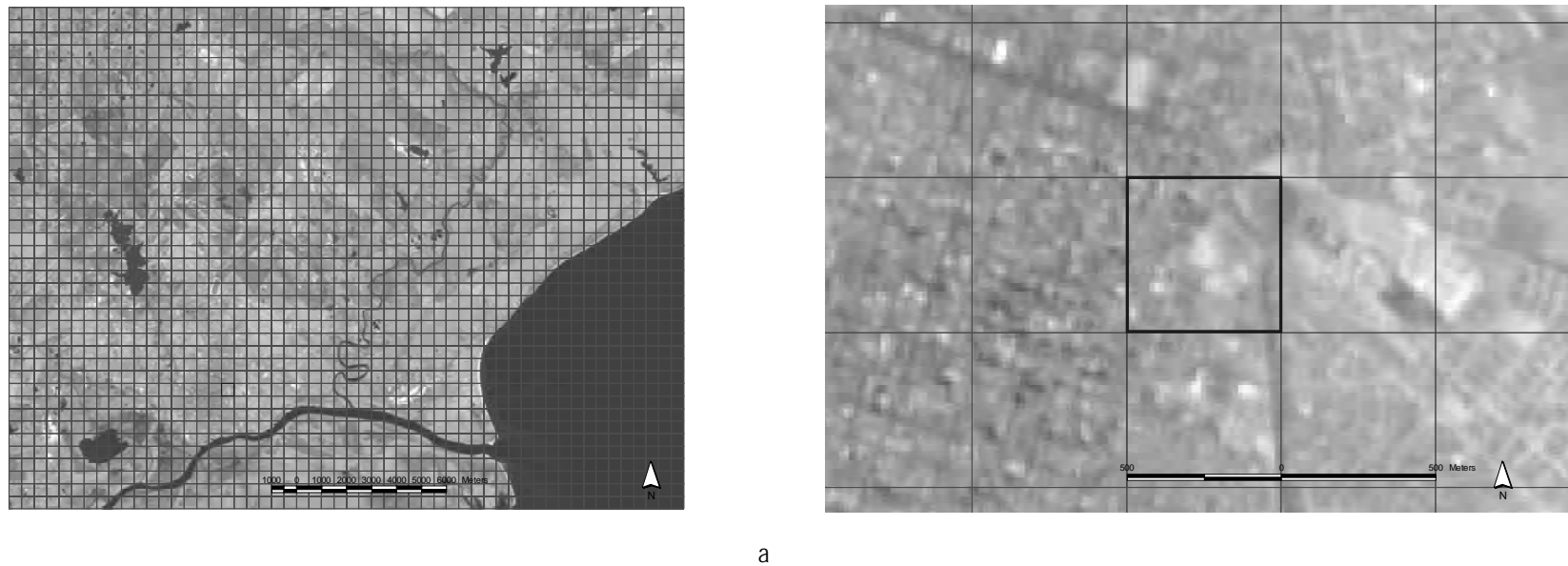


Figura 5.8: a) desagregação espacial com 2.160 células de 500m; b) detalhe de uma célula de 500 x 500m (destacada em azul).

Para a calibração estão definidos três estudos de caso, variando a entrada de dados, a saber:

- a) caso 1: entrada de dados com uma intensidade de urbanização, isto é, com carregamento urbano igual a 1 em todas as células urbanas (figura 5.23; subtítulo 5.4.2);
- b) caso 2: entrada de dados com carregamento urbano diferenciado por três intensidades de urbanização, com valores de 1, 5 e 10 (figura 5.31; subtítulo 5.4.3);
- c) caso 3: entrada de dados com carregamento urbano aleatório, com valores entre 1 e 10 (figura 5.39; subtítulo 5.4.4).

A calibração está realizada manualmente, por aproximações sucessivas, em séries com até 20 simulações, variando dois parâmetros do modelo:

- a) a distribuição das tensões (*Tension Distribution*, no modelo), o que implica em tipos de crescimentos diferentes, provocando variações qualitativas;
- b) a intensidade do potencial de crescimento ( $\lambda$  (lambda), no modelo), de modo a conseguir intensidades de crescimento diferentes, provocando variações quantitativas.

A variação na distribuição de tensões está realizada do seguinte modo: a.1) sem predomínio de algum tipo de distribuição (20% para todos); a.2) com predomínio da distribuição de tensões axiais (80% para as axiais e 5% para as demais); a.3) com predomínio da distribuição de tensões polares (80% para as polares e 5% para as demais); a.4) com predomínio da distribuição de tensões difusas (47% para cada um dos tipos de tensões difusas e 2% para as demais); a.5) com predomínio de uma composição de tensões axiais e polares<sup>25</sup> (47% para cada uma delas e 2% para as demais). A variação na intensidade do potencial de crescimento está implementada na primeira simulação com  $\lambda$  (lambda) igual a 1 (um), a partir do que são realizados ajustes sucessivos, caso a caso.

Como indicadores de semelhança estão usadas correlações espaciais entre *grids* que representam a situação simulada para o ano 2000 e a situação nesse ano, assumindo cada célula como unidade amostral e o atributo associado a cada uma delas como variável. Estão consideradas as seguintes grandezas: a) fenótipo urbano (*CellType*, no modelo), que indica a conversão de território não urbanizado em urbanizado; b) carregamento urbano (*LoadU*, no modelo), que representa a distribuição dos estoques construídos; c) centralidade relativa de tipo 1 (*CentR1*, no modelo), que representa um indicador sintético de qualificação locacional.

Todas as simulações para o caso de Pelotas, RS utilizam o recurso de autoponderação (conforme será mostrado no subtítulo 7.13, adiante) para os atributos naturais vinculados aos subsistemas de águas naturais e banhados, dunas e praias, matas e campos nativos, cuja escassez está assumida como fator de aumento de importância na totalidade do sistema.

### 5.3 Descrição urbana, natural e institucional para 1965 e 2000

A simulação de crescimento inicia pela descrição dos fatores que representam a paisagem natural, a paisagem urbana e os fatores institucionais, para as datas que participam do experimento, neste caso para os anos de 1965 e de 2000, em Pelotas, RS, como foi apresentado no subtítulo anterior. Essa descrição é feita através de atributos e de mapas temáticos, de modo a construir no SACI um banco de dados tabular e de informações gráficas, respectivamente. A entrada de dados tabulares é feita manualmente, na interface do programa de computador, sendo os dados gráficos obtidos por dois modos: a) por digitalização manual sobre bases cartográficas preexistentes, o que é usado para os atributos urbanos e institucionais; b) por interpretação e classificação de imagem aérea (para o caso do ano de 1965) e de imagem de satélite (para o caso do ano 2000), o que é usado para os atributos naturais (Florenzano, 2002).

---

<sup>25</sup> A experimentação de uma distribuição de tensões com predomínio de uma composição axial e polar vem do exame visual da diferença entre os mapas da área coberta por urbanização de 1965 e 2000, que sugere um crescimento ao longo de eixos e ao redor de pólos de desenvolvimento (ver figura 7, anteriormente); como será mostrado adiante, essa hipótese não foi confirmada.



### 5.3.1 Dados tabulares

Os dados tabulares registram os atributos utilizados nas simulações, como resume a tabela 5.1, a seguir.

Resumo dos atributos utilizados nas simulações								
Nome [Name <sup>26</sup> ]	Descrição	Categoria [Type]	Comportamento [Behave]	Peso [Weight] <sup>27</sup>	Limiar [Threshold]	Mutante [Mutable] ou Re-movível [Removable]	Congelante [Freezing]	Percolador [Percolator]
Laguna	trecho da Laguna dos Patos, delimitado pela área de estudo	natural	resistência	1	1	não	sim	não
Rios	rios, arroios e canais naturais internos à área de estudo	natural	resistência	1	1	não	sim	não
Águas	águas lânticas internas à área de estudo	natural	resistência	1	1	não	sim	não
Banhados	banhados e campos alagáveis	natural	resistência	1	1	sim	não	não
Matas	matas nativas e vegetação de grande porte	natural	resistência	1	1	sim	não	não
Dunas	dunas fixas e móveis	natural	resistência	1	1	não	sim	não
Praias	praias contíguas à Laguna dos Patos	natural	resistência	1	1	não	sim	não
Campos	campos e vegetação de pequeno porte	natural	resistência	1	1	sim	não	não
Plantações	áreas plantadas e vegetação de pequeno porte	natural	resistência	1	1	sim	não	não
Solo descoberto	solos descobertos; não edificadas e sem cobertura vegetal	natural	resistência	1	1	sim	não	não
Canais	canais de drenagem artificiais	urbano	resistência	1	1	sim	não	não
Áreas alagáveis	áreas sujeitas a alagamento	natural	resistência	1	1	sim	não	não
Random	<i>grid</i> aleatório, com mínimo igual a 1 e máximo igual a 1,1	natural	resistência	1	1	sim	não	não
1965	área coberta por urbanização no ano de 1965	urbano	atração	1	1	sim	não	não
2000	área coberta por urbanização no ano de 2000	urbano	atração	1	1	sim	não	não
Sv_1965	área coberta pelo sistema viário no ano de 1965	urbano	atração	1	1	sim	não	não
Sv_2000	área coberta pelo sistema viário no ano de 2000	urbano	atração	1	1	sim	não	não
RGCL	trecho de território não pertencente ao município de Pelotas (Rio Grande e Capão do Leão)	institucional	resistência	1	1	não	sim	não

Tabela 5.1: resumo dos atributos utilizados nas simulações.

<sup>26</sup> As expressões em inglês estão de acordo com a terminologia do modelo.

<sup>27</sup> Os pesos iguais a 1 (um) são os iniciais, podendo haver substituição pelo processo de autponderação residente no modelo.

### 5.3.2 Dados gráficos

Os dados gráficos que participaram das simulações constam das figuras 5.9 a 5.22, a seguir, em *grids* de 40 por 54, com 2.160 células de 500m.

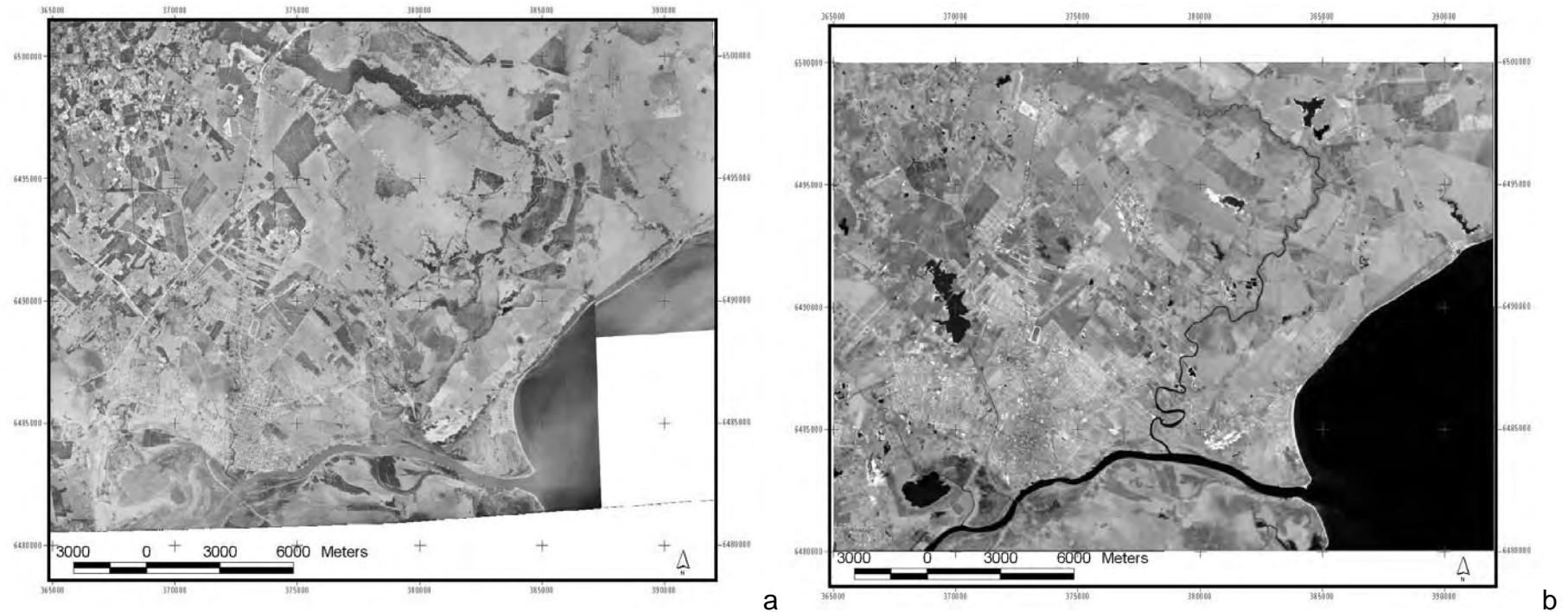


Figura 5.9: a) imagem aérea utilizada como fonte para os dados gráficos do ano de 1965 (fonte no recobrimento aerofotogramétrico de 1965; Polidori, 2003b); b) imagem de satélite utilizada como fonte para os dados gráficos do ano 2000 (fonte em Landsat 7 ETM +, de fevereiro de 2000, resolução de 15m; projeções em UTM, fuso 22 sul).

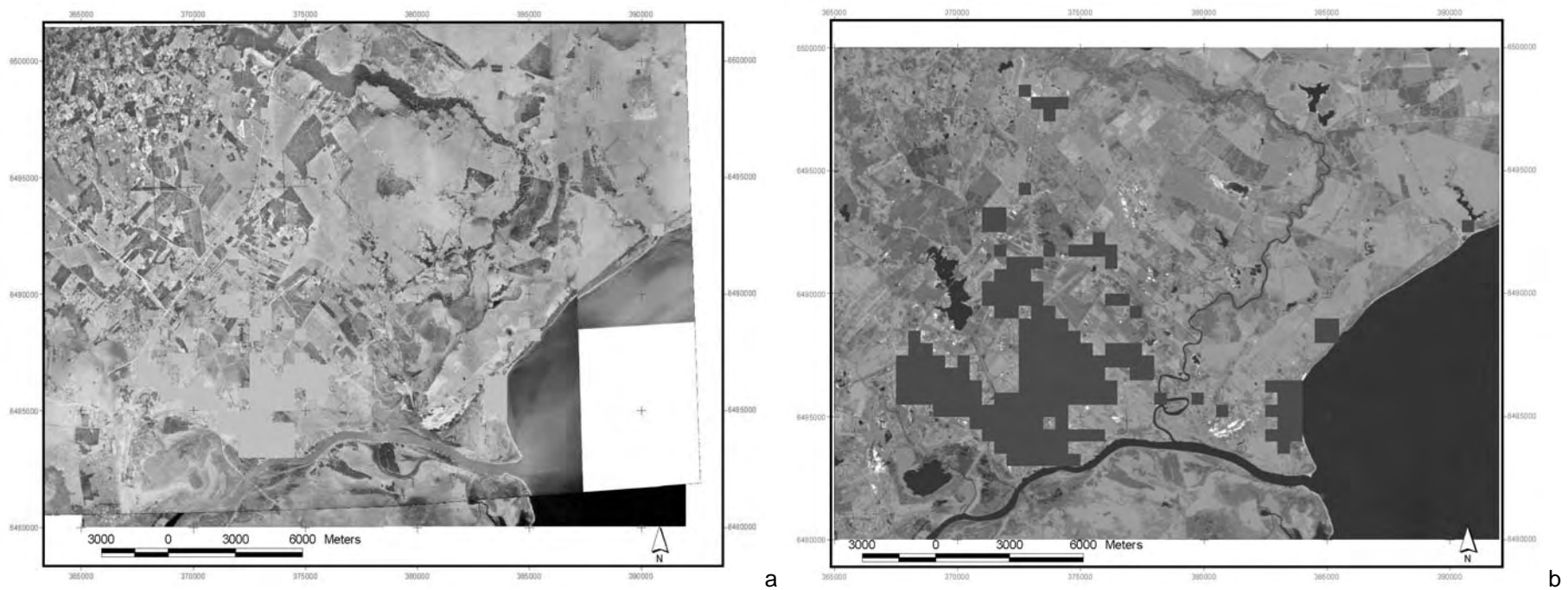


Figura 5.10: carregamento em uma intensidade de urbanização; a) em 1965; b) em 2000.

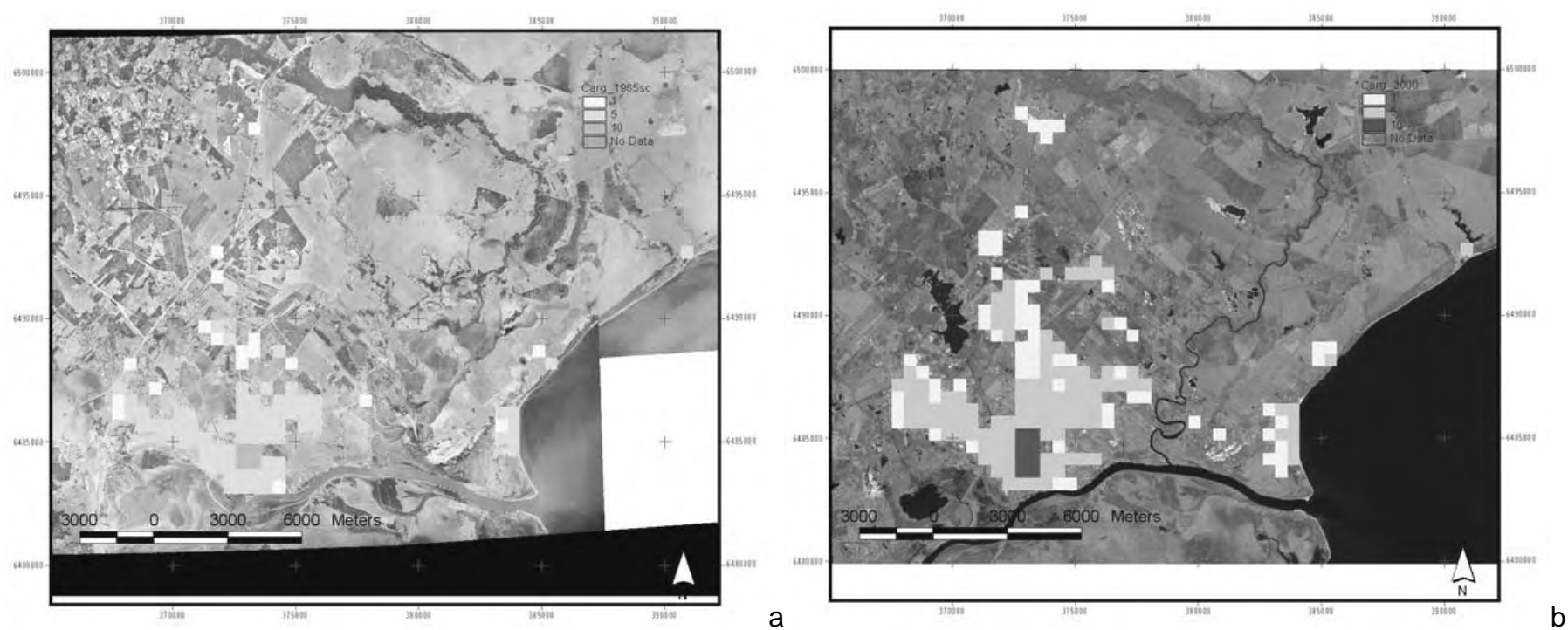


Figura 5.11: carregamento em três intensidades de urbanização (valores de 1, 5 e 10); a) em 1965; b) em 2000.

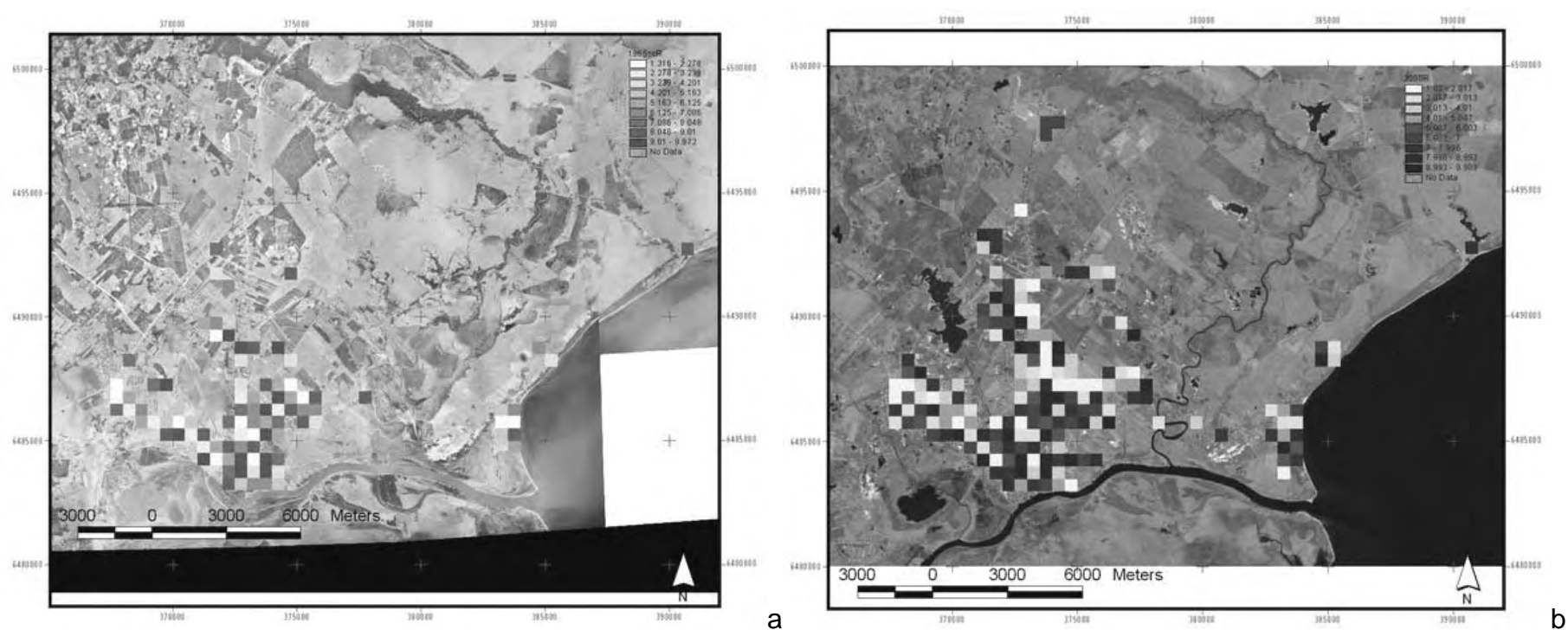


Figura 5.12: carregamento aleatório (intervalo de valores de 1 a 10); a) em 1965; b) em 2000.

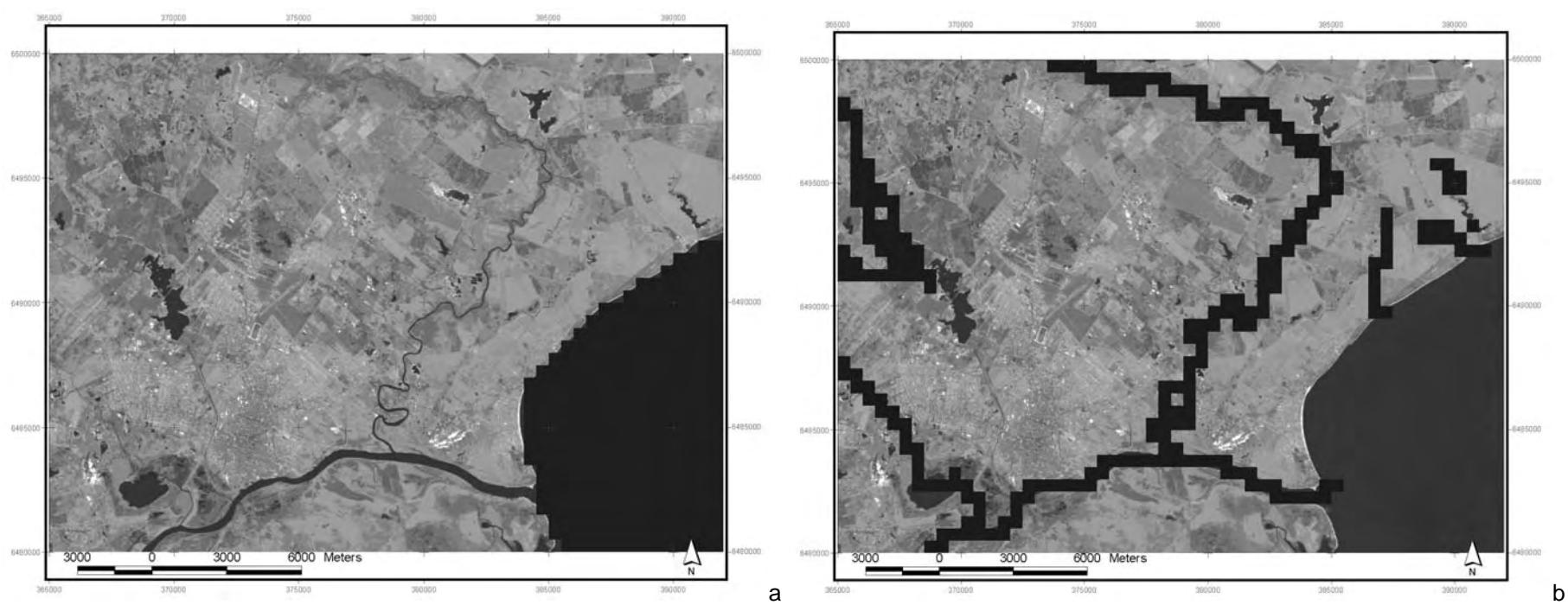


Figura 5.13: a) Laguna dos Patos (em 1965 e em 2000); b) rios, arroios e canais naturais (em 1965 e em 2000).

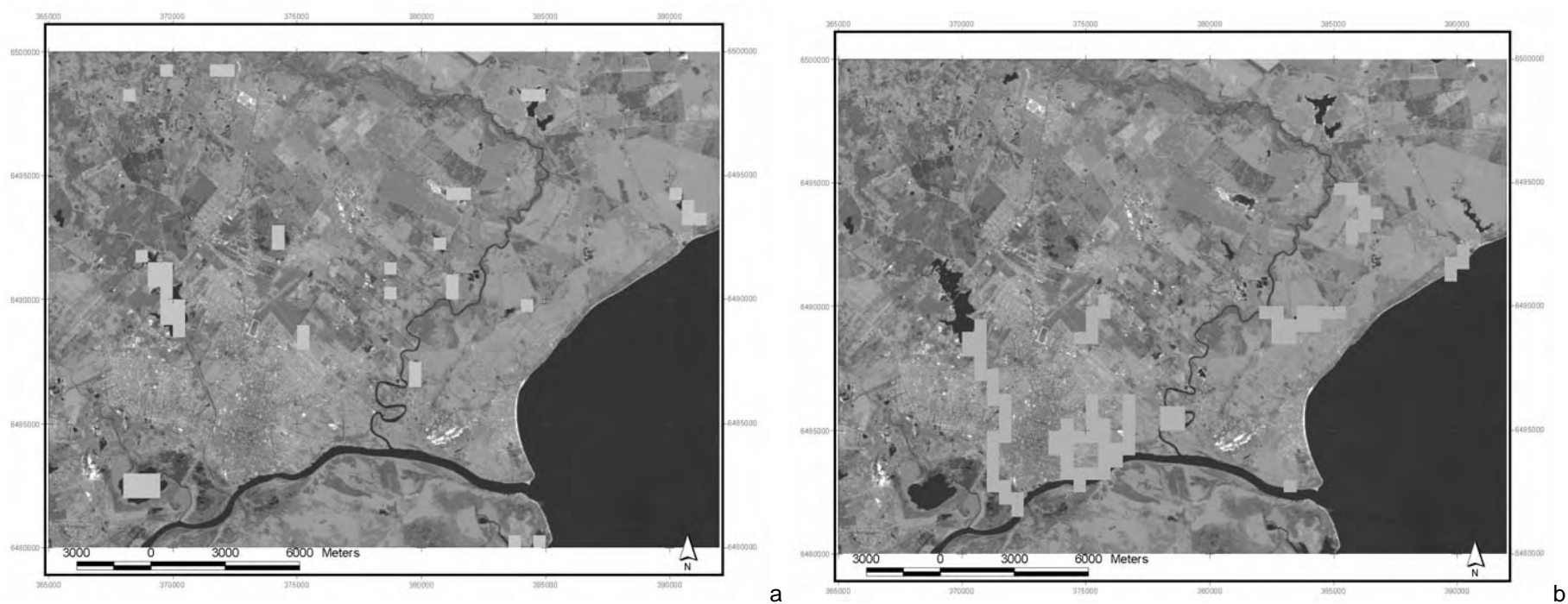


Figura 5.14: a) águas lânticas (em 1965 e em 2000); b) canais artificiais em (1965 e em 2000).

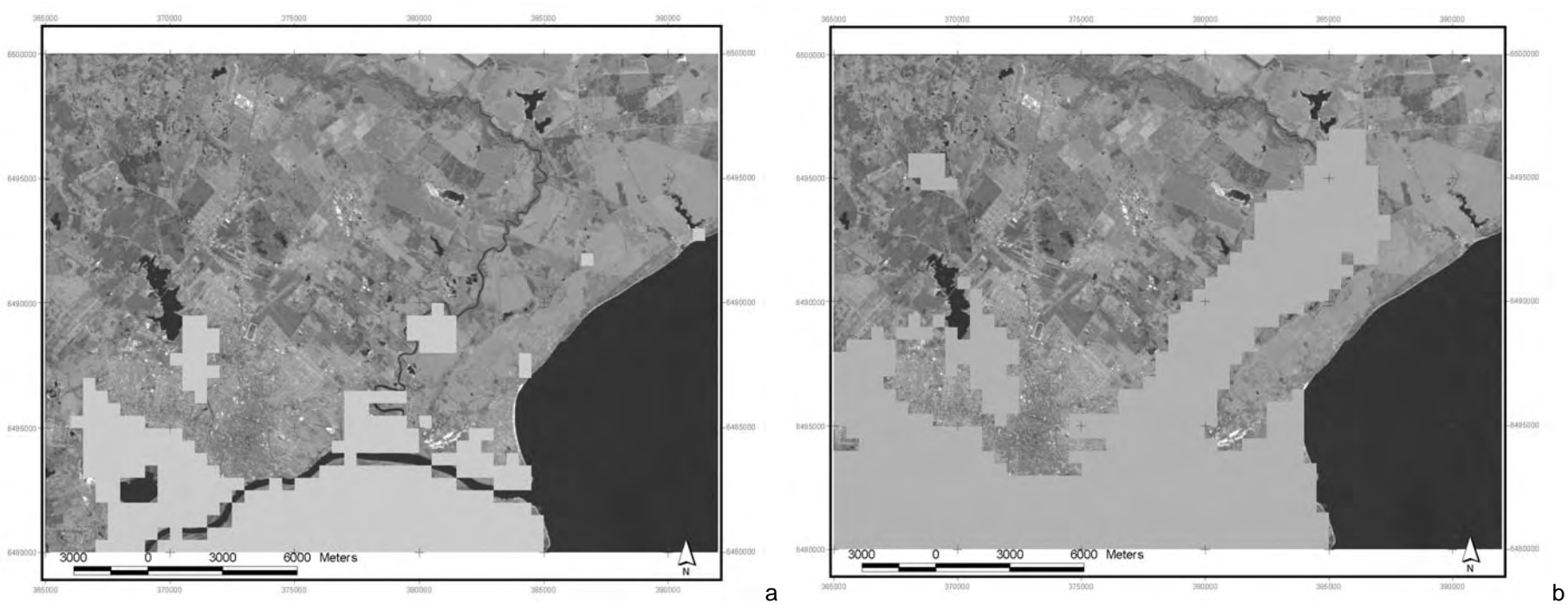


Figura 5.15: a) banhados (em 1965 e em 2000); b) áreas alagáveis (em 1965 e em 2000).

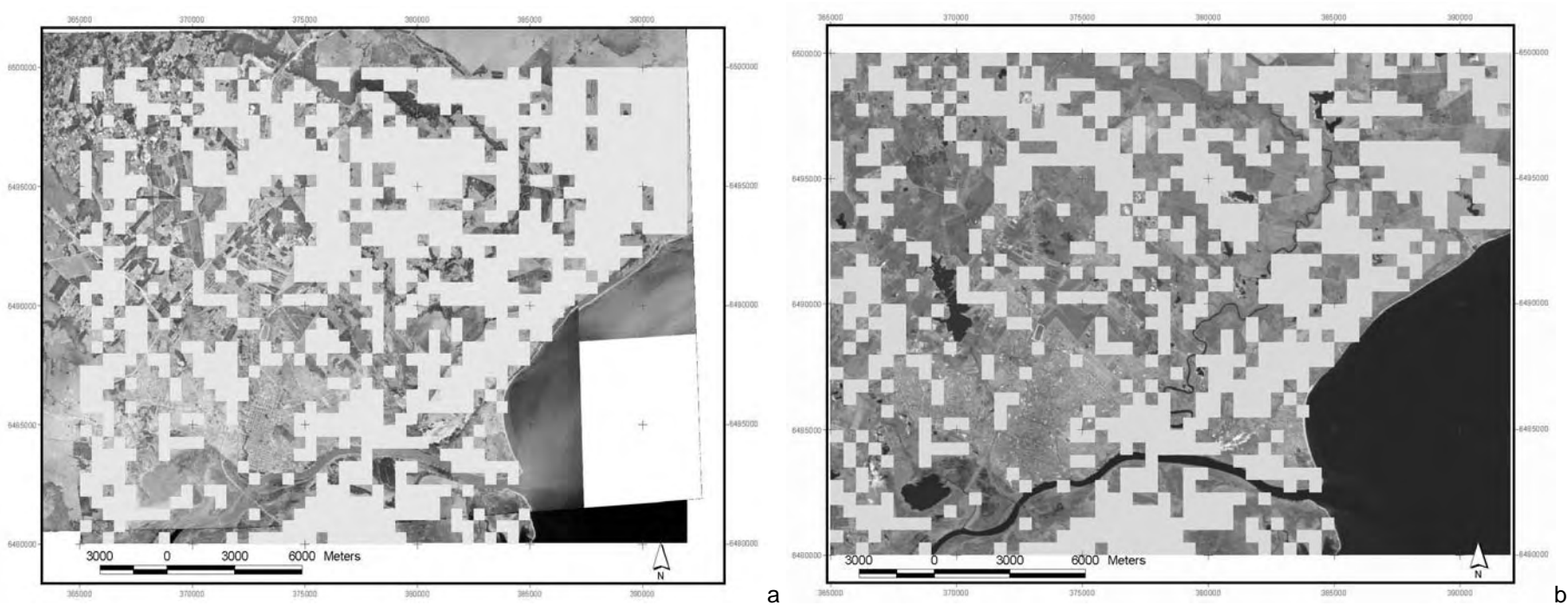
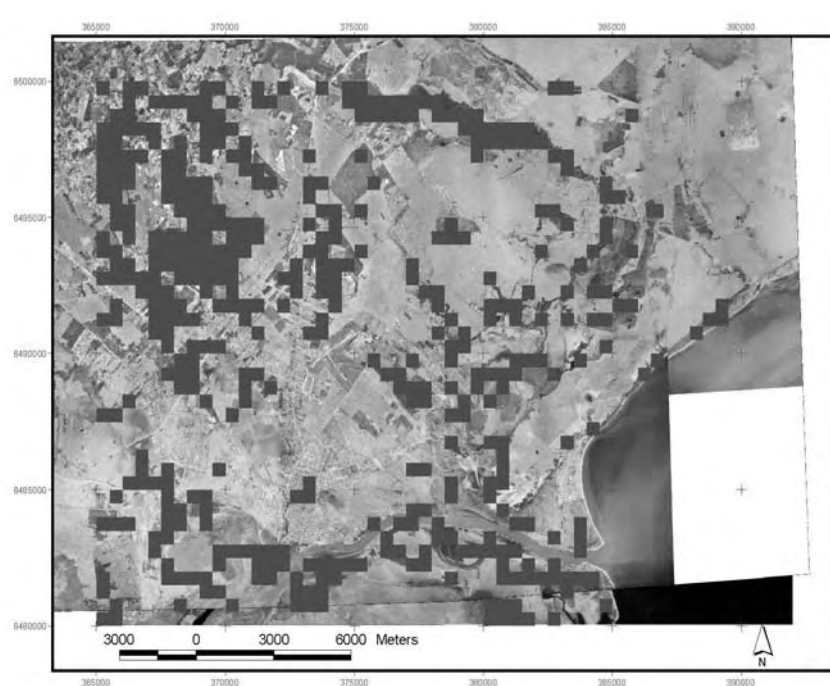
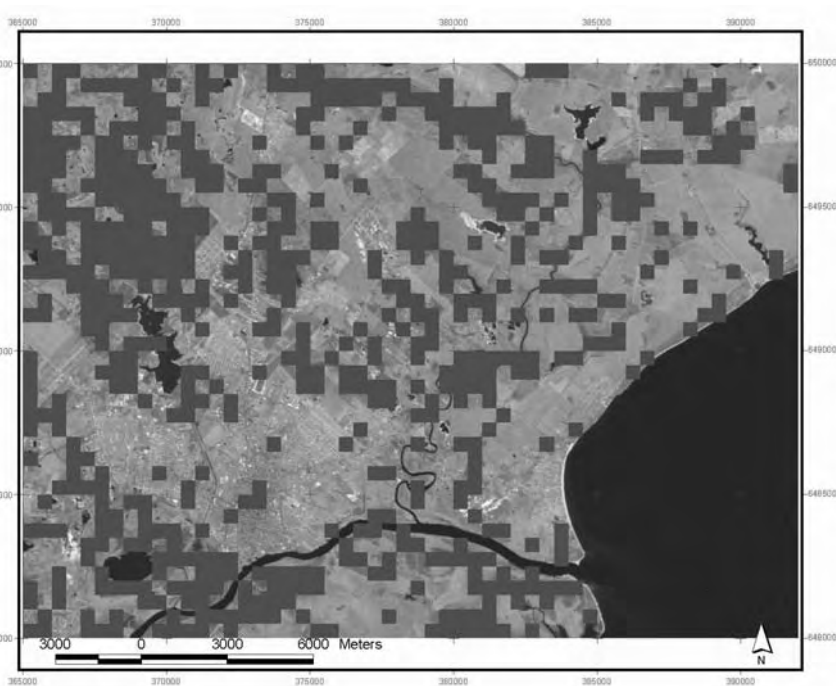


Figura 5.16: campos e vegetação de pequeno porte; a) em 1965; b) em 2000.

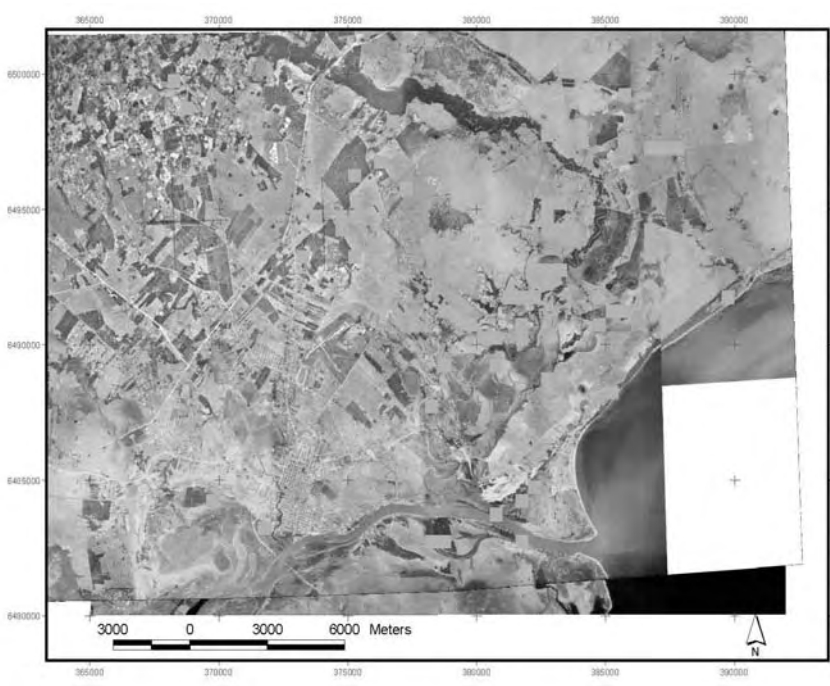


a



b

Figura 5.17: matas e vegetação de grande porte; a) em 1965; b) em 2000.



a



b

Figura 5.18: plantações e vegetação de pequeno porte; a) em 1965; b) em 2000.

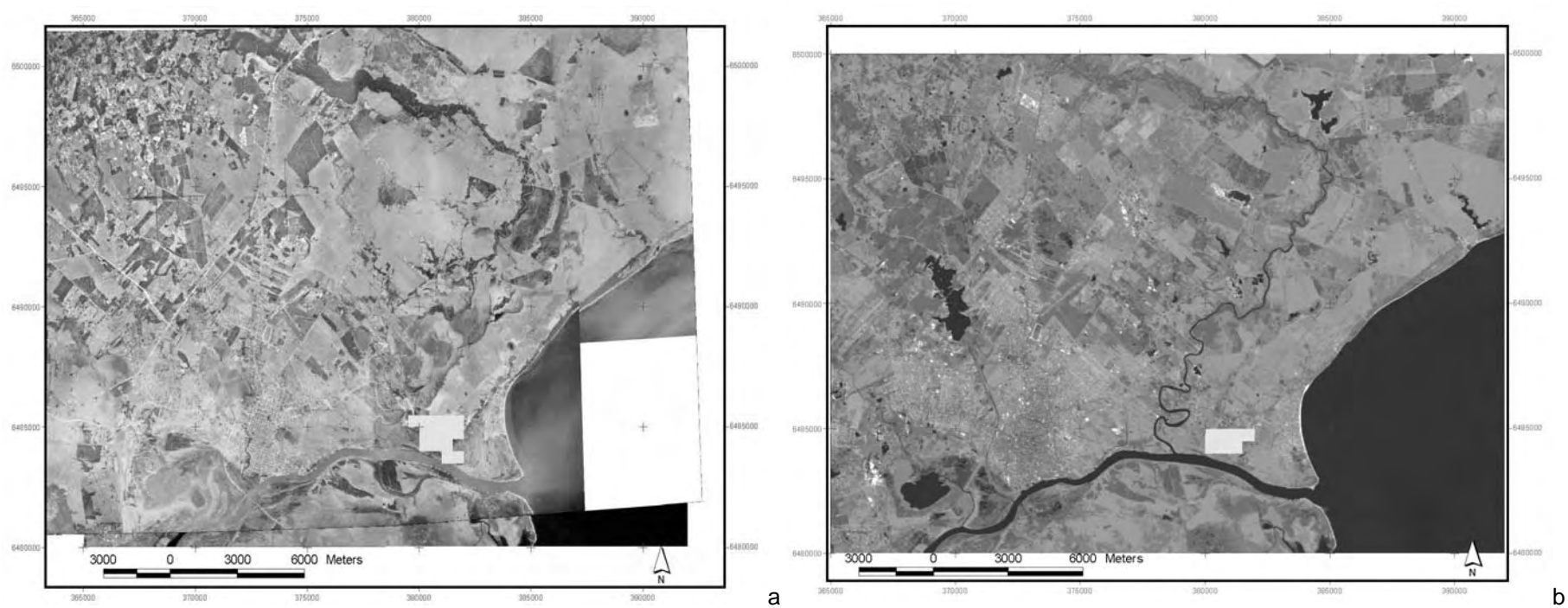


Figura 5.19: dunas; a) em 1965; b) em 2000.

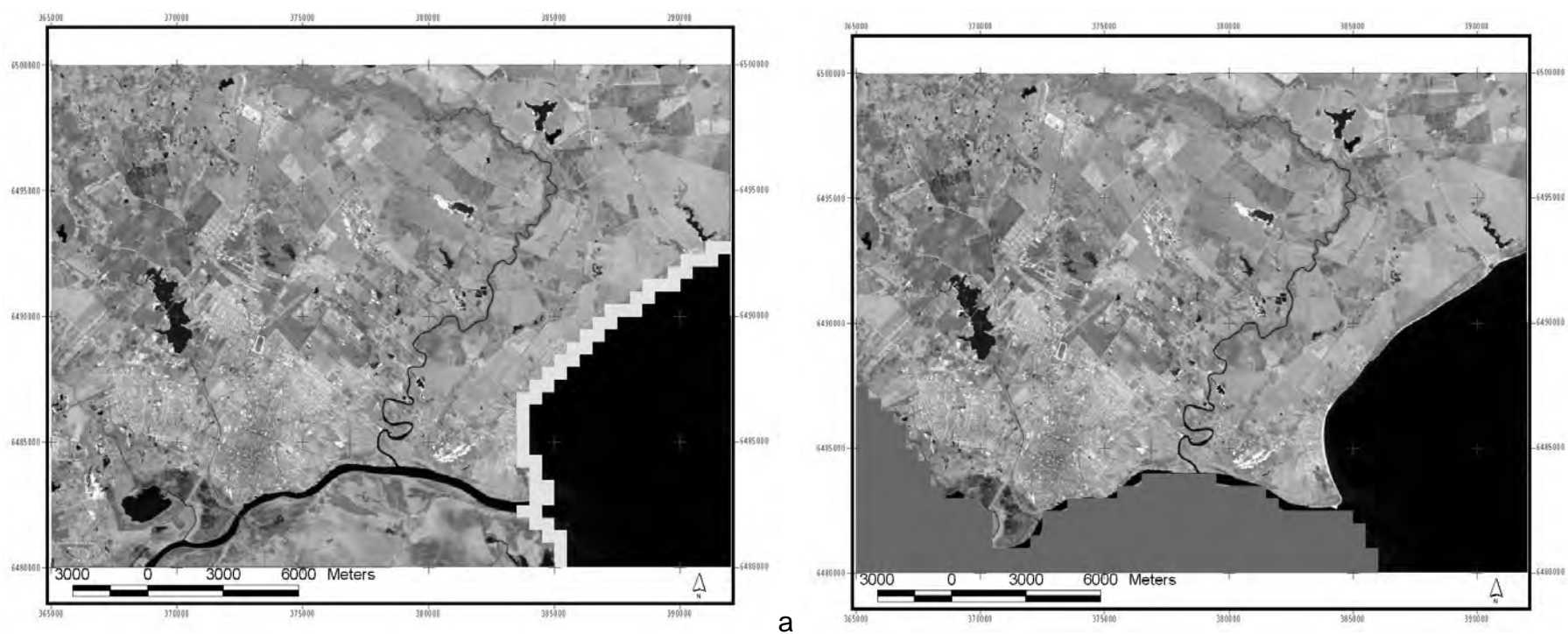


Figura 5.20: a) praias (em 1965 e em 2000); b) áreas não pertencentes ao município de Pelotas (em 1965<sup>28</sup> e em 2000).

<sup>28</sup> A área do atual município de Capão do Leão era um distrito rural de Pelotas em 1965.

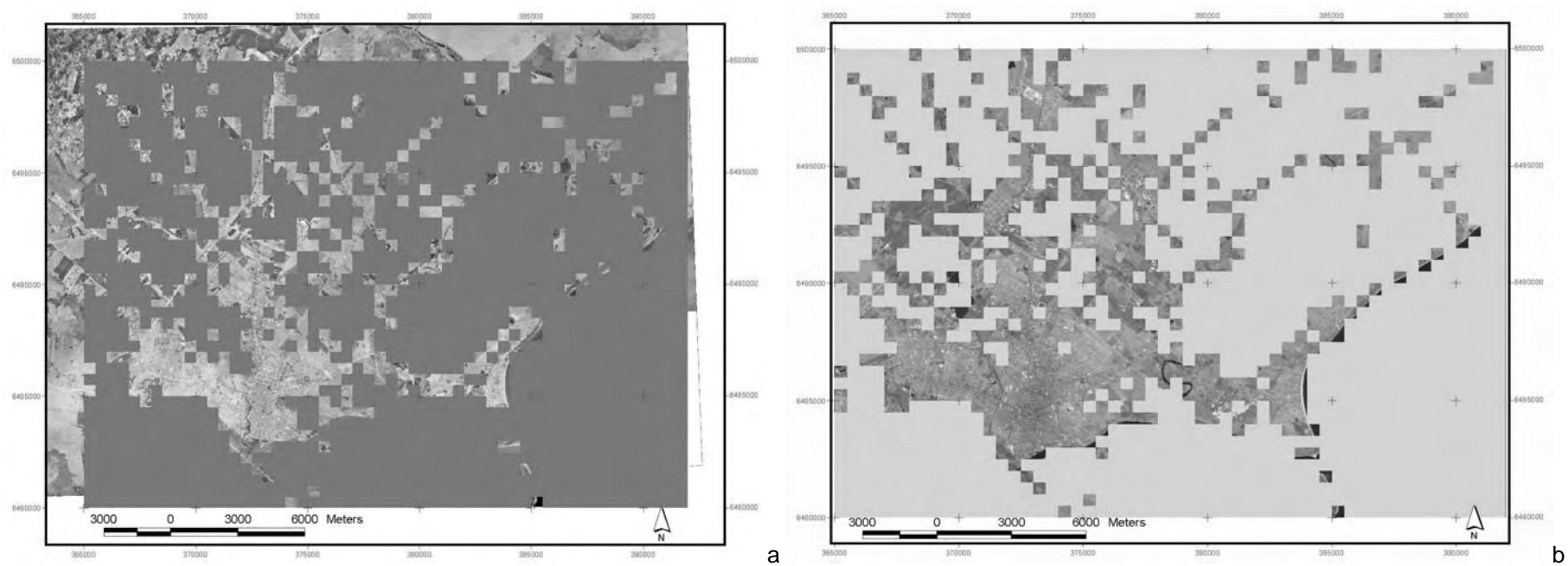


Figura 5.21: cobertura do sistema viário; a) em 1965; b) em 2000.

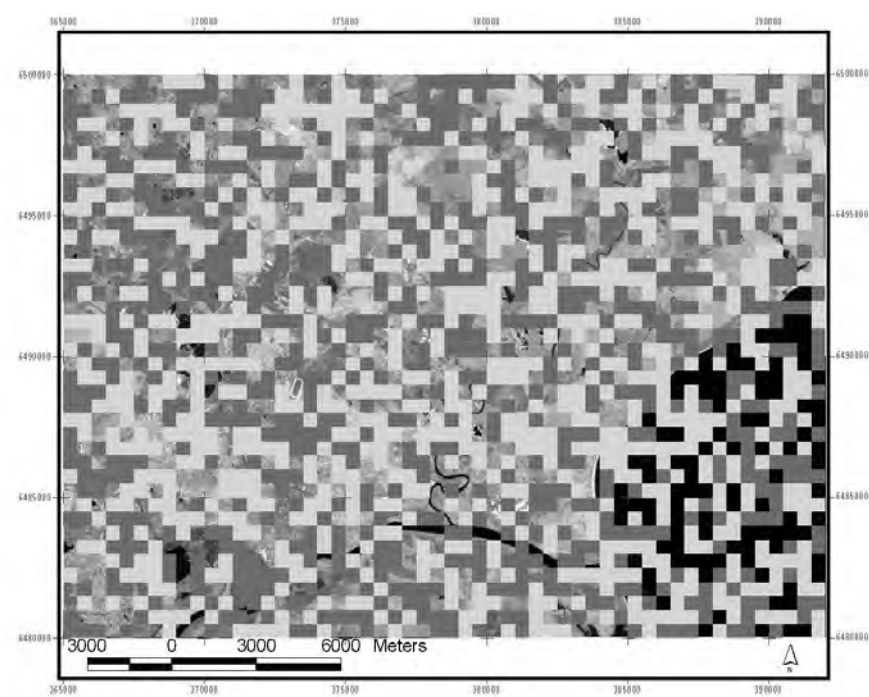


Figura 5.22: grid aleatório (valores de 1 a 1,1), em três classes.



#### 5.4 Calibração do modelo para 1965 a 2000

O processo de calibração está realizado nos três casos anotados anteriormente (carregamento urbano igual a 1 em todas as células urbanas, carregamento urbano diferenciado por três intensidades de urbanização e carregamento urbano aleatório), cada um com sete etapas, a saber:

- a) escolha dos estados inicial e final da realidade: estão representados pelo ano de 1965 e de 2000, respectivamente;
- b) implementação de projeto no SACI: inclui descrição tabular e gráfica, montando o banco de dados com os atributos e os respectivos *grids*; inclui também a parametrização (ver subtítulo 5.4.1, logo adiante) e a indicação do número de iterações, bem como o intervalo de estados a representar;
- c) escolha das distribuições de tensões que serão testadas: como foi anotado anteriormente, estão testadas cinco distribuições de tensões (sem predomínio, predomínio axial, predomínio polar, predomínio difuso e composição axial-polar), obtidas por variação dos parâmetros “x”, “y”, “z”, “w” e “q”, como estão registrados na tabela 5.2, adiante ;
- d) simulação de crescimento com intensidade zero (sem crescimento) para o ano 2000, para cada tipo de distribuição de tensões (variação qualitativa): essas simulações permitem mensurar estados através dos mesmos descritores das simulações que têm como estado inicial o ano de 1965 e realizar as comparações entre simulações e realidade;
- e) simulação de séries de crescimento, a partir do ano 1965, para cada tipo de distribuição de tensões (variação qualitativa), com aproximações sucessivas de intensidade de crescimento (variação quantitativa): a série está obtida por variação no parâmetro  $\lambda$  (lambda), ajustando o potencial de crescimento a cada simulação;
- f) indicação dos melhores resultados iniciais: é realizada por contagem do número total de células urbanas e contagem do número de células urbanas de borda, calculando então a percentagem de acertos de cada simulação; as percentagens máximas são adotadas como os melhores resultados;
- g) indicação dos melhores resultados finais: é realizada por correlação espacial entre os resultados simulados para o ano 2000 e os resultados desse ano, com crescimento zero; são adotados como melhores resultados aqueles com maior frequência de correlações máximas e com menor frequência de correlações mínimas, como aparece no subtítulo 5.5, mais adiante.

##### 5.4.1 Parametrização

Os parâmetros utilizados para regular o SACI podem permanecer no valor padrão ou serem modificados para conseguir os resultados desejados na calibração. A tabela 5.2, a seguir, mostra como os parâmetros foram utilizados nos experimentos deste capítulo.

## Resumo dos parâmetros utilizados no SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®

Parâmetro	Função		Espectro	Valor utilizado
Threshold	informar o limite de crescimento urbano por aumento de área construída (limiar)	permite simular o aparecimento de problemas ambientais decorrentes de excesso de urbanização; permite também diferenciar subsistemas urbanos; permite ainda simular fragilidade ambiental, melhoramentos urbanos e efeitos encadeados	0 a 100*	valor padrão (1 para todos)
Weigth	informar o grau de importância ou peso de cada atributo cadastrado	permite diferenciar os atributos quantitativamente, de modo independente da localização	1 a 100*	valor padrão (1 para todos)
$\lambda$ (lambda)	descomprimir os valores de PoteCel, ajustando-o a diferentes intensidades de crescimento urbano	permite ajustar o valor do potencial de crescimento urbano a cenários de crescimento quantitativamente diferentes	1/10* a 10*	variável. conforme processo de calibração
$\mu$ (mi)	introduzir depreciação no valor das construções, em função do tempo	permite regular o declínio edilício decorrente do passar do tempo, bem como promover revitalização	0 a 1	valor padrão (1 para todos)
$\psi$ (phi)	especificar o valor de CentCel <sub>Latente</sub>	permite ajustar padrões de formação de vazios urbanos orientados pela retenção fundiária	1* a 10*	valor padrão (1 para todos)
$\rho$ (rô) ext	definir a porcentagem ou a quantidade de células externas à área urbana preexistente que têm crescimento a cada iteração	permite ajustar a intensidade relativa de crescimento externo do sistema	0 a 1	valor padrão (1 para todos)
$\rho$ (rô) int	definir a porcentagem ou a quantidade de células internas à área urbana que têm crescimento a cada iteração	permite ajustar a intensidade relativa de crescimento interno do sistema	0 a 1	valor padrão (1 para todos)
$\theta$ (teta)	especificar evolução das resistências naturais	emula dinâmica de fatores naturais	0* a 100*	valor padrão (1 para todos)
P	determinar a existência e a intensidade da dinâmica dos atributos naturais	emula uma dinâmica simplificada de dinâmica ambiental, por percolação	0 a 100*	não utilizado
PR	determinar o raio de vizinhança onde incide "P"	permite regular o alcance do crescimento por percolação	0 até <i>grid</i> máximo	não utilizado
Iteration Radius	determinar o raio de alcance para as células que realizam interação espacial; é usado nos processos de interação espacial associados ao cálculo da centralidade celular	oferece a possibilidade de regular o grau de interação ou pregnância de trocas nas atividades urbanas de produção espacial, emulando o grau de compartimentação total do sistema	1 até <i>grid</i> máximo	valor padrão (máximo para todos)
Neighborhood Radius	determinar o raio de alcance para as células que realizam crescimento por diferenciação de centralidade celular; é usado nos processos de CA – autômato celular associados ao cálculo do potencial de crescimento celular	oferece a possibilidade de ajustar o tamanho da vizinhança no ambiente de CA – autômato celular, emulando a ocorrência de subsistemas locais	1 até <i>grid</i> máximo	valor padrão (1 para todos)

segue

continuação

Parâmetro	Função		Espectro	Valor utilizado
$\alpha$ (alfa)	minimizar ou maximizar a resistência natural de um determinado sistema ou subsistema	permite individualizar subsistemas naturais, na cidade ou na região, conforme a escala do trabalho	1/10* a 10*	valor padrão (1 para todos)
$\alpha'$ (alfa-linha)	minimizar ou maximizar o carregamento natural de um determinado sistema ou subsistema	permite individualizar subsistemas naturais, capazes de gerar tensões de crescimento urbano	1/10* a 10*	valor padrão (1 para todos)
$\beta$ (beta)	minimizar ou maximizar o carregamento urbano de um determinado sistema ou subsistema	permite individualizar subsistemas urbanos, na cidade ou na região, conforme a escala do trabalho	1/10* a 10*	valor padrão (1 para todos)
$\beta'$ (beta-linha)	minimizar ou maximizar a resistência urbana de um determinado sistema ou subsistema	permite individualizar subsistemas urbanos, capazes de gerar resistência ao crescimento urbano	1/10* a 10*	valor padrão (1 para todos)
$\Omega$ (ômega)	minimizar ou maximizar fatores institucionais referidos como carregamentos	permite ajustar a ação institucional como indutora de crescimento urbano	1/10* a 10*	valor padrão (1 para todos)
$\Omega'$ (ômega-linha)	minimizar ou maximizar fatores institucionais referidos como resistências	permite ajustar a ação institucional como restritora de crescimento urbano	1/10* a 10*	valor padrão (1 para todos)
I (Impedance)	converter os valores de resistência natural e urbana em impedância	permite informar o grau de resistência às interações que ocorrem na simulação, incidindo sobre tendências de conversão de solo não urbanizado em urbanizado	$\Sigma$ das resistências ou qualquer valor	valor padrão ( $\Sigma$ das resistências para todos)
BLP ( <i>buffer limits polar</i> )	informar o grau de abrangência dos pólos de atração urbanos	emula a abrangência dos usos ou funções urbanas que polarizam atração	1 célula até <i>grid</i> máximo	valor padrão (1 célula para todos)
BLA ( <i>buffer limits axial</i> )	informar o grau de abrangência do sistema axial	emula a abrangência do sistema viário	1 célula até <i>grid</i> máximo	valor padrão (1 célula para todos)
k (ka)	especificar a influência da distância entre as células geradoras de tensões	permite simular graus de eficácia de sistema de comunicação entre as células, emulando o sistema de transportes na simulação	1* a 100*	2 para todos
DD <sub>1</sub> ( <i>diffusive draw 1</i> )	regular a quantidade de células que serão sorteadas na distribuição de tensões aleatórias de tipo 1	permite ajustar o modelo ao grau de inovação empresarial que interessa à simulação,	0 até <i>grid</i> máximo ou %	valor padrão (% das células urbanas)
DD <sub>2</sub> ( <i>diffusive draw 2</i> )	regular a quantidade de células que serão sorteadas na distribuição de tensões aleatórias de tipo 2	permite ajustar o modelo ao grau de participação do mercado informal que interessa à simulação	0 até <i>grid</i> máximo ou %	valor padrão (% das células urbanas)
x	especificar a porcentagem de distribuição de tensões de no caminho preferencial	conjuntamente com o valor de y, implementa crescimento estrutural na cidade, na escala global	0 a 100%	variável. conforme processo de calibração
y	especificar a porcentagem de distribuição de tensões no <i>buffer</i> do caminho preferencial	conjuntamente com o valor de x, implementa crescimento estrutural na cidade, na escala global	0 a 100%	variável. conforme processo de calibração
z	especificar a porcentagem de distribuição de tensões no <i>buffer</i> da célula em interação espacial	implementa o crescimento na escala local, visando a área de influência de uma entidade do sistema	0 a 100%	variável. conforme processo de calibração
w	especificar a porcentagem de distribuição de tensões no modo difuso 1	implementa a promoção imobiliária formal, que "inventa" novos nichos de desenvolvimento e de mercado	0 a 100%	variável. conforme processo de calibração
q	especificar a porcentagem de distribuição de tensões no modo difuso 2	implementa a promoção imobiliária informal, de modo dedicado o crescimento periférico, visando locais com menor valor do solo	0 a 100%	variável. conforme processo de calibração

Tabela 5.2: resumo dos parâmetros utilizados nas simulações (linhas sombreadas destacam os parâmetros variáveis conforme processo de calibração; valores com asterisco são limites recomendados).

### 5.4.2 Calibração no caso 1

As simulações realizadas no caso 1 têm entrada de dados com uma intensidade de urbanização (carregamento igual a 1 em todas as células urbanas), conforme figura 5.23, abaixo. Os resultados aparecem resumidos na tabela 5.3, adiante.

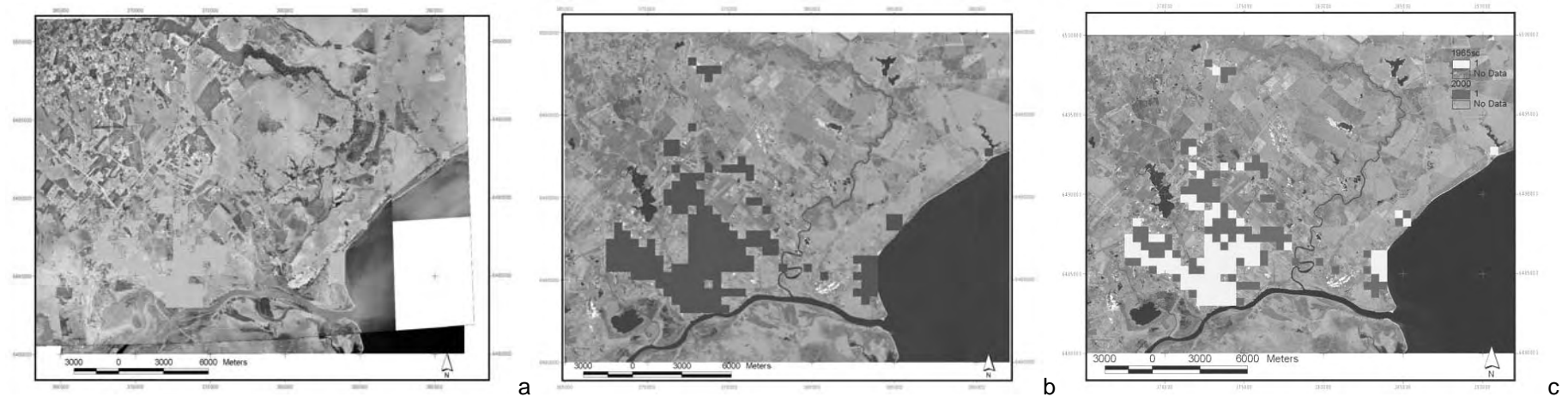


Figura 5.23: caso 1, com uma intensidade de urbanização (carregamento igual a 1 para todas as células urbanas); a) em 1965; b) em 2000; c) superposição de 1965 e 2000.

Resumo dos melhores resultados da calibração no caso 1 (com uma intensidade de urbanização e com a participação de todos os atributos naturais cadastrados)

ano 1965		ano 2000		processo de simulação	tipo de crescimento	distribuições de tensões, em %					melhores resultados de uma série de 20 simulações									
nº total de células	nº de células de borda	nº total de células	nº de células de borda			A1	A2	P	D1	D2	$\lambda$ (lambda)	nº total de células	nº de células de borda	taxa de crescimento em 45 anos, em %	% de acertos do nº total de células simuladas	% de acertos do nº de células de borda simuladas	correlação para CellType	correlação para LoadU	correlação para CentR1	média das correlações
95	89	187	147	a	sem predomínio	20	20	20	20	20	1,10	181	139	1,44	96,79	94,56	0,95	0,54	0,91	0,80
				b	predomínio axial	80	5	5	5	5	1,10	186	144	1,50	99,46	97,56	0,97	0,54	0,93	0,81
				c	predomínio polar	5	5	80	5	5	1,10	187	145	1,52	100	98,64	0,96	0,44	0,79	0,73
				d	predomínio difuso	2	2	2	47	47	1,00	175	134	1,37	93,58	91,16	0,92	0,55	0,74	0,74
				e	composição axial e polar	47	2	47	2	2	1,10	197	147	1,55	98,42	100	0,95	0,41	0,79	0,72

Legenda: A1: distribuição axial; A2: distribuição axial de *buffer*; P: distribuição polar; D1: distribuição difusa de tipo 1; D2: distribuição difusa de tipo 2; p externo: taxa de crescimento externo; *CellType*: células com fenótipo urbano; *LoadU*: carregamento urbano; *CentR1*: centralidade relativa de tipo 1.

Tabela 5.3: caso 1; resumo dos melhores resultados da calibração (com uma intensidade de urbanização e com a participação de todos os atributos naturais cadastrados); melhor resultado no processo "b" (predomínio de crescimento axial, linha com resultados sombreados, na tabela).

Os *outputs* finais para os fenótipos urbanos das cinco hipóteses de distribuição de tensão testadas no caso 1 estão na figura 5.24, abaixo.

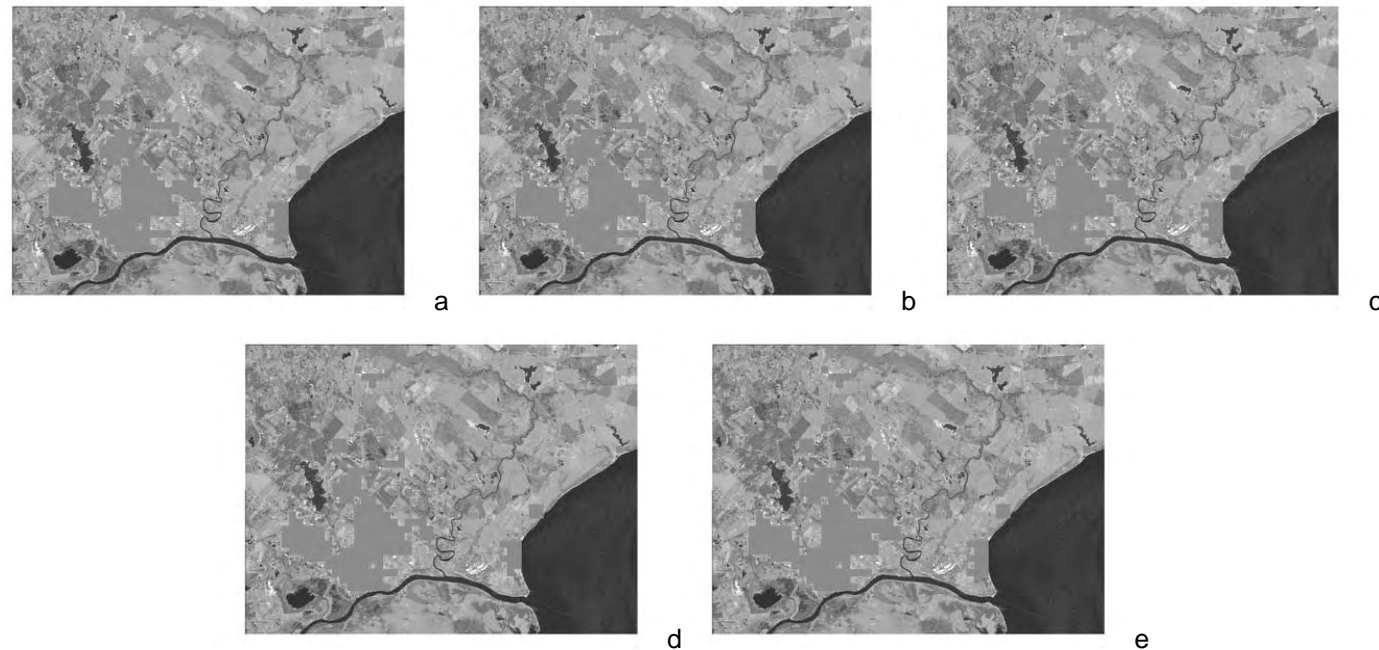


Figura 5.24: caso 1; resultados alcançados para fenótipos urbanos, com distribuição de tensões da tabela 3; a) sem predomínio; b) predomínio axial (melhor resultado); c) predomínio polar; d) predomínio difuso; e) predomínio de composição axial e polar.

Os melhores resultados alcançados no caso 1 constam do processo de simulação “b”, com predomínio de distribuição de tensões axiais (como está na tabela 5.3, anteriormente, com a linha sombreada), assumindo a maior média entre as correlações espaciais referentes aos fenótipos urbanos (*CellType*, no modelo), ao carregamento urbano (*LoadU*, no modelo) e à centralidade relativa tipo 1 (*CentR1*, no modelo), como indicadora da maior semelhança entre a situação simulada para o ano 2000 e a situação nesse ano, obtida rodando o modelo com taxa de crescimento igual a zero. O gráfico 5.1, a seguir, mostra as dispersões para as três grandezas indicadoras de semelhança; nas figuras 5.25 a 5.30, na seqüência, estão os *grids* para o ano 2000 e os resultantes dos melhores resultados alcançados na simulação, no seu estado final.

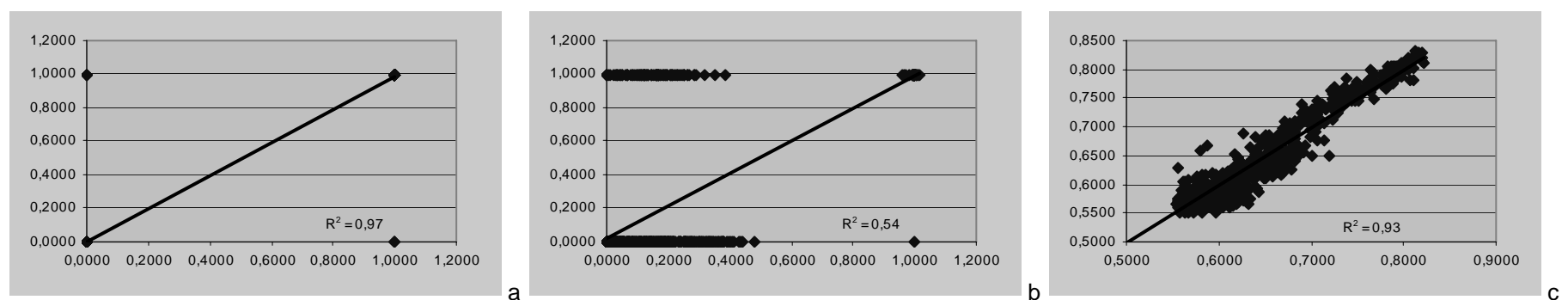
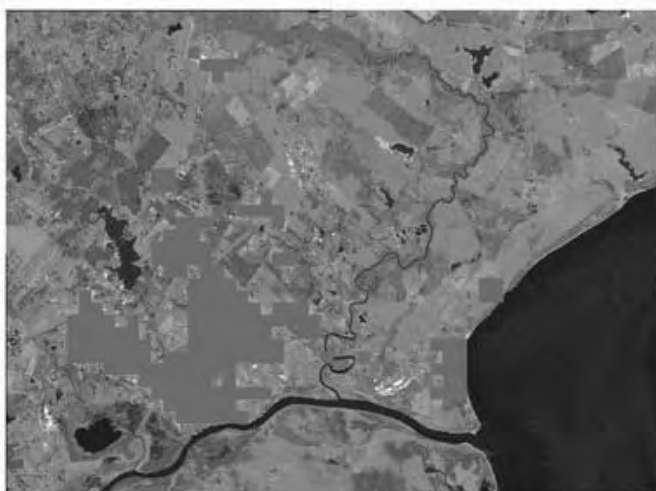


Gráfico 5.1: caso 1; dispersão para as três grandezas consideradas indicadoras de semelhança entre a situação simulada para o ano 2000 (eixo vertical) e a situação nesse ano (eixo horizontal), para o melhor resultado (predomínio axial); a) correlação entre fenótipos urbanos (*grids* booleanos); b) correlação entre carregamentos urbanos; c) correlação entre centralidades urbanas.



a



b

Figura 5.25: caso 1; a) células urbanas de controle para o ano 2000; b) células urbanas simuladas para o ano 2000.

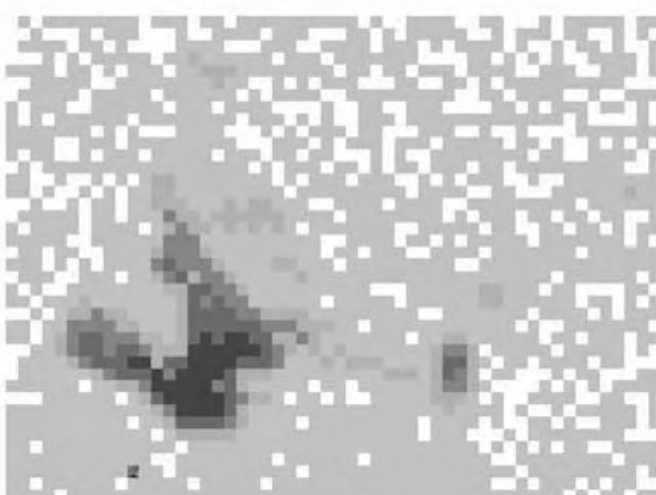


a

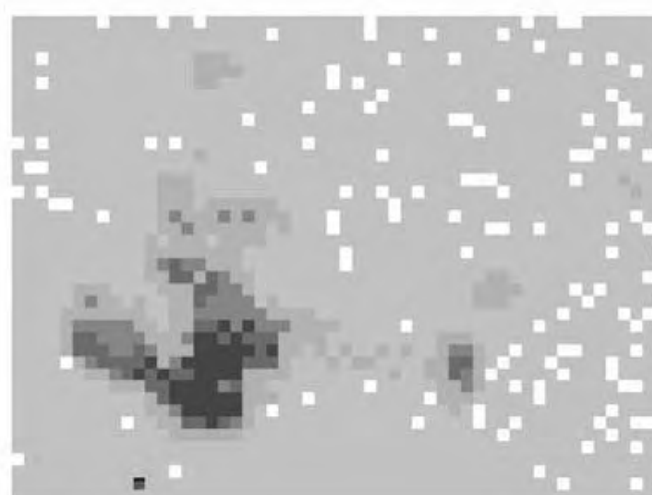


b

Figura 5.26: caso 1; a) carregamento de controle para o ano 2000; b) carregamento simulado para o ano 2000.



a



b

Figura 5.27: caso 1; a) centralidade de controle para o ano 2000; b) centralidade simulada para o ano 2000.

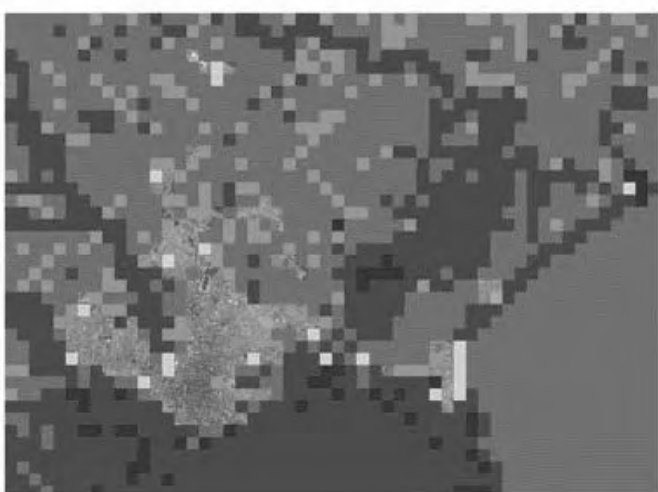


a

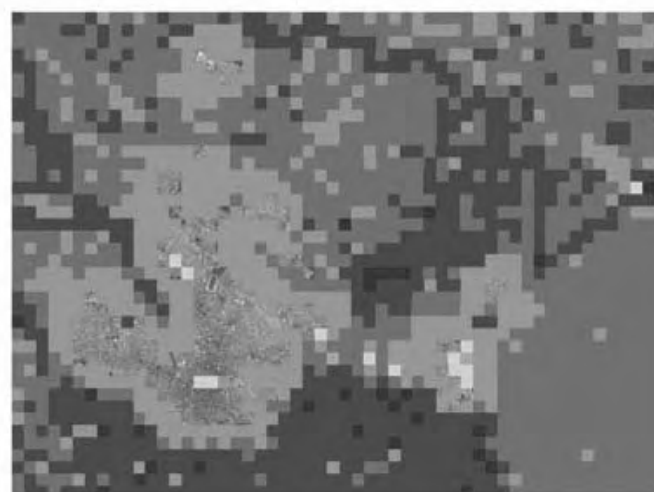


b

Figura 5.28: caso 1; a) potencial de controle para o ano 2000; b) potencial simulado para o ano 2000.



a



b

Figura 5.29: caso 1; a) resistências naturais de controle para o ano 2000; b) resistências naturais simuladas para o ano 2000.



a



b

Figura 5.30: caso 1; a) problemas ambientais intra-urbanos de controle para o ano 2000; b) problemas ambientais intra-urbanos simuladas para o ano 2000.

### 5.4.3 Calibração no caso 2

As simulações realizadas no caso 2 têm entrada de dados com carregamento diferenciado em três intensidades de urbanização, expressa por valores de 1, 5 e 10 (conforme figura 5.31, abaixo). Essas intensidades de urbanização foram definidas e localizadas considerando os seguintes fatores: a) concentração de edifícios em altura; b) freqüência de uso comercial; c) quantidade de tráfego. Os resultados aparecem resumidos na tabela 5.4, adiante.

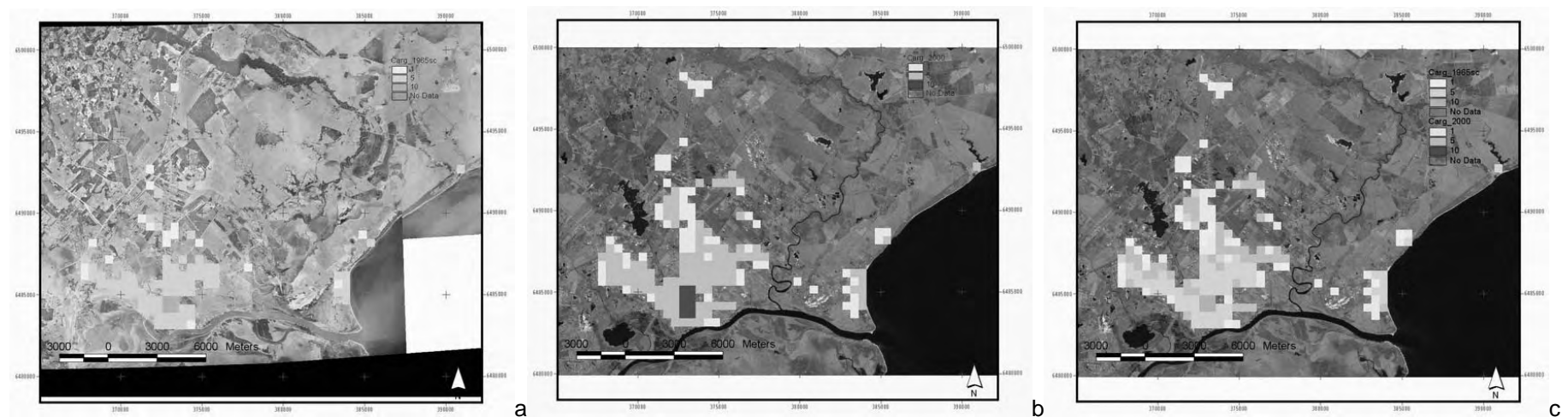


Figura 5.31: caso 2, com carregamento em três intensidades de urbanização (valores de 1, 5 e 10); a) em 1965; b) em 2000; c) superposição de 1965 e 2000.

Resumo dos melhores resultados da calibração no caso 2 (com três intensidades de urbanização e com a participação de todos os atributos naturais)

ano 1965		ano 2000		processo de simulação	tipo de crescimento	distribuições de tensões, em %					melhores resultados de uma série de 20 simulações									
nº total de células	nº de células de borda	nº total de células	nº de células de borda			A1	A2	P	D1	D2	$\lambda$ (lambda)	nº total de células	nº de células de borda	taxa de crescimento em 35 anos, em %	% de acertos do nº total de células simuladas	% de acertos do nº de células de borda simuladas	correlação para CellType	correlação para LoadU	correlação para CentR1	média das correlações
90	84	161	130	a	sem predomínio	20	20	20	20	20	1,50	160	127	1,29	99,38	97,69	0,85	0,68	0,88	0,80
				b	predomínio axial	80	5	5	5	5	1,70	158	126	1,25	98,14	96,93	0,85	0,66	0,88	0,80
				c	predomínio polar	5	5	80	5	5	1,60	179	139	1,54	89,94	93,52	0,85	0,66	0,59	0,70
				d	predomínio difuso	2	2	2	47	47	1,00	172	133	1,45	93,60	97,74	0,97	0,80	0,85	0,87
				e	composição axial e polar	47	2	47	2	2	1,70	161	134	1,30	100	97,01	0,84	0,65	0,66	0,72

Legenda: A1: distribuição axial; A2: distribuição axial de *buffer*; P: distribuição polar; D1: distribuição difusa de tipo 1; D2: distribuição difusa de tipo 2; p externo: taxa de crescimento externo; *CellType*: células com fenótipo urbano; *LoadU*: carregamento urbano; *CentR1*: centralidade relativa de tipo 1.

Tabela 5.4: caso 2; resumo dos melhores resultados da calibração (com três intensidades de urbanização e com a participação de todos os atributos naturais); melhor resultado no processo "d" (predomínio de crescimento difuso, linha com resultados sombreados, na tabela).



Os *outputs* finais para os fenótipos urbanos das cinco hipóteses de distribuição de tensão testadas no caso 2 estão na figura 5.32, abaixo.

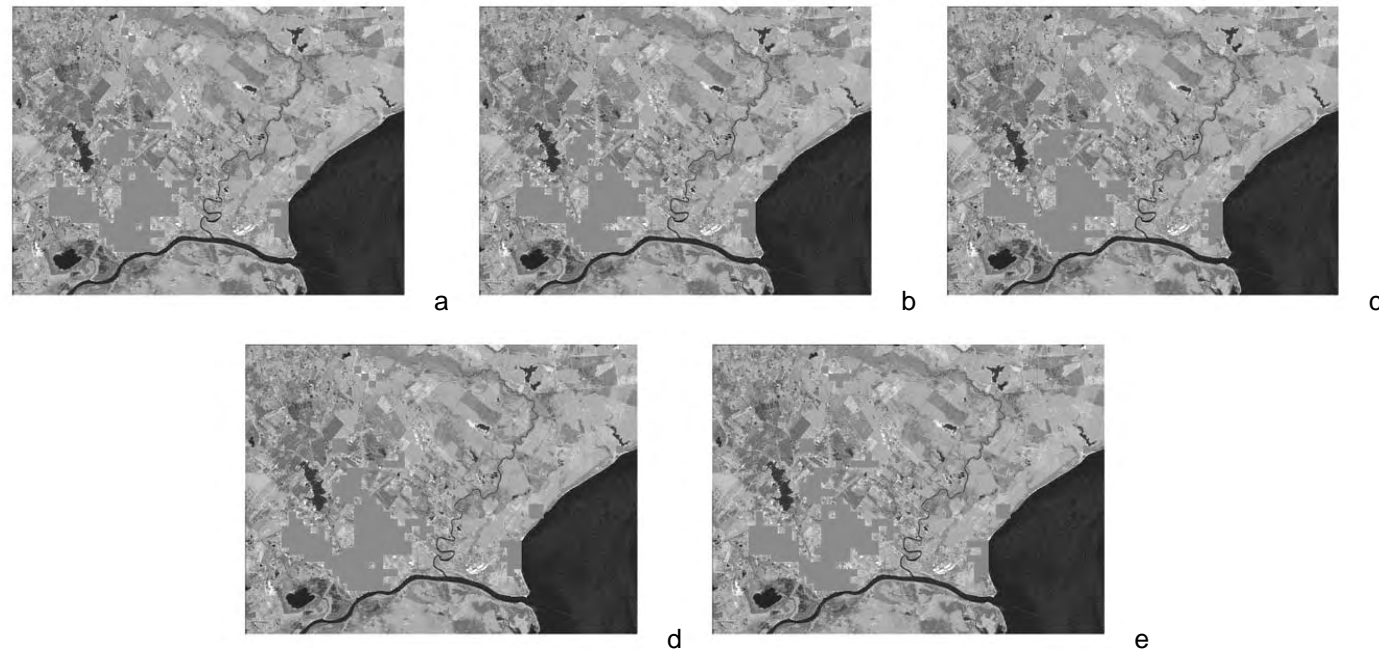


Figura 5.32: caso 2; resultados alcançados para fenótipos urbanos, com distribuição de tensões da tabela 4; a) sem predominio; b) predominio axial; c) predominio polar; d) predominio difuso (melhor resultado); e) predominio de composição axial e polar.

Os melhores resultados alcançados no caso 2 constam do processo de simulação “d”, com predominio de distribuição de tensões difusas (como está na tabela 5.4, anteriormente, com a linha sombreada), assumindo a maior média entre as correlações espaciais referentes aos fenótipos urbanos (*CellType*, no modelo), ao carregamento urbano (*LoadU*, no modelo) e à centralidade relativa tipo 1 (*CentR1*, no modelo), como indicadora da maior semelhança entre a situação simulada para o ano 2000 e a situação nesse ano, obtida rodando o modelo com taxa de crescimento igual a zero. O gráfico 5.2, a seguir, mostra as dispersões para as três grandezas indicadoras de semelhança; nas figuras 5.33 a 5.38, na seqüência, estão os *grids* para o ano 2000 e os resultantes dos melhores resultados alcançados na simulação, no seu estado final.

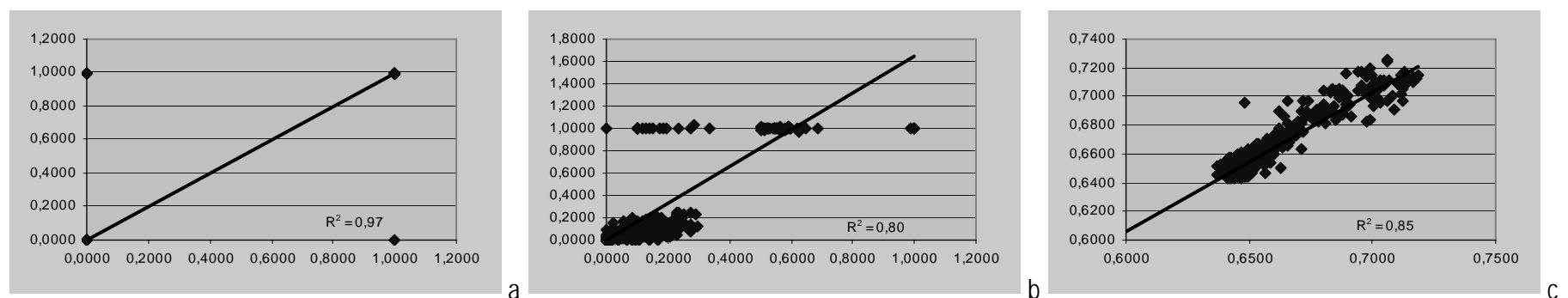
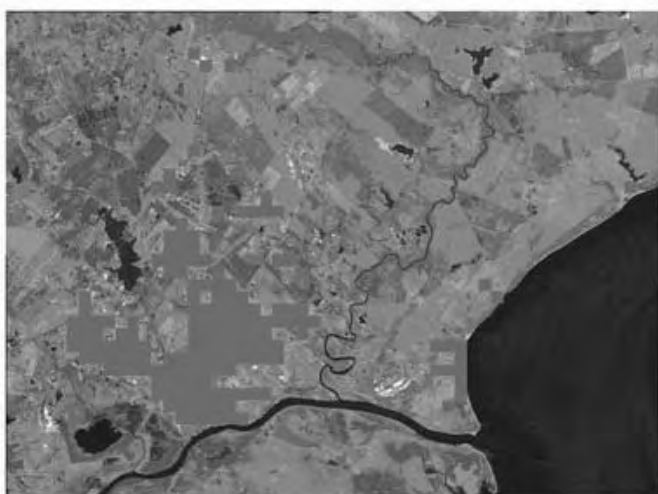
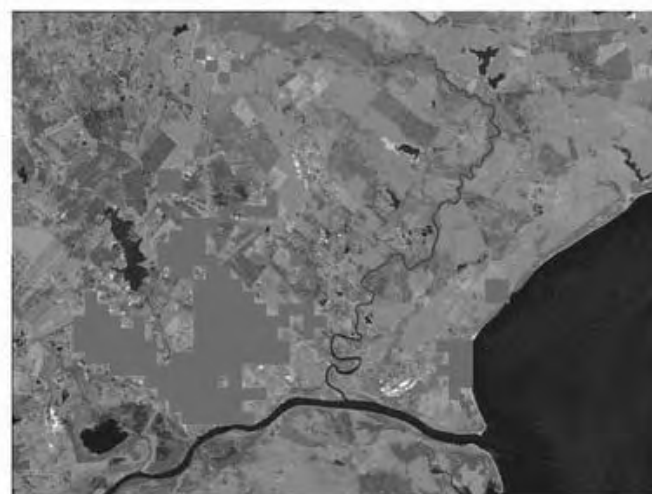


Gráfico 5.2: caso 2; dispersão para as três grandezas consideradas indicadoras de semelhança entre a situação simulada para o ano 2000 (eixo vertical) e a situação nesse ano (eixo horizontal), para o melhor resultado (predomínio difuso); a) correlação entre fenótipos urbanos (*grids* booleanos); b) correlação entre carregamentos urbanos; c) correlação entre centralidades urbanas.



a



b

Figura 5.33: caso 2; a) células urbanas de controle para o ano 2000; b) células urbanas simuladas para o ano 2000.

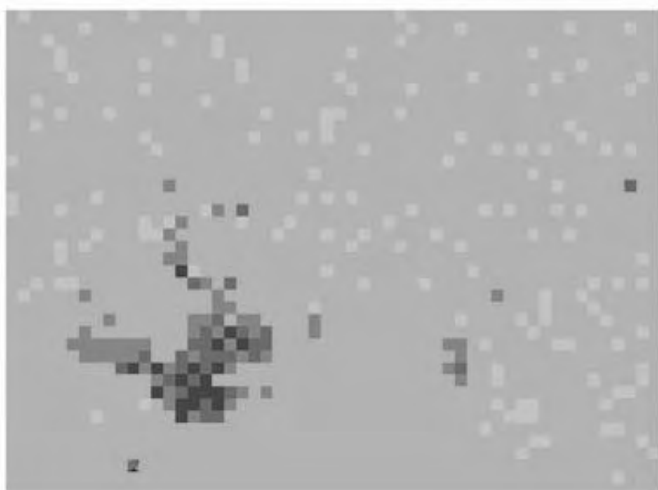


a

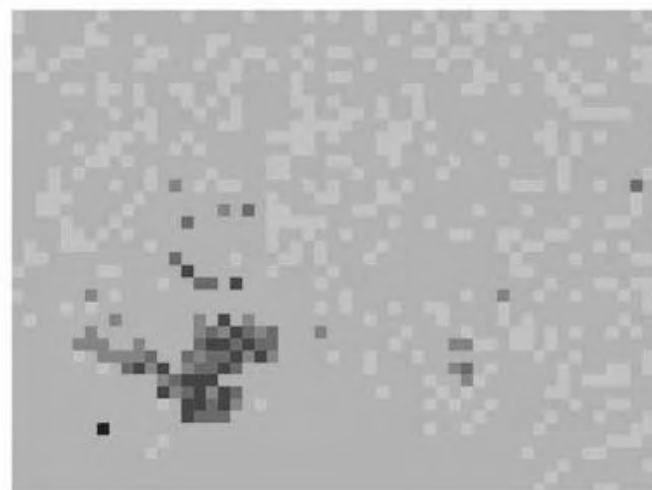


b

Figura 5.34: caso 2; a) carregamento de controle para o ano 2000; b) carregamento simulado para o ano 2000.



a

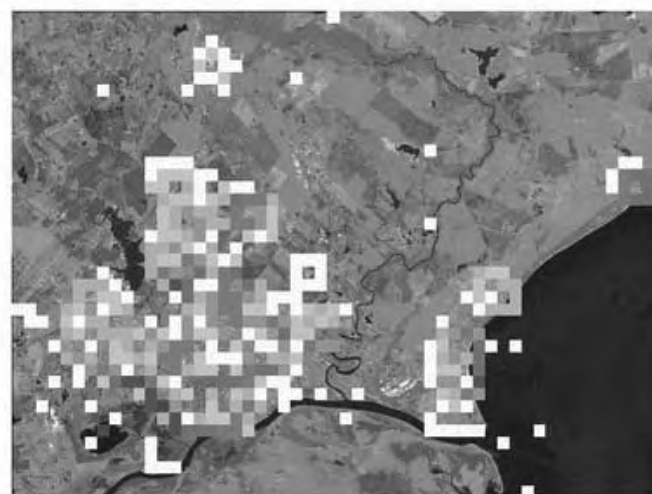


b

Figura 5.35: caso 2; a) centralidade de controle para o ano 2000; b) centralidade simulada para o ano 2000.

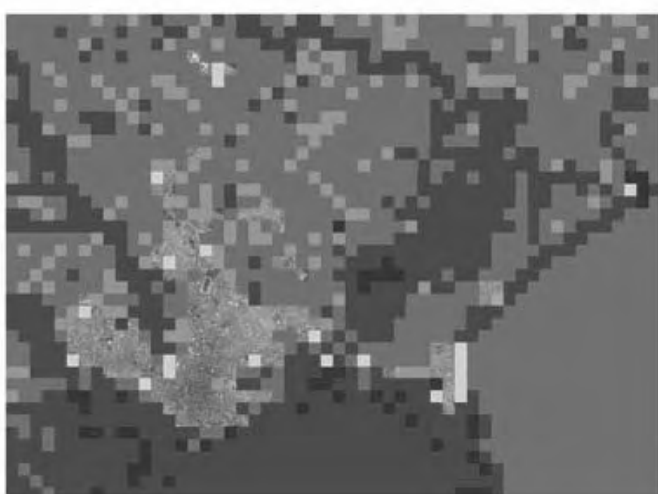


a

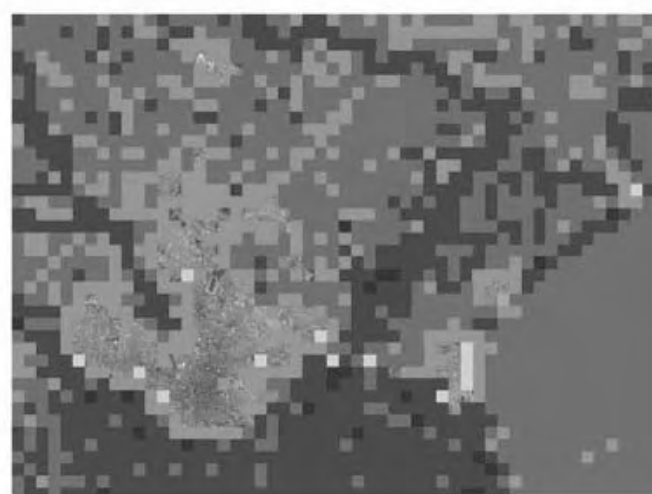


b

Figura 5.36: caso 2; a) potencial de controle para o ano 2000; b) potencial simulado para o ano 2000.



a



b

Figura 5.37: caso 2; a) resistências naturais de controle para o ano 2000; b) resistências naturais simuladas para o ano 2000.



a



b

Figura 5.38: caso 2; a) problemas ambientais intra-urbanos de controle para o ano 2000; b) problemas ambientais intra-urbanos simuladas para o ano 2000.

#### 5.4.4 Calibração no caso 3

As simulações realizadas no caso 3 têm entrada de dados com carregamento diferenciado em intensidades de urbanização aleatórias, com valor mínimo igual a 1 e máximo igual a 10 (conforme figura 5.39, abaixo). Participam todos os atributos naturais cadastrados, com as características que aparecem na tabela 5.5, na seqüência.

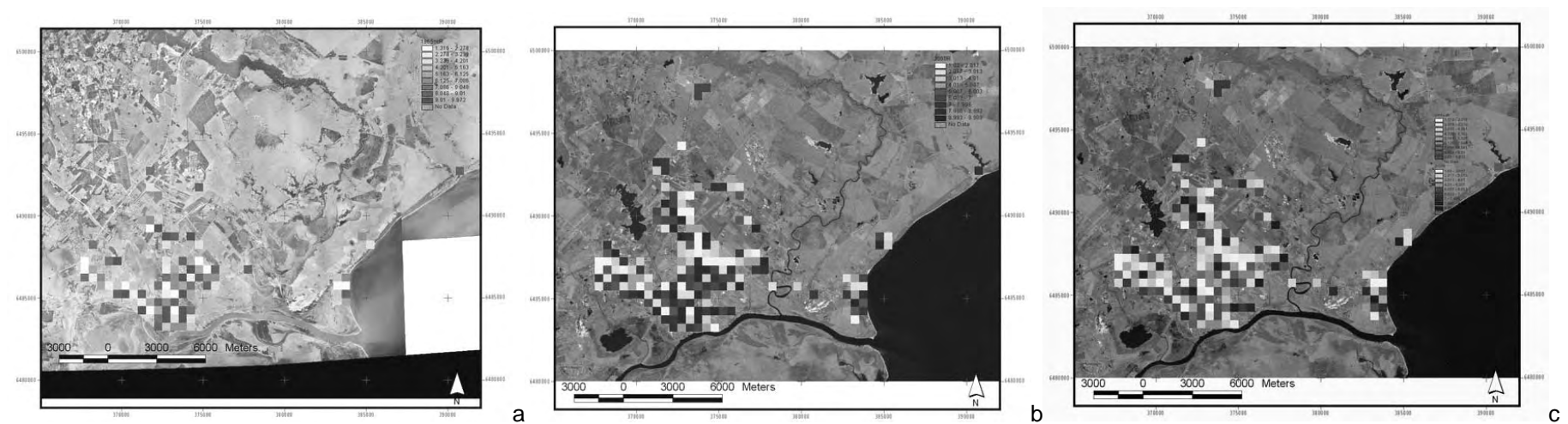


Figura 5.39: caso 3, com carregamento aleatório (intervalo de valores de 1 a 10); a) em 1965; b) em 2000; c) superposição de 1965 e 2000.

Resumo dos melhores resultados da calibração no caso 3 (com intensidade de urbanização aleatória e com a participação de todos os atributos naturais)

ano 1965		ano 2000		processo de simulação	tipo de crescimento	distribuições de tensões, em %					melhores resultados de uma série de 20 simulações									
nº total de células	nº de células de borda	nº total de células	nº de células de borda			A1	A2	P	D1	D2	$\lambda$ (lambdã)	nº total de células	nº de células de borda	taxa de crescimento em 35 anos, em %	% de acertos do nº total de células simuladas	% de acertos do nº de células de borda simuladas	correlação para CellType	correlação para LoadU	correlação para CentR1	média das correlações
93	87	179	145	a	sem predomínio	20	20	20	20	20	1,30	181	139	1,49	98,89	95,86	0,92	0,58	0,86	0,79
				b	predomínio axial	80	5	5	5	5	1,30	182	139	1,50	98,35	95,86	0,90	0,56	0,86	0,77
				c	predomínio polar	5	5	80	5	5	1,40	183	141	1,51	97,81	97,24	0,94	0,54	0,68	0,72
				d	predomínio difuso	2	2	2	47	47	1,00	175	133	1,41	97,76	91,72	0,89	0,62	0,80	0,77
				e	composição axial e polar	47	2	47	2	2	1,50	186	143	1,55	96,24	98,62	0,92	0,53	0,69	0,71

Legenda: A1: distribuição axial; A2: distribuição axial de *buffer*; P: distribuição polar; D1: distribuição difusa de tipo 1; D2: distribuição difusa de tipo 2; p externo: taxa de crescimento externo; *CellType*: células com fenótipo urbano; *LoadU*: carregamento urbano; *CentR1*: centralidade relativa de tipo 1.

Tabela 5.5: caso 3; resumo dos melhores resultados da calibração (com intensidade de urbanização aleatória e com a participação de todos os atributos naturais); melhor resultado no processo "a" (sem predomínio; linha sombreada, na tabela).

Os *outputs* finais para os fenótipos urbanos das cinco hipóteses de distribuição de tensão testadas no caso 3 estão na figura 5.40, abaixo.

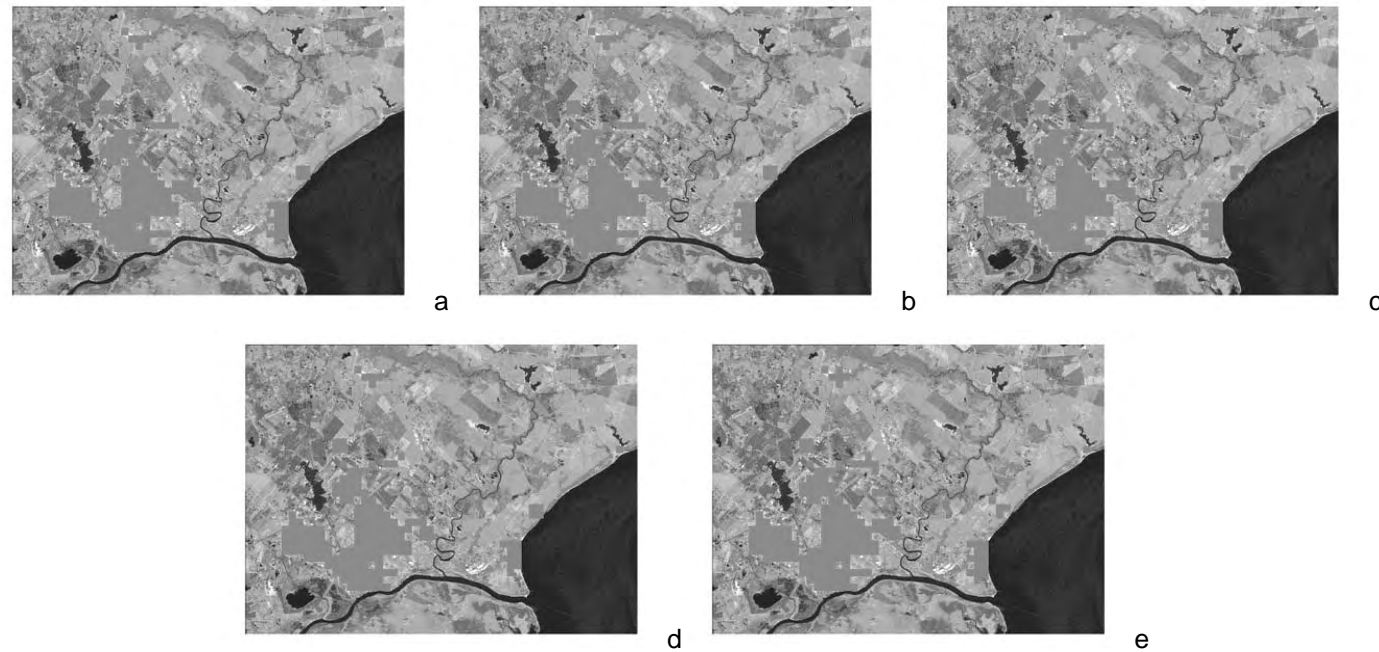


Figura 5.40: caso 3; resultados alcançados para fenótipos urbanos, com distribuição de tensões da tabela 5; a) sem predominio (melhor resultado); b) predominio axial; c) predominio polar; d) predominio difuso; e) predominio de composição axial e polar.

Os melhores resultados alcançados no caso 3 constam do processo de simulação “a”, sem predominio de distribuição de tensões (como está na tabela 5.5, anteriormente, com a linha sombreada), assumindo a maior média entre as correlações espaciais referentes aos fenótipos urbanos (*CellType*, no modelo), ao carregamento urbano (*LoadU*, no modelo) e à centralidade relativa tipo 1 (*CentR1*, no modelo), como indicadora da maior semelhança entre a situação simulada para o ano 2000 e a situação nesse ano, obtida rodando o modelo com taxa de crescimento igual a zero. O gráfico 5.3, a seguir, mostra as dispersões para as três grandezas indicadoras de semelhança; nas figuras 5.41 a 5.46, na seqüência, estão os *grids* para o ano 2000 e os resultados dos melhores resultados alcançados na simulação, no seu estado final.

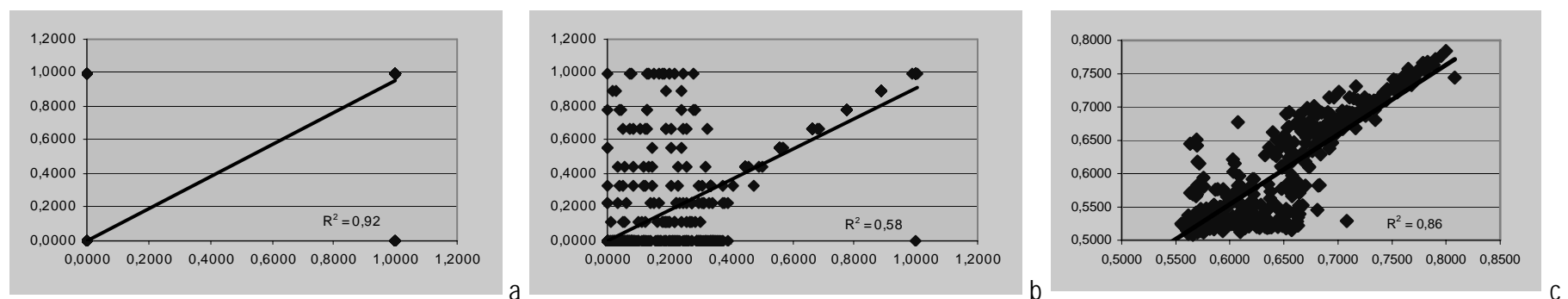
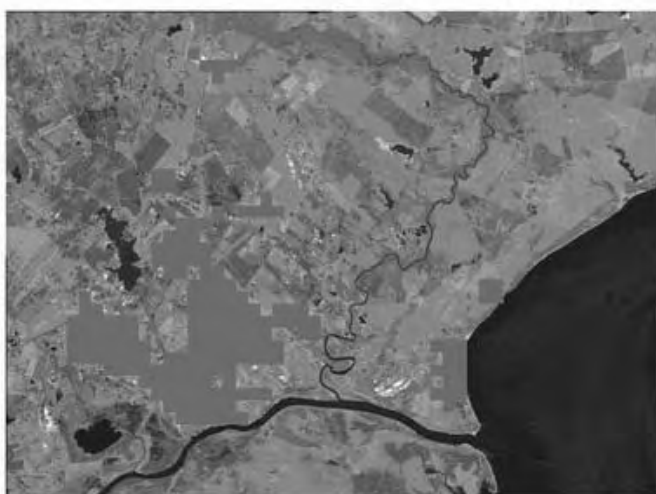
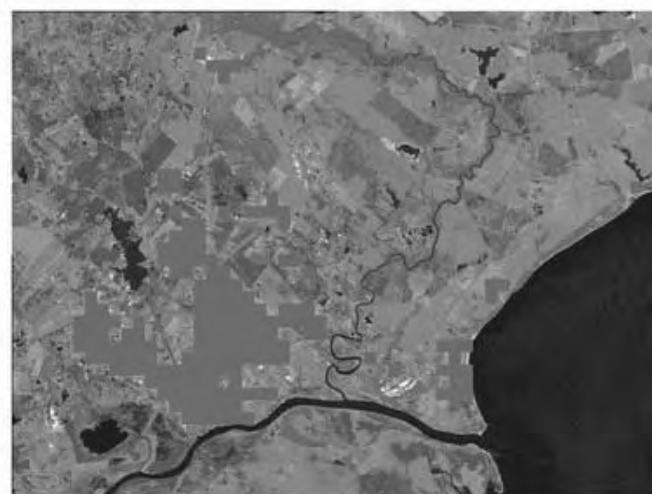


Gráfico 5.3: caso 3; dispersão para as três grandezas consideradas indicadoras de semelhança entre a situação simulada para o ano 2000 (eixo vertical) e a situação nesse ano (eixo horizontal), para o melhor resultado (sem predominio); a) correlação entre fenótipos urbanos (*grids* booleanos); b) correlação entre carregamentos urbanos; c) correlação entre centralidades urbanas.

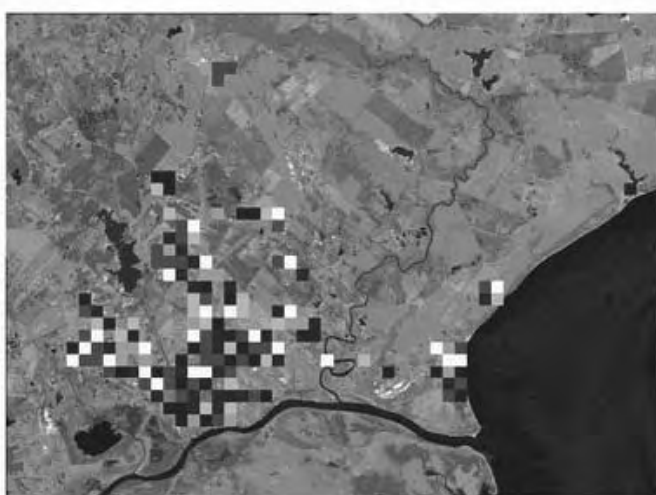


a

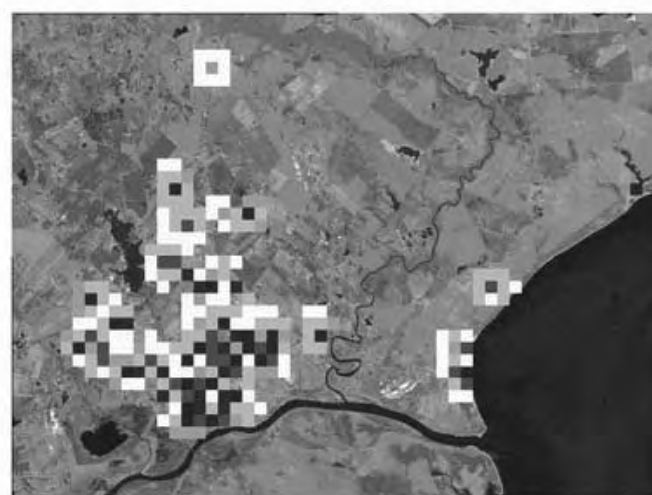


b

Figura 5.41: caso 3; a) células urbanas de controle para o ano 2000; b) células urbanas simuladas para o ano 2000.

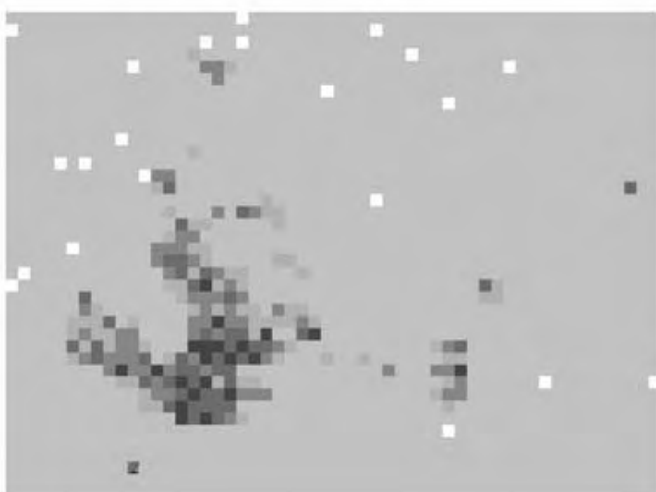


a

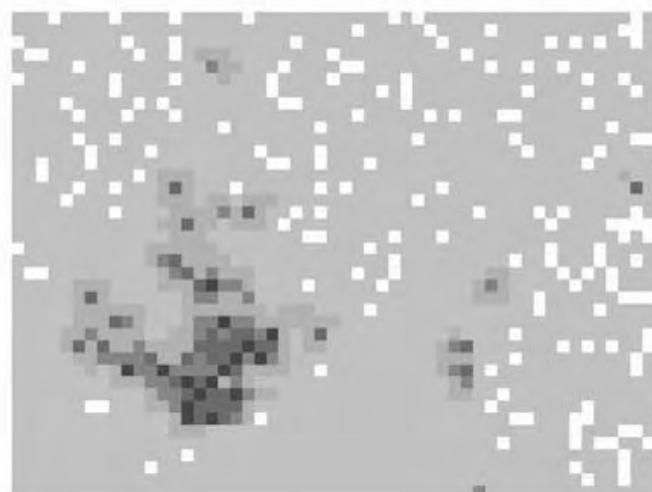


b

Figura 5.42: caso 3; a) carregamento de controle para o ano 2000; b) carregamento simulado para o ano 2000.



a

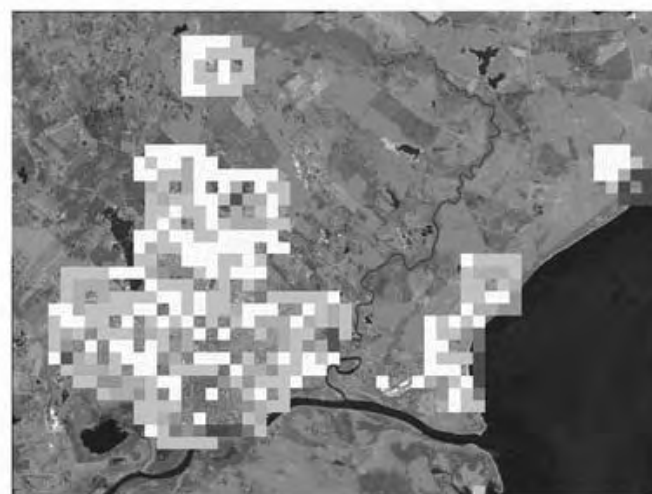


b

Figura 5.43: caso 3; a) centralidade de controle para o ano 2000; b) centralidade simulada para o ano 2000.

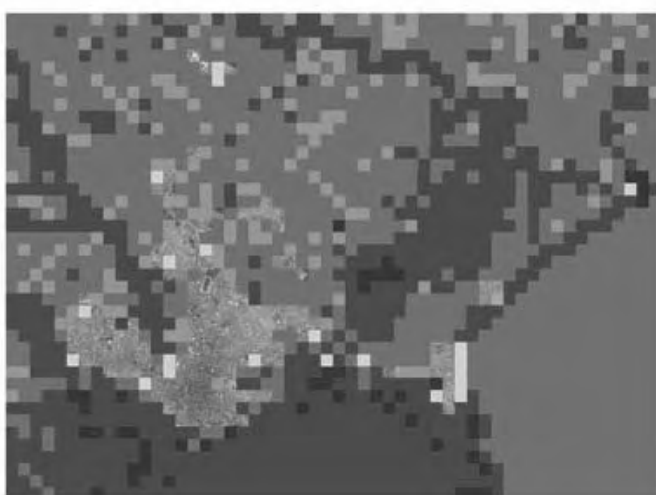


a

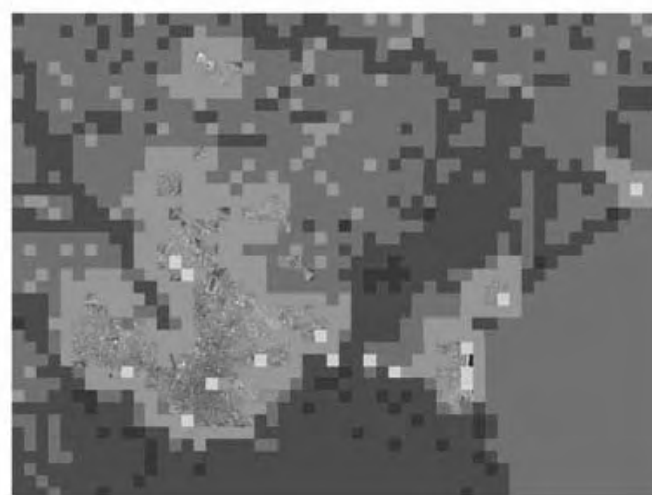


b

Figura 5.44: caso 3; a) potencial de controle para o ano 2000; b) potencial simulado para o ano 2000.



a



b

Figura 5.45: caso 3; a) resistências naturais de controle para o ano 2000; b) resistência naturais simuladas para o ano 2000.



a



b

Figura 5.46: caso 3; a) problemas ambientais intra-urbanos de controle para o ano 2000; b) problemas ambientais intra-urbanos simuladas para o ano 2000.

## 5.5 Conclusões sobre a aplicação do modelo para 1965 a 2000

As conclusões sobre a aplicação do modelo de simulação de crescimento no período do ano 1965 ao ano 2000 estão mostradas pela comparação entre os resultados e por um conjunto de interpretações associadas aos *outputs* comparados, como vêm a seguir.

### 5.5.1 Comparação entre os resultados

A comparação entre os resultados obtidos busca responder duas perguntas principais: a) qual o tipo de distribuição de tensões que mais se ajusta ao crescimento urbano de Pelotas, RS, do ano de 1965 ao ano 2000 ? b) qual o caso de carregamento urbano (ou intensidade de urbanização) mais adequado para as simulações a partir do ano 2000 ? Para isso são utilizados os resultados das correlações espaciais apresentadas no subtítulo anterior, como está à frente.

Os resultados alcançados com os três casos submetidos à calibração estão resumidos na tabela 5.6, abaixo.

Resumo dos melhores resultados da calibração nos três casos simulados																			
processo de simulação	tipo de crescimento	distribuições de tensões, em %					caso 1 uma intensidade de urbanização				caso 2 três intensidades de urbanização, iguais a 1, 5 e 10				caso 3 intensidades de urbanização aleatórias de 1 a 10				média
		A1	A2	P	D1	D2	correlação para CellType	correlação para LoadU	correlação para CentR1	média no caso 1	correlação para CellType	correlação para LoadU	correlação para CentR1	média no caso 2	correlação para CellType	correlação para LoadU	correlação para CentR1	média no caso 3	média das médias dos casos 1, 2 e 3
a	sem predomínio	20	20	20	20	20	0,95	0,54	0,91	0,80	0,85	0,68	0,88	0,80	0,92	0,58	0,86	0,79	0,80
b	predomínio axial	80	5	5	5	5	0,97	0,54	0,93	0,81	0,85	0,66	0,88	0,80	0,90	0,56	0,86	0,77	0,79
c	predomínio polar	5	5	80	5	5	0,96	0,44	0,79	0,73	0,85	0,66	0,59	0,70	0,94	0,54	0,68	0,72	0,72
d	predomínio difuso	2	2	2	47	47	0,92	0,55	0,74	0,74	0,97	0,80	0,85	0,87	0,89	0,62	0,80	0,77	0,79
e	composição axial e polar	47	2	47	2	2	0,95	0,41	0,79	0,72	0,84	0,65	0,66	0,72	0,92	0,53	0,69	0,71	0,72
	médias	--	--	--	--	--	0,95	0,50	0,83	0,76	0,83	0,69	0,77	0,76	0,91	0,57	0,77	0,75	0,76

Legenda (1): A1: distribuição axial; A2: distribuição axial de *buffer*; P: distribuição polar; D1: distribuição difusa de tipo 1; D2: distribuição difusa de tipo 2; p externo: taxa de crescimento externo; *CellType*: células com fenótipo urbano; *LoadU*: carregamento urbano; *CentR1*: centralidade relativa de tipo 1.

Legenda (2): valores em vermelho representam os máximos; valores em azul representam os mínimos.

**Tabela 5.6: resumo dos melhores resultados da calibração nos três casos estudados.**



A tabela anterior reúne os melhores resultados das três simulações realizadas, com o objetivo de obter a melhor calibragem para o crescimento urbano em Pelotas, RS, do ano de 1965 ao ano 2000. Estão testados cinco tipos de crescimento, obtidos por variação na distribuição de tensões que é processada no SACI (o que implica em variações qualitativas), com até 20 variações de intensidades de crescimento (o que implica em variações quantitativas, como está demonstrado nos subtítulos anteriores). Os resultados referem-se a três casos de carregamento urbano: a) caso 1: somente uma intensidade de urbanização; b) caso 2: três intensidades de urbanização; c) caso 3: intensidades de urbanização aleatórias. Os descritores dos resultados são correlações espaciais entre três *outputs* das simulações: d) células com fenótipo urbano (*CellType*, no modelo; são *grids* booleanos, sendo os atributos das células ou zero ou 1); e) carregamento urbano (*LoadU*, no modelo; são *grids* compostos por células com atributos quantitativos, entre zero e 1); f) centralidade urbana de tipo 1 (*CentR1*, no modelo, que é a centralidade mais indicada para comparações entre simulações na mesma cidade; são também *grids* compostos por células com atributos quantitativos, entre zero e 1).

O conjunto de gráficos 5.4, a seguir, mostra o desempenho dos cinco tipos de distribuição de tensões nos três casos simulados.

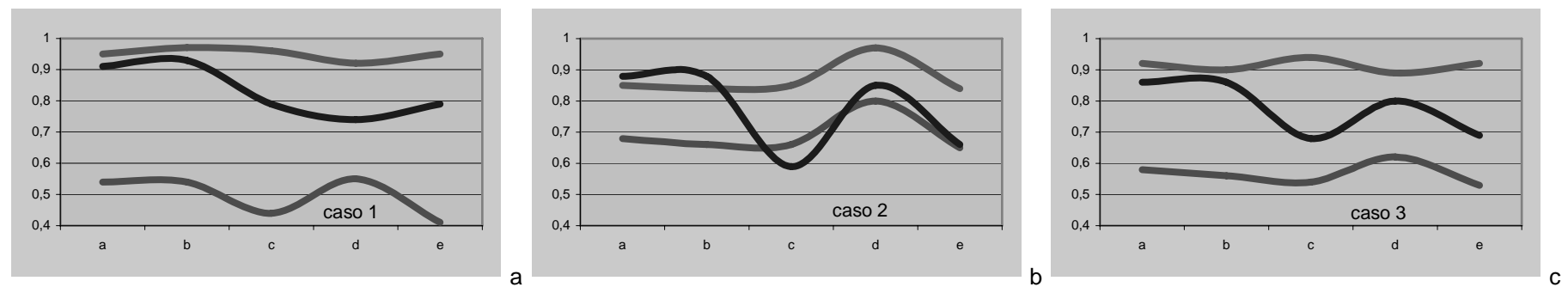


Gráfico 5.4: variação das correlações (eixo vertical) entre o caso simulado e o ano 2000, nos cinco tipos de distribuições de tensões testadas (processos de simulação "a, b, c, d, e", no eixo horizontal), para *CellType* (linha marrom), para *LoadU* (linha vermelha) e para *CentR1* (linha azul); a) caso 1: uma intensidade de urbanização; b) caso 2: três intensidades de urbanização; c) caso 3: intensidades de urbanização aleatórias.

Os gráficos 5.5, abaixo, mostram o desempenho dos cinco tipos de distribuição de tensões nos três descritores utilizados.

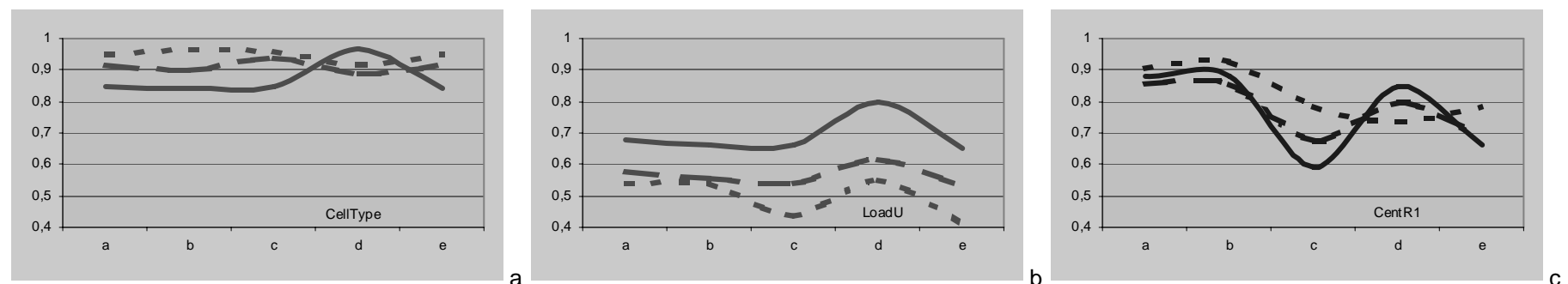


Gráfico 5.5: variação das correlações (eixo vertical) entre o caso simulado e o ano 2000, nos cinco tipos de distribuições de tensões testadas (processos de simulação "a, b, c, d, e", no eixo horizontal), para o caso 1 (uma intensidade de urbanização; linha pontilhada), para o caso 2 (três intensidades de urbanização; linha cheia) e para o caso 3 (intensidades de urbanização aleatórias; linha tracejada); a) células com fenótipo urbano (*CellType*, no modelo); b) carregamento urbano (*LoadU*, no modelo); c) centralidade celular de tipo 1 (*CentR1*, no modelo).

O critério utilizado para a comparação é a diferença entre a frequência de correlações máximas e mínimas, considerando duas razões principais: a) interessam resultados com melhor desempenho em diferentes condições de carregamento, pois as simulações para as quais se destina a calibragem do modelo usam intensamente mudanças nesse atributo; b) as médias das correlações demonstram valores muito aproximados, diferenciando fracamente os resultados (como mostrou a tabela 5.6, anteriormente). Esse critério está aplicado aos tipos de crescimento urbano (tipos de distribuição de tensões) e às variações de *input* no carregamento urbano, como está nas tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente.

Comparação entre os resultados da calibração entre os três casos simulados – Tipos de crescimento urbano

processo de simulação	tipo de crescimento	frequência de correlações máximas	frequência de correlações mínimas	diferença entre frequências máximas e mínimas
a	sem predomínio	2	0	2
b	predomínio axial	4	1	3
c	predomínio polar	1	2	-1
d	predomínio difuso	4	2	2
e	composição axial e polar	0	4	-4

Tabela 5.7: comparação entre as frequências de correlações máximas e mínimas obtidas na calibração, para os tipos de crescimento urbano, nos três casos simulados; melhor resultado para a linha “b”, predomínio axial (linha sombreada).

Comparação entre os resultados da calibração entre os três casos simulados – Variações de *input* no carregamento urbano

variações de <i>input</i> no carregamento urbano		frequência de correlações máximas	frequência de correlações mínimas	diferença entre frequências máximas e mínimas
caso 1	uma intensidade de urbanização	3	3	0
caso 2	três intensidades de urbanização	4	3	1
caso 3	intensidades de urbanização aleatórias	2	3	-1

Tabela 5.8: comparação entre as frequências de correlações máximas e mínimas obtidas na calibração, para as variações de *input* no carregamento urbano, nos três casos simulados; melhor resultado para o “caso 2”, três intensidades de urbanização (linha sombreada).

Considerando a comparação dos resultados mostrada na tabela 5.7, anteriormente, o melhor resultado para a calibração do crescimento urbano em Pelotas, RS, do ano de 1965 ao ano 2000, com relação ao tipo de crescimento urbano, é o do processo de simulação “b”, com o tipo de crescimento “predomínio axial”, obtido com a seguinte distribuição de tensões: 80, 5, 5, 5 e 5%, para as tensões de tipo axial, axial de *buffer*, polar, difusa de tipo 1 e difusa de tipo 2, respectivamente. Esse padrão fica indicado para ser utilizado nas simulações a partir do ano 2000, como está na seqüência do trabalho. É notável nos gráficos 5.4a,

5.4b e 5.4c como o tipo de crescimento com predomínio de tensões axiais (processo “b”) apresenta desempenho homogêneo em todos os casos. Fica registrado que os tipos de crescimento sem predomínio de alguma distribuição de tensão (20 % para todos os tipos) e o tipo com predomínio de tensões difusas (2, 2, 2, 47 e 47%, na mesma ordem citada acima) obtiveram resultados próximos do melhor, o que pode ser considerado nas interpretações dos resultados.

Considerando a comparação dos resultados mostrada na tabela 5.8, anteriormente, o melhor resultado para a calibração do crescimento urbano em Pelotas, RS, do ano de 1965 ao ano 2000, com relação ao caso de carregamento urbano, é o do caso 2, com três intensidades de urbanização, o qual fica indicado para as simulações a partir do ano 2000, como vêm adiante. É visível que justamente no caso 2 que aparecem com evidência os melhores resultados para as correlações de carregamento urbano (*LoadU*, no modelo; ver gráfico 5.5b, antes), o que reforça o uso desse carregamento para as simulações a partir do ano 2000.

### 5.5.2 Interpretação dos resultados alcançados

Os resultados obtidos no processo de calibração, considerando os três casos simulados para Pelotas, permitem interpretações quanto à distribuição de tensões, quanto aos tipos de carregamentos e quanto aos resultados das correlações, como está na seqüência.

Quanto à distribuição de tensões, três observações podem ser registradas:

- a) o melhor resultado, obtido para o predomínio de tensões axiais, reflete a estrutura urbana de Pelotas no período de 1965 a 2000, fortemente influenciada por eixos de desenvolvimento;
- b) os resultados intermediários, alcançados para o caso do predomínio de tensões difusas e para o caso da ausência de predomínio de tensões, indicam que o crescimento axial global é acompanhado pelo crescimento aleatório, com ocorrências que gravitam junto aos eixos de desenvolvimento;
- c) os piores resultados estão associados às tensões polares, sugerindo a menor influência desse tipo de crescimento.

Os resultados para os tipos de carregamento utilizados nas simulações permitem indicar sua adequação para as simulações, do seguinte modo:

- a) as simulações com uma intensidade de urbanização mostram melhores resultados para conversão de território e piores para carregamento urbano; sendo assim, esse tipo de simulação é indicado quando o interesse principal está na área coberta por urbanização e não na distribuição dos estoques construídos em seu interior;

b) os experimentos com três intensidades de urbanização apresentaram melhores resultados para carregamento urbano e resultados intermediários nos demais descritores; pelos critérios de máximos e mínimos mostrados anteriormente, esse tipo de simulação é o que apresenta o melhor conjunto de resultados;

c) as simulações com carregamentos aleatórios apresentam os piores resultados, podendo ser indicadas como auxiliares na interpretação do crescimento urbano, pois os casos anteriores apresentam melhores correlações; adicionalmente, esse resultado sugere que os carregamentos urbanos são fatores estruturantes no processo de crescimento das cidades, pois sua implementação aleatória diminui a aproximação entre simulação e realidade.

Quanto aos resultados das correlações, três observações estão destacadas:

a) os altos valores de correlação entre simulação e realidade obtidos para células com fenótipo urbano (*CellType*, no modelo), que se refere à conversão de território não urbanizado em urbanizado, ocorrem em função do condicionamento exercido pelas resistências à urbanização, frente a um processo de crescimento de fraca intensidade, o que determinou a conversão de células com menores resistências; é notável também que as correlações mais elevadas para essa grandeza ocorrem quando predominam distribuições de tensões difusas, o que sugere duas observações: a.1) a paisagem que integra o entorno da cidade pode-se constituir em determinante do crescimento urbano, particularmente quando valores mínimos de resistências se localizam na borda da cidade e quando a intensidade de crescimento urbano é fraca; a.2) conversão de território não urbanizado em urbanizado gerado de modo difuso não impede a antecipação de cenários de futuro, pois a repetição de localizações aleatórias pode gerar um padrão previsível de cidade;

b) as correlações menores para os resultados de carregamento urbano (*LoadU*, no modelo), que se refere à intensidade de urbanização em cada célula, demonstram maior dificuldade preditiva para essa grandeza, que se comporta de maneira instável ao longo do processo de crescimento urbano;

c) os resultados para a centralidade celular (foi utilizada a centralidade de tipo 1 ou *CentR1*, no modelo), que se referem à estrutura urbana e podem ser utilizados como representantes de qualidade locacional, mostram altos valores de correlação entre simulação e realidade, o que permite observar que, embora os carregamentos urbanos se comportem de maneira instável e sejam de difícil antecipação no processo de crescimento urbano, a estrutura que resulta de suas interações apresenta suficientes possibilidades de predição.

## 5.6 Conclusões sobre a calibração do modelo

Os trabalhos de calibração realizados para o caso de Pelotas permitem conclusões gerais, saber:

- a) o modelo efetivamente apresentou a capacidade de realizar simulação de crescimento urbano num caso real, considerando fatores urbanos, naturais e institucionais integrados, como ficou demonstrado através do caso de Pelotas, RS; sendo assim, pode ser assumido que a possibilidade de calibração do modelo legitima sua utilização para o uso em trabalhos empíricos, atingindo deste modo um de seus objetivos;
- b) o processo de calibração, que opera por repetições de simulações a aproximações sucessivas entre uma situação simulada e uma situação real, cumprindo com as etapas de controle visual, comparação de quantidades de células urbanas e urbanas de borda, correlações de resultados e análise de máximos e mínimos, funcionou eficazmente, incluindo exclusivamente um ajuste quantitativo e um qualitativo; enquanto que o ajuste quantitativo foi realizado através do parâmetro  $\lambda$  (lambda), que promove mudança exponencial na intensidade de crescimento, o ajuste qualitativo foi realizado por variação nos tipos de distribuição de tensões, o que induz a formação de diferentes tecidos urbanos, como vêm sendo mostrado neste trabalho; esse resultado, de calibração através do uso restrito de somente dois parâmetros, é particularmente importante no caso do SACI, que dispõe de diversos outros dispositivos de regulação, como será mostrado nos capítulos 7 e 8, adiante;
- c) embora efetivo e eficaz, o processo de calibração construído é lento e trabalhoso, exigindo muito tempo e esforço do usuário; sendo desse modo, é recomendável buscar a implementação automática da calibração, o que fica como sugestão para continuidade dos trabalhos;
- d) assumindo que os resultados obtidos na calibração do SACI legitimam o modelo, essa legitimidade indica a validade dos conceitos que estão embutidos nos processo de simulação de crescimento, que podem ser resumidos em três principais: d.1) a diferenciação espacial alcançada como o modelo de centralidade (Krafta, 1994), cuja validade vinha sendo testada mediante representação vetorial da cidade (através de linhas axiais e formas construídas, como está em Timmermans, 1997), legitima-se para o caso de representação celular da cidade e para simulações dinâmicas; d.2) o modelo de potencial (Krafta, 1994), que indica que as transformações espaciais ocorrem em função das diferenças de centralidade também se legitima, sendo que o SACI dá operacionalidade à idéia original, implementa um processo dinâmico e oferece a possibilidades de visualização e extração de resultados; d.3) a noção de que o ambiente natural interfere na dinâmica urbana, condicionando a conversão de território e influenciando a distribuição dos estoques construídos também se legitima (conforme sustentado nesta tese), demonstrando que o crescimento do espaço urbano não se dá de modo autóctone, mas sim de modo interagente com o ambiente natural;
- e) os resultados das correlações para o fenótipo urbano, que indicam a aproximação entre a conversão de território simulada e a que efetivamente ocorreu na realidade, podem ser considerados elevados em todos os casos relatados, alcançando o coeficiente mínimo igual a 0,84 e máximo igual a 0,97, o que pode ser explicado por quatro fatores principais: e.1) a consistência e a acuidade do modelo para esse objetivo, que é central nesta investigação; e.2) a fraca resolução espacial, pois as células de

500 metros de lado facilitam os acertos; e.3) os condicionantes naturais, que apresentam fraca resistência justamente nos locais onde ocorreu a expansão urbana no período considerado; e.4) o crescimento pequeno, pois a relação da taxa de crescimento espacial (1,50% ao ano) com o tempo considerado (35 anos) determinou uma quantidade de território urbano acrescido à cidade preexistente que não trouxe dificuldades ao processo de calibração; esses fatores indicam que os resultados alcançados para o caso de Pelotas, RS devem ser assumidos sem excesso de otimismo, pois podem parecer mais exatos do que realmente pode ser esperado, se considerados outra resolução espacial, outros condicionantes naturais e crescimentos mais intensos ou em períodos de tempo maiores;

f) finalmente, deve ser assumido que os resultados com as diferentes distribuições de tensões, embora o estudo de caso tenha identificado como de melhor desempenho aquele com predomínio de tensões axiais, denota três possibilidades fundamentais: f.1) é possível simular o crescimento urbano sem predomínio de algum tipo de distribuição de tensões, que é o padrão do modelo; essa regulagem apresentou a melhor média de correlações entre simulação e realidade, motivo pelo qual será utilizada no Capítulo 8, adiante, quando simulações avançadas serão realizadas; f.2) também é possível simular o crescimento urbano com predomínio de tensões difusas pois, como ficou demonstrado no estudo de caso, essa regulagem tem o melhor desempenho no caso dos carregamentos urbanos e um bom desempenho médio nos demais indicadores; f.3) por fim é possível utilizar a regulagem das tensões com predomínio axial, especialmente quando a estrutura urbana se encontra fortemente influenciada por eixos de desenvolvimento, como demonstrou ser o caso de Pelotas, no período da calibração.

## 5.7 Epílogo do capítulo 5

Neste capítulo demonstrei o processo de calibração do modelo, através do ajuste integrado de parâmetros quantitativos e qualitativos, respectivamente representados pela intensidade e pelo tipo de crescimento (modificados pelo parâmetro  $\lambda$  (lambda) que atua sobre o potencial e pelo tipo de distribuição de tensões de crescimento). Utilizei o crescimento urbano de Pelotas, RS, do ano 1965 ao ano 2000 como estudo de caso, para o que delinee o experimento variando os dados de entrada, regulando os parâmetros e realizando manualmente ajustes sucessivos. Escolhi os melhores resultados por correlação espacial dos *outputs* da simulação com a situação real no ano 2000, comparando os resultados finais do experimento por frequência de melhores e piores desempenhos.



Uma vez conhecidas as possibilidades de ajuste do modelo de simulação de crescimento urbano ao período de 1965 a 2000, no próximo capítulo estarei utilizando a regulagem alcançada para especular sobre o futuro da cidade a partir do ano 2000. Farei isso modificando a velocidade do crescimento urbano, verificando o efeito de grandes pólos de atração, implementando diferentes zoneamentos e testando a aplicação de indutores de institucionais de desenvolvimento.

## 6 Especulando sobre o futuro

Nos capítulos anteriores explicitarei fundamentos sobre o crescimento urbano integrando fatores urbanos, naturais e institucionais, construí um modelo de simulação e demonstrei o processo de calibragem, legitimando o modelo do ponto de vista teórico e instrumental, para o que utilizei o caso do crescimento de Pelotas, RS, do ano de 1965 ao ano 2000. Neste capítulo utilizarei o modelo para especular sobre o futuro, introduzindo modificações e observando os resultados, o que farei utilizando o caso real e a calibragem obtida anteriormente.

### 6.1 Apresentação

Uma das principais possibilidades de um modelo de simulação é especular sobre cenários de futuro, seguindo tendências anteriores ou sofrendo influência de mudanças na situação atual; diferentemente de antecipar o futuro, essa possibilidade permite compreender melhor a dinâmica urbana e ambiental, podendo auxiliar na tomada de decisão. Nesse caminho estão realizados experimentos com o SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>, tomando como ponto de partida o ano 2000 e formando os seguintes grupos de caso: a) variações de intensidade de crescimento urbano (subtítulo 6.2), em três hipóteses, sendo uma superior, outra intermediária (ou semelhante) e mais outra superior ao crescimento médio observado no período de 1965 a 2000; b) crescimento urbano e grandes pólos de atração urbanos e naturais (subtítulo 6.3); c) crescimento urbano e zoneamento (subtítulo 6.4), considerando preservação cultural, conservação natural e fragilidade ambiental ; d) crescimento urbano e indutores institucionais de desenvolvimento (subtítulo 6.5).

### 6.2 Crescimento urbano em hipóteses inferior, intermediária e superior

A variação na intensidade de crescimento urbano, que equivale aqui à variação de velocidade, pode provocar mudanças estruturais nas cidades, para além do aumento do tamanho final da área ocupada pela cidade, sendo esperado que crescimentos lentos produzam resultados diferentes de crescimentos rápidos (McCann e Ewing, 2003). Nessa direção, três hipóteses de crescimento estão simuladas, utilizando como ponto de partida o ano de 2000 e como horizonte temporal o ano de 2045 (45 anos), com a calibragem alcançada para o intervalo dos anos de 1965 a 2000, como foi mostrada no título anterior. As hipóteses são as seguintes: a) hipótese de crescimento inferior: a cidade cresce menos do que cresceu no período de 1965 a 2000; b) hipótese de crescimento intermediária: a cidade cresce na mesma intensidade do período de 1965 a 2000; c) hipótese de crescimento superior: a cidade cresce mais do que cresceu no período de 1965 a 2000.

As interpretações das hipóteses de crescimento urbano inferior, intermediário e superior seguem *outputs* do SACI, utilizando as seguintes categorias de análise: a) fenótipos urbanos (*CellType*, no modelo): velocidade de crescimento; agrupamentos e núcleos remotos; formação de vazios urbanos; b) carregamento urbano (*LoadU*, no modelo): concentração e rarefação dos carregamentos urbanos; vetores de crescimento e novos pólos de atração; características de centro e periferia; c) centralidade de tipo 1 e de tipo 2 (respectivamente *CentR1* e *CentR2*, no modelo): localização de lugares centrais; mono e policentralidade; formação de periferias e suas relações com o centro (particularmente para *CentR1*); vetores de expansão dos centros urbanos (particularmente para *CentR2*); d) potencial (*Potential*, no modelo): forma e localização dos potenciais; análise de máximos e mínimos; e) resistências naturais (*ResistE*, no modelo): dinâmica de concentrações e rarefações; localização e forma de manchas; relações com a cidade; f) problemas ambientais intra-urbanos totais (*EProbT*, no modelo): localização e intensidade; relação com a dinâmica de urbanização.

### 6.2.1 Hipótese de crescimento urbano inferior

A simulação começa com 144 células urbanas e 117 células urbanas de borda; em 45 iterações, equivalentes a 45 anos, chega a 249 e 203 células, respectivamente (ver figura 6.1, adiante); isso resulta num crescimento médio de 1,22% ao ano, inferior ao crescimento médio do período de calibração (anos 1965 a 2000). Esse resultado foi alcançado mediante o uso de distribuição de tensões axiais, axiais de *buffer*, polares, difusas de tipo 1 e difusas de tipo 2 com taxas de 80, 5, 5, 5 e 5 %, respectivamente e com carregamento urbano inicial em três intensidades de urbanização (melhores resultados na calibração), mediante controle da intensidade de crescimento através da imputação de  $\lambda$  (lambda) igual a 2,50; todos os demais parâmetros estão regulados no valor padrão. Os gráficos 6.1a e 6.1b, a seguir, mostram a variação do crescimento e da taxa de crescimento, enquanto que as figuras 6.1 a 6.6, adiante, resumem os resultados obtidos na simulação.

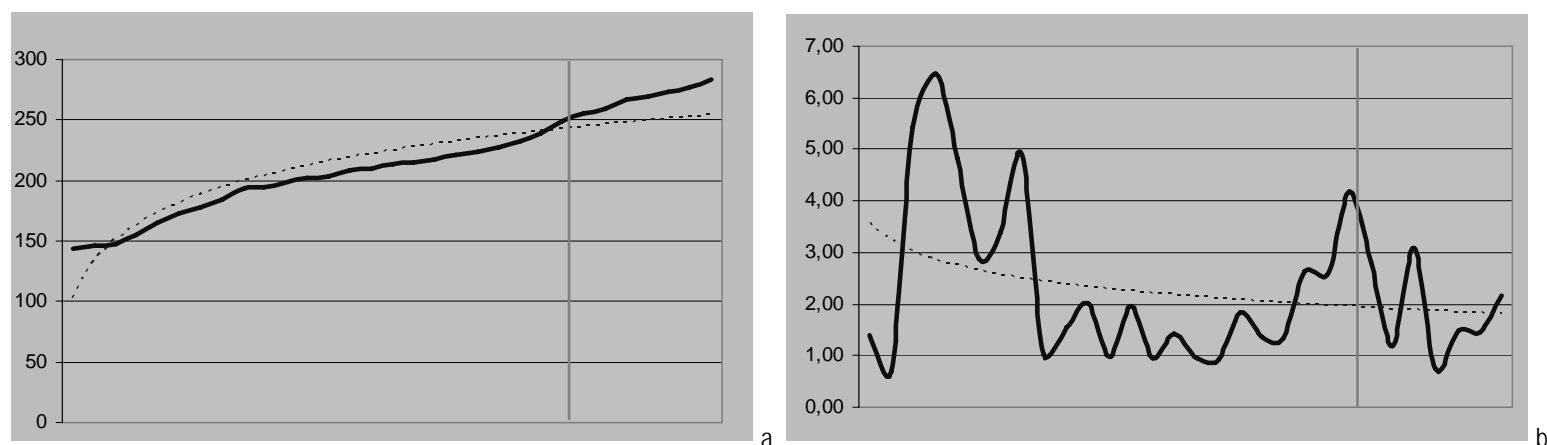


Gráfico 6.1: hipótese de crescimento inferior, em 60 iterações, com destaque na iteração 45; a) evolução do crescimento urbano; b) evolução da taxa de crescimento urbano; linhas tracejadas mostram tendências de base logarítmica 10.



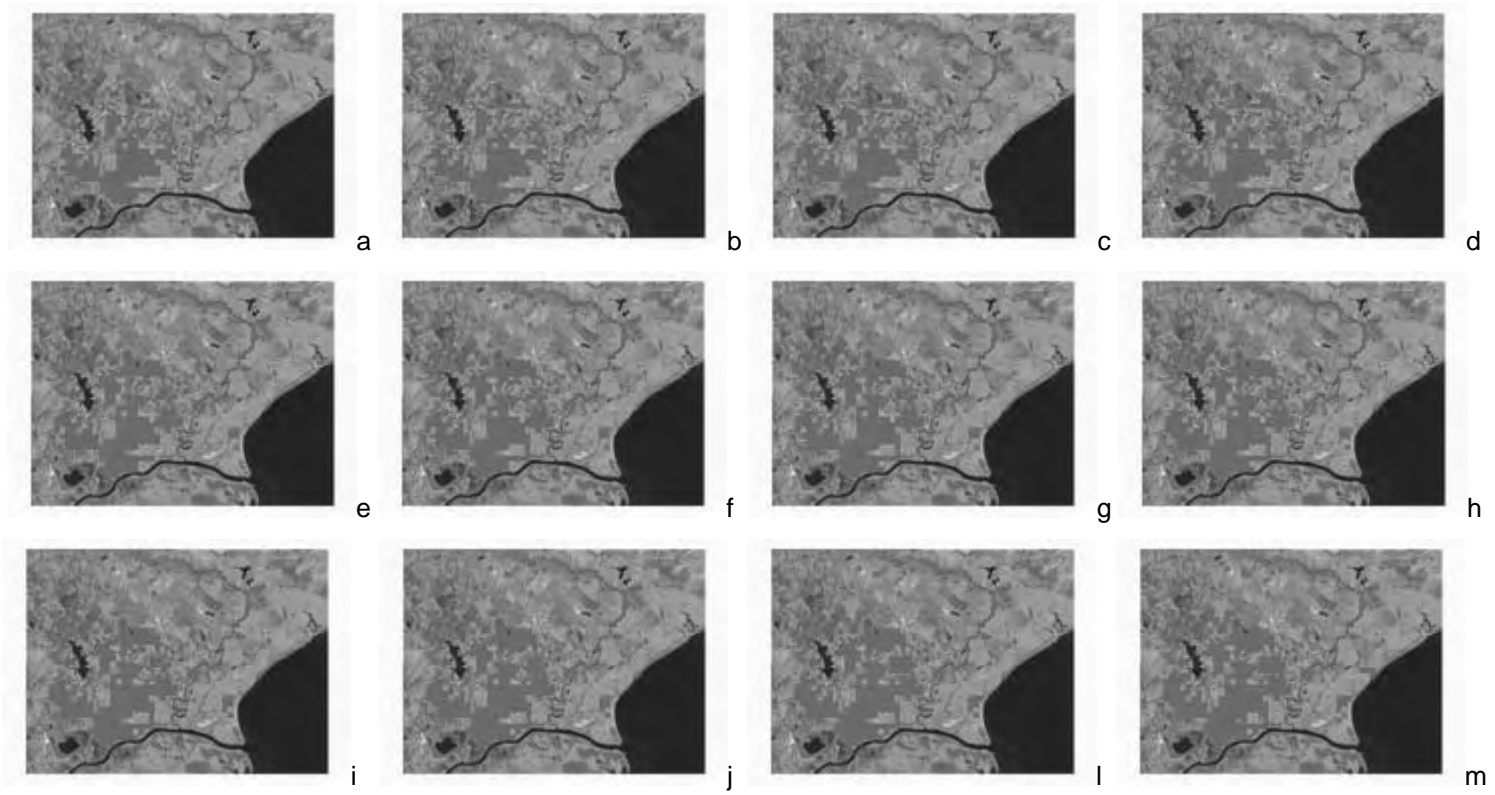


Figura 6.1: hipótese de crescimento inferior; CellType, até iteração 45.

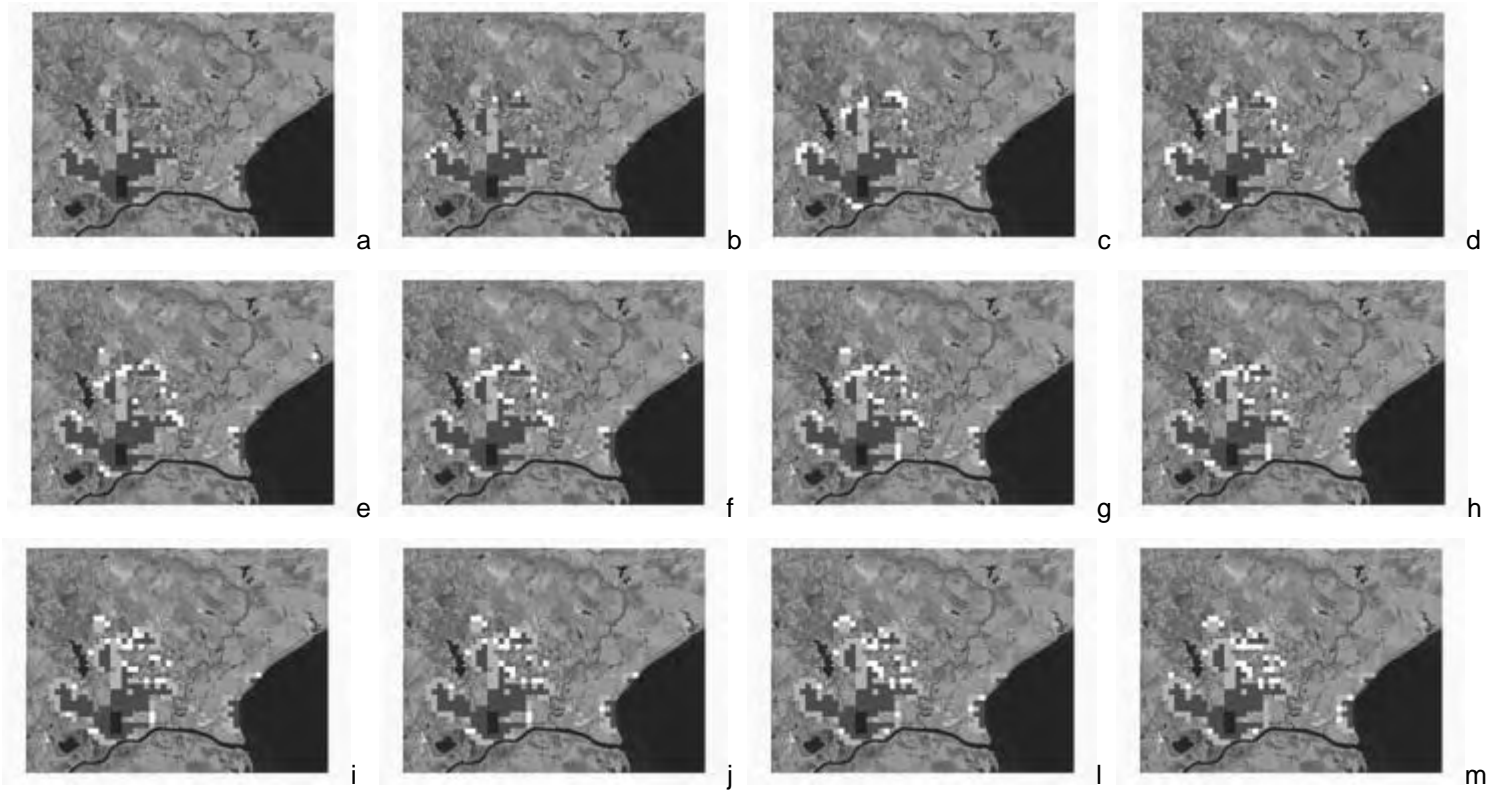


Figura 6.2: hipótese de crescimento inferior; LoadU, até iteração 45.

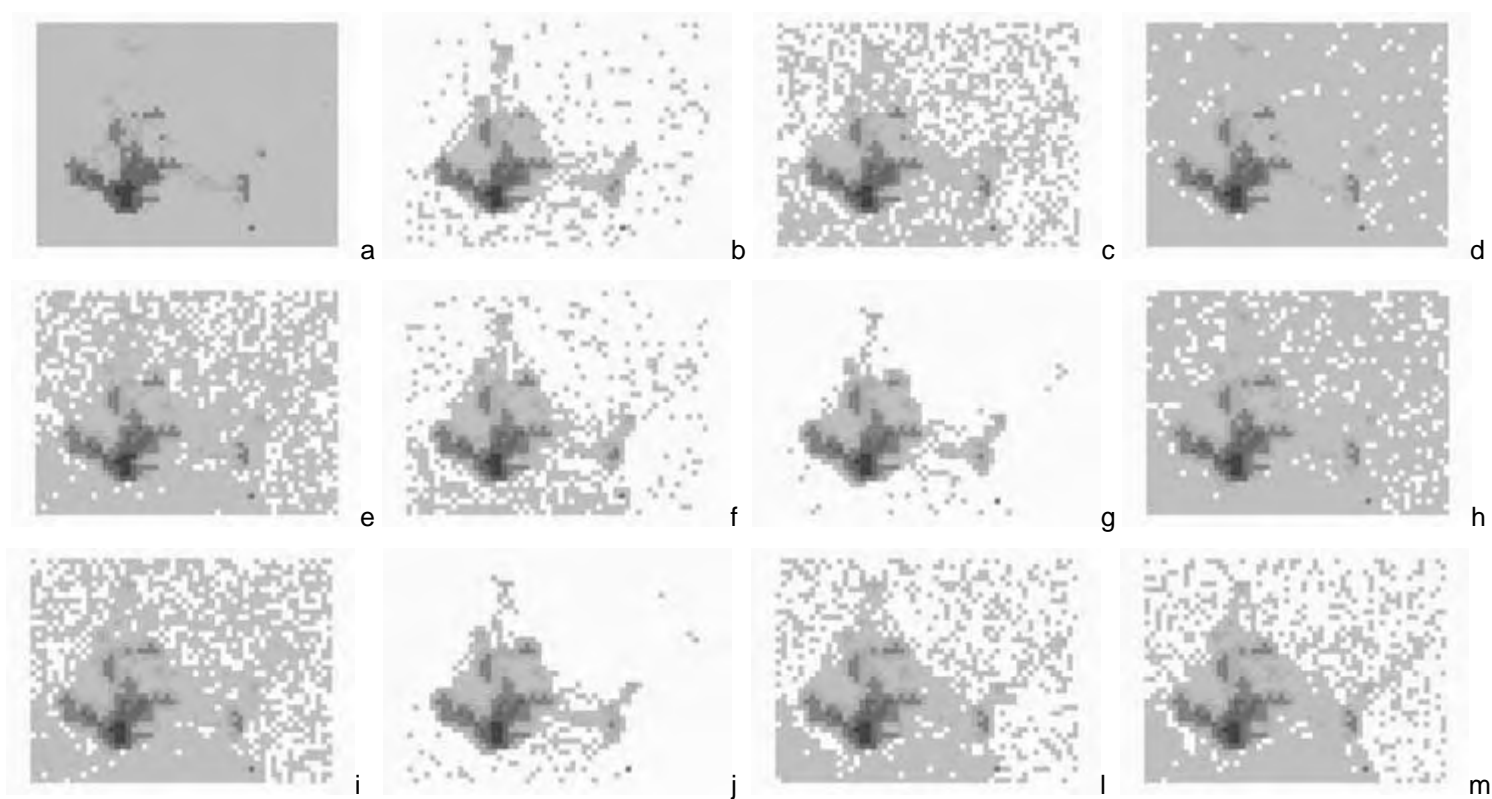


Figura 6.3: hipótese de crescimento inferior; CentR1, até iteração 45.

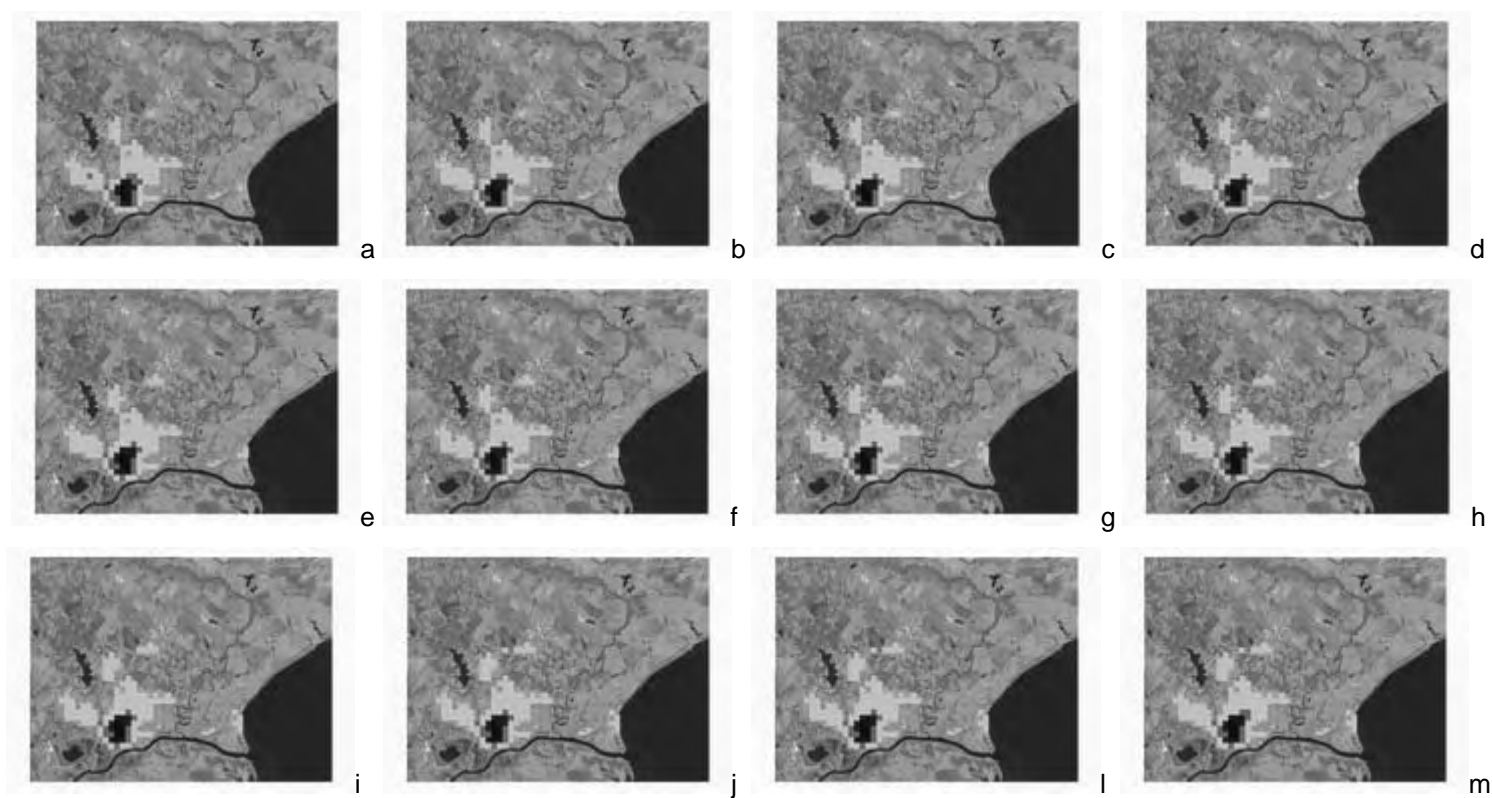


Figura 6.4: hipótese de crescimento inferior; CentR1, até iteração 45.

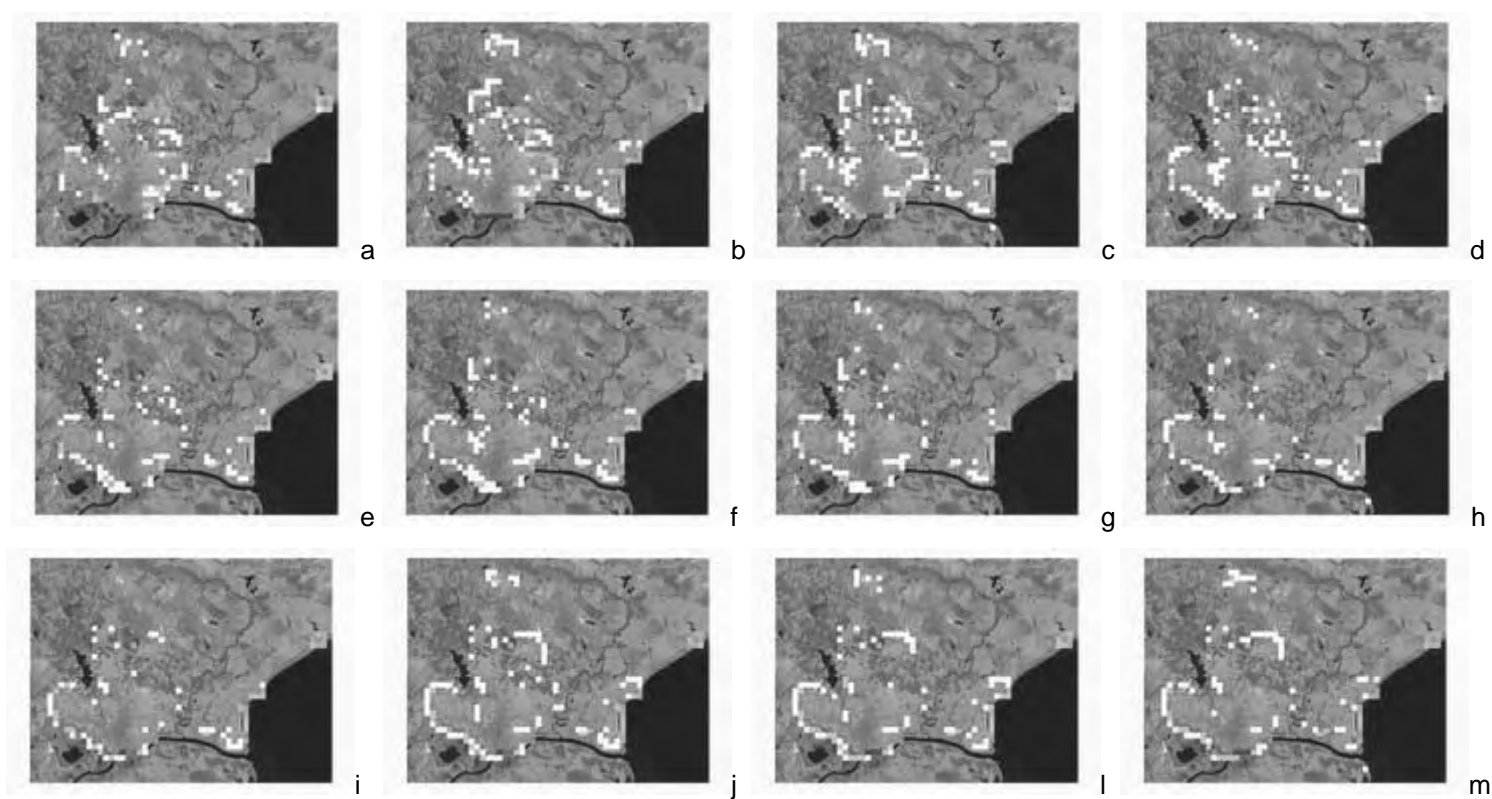


Figura 6.5: hipótese de crescimento inferior; Potential, até iteração 45.

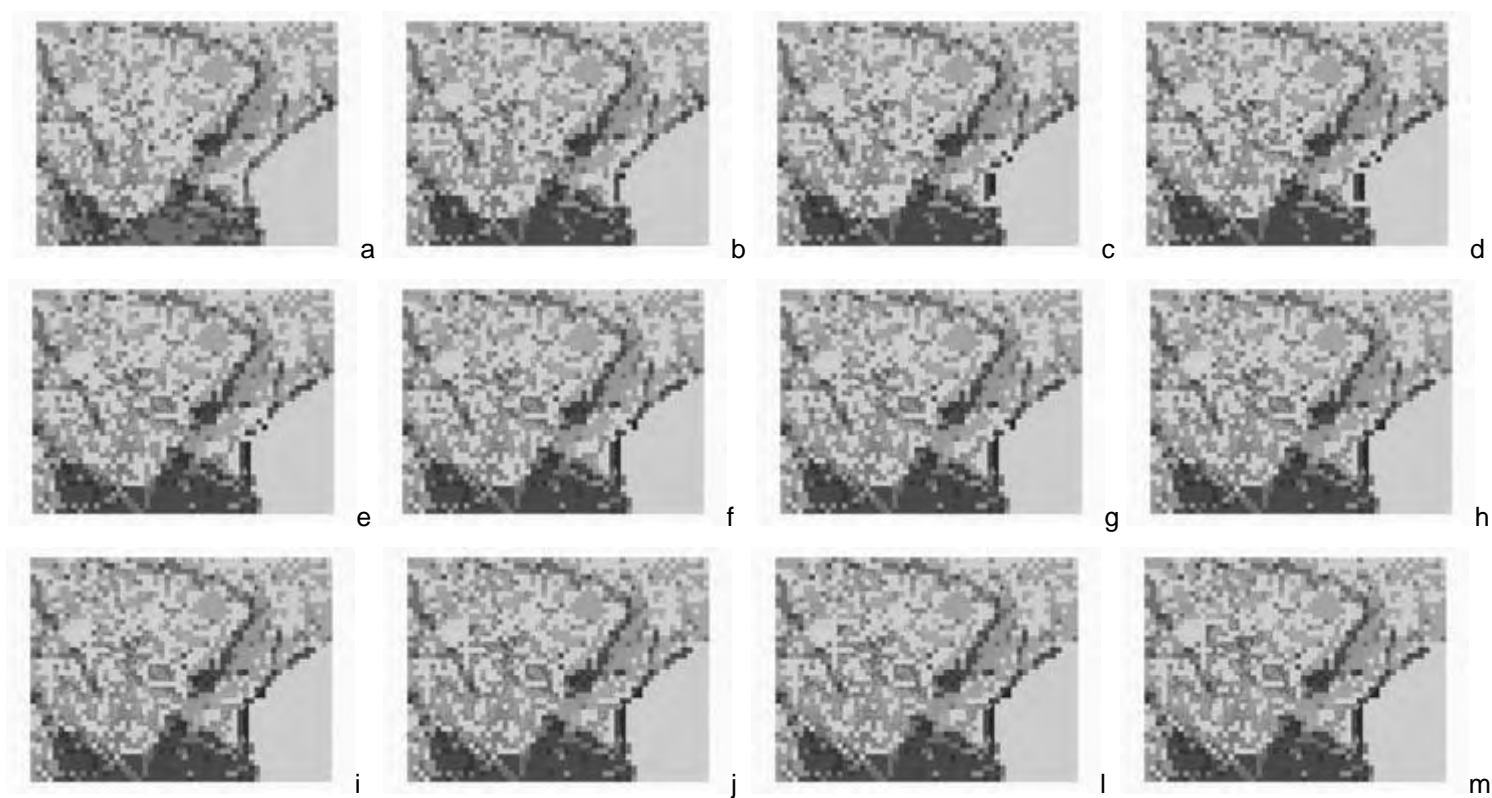


Figura 6.6: hipótese de crescimento inferior; ResistE, até iteração 45.

A conversão de território não urbanizado em urbanizado é mostrada através dos mapas de fenótipos urbanos (*CellType*, no modelo), sendo que a hipótese de crescimento inferior mostra uma intensificação do crescimento atomizado, como está destacado na figura 6.7, a seguir; o crescimento não é capaz de unificar as diversas parcelas com características predominantemente urbanas, tampouco de consolidar os eixos de desenvolvimento norte e leste, na direção dos bairros Três Vendas e Laranjal, respectivamente; é notável como o estado final reproduz o estado inicial da simulação, apenas intensificando o mesmo modo de ocupação do território.

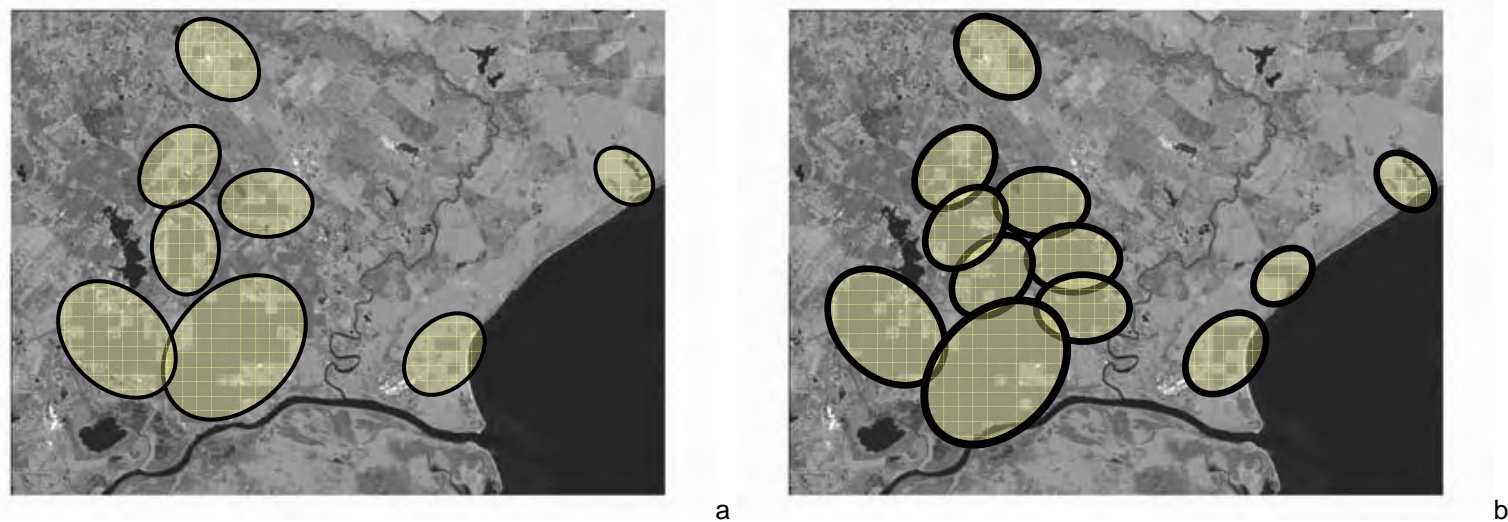


Figura 6.7: hipótese de crescimento inferior, sobre output de *CellType*, mostrando os agrupamentos de células urbanas; a) iteração 1; b) iteração 45.

Vazios urbanos são constantes durante a simulação, podendo ser identificados três tipos (figura 6.8): a) vazios que separam núcleos remotos do núcleo principal; b) vazios que penetram no núcleo principal; c) vazios fragmentados.

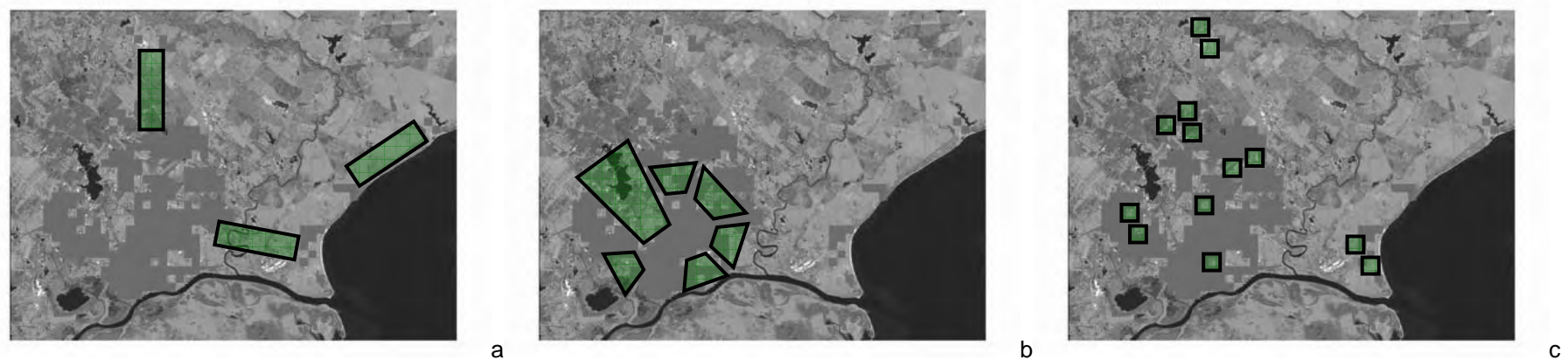


Figura 6.8: hipótese de crescimento inferior, sobre output de *CellType*, na iteração 45, mostrando a incidência de vazios urbanos; a) vazios que separam núcleos remotos; b) vazios no núcleo principal; c) vazios fragmentados.

A distribuição dos estoques construídos mantém a relação de hegemonia do bairro centro sobre os demais, sem mudar a relação de hierarquia com a periferia; sendo assim, as novas células urbanas aparecem com baixa intensidade de ocupação do território, podendo ser assumido que ao crescimento lento corresponde fraca urbanização das bordas da cidade. As novas células urbanizadas e fracamente carregadas exercem dois papéis na constituição da estrutura urbana (figura 6.9): a) estabelecer alguma continuidade entre as parcelas separadas; b) estabelecer um padrão de interface do espaço urbanizado com o não urbanizado, formado por áreas com baixa intensidade de urbanização.

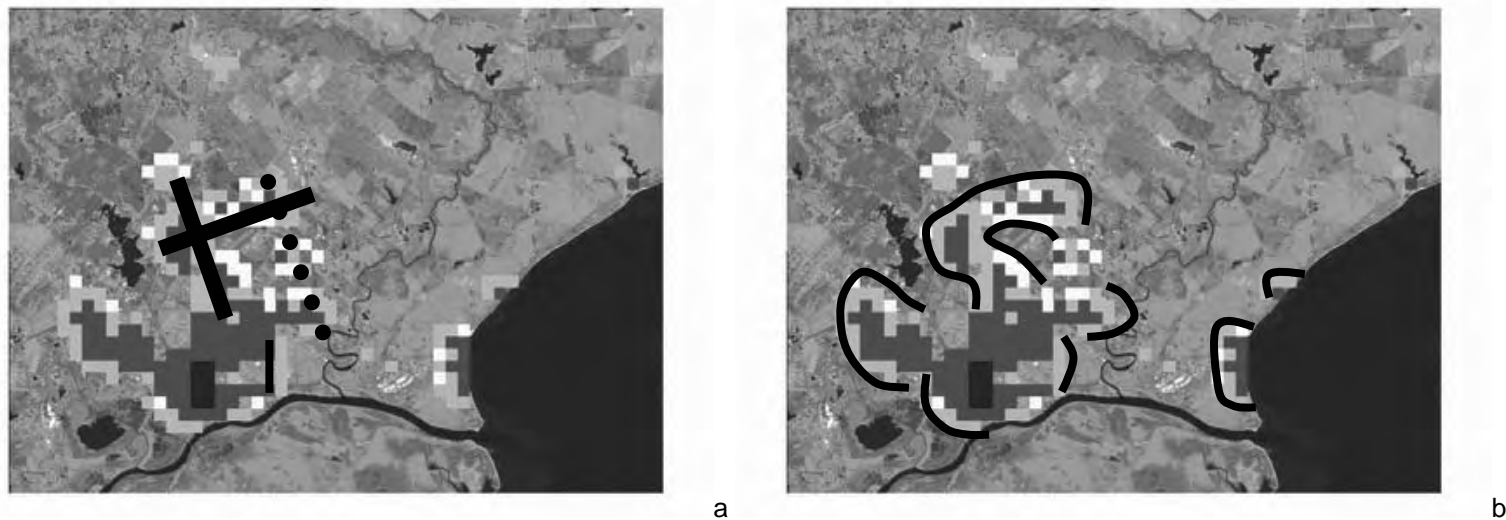


Figura 6.9: hipótese de crescimento inferior, sobre output de LoadU na iteração 45, mostrando a distribuição de carregamentos urbanos; a) continuidade entre parcelas separadas; b) interface do ambiente urbanizado com o não urbanizado.

A distribuição das centralidades de tipo 1 (*CentR1*, no modelo, normalizada pelo total de tensões) mostra a permanência do centro preexistente e revela uma hierarquia composta por quatro níveis de centralidade (figura 6.10): a) nível 1: centro principal, está representado pelo centro tradicional da cidade; b) nível 2: é formado pela expansão do centro de nível 1, no caso de Pelotas pelas conexões do centro tradicional com os bairros Fragata e Areal; c) nível 3: representa os centros de bairro, os quais assumem uma configuração de policentralidade; d) nível 4: é representado por corredores de baixa centralidade, que conectam os outros níveis e trechos periféricos da cidade. Dois itens podem ser agregados à interpretação: e) os centros de bairro são de intensidade relativa fraca no conjunto da cidade, embora se destaquem no interior do bairro; f) observando a seqüência completa de iterações, aparece o eixo norte como marcado pela instabilidade de valores de centralidade (no bairro Três Vendas), enquanto que o eixo leste, ao contrário, aparece com constância (no bairro Laranjal).

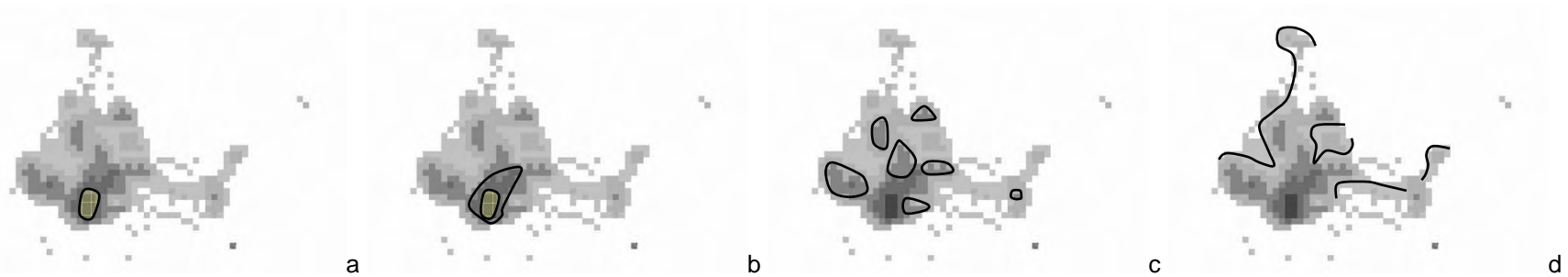


Figura 6.10: hipótese inferior, sobre output de CentR1 na iteração 45, mostrando distribuições de centralidade; a) centro principal, de nível 1; b) expansão do centro principal, de nível 2; c) centros de bairro, de nível 3; d) corredores de baixa centralidade, de nível 4.

As centralidades de tipo 2 (*CentR2*, no modelo, normalizada pela centralidade máxima) confirmam a permanência do centro tradicional, detalhando sua estrutura interna, pelo quê fica destacado como máximo o trecho loteado até 1835, hoje centro comercial e histórico principal da cidade. As extensões para os bairros Areal e Fragata também são visíveis, mostrando a supremacia em superfície e intensidade da primeira sobre a segunda; centros de bairro não são visíveis nessa medida, o que demonstra que o crescimento lento participa na formação de uma cidade monocêntrica e que as concentrações de centralidade nos bairros de Pelotas são fracas (figura 6.11).



Figura 6.11: hipótese de crescimento inferior, sobre output de CentR2, na iteração 45, mostrando distribuições de centralidade; a) centro principal; b) expansões do centro principal na direção dos bairros Areal e Fragata.

O potencial de crescimento (*Potential*, no modelo) aparece, ao início da simulação, como uma linha de contorno à cidade preexistente, padrão que se mantém junto às áreas não urbanizáveis ao sul (na interface com os municípios do Capão do Leão e Rio Grande, essa última coincidindo com o Canal São Gonçalo) e a leste (na interface com a Laguna dos Patos); a norte e a nordeste, nos limiares dos bairros Areal e Três Vendas, acrescidos das novas células geradas no processo de simulação, o potencial aparece como fragmentos, em células isoladas e sem geometria evidente, com localização difusa; como o potencial em áreas não urbanizáveis não se realiza (as células são classificadas como *freezing*, no modelo), é justamente esse potencial difuso que

se encarrega de crescimento real que ocorre na simulação, o que ajuda a entender o resultado de polinucleação mostrado no *output* referente aos fenótipos urbanos. É notável que os valores máximos de potencial estão concentrados nos locais de contato da urbanização preexistente com o ambiente natural não urbanizável; isso sugere que a interface entre os sistemas culturais ou artificiais com os sistemas físico-biológicos ou naturais é geradora de potencial para a urbanização e para a transformação, só não se realizando por algum tipo de impedimento (figura 6.12).

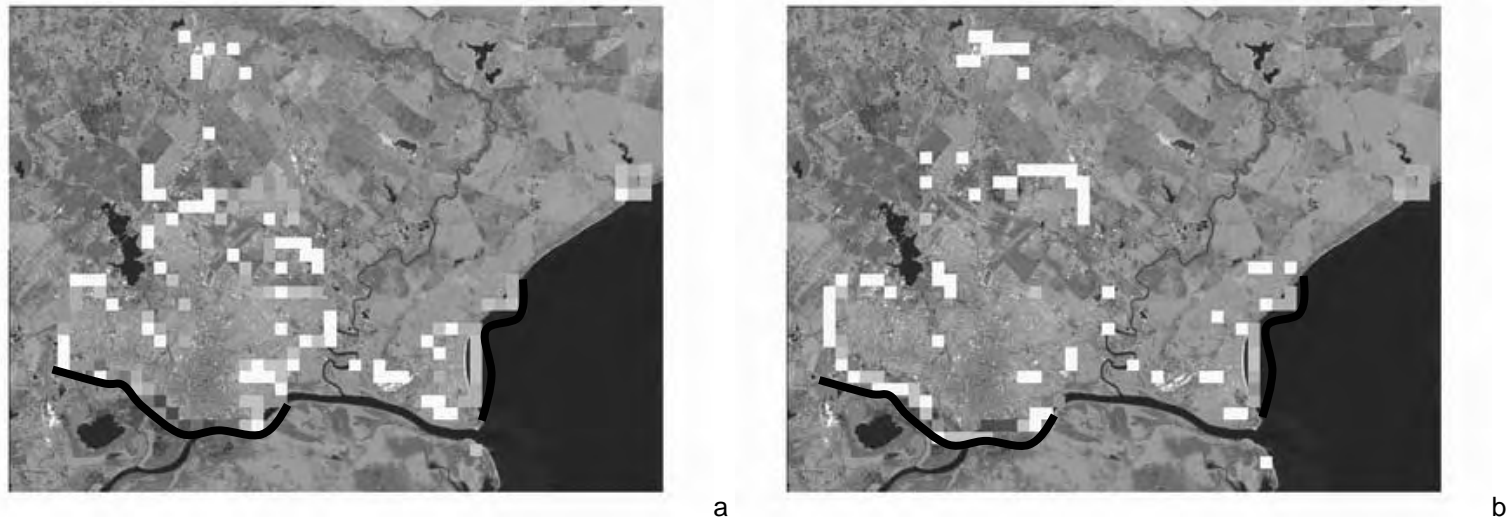


Figura 6.12: hipótese de crescimento inferior, sobre *output* de *Potential*, mostrando linhas de concentração de potencial; a) na iteração 1; b) na iteração 45.

Estão identificados dois tipos de comportamentos quantitativos da distribuição do potencial de crescimento, durante a simulação: a) o potencial externo é maior que o interno e diminui exponencialmente com o avançar das iterações, o que está associado à formação de borda de baixa intensidade de urbanização, que por sua vez está associada ao crescimento lento; b) o potencial interno é menor e tende a se manter estável durante toda a simulação (gráfico 6.2, a seguir).

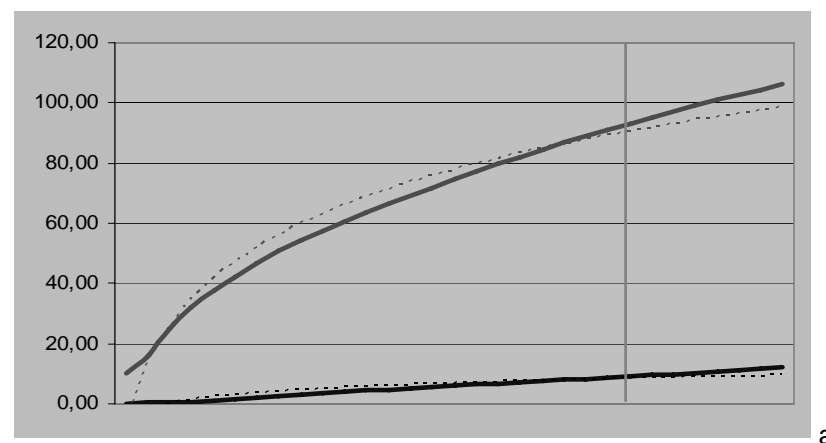


Gráfico 6.2: hipótese de crescimento inferior, em 60 iterações, com destaque para a iteração 45; potencial aplicado acumulado externo em vermelho e interno em azul; linhas tracejadas mostram tendências de base logarítmica 10.

As resistências naturais seguem três padrões de forma durante a simulação (figura 6.13): a) áreas, no trecho sul, particularmente vinculadas ao subsistema de banhados; b) linhas, coincidindo com o subsistema de águas lóaticas; c) pontos dispersos pelo território, associados às permanências do subsistema de matas. No crescimento lento, a interface com a cidade é marcada pelo enfraquecimento progressivo das resistências, evitando maiores contrastes entre o ambiente natural e o cultural, restando ambos enfraquecidos na borda da cidade

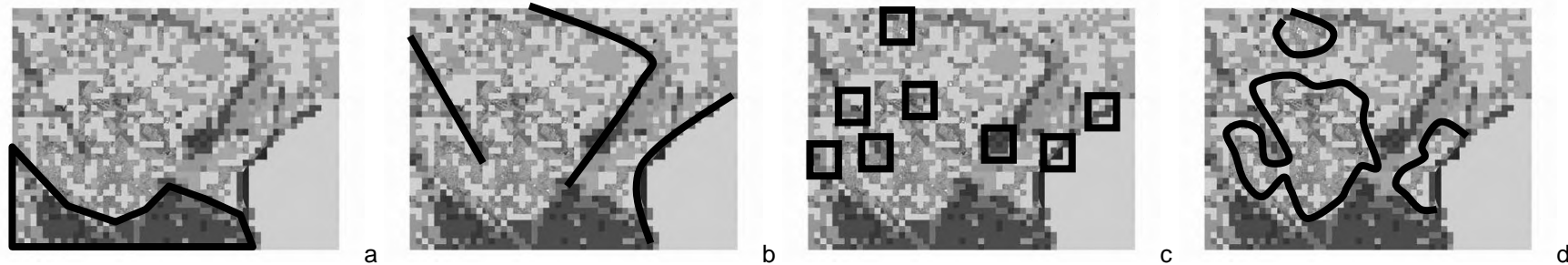


Figura 6.13: hipótese inferior, sobre output de ResistE, na iteração 45, mostrando a distribuição de resistências naturais; a) áreas de permanência; b) linhas de concentração; c) fragmentos; d) interfaces com a cidade.

Em resumo, do experimento realizado com a hipótese de crescimento inferior, que caracteriza um modo de crescimento lento, podem ser anotados as seguintes observações:

- a) o crescimento lento favorece a permanência de núcleos preexistentes separados, mostrando dificuldade para realizar conexões;
- b) os novos carregamentos que aparecem em função do crescimento lento são de fraca intensidade, aderindo às bordas da cidade preexistente;
- c) a distribuição de centralidades mantém a hierarquia entre máximos e mínimos, do centro para a periferia, respectivamente; centros de bairro ocorrem com valores fracos, sendo visíveis somente em relação ao seu entorno imediato;
- d) o potencial de crescimento ocorre de forma predominantemente linear, na interface do território urbanizado com o não urbanizado, estando os máximos concentrados no encontro da cidade com zonas não urbanizáveis; enquanto o potencial de crescimento externo é o maior e decrescente, o potencial interno é o menor e mais estável;
- e) a interface do ambiente natural com a cidade apresenta baixas resistências naturais, com a urbanização avançando lentamente; desse processo resulta um encontro com contraste fraco entre o território urbanizado e o não urbanizado, o que se mostra como um resultado típico do crescimento urbano lento.



### 6.2.2 Hipótese de crescimento urbano intermediário

Tal como na hipótese de crescimento inferior, a simulação começa com 144 células urbanas e 117 células urbanas de borda; em 45 iterações, equivalentes a 45 anos, chega a 455 e 237 células, respectivamente, o que resulta num crescimento médio de 2,66% ao ano, que se aproxima ao crescimento médio do período de calibração (ver figura 6.14, adiante). Esse resultado foi alcançado mediante o uso de distribuição de tensões axiais, axiais de *buffer*, polares, difusas de tipo 1 e difusas de tipo 2 com taxas de 80, 5, 5, 5 e 5 %, respectivamente e com carregamento urbano inicial em três intensidades de urbanização (melhores resultados na calibração), mediante controle da intensidade de crescimento através da imputação de  $\lambda$  (lambda) igual a 1,80; todos os demais parâmetros estão regulados no valor padrão. Os gráficos 6.3a e 6.3b, a seguir, mostram a variação do crescimento e da taxa de crescimento, enquanto que as figuras 6.14 a 6.19, adiante, resumem os resultados obtidos na simulação.

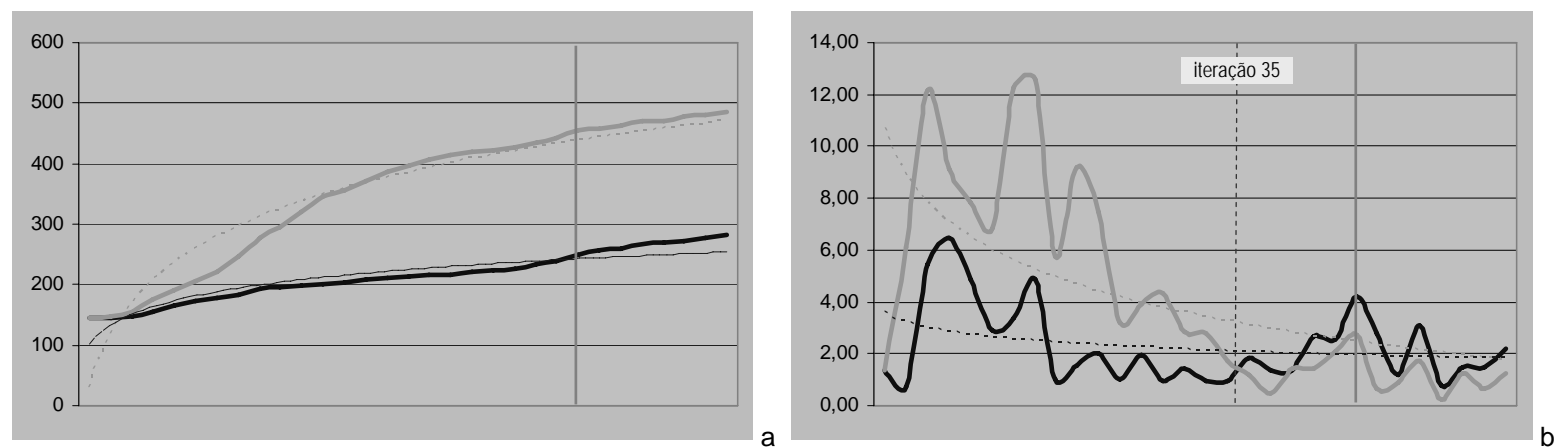


Gráfico 6.3: hipótese de crescimento intermediária, em 60 iterações, com destaque para a iteração 45 (linha vertical cheia) e para a iteração 35 (linha vertical tracejada) ; a) evolução do crescimento urbano; b) evolução da taxa de crescimento urbano; linhas tracejadas mostram tendências de base logarítmica 10.

Os gráficos 6.3a e 6.3b mostram que as tendências de crescimento observadas nas hipóteses inferior e intermediária, aparentemente estáveis, são acompanhadas por intensas variações na taxas de crescimento (ao considerar as diferenças entre as iterações), as quais apresentam uma tendência geral decrescente (ao considerar a totalidade das iterações). É notável que a tendência decrescente da taxa de crescimento é inversamente proporcional à quantidade desse crescimento, sugerindo que a cidade pode manter mecanismos de auto-regulação, provocando endogenamente a diminuição das taxas através de *feedback* negativo. Como demonstra o gráfico 6.3b, a partir da iteração 35 a hipótese de crescimento inferior apresenta taxas de crescimento superiores às da hipótese intermediária, situação que se mantém até o final.

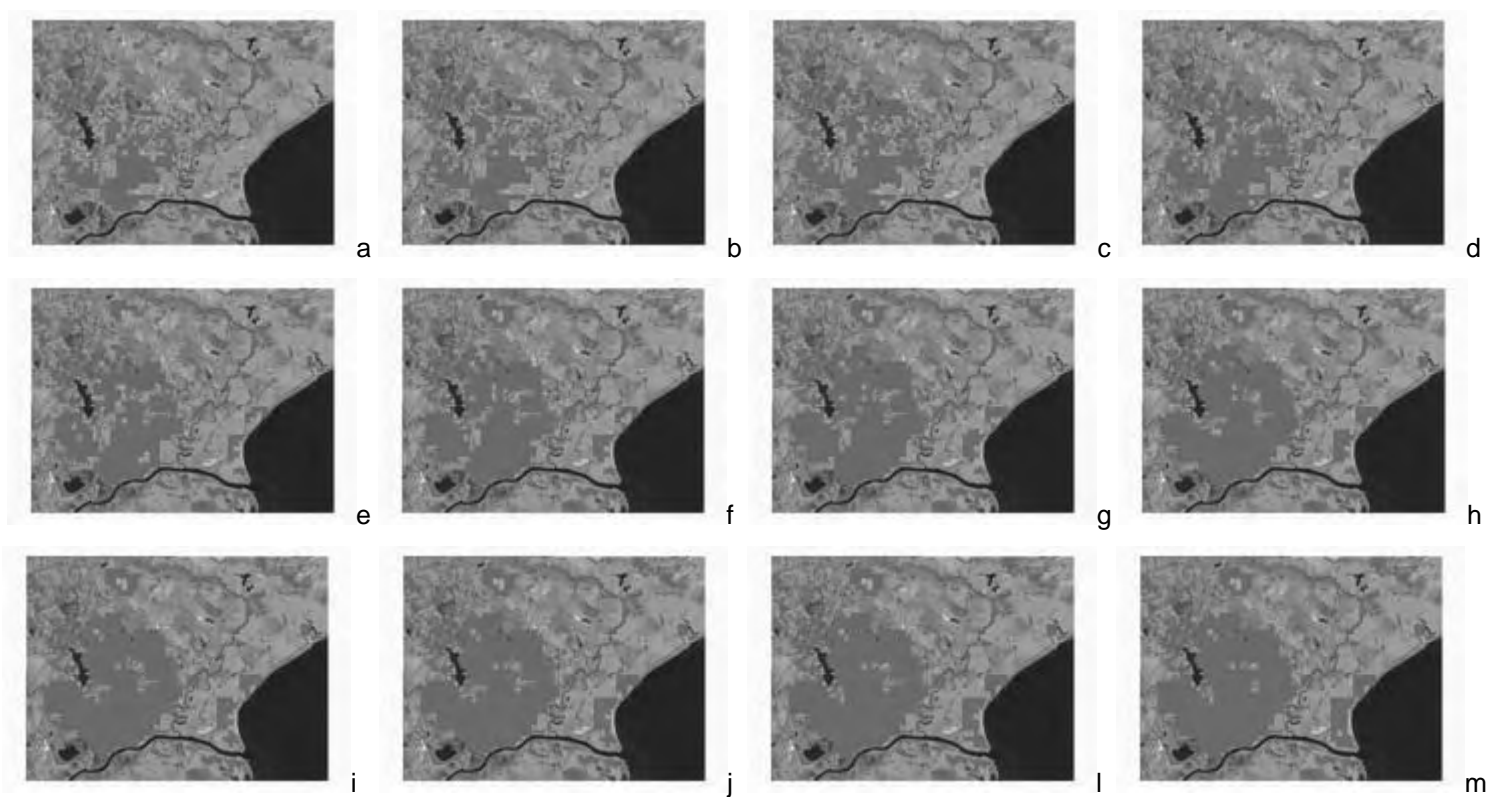


Figura 6.14: hipótese de crescimento intermediário; CellType, até iteração 45.

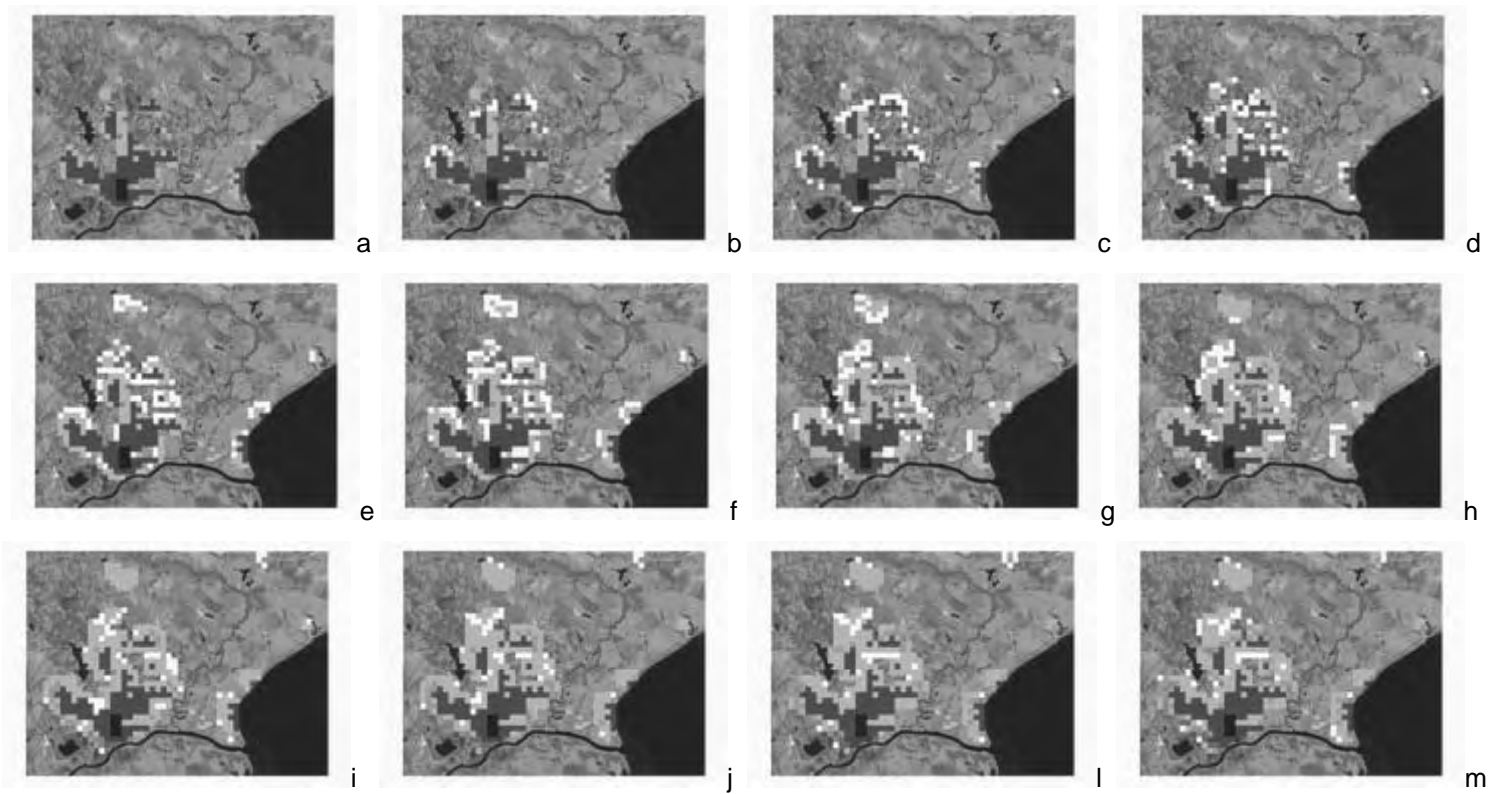


Figura 6.15: hipótese de crescimento intermediário; LoadU, até iteração 45.

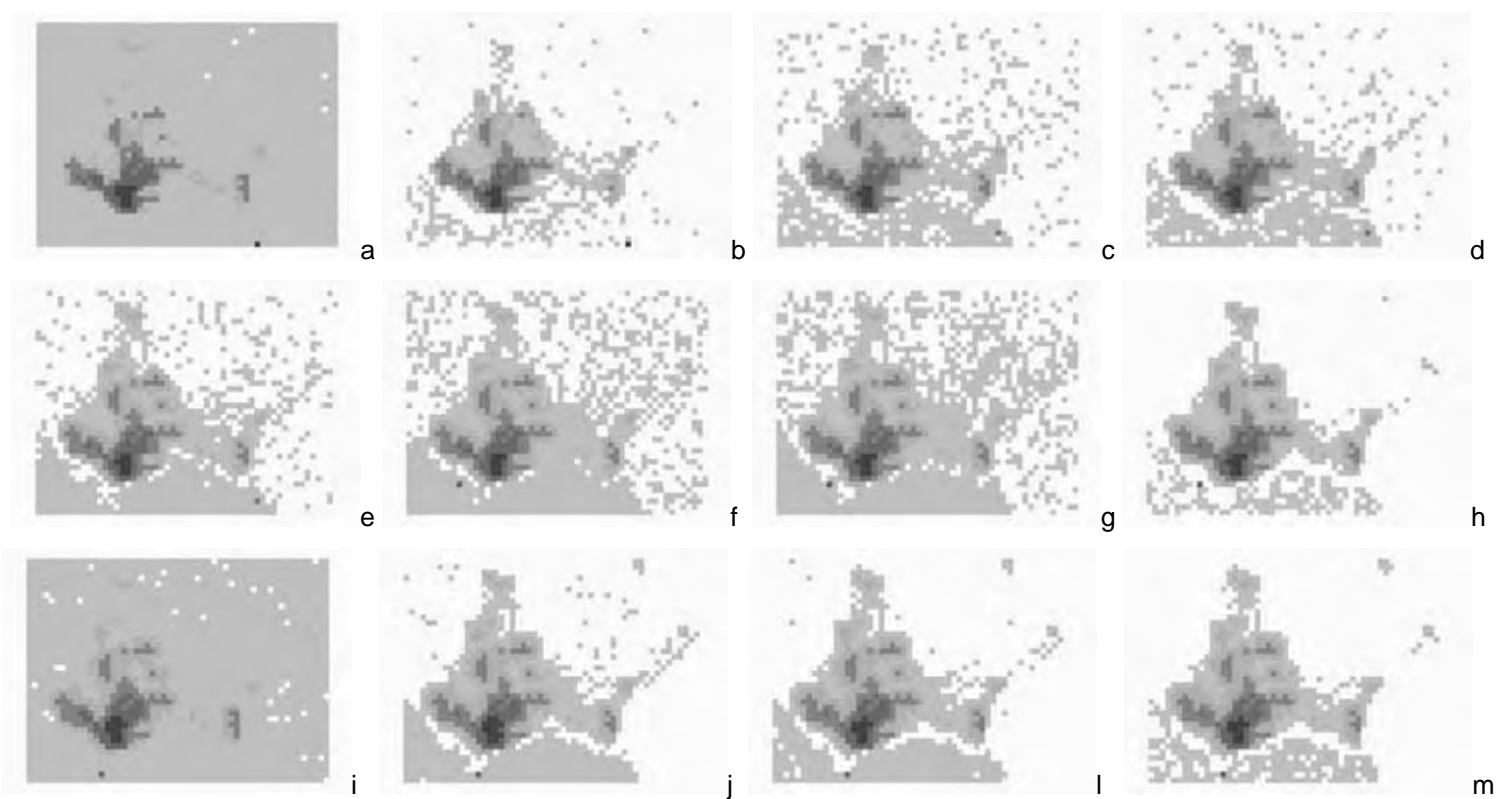


Figura 6.16: hipótese de crescimento intermediário; CentR1, até iteração 45.

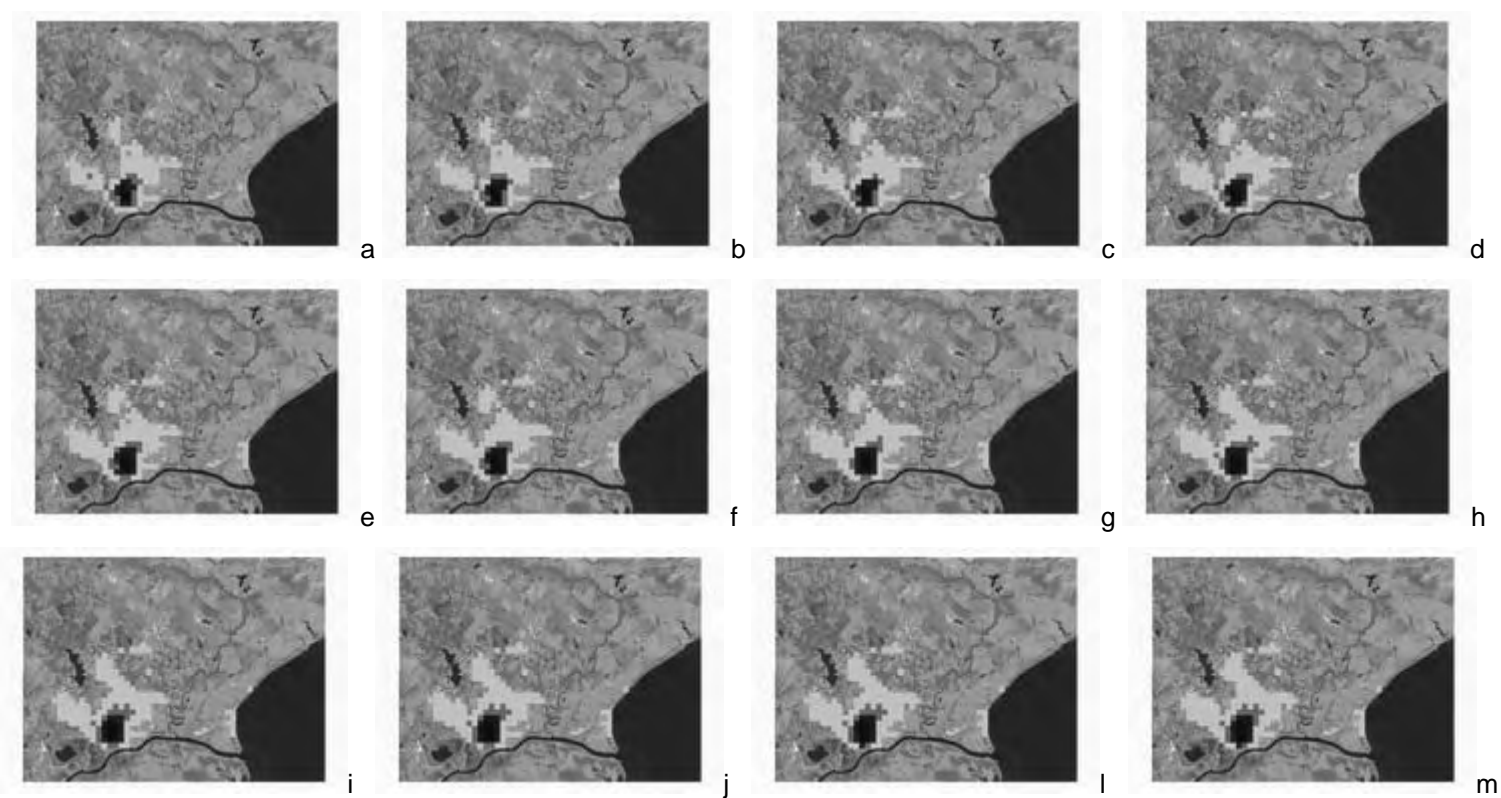


Figura 6.17: hipótese de crescimento intermediário; CentR2, até iteração 45.

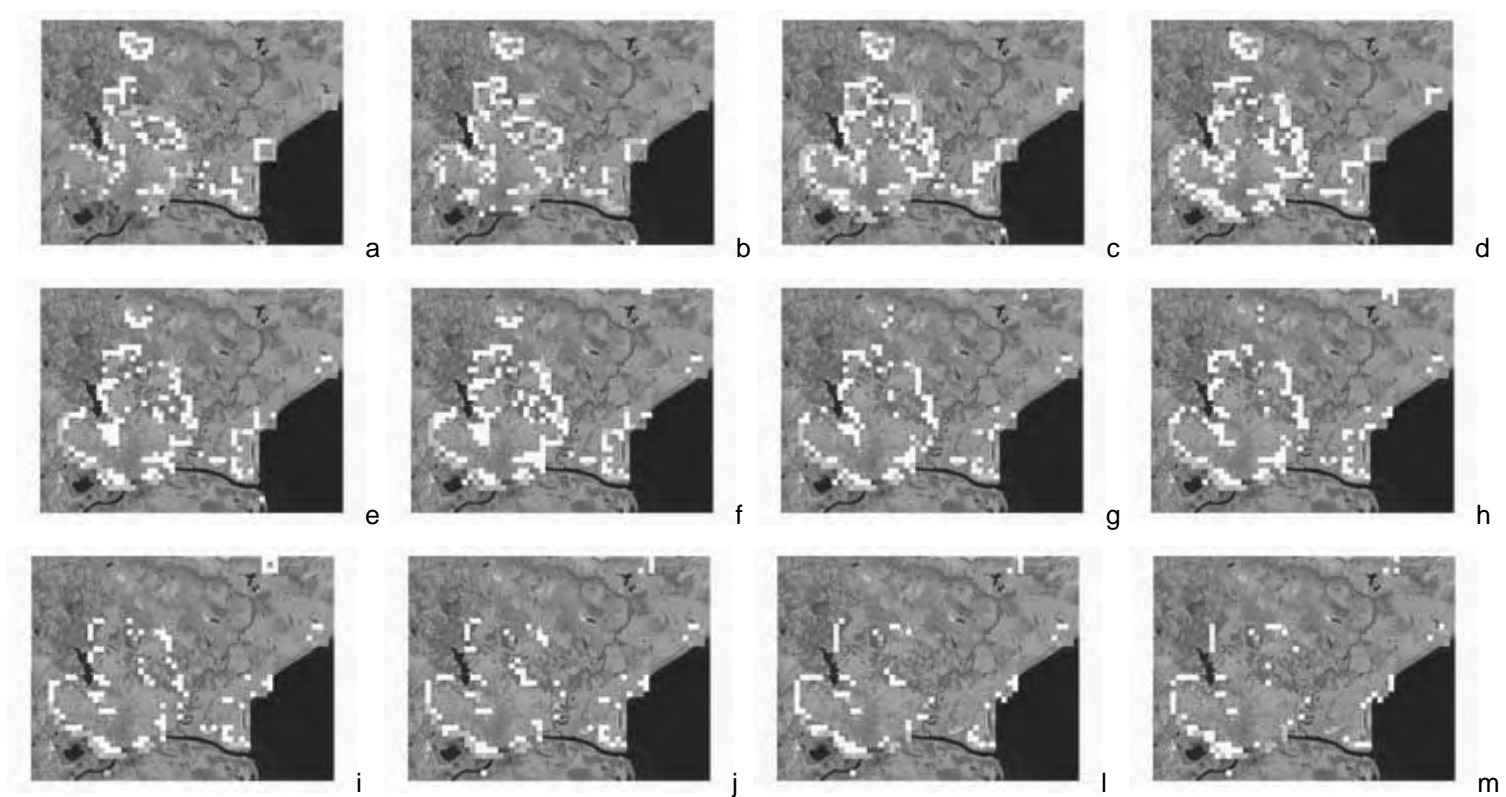


Figura 6.18: hipótese de crescimento intermediário; Potential, até iteração 45.

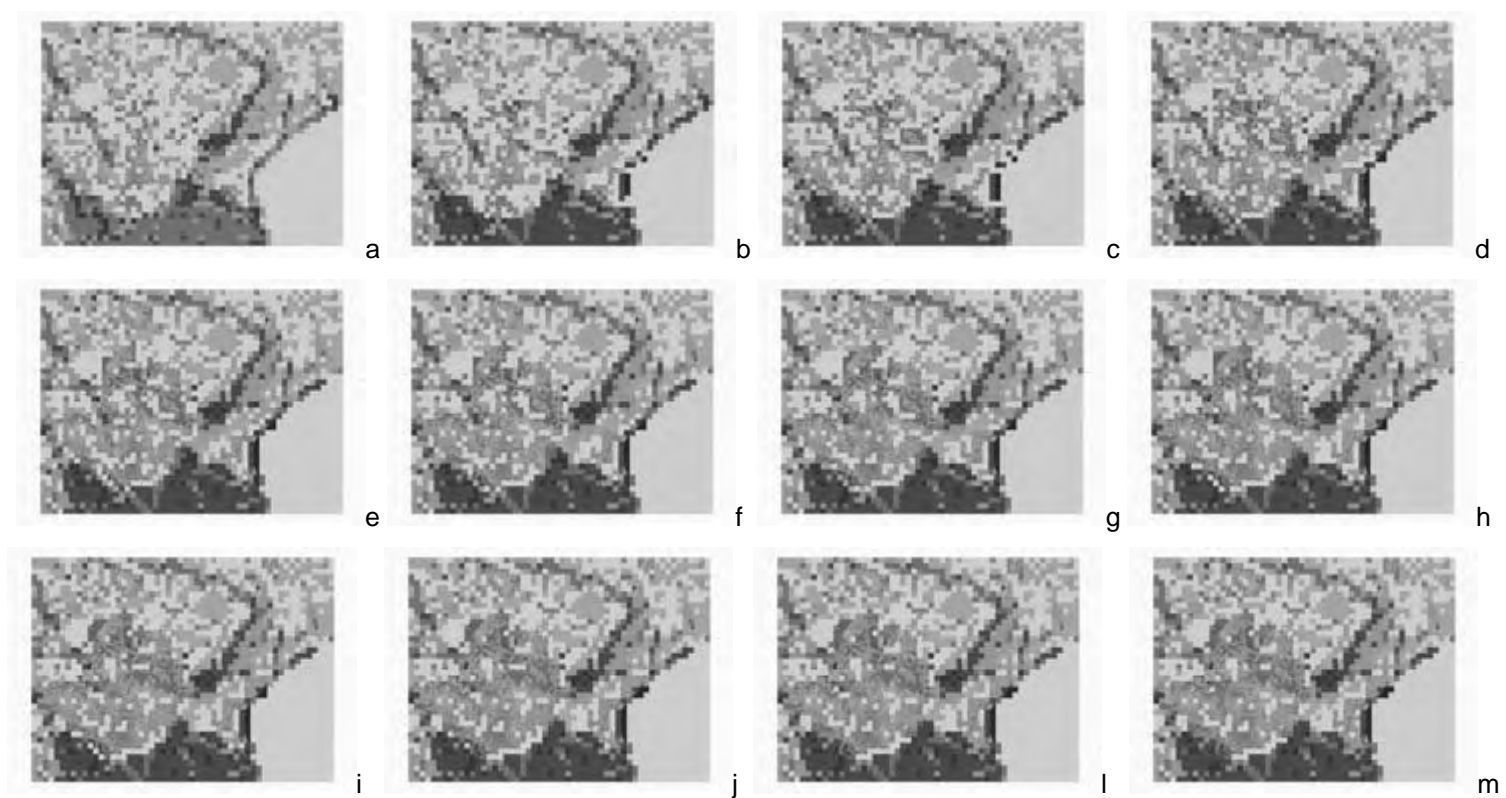


Figura 6.19: hipótese de crescimento intermediário; ResistE, até iteração 45.

Com o avanço das iterações, a simulação mostra as células se organizando em cinco grupos (figura 6.14, anteriormente e 6.20a, adiante): 1) núcleo principal, com diversos bairros mantendo continuidade; 2) bairros Laranjal e Barro Duro, a leste e junto à Laguna dos Patos; 3) vila de pescadores Z3, a nordeste e também junto à laguna; 4) vila Princesa, no extremo norte da área de estudo; 5) uma nova ocupação, no extremo nordeste da área de estudo; esse resultado mostra uma tendência de unificação dos bairros mais próximos do centro tradicional da cidade, ao mesmo tempo em que os núcleos mais distantes consolidam sua independência territorial.

Vazios urbanos ocorrem durante toda a simulação, estando identificados quatro tipos principais (figura 6.20b): 1) vazios que separam os núcleos isolados; 2) bacia de captação, lago, barragem e vertedouro do arroio Santa Bárbara; 3) região do aeroporto; 4) fragmentos dispersos pelo território. Comparando com a hipótese de crescimento inferior, mostrada anteriormente, a tendência geral desta simulação foi de diminuição dos vazios fragmentados e de consolidação dos grandes vazios que separam os bairros mais distantes; essa característica aparece nas medidas de fragmentação e compacidade da área urbanizada, conforme está nos gráficos 6.4a e 6.4b, adiante.

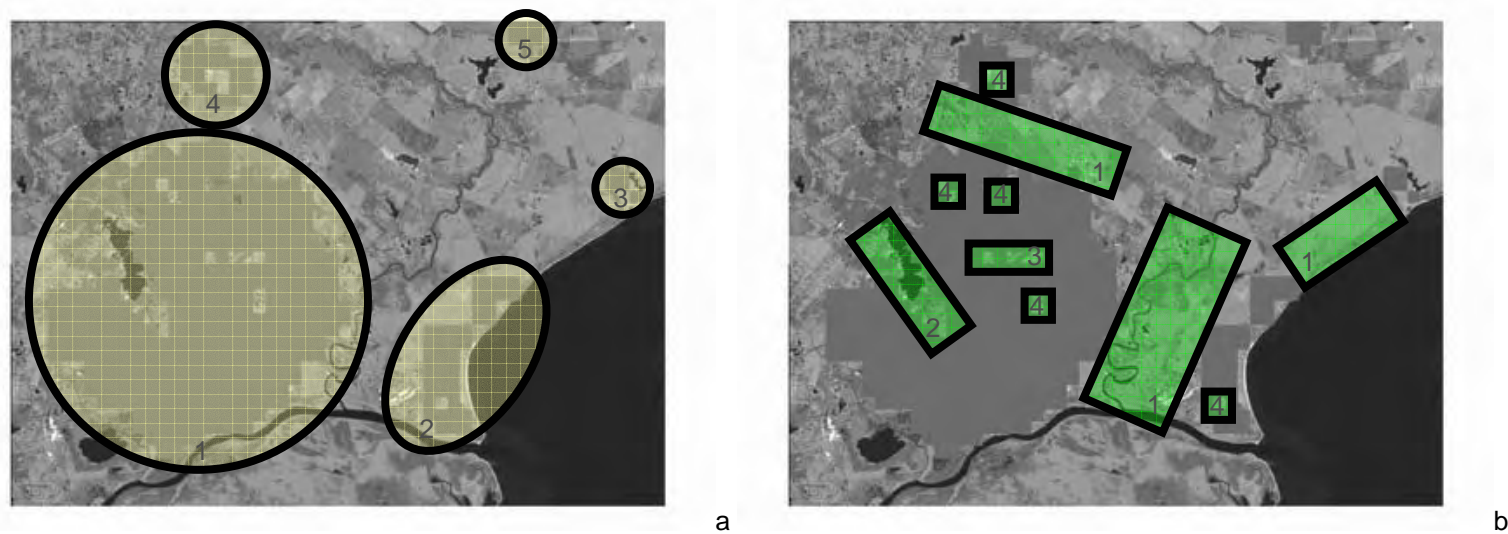


Figura 6.20: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de CellType, na iteração 45; a) agrupamentos urbanos; b) vazios urbanos.

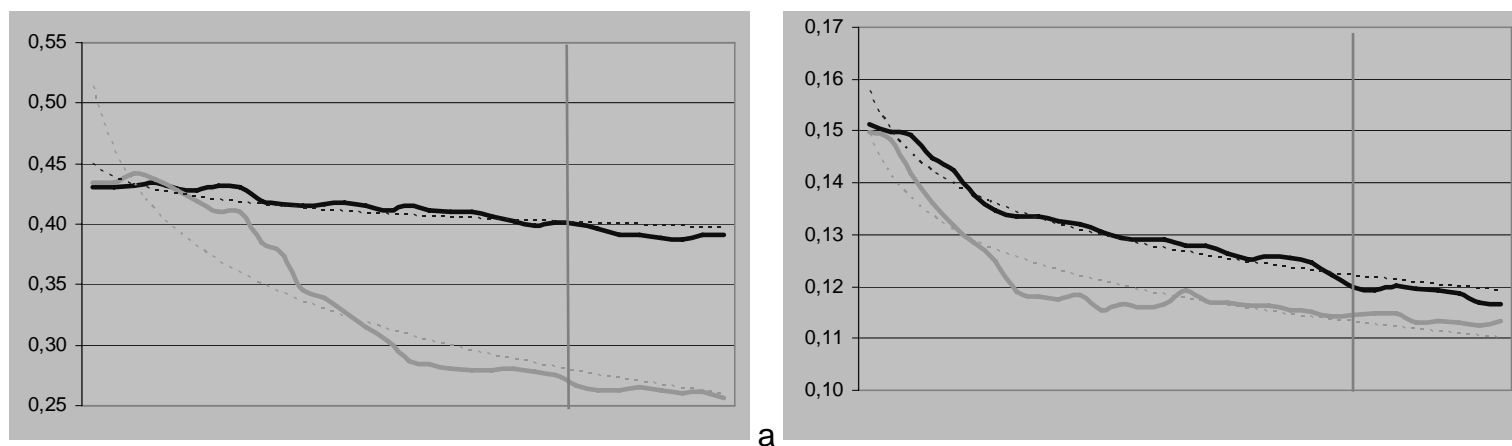


Gráfico 6.4: hipótese de crescimento inferior (linha azul) e intermediária (linha verde), em 60 iterações, com destaque para a iteração 45; a) fragmentação relativa; b) compacidade relativa; linhas tracejadas mostram tendências de base logarítmica 10.

A localização da maior intensidade de urbanização se mantém durante toda a simulação, com as expansões nas bordas das preexistências apresentando valores pequenos e médios (figura 6.15, anteriormente), o que faz com que a interface com o sistema natural assumam maior contraste, em função do carregamento urbano maior; a presença desses valores médios é um diferenciador dos resultados da hipótese de crescimento inferior, na qual só aparecem valores baixos; esse resultado indica que ao aumento da velocidade de crescimento corresponde maior intensidade de urbanização na borda onde o crescimento se dá, podendo ser admitida uma relação de proporção direta entre velocidade de crescimento e intensidade de urbanização das bordas da cidade. Além disso, os valores máximos de carregamento urbano que aparecem na periferia se localizam diametralmente opostos em relação à zona de maior intensidade de urbanização, o que indica um processo de ocupação “de trás para frente” ou movido por uma força centrípeta.

Sendo desse modo, pode ser admitido que a conversão do território não urbanizado em urbanizado e a intensidade de urbanização desse território são movidas por forças em oposição: enquanto os novos parcelamentos urbanos seguem forças centrífugas, a alocação de edificações nessas novas parcelas atende a forças centrípetas (figura 6.21)

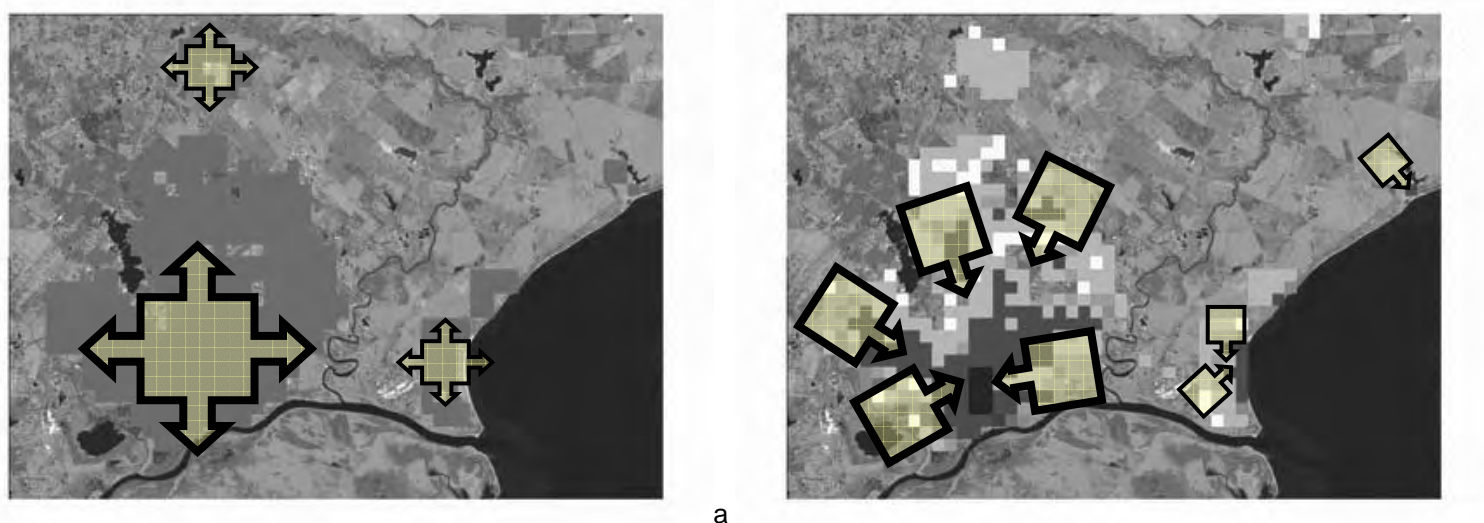


Figura 6.21: hipótese de crescimento intermediário, na iteração 45; a) crescimento centrífugo, sobre output de CellType; b) ocupação centrípeta, sobre output de LoadU.

Tal como na hipótese inferior, o centro tradicional se mantém durante toda a simulação, com máximos que flutuam no entorno da área com maior centralidade (figura 6.16, anteriormente); ao final da simulação aparece um vetor de aumento de centralidade no sentido do bairro Areal, a partir do centro. À exceção do bairro Laranjal, os demais núcleos remotos apresentam fraca centralidade durante toda a simulação. De modo similar ao caso anterior, quatro níveis de centralidade podem ser identificados (figura 6.22): 1) nível 1 ou principal, representado pelo centro tradicional, acrescido de expansões a norte e a leste (lugares conhecidos como zona da Igreja da Luz e zona do Foro); 2) nível 2, que se caracteriza como uma expansão do nível anterior na direção do bairro Areal, na zona conhecida como Simões Lopes e em fragmentos do eixo de desenvolvimento do bairro Fragata; 3) nível 3, demarcando centros de bairro; 4) nível 4, realizando conexões entre bairros.

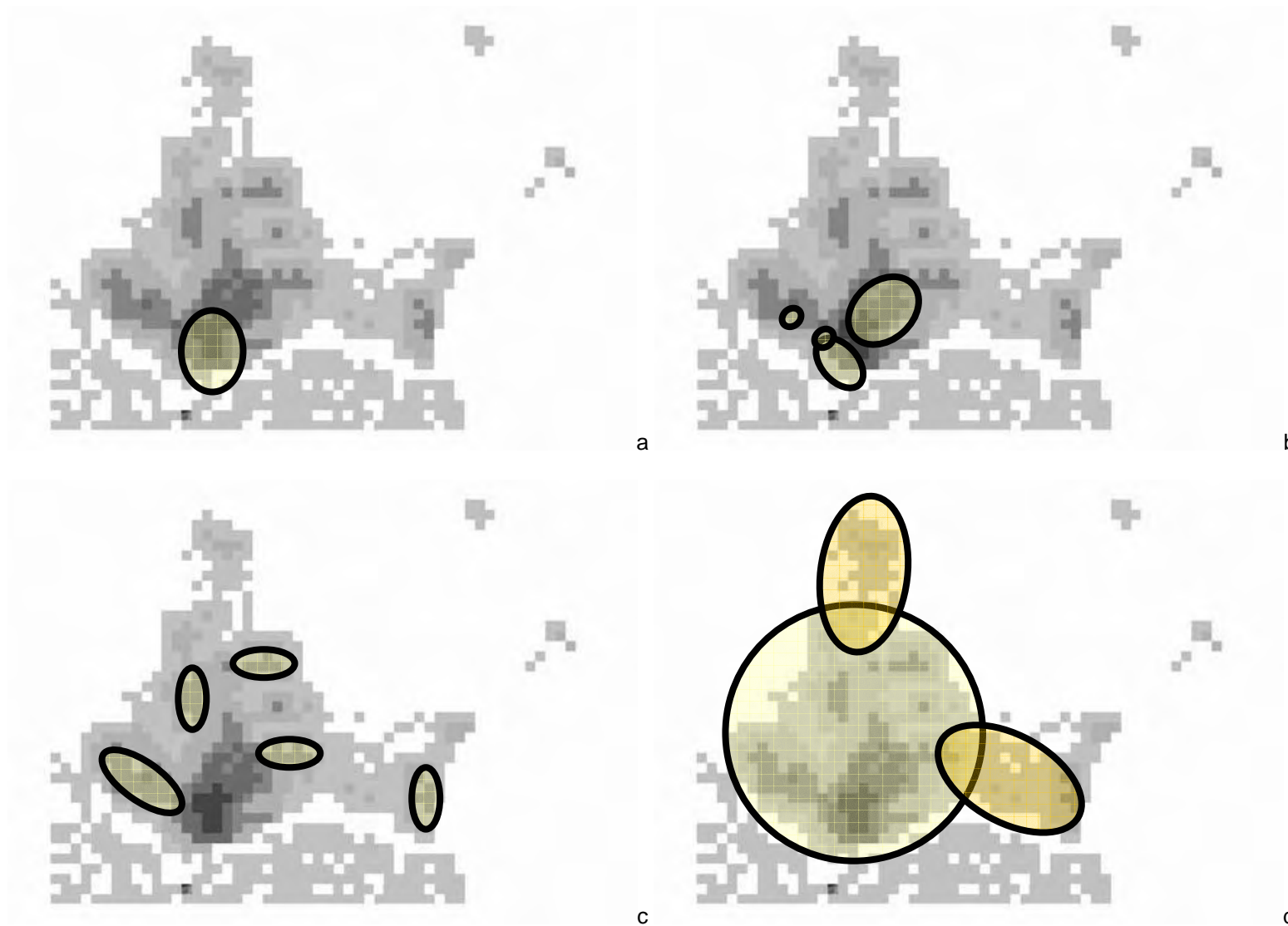


Figura 6.22: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de *CentR1*, na iteração 45, mostrando centralidades de diferentes hierarquias; a) centralidade de nível 1; b) centralidade de nível 2; c) centralidade de nível 3; d) centralidade de nível 4.

Enquanto que a centralidade de tipo 1 (*CentR1*, no modelo, mostrada anteriormente, a qual é normalizada pelo somatório dos valores nas células; ver figura 6.16) mostra um escalonamento completo dos resultados, a centralidade de tipo 2 (*CentR2*, no modelo, a qual é normalizada pelo valor máximo; ver figura 6.17), detalha melhor a tendência do centro principal, onde se concentram os valores de centralidade máxima. Sendo assim, duas tendências principais estão identificadas (como mostra a figura 6.23, adiante): a) o centro tradicional tem seu papel preservado na estrutura urbana, tornando-se as expansões simuladas colaboradoras da manutenção de sua posição hierárquica; b) os dois principais vetores de expansão desse centro tradicional, um mais forte e no sentido do bairro Areal e outro mais fraco no sentido do bairro Fragata, mantêm sua base conectada a esse centro tradicional, o que implica mais em reforço da estrutura anterior do que nalguma mudança inovadora. Como mostram as figuras 6.16, 6.17, 6.22 e 6.23, as parcelas periféricas da cidade mantêm baixa centralidade durante toda a simulação, independentemente de ocorrerem maiores ou menores intensidades de urbanização.

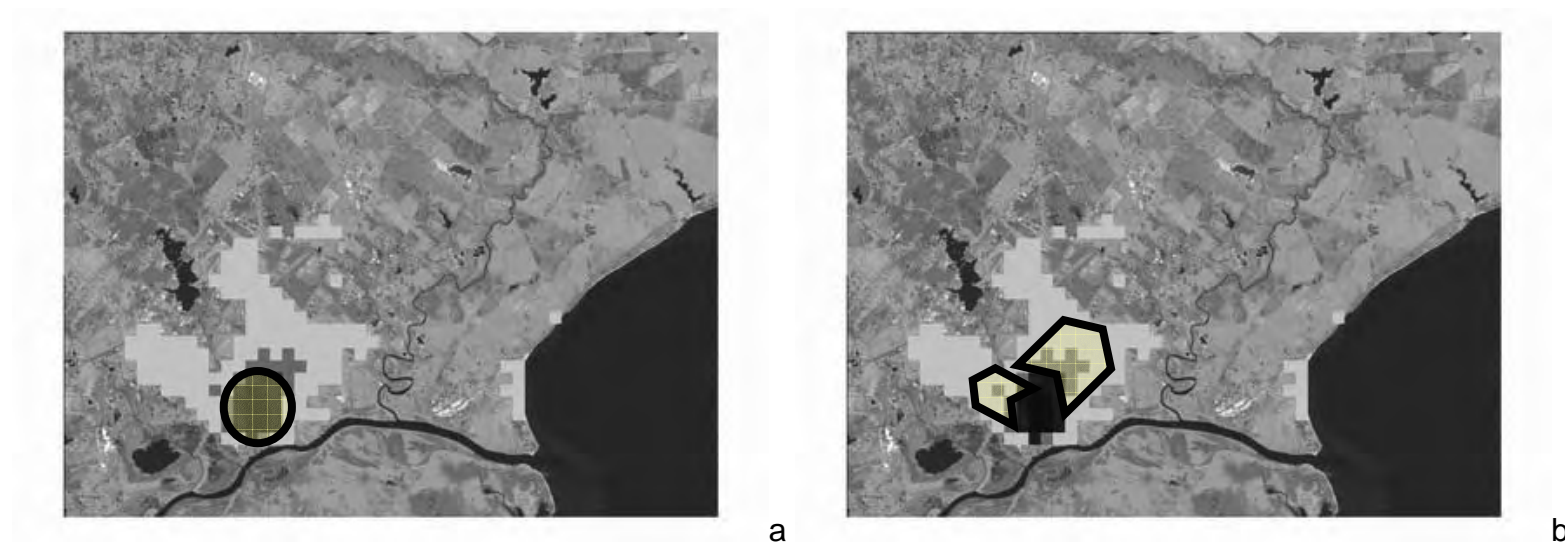


Figura 6.23: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de *CentR2*, na iteração 45, mostrando a distribuição de centralidade; a) concentração de centralidade; b) vetores de expansão de centralidade.

O potencial de crescimento (*Potential*, no modelo; ver figura 6.18, anteriormente e figura 6.24, adiante) mostra um destaque da borda da urbanização preexistente, que acompanha o avanço da simulação. Os valores máximos se concentram no encontro das células urbanas com as áreas de urbanização impedida (células *freezing*, no modelo), como aparece junto ao canal São Gonçalo e à Laguna dos Patos. Tal como na hipótese inferior, o potencial aparece fragmentado no trecho norte da cidade, ocorrendo fracamente nas parcelas já urbanizadas ao começo da simulação.

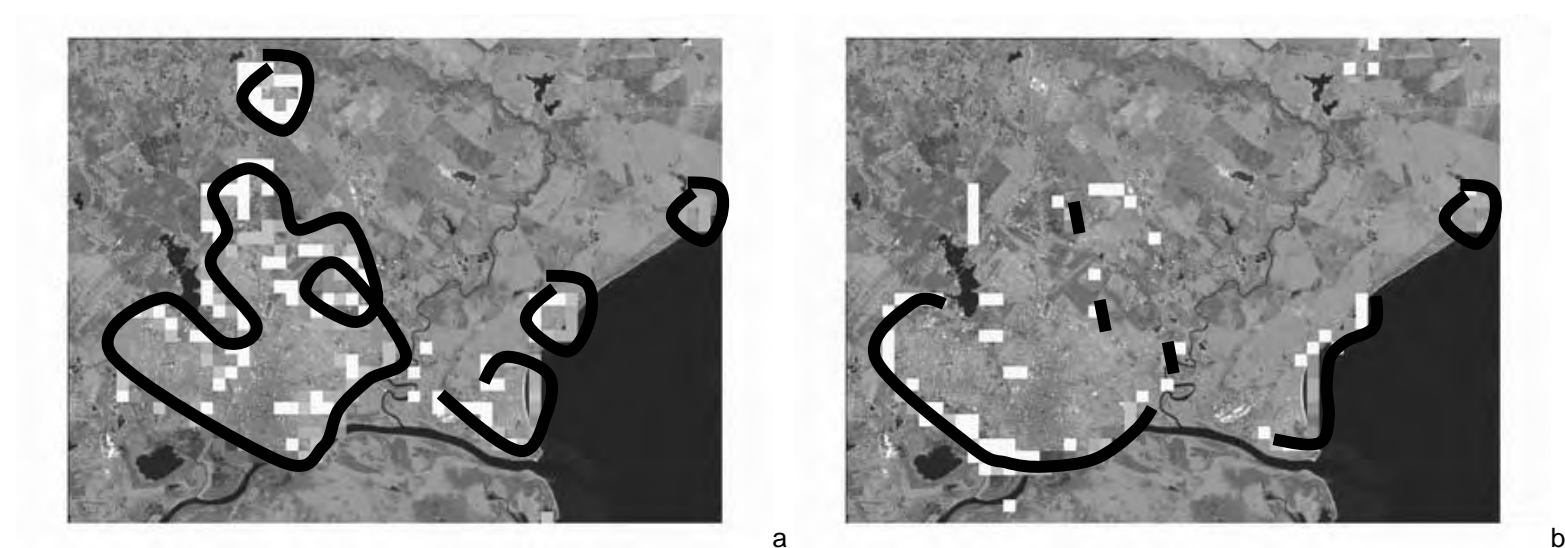


Figura 6.24: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de *Potential*, mostrando as linhas de concentração de potencial, a) na iteração 1; b) na iteração 45.



As resistências naturais se concentram no subsistema de águas, desde as primeiras até as últimas iterações, as quais aparecem como linhas acompanhando os arroios Fragata, Santa Bárbara e Pelotas, bem como o canal São Gonçalo e as praias junto à Laguna dos Patos (figura 6.25); salvo nesses trechos, a interface com a cidade é marcada pela baixas resistências naturais. O desaparecimento dos atributos naturais causado pelo crescimento urbano implica no aumento do valor relativo dos remanescentes, isto é, aqueles atributos naturais que permanecem (ou sobrevivem, no caso de sistemas bióticos) numa iteração tornam-se mais fortes para a próxima; esse fenômeno pode ser observado na seqüência da figura 6.19, anteriormente, bem como na acumulação de tonalidades verde escuro, na figura 6.25, abaixo.

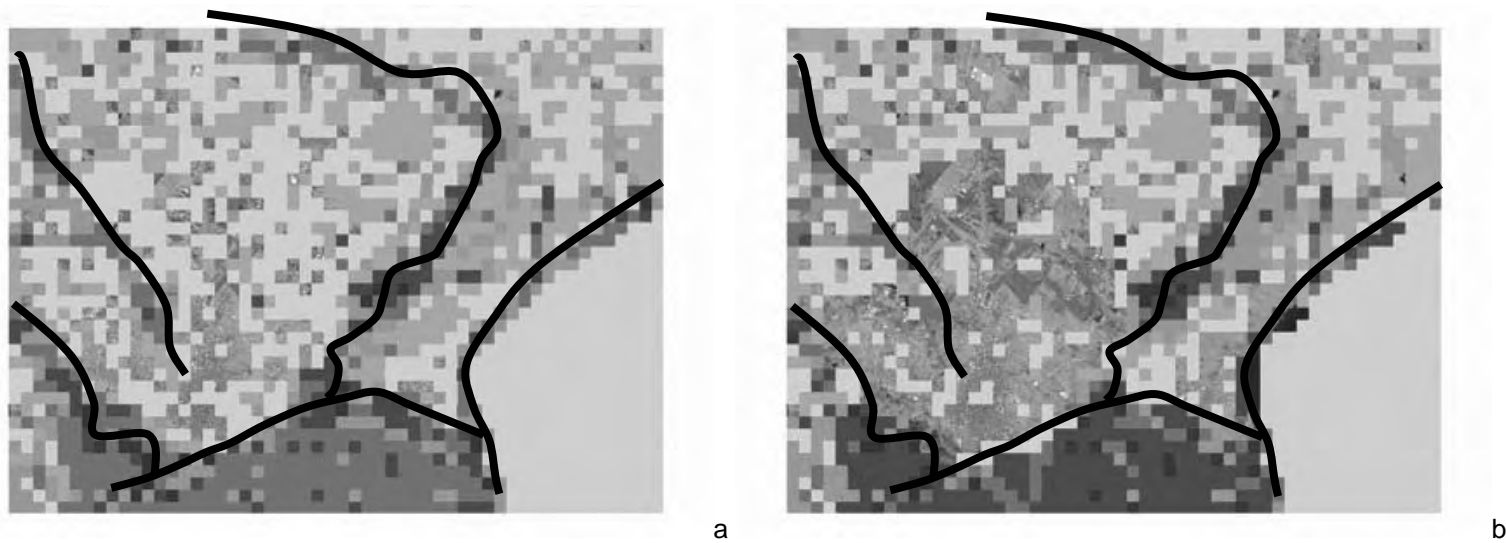


Figura 6.25: hipótese de crescimento intermediário, sobre output de ResistE, mostrando as linhas de concentração de resistências naturais; a) na iteração 1; b) na iteração 45.

Em resumo, da simulação realizada com a hipótese de crescimento intermediária, que utiliza uma velocidade de crescimento aproximada à atual, podem ser destacadas as seguintes observações:

- a) o processo de conversão de território gerou um núcleo principal contínuo e núcleos secundários separados, bem como manteve os vazios urbanos maiores e diminuiu os vazios menores e fragmentados; isso indica que houve um acirramento da estrutura urbana, na relação de cheios e vazios (áreas urbanizadas e não urbanizadas), realizado por reprodução do comportamento das células vizinhas, gerando um padrão global através da repetição de comportamentos locais;

- b) os solos convertidos pela urbanização apresentam carregamento médio e fraco; enquanto os carregamentos fracos reproduzem a borda formada na hipótese de crescimento inferior, os médios constituem uma frente de crescimento diferenciada e localizada diametralmente oposta ao centro principal; esse resultado sugere que o crescimento urbano é dirigido por forças em oposição: enquanto que a conversão de território ocorre de dentro para fora (força centrífuga), a ocupação desse território ocorre de fora para dentro (força centrípeta);
- c) o centro tradicional mostra forte tendência de persistência, com pouca alteração durante a simulação, o que se deve a sua posição estratégica e às condições iniciais de carregamento; centros de bairro ocorrem, mas com valores de centralidade muito mais baixos do que no centro principal, sendo que nas bordas da cidade se acumulam os menores valores de centralidade (dividindo a centralidade em quatro classes, o centro tradicional está na classe 1, enquanto que os centros de bairro estão na classe 3 e as bordas da cidade na classe 4); esse resultado mostra a persistência de uma estrutura urbana com hierarquia definida e comandada pelo centro tradicional, com as expansões coincidentes com a formação das periferias urbanas;
- d) a concentração de potencial de crescimento é maior na interface das zonas urbanizadas com as não urbanizáveis, aparecendo normalmente como uma linha; onde o impedimento de urbanização não ocorre, a tendência é de o potencial ocorrer fragmentado sobre o território, com valores médios e baixos e com localização difusa;
- e) no processo de crescimento urbano, os atributos que operam como resistência à urbanização ou desaparecem ou aumentam de valor relativo, na seqüência das iterações; sendo assim, pode ser assumido que as resistências evoluem com avanço da simulação, sendo que somente as mais fortes permanecem; no caso do local de estudo, em Pelotas, essas permanências estão representadas pelo subsistema de águas e banhados;
- f) a intensidade e o tipo de crescimento simulado na hipótese intermediária não provocou a superação de limiares, não registrando a ocorrência de problemas ambientais intra-urbanos.

Mas o que acontece se a velocidade de crescimento for duplicada, mantendo as mesmas condições iniciais ? É dessa questão que trata o próximo subtítulo, com a hipótese de crescimento superior.

### 6.2.3 Hipótese de crescimento urbano superior

Tal como nas hipóteses de crescimento inferior e intermediária, a simulação começa com 144 células urbanas e 117 células urbanas de borda; em 45 iterações, equivalentes a 45 anos, chega a 755 e 320 células, respectivamente, o que resulta num crescimento médio de 3,75% ao ano, superior ao crescimento médio do período de calibração (ver figura 6.26, adiante). Esse resultado foi alcançado mediante o uso de distribuição de tensões axiais, axiais de *buffer*, polares, difusas de tipo 1 e difusas de tipo 2 com taxas de 80, 5, 5, 5 e 5 %, respectivamente e com carregamento urbano inicial em três intensidades de urbanização (melhores resultados na calibração), mediante controle da intensidade de crescimento através da imputação de  $\lambda$  (lambda) igual a 1,20; todos os demais parâmetros estão regulados no valor padrão. Os gráficos 6.5a e 6.5b, a seguir, mostram a variação do crescimento e da taxa de crescimento, enquanto que as figuras 6.26 a 6.31, adiante, resumem os resultados obtidos na simulação.

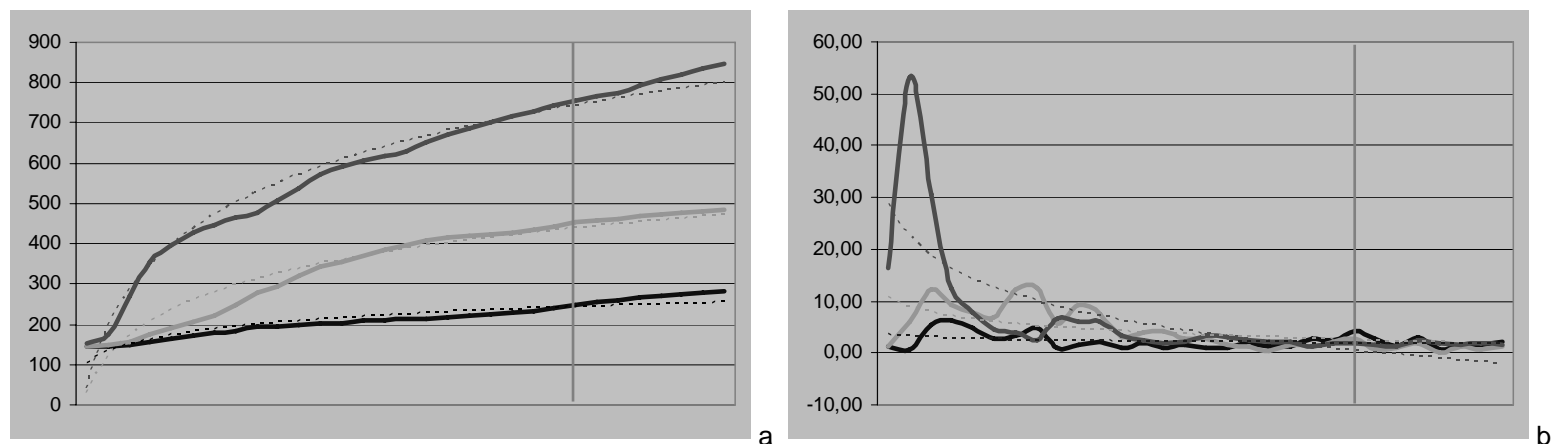


Gráfico 6.5: hipótese de crescimento inferior (linha azul), intermediária (linha verde) e superior (linha azul), em 60 iterações, com destaque para a iteração 45; a) evolução do crescimento urbano; b) evolução da taxa de crescimento urbano; linhas tracejadas mostram tendências de base logarítmica 10.

Os gráficos 6.5a e 6.5b mostram tendências opostas entre crescimento absoluto (expresso em evolução de células convertidas para o fenótipo urbano) e crescimento relativo (expresso em evolução de taxas de conversão de células para o fenótipo urbano), que se repetem nas hipóteses de crescimento inferior, intermediária e superior. Essas tendências indicam que ao acréscimo no tamanho da cidade corresponde a diminuição da taxa de crescimento, a qual tende a se estabilizar com o evoluir das iterações, embora apresente comportamento turbulento de iteração para iteração. Como está anotado no subtítulo anterior, o resultado sugere a ação de mecanismos de auto-regulação no crescimento urbano, o que tem sido apontado como uma das características dos sistemas complexos (Johnson, 2003).

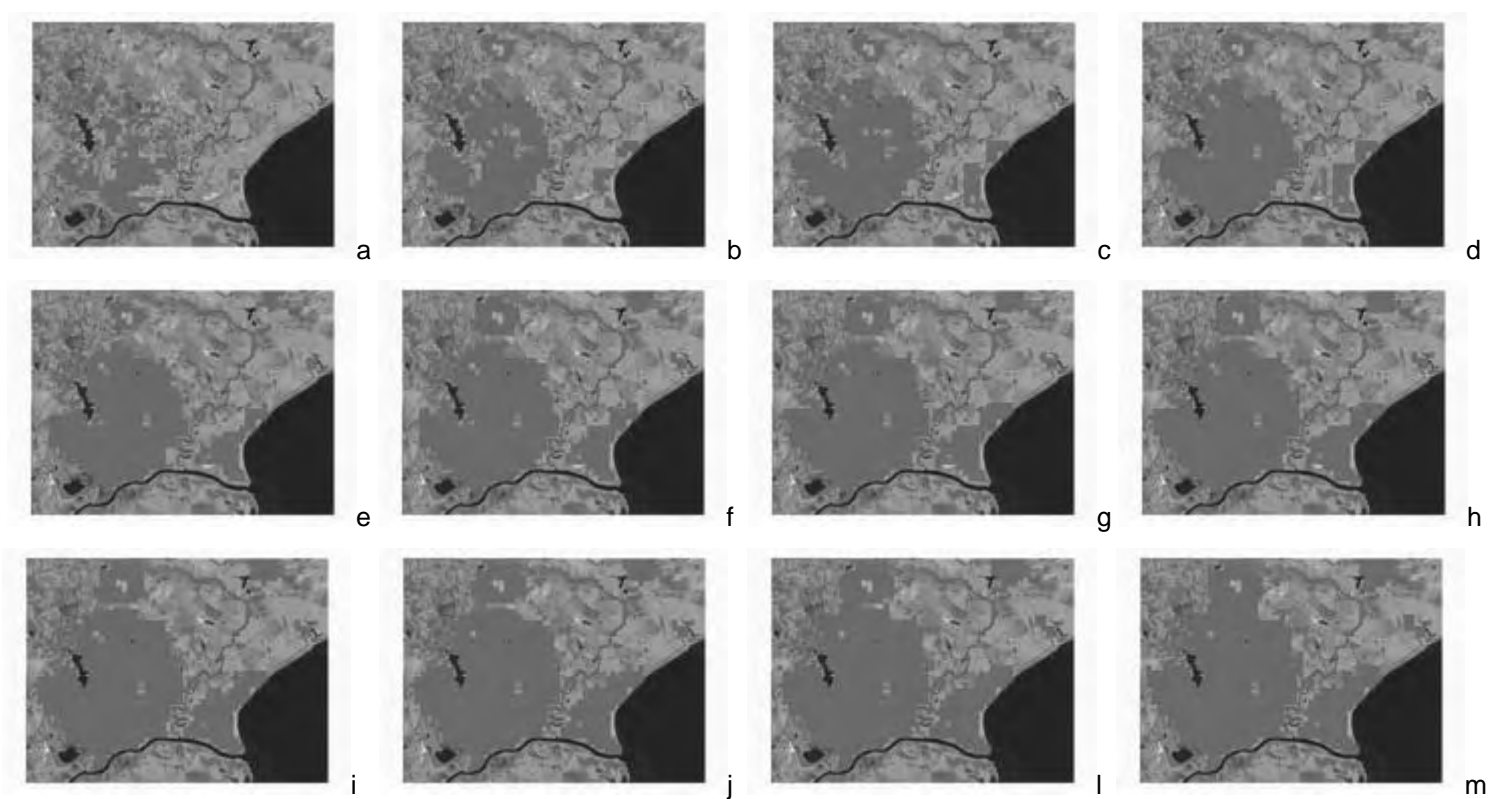


Figura 6.26: hipótese de crescimento superior; CellType, até iteração 45.

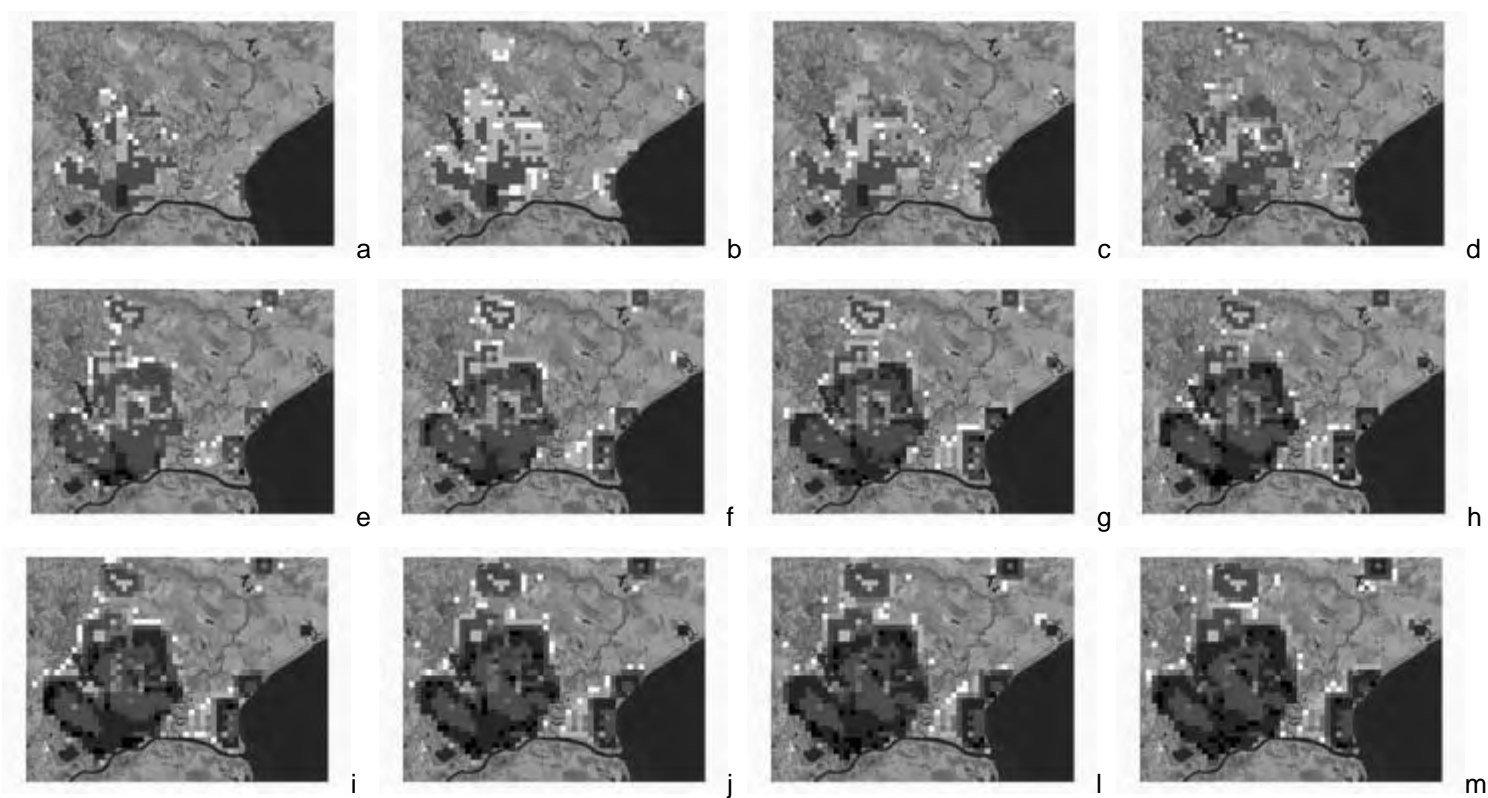


Figura 6.27: hipótese de crescimento superior; LoadU, até iteração 45.

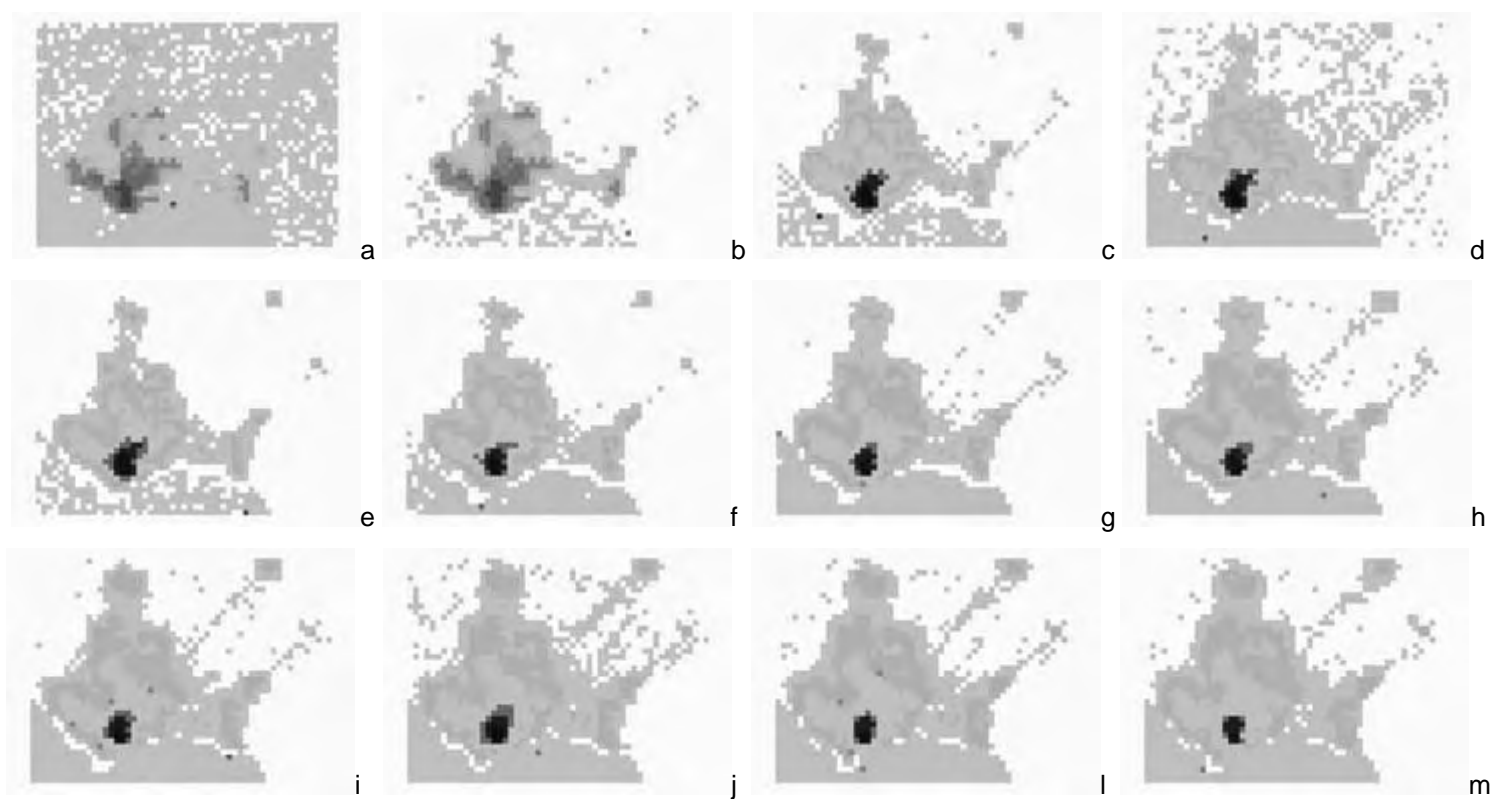


Figura 6.28: hipótese de crescimento superior; CentR1, até iteração 45.

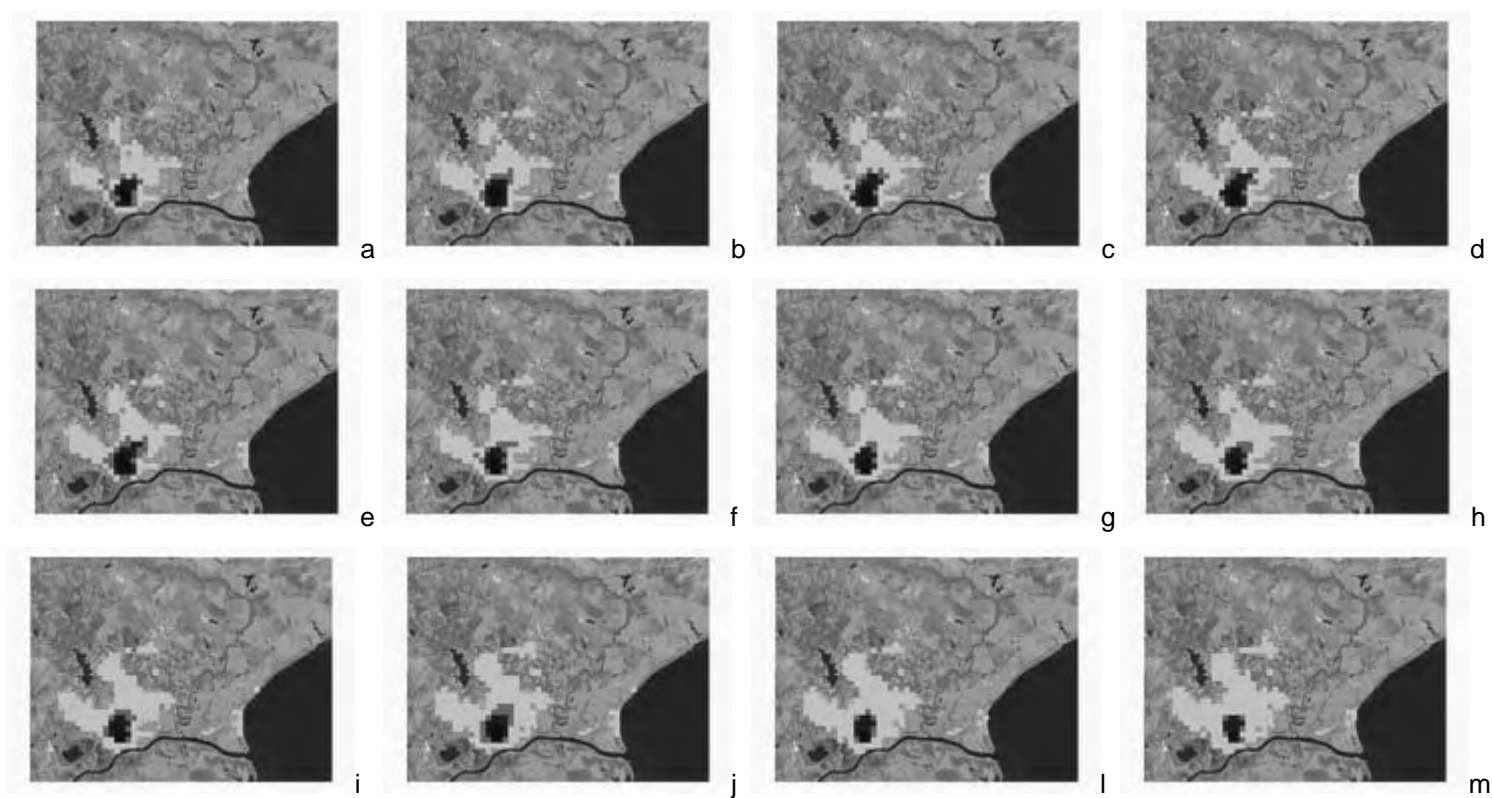


Figura 6.29: hipótese de crescimento superior; CentR2, até iteração 45.

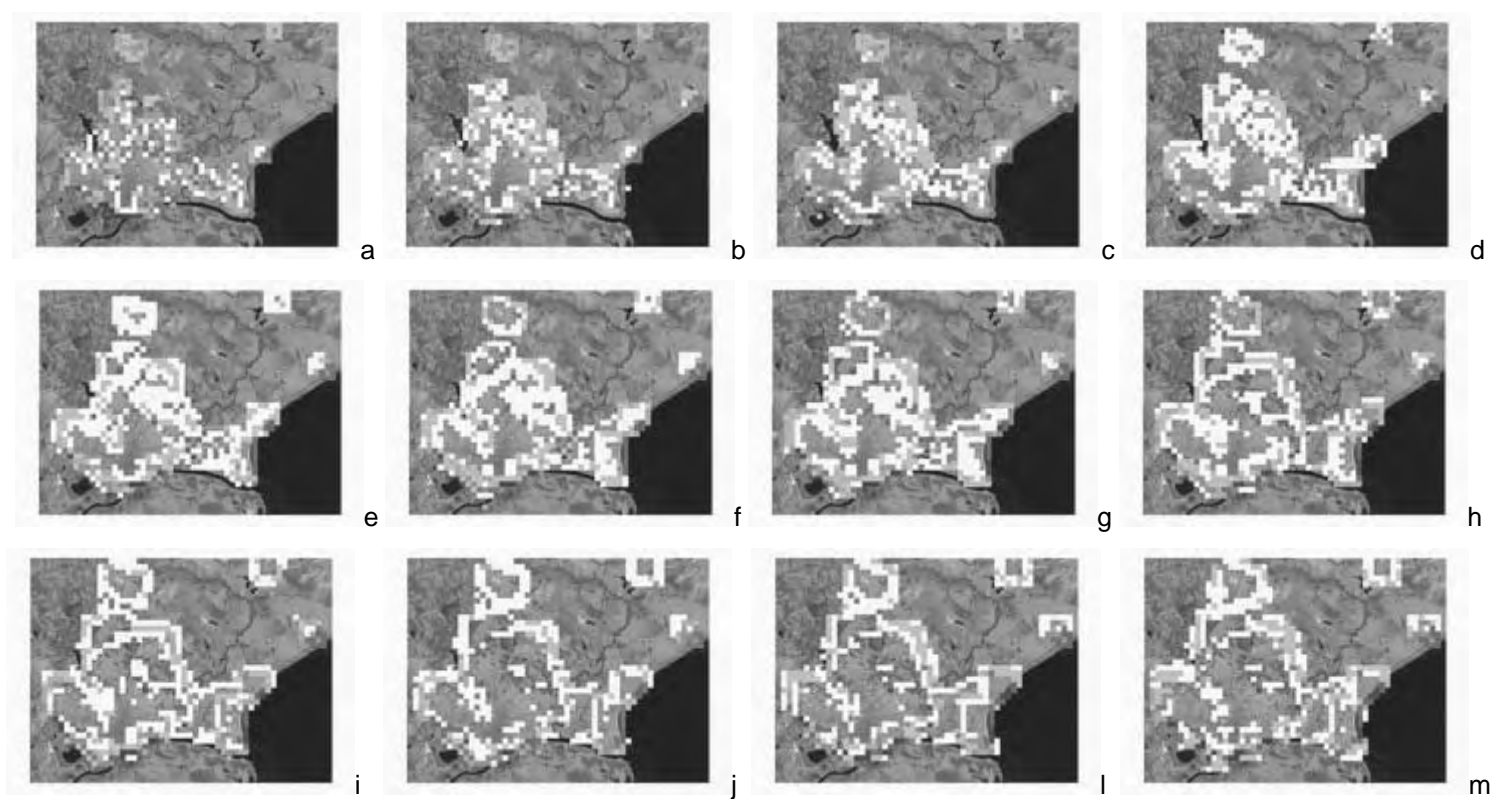


Figura 6.30: hipótese de crescimento superior; Potential, até iteração 45.

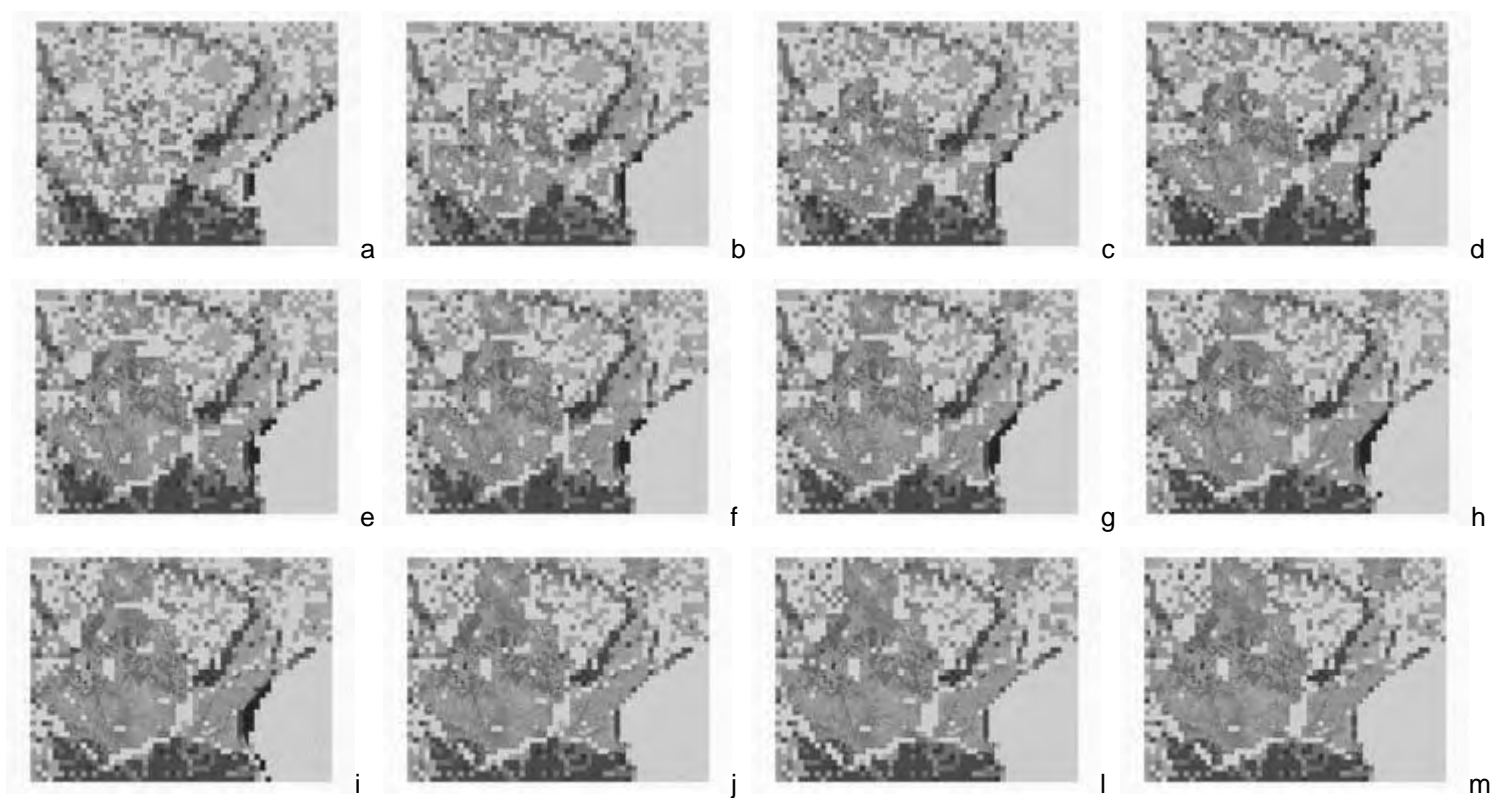


Figura 6.31: hipótese de crescimento superior; ResistE, até iteração 45.

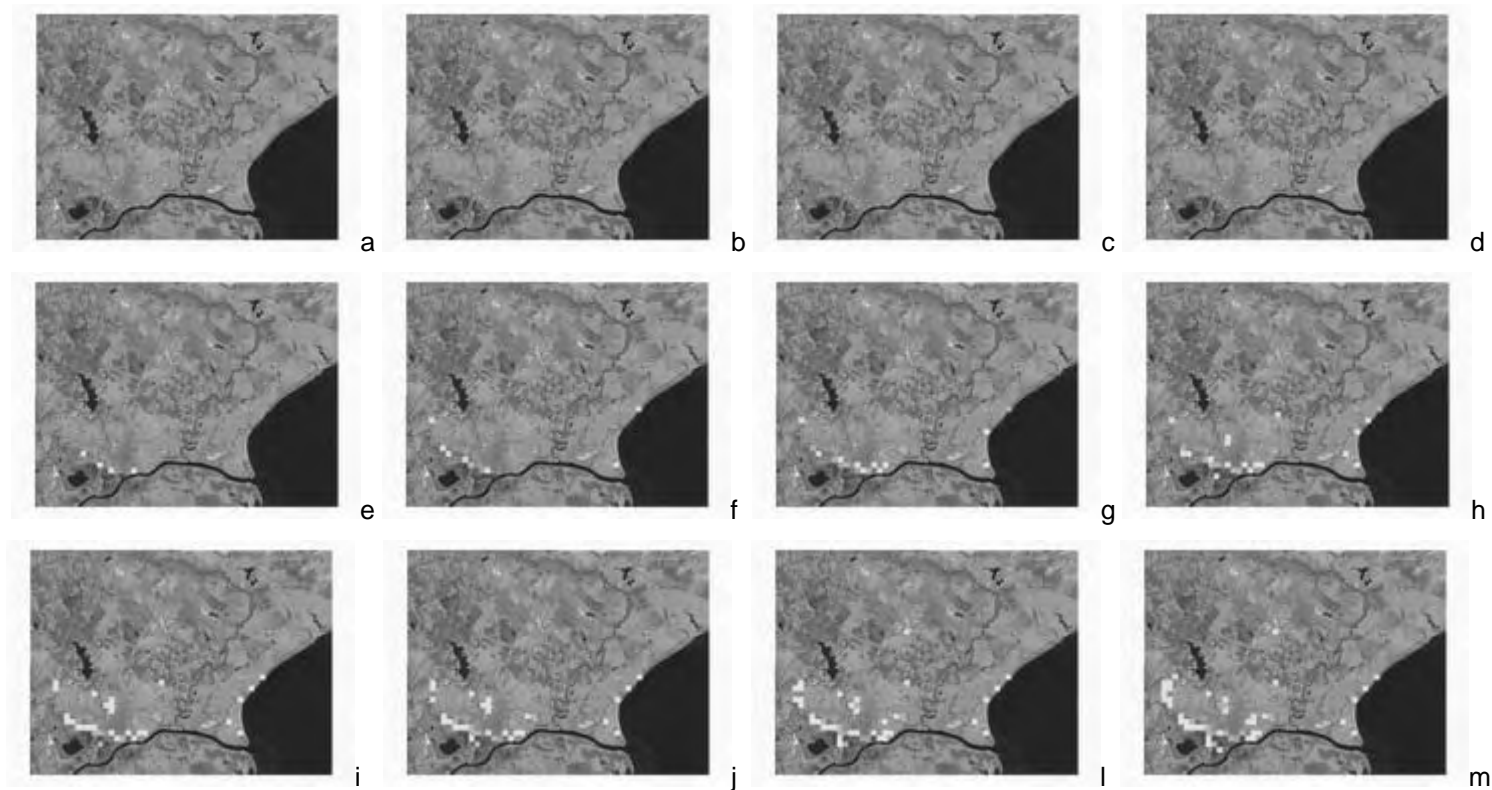


Figura 6.32: hipótese de crescimento superior; EProbT, até iteração 45.

A hipótese de crescimento superior mostra uma rápida expansão das áreas urbanas preexistentes, diminuindo drasticamente os vazios urbanos em seu interior, dos quais restam poucos fragmentos ao final da simulação. Os núcleos remotos também se desenvolvem e aumentam de tamanho, unificando os bairros na margem direita do arroio Pelotas, o que é mais visível a partir da metade da simulação (figura 6.26). Os núcleos à esquerda do Arroio Pelotas permanecem desconectados, salvo para o caso do Laranjal e do Barro Duro, que aparecem urbanizados de modo contínuo. Um núcleo novo aparece e prospera (em função do crescimento difuso e das baixas resistências locais, respectivamente), a nordeste na área de estudo (na chamada região do Cotovelo, em função da inflexão do arroio Pelotas); a ocorrência desse núcleo remoto não indica precisão de localização, mas simplesmente sugere que a unificação dos núcleos antes separados é acompanhada da formação de novos núcleos e da ocorrência de novas separações, num processo de compactação e fragmentação concomitantes. É notável como a região de várzea junto ao canal São Gonçalo, particularmente no encontro com a laguna, é totalmente convertida para funções urbanas, incluindo o sítio das dunas e as manchas de matas nativas, atributos que foram classificados como removíveis na simulação (*removable*, no modelo); a região do arroio Pelotas que separa o bairro Laranjal do núcleo principal da cidade está classificada como não urbanizável, tendo sua conversão impedida exogenamente (as células são *freezing*, no modelo).

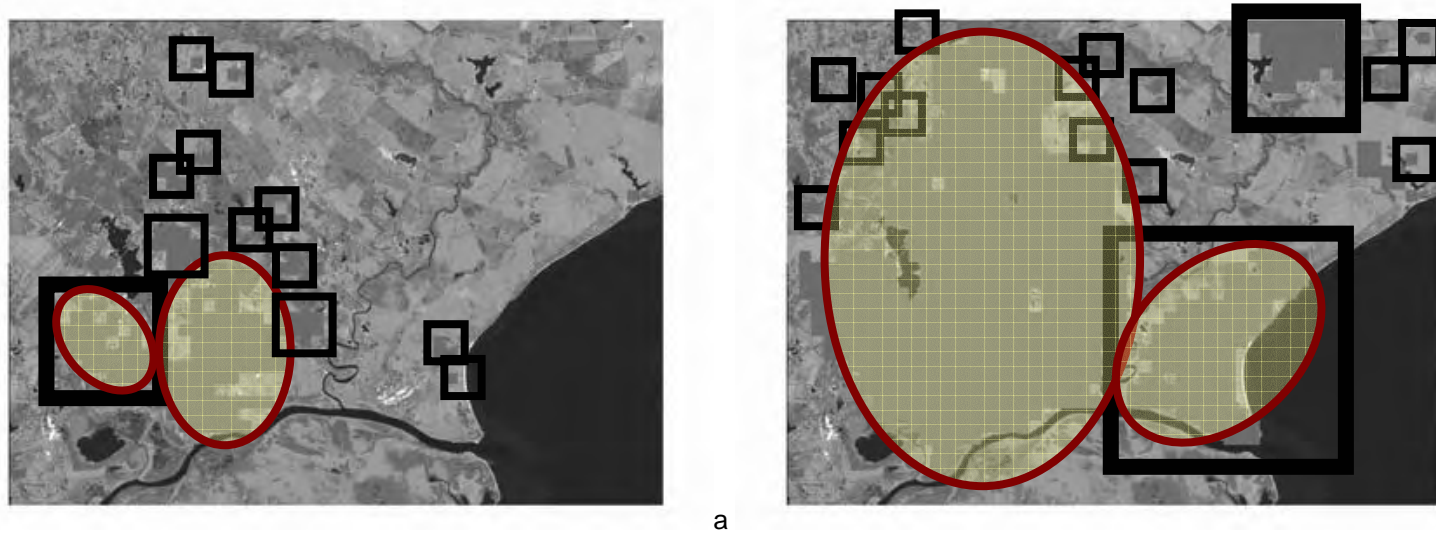


Figura 6.33: hipótese de crescimento superior, sobre output de CellType, mostrando processos de compactação (elipses) e fragmentação (quadrados); a) na iteração 1; b) na iteração 45.

O resultado da dinâmica de conversão de território, mostrado na figura 6.26 e com os estados inicial e final da simulação que estão na figura 6.33, aponta para um continuado mecanismo de fragmentação acompanhado de outro de compactação de parcelas antes fragmentadas, sugerindo um mecanismo de crescimento composto pela combinação desses dois processos. Evidências podem ser visualizadas ao final da simulação, com fragmentos urbanos em duas escalas: a) a nordeste e a noroeste do núcleo principal, como um *spray* de células com fenótipo urbano; b) à nordeste na área de estudo, em núcleo maior na região do Cotovelo, como foi comentado anteriormente. A interrupção desse mecanismo pode ser causada pelo encontro de células urbanas com células de urbanização impedida (*freezing*, no modelo), o que implica em acúmulo de potencial de crescimento e na emergência de problemas ambientais intra-urbanos nessas áreas, como está adiante.

A intensidade de ocupação do território (*LoadU*, no modelo) rapidamente alcança os patamares da hipótese intermediária, mostrando uma linha de urbanização de intensidade média-alta nas proximidades dos limites externos da área coberta por urbanização preexistente; esse padrão, que perdura durante toda a simulação, é evidente diferenciador das hipóteses anteriores, podendo ser creditado à maior velocidade de crescimento. Ao mesmo tempo em que essa concentração de intensidade de urbanização ocorre, pontos de carregamento urbano máximo flutuam sobre a área previamente ocupada, como grandes e efêmeros pólos de atração que interagem e articulam o processo de urbanização. Com o avançar das iterações, o centro tradicional perde a hegemonia e deixa de apresentar os valores máximos de urbanização, os quais passam a ser compartilhados com os máximos dos bairros adjacentes. As áreas de fraca urbanização ocorrem destacadamente a norte do núcleo principal e a oeste do bairro Laranjal, como uma borda estreita que margeia as frentes de expansão urbana (figura 6.34).





Figura 6.34: hipótese de crescimento superior, sobre output de LoadU, na iteração 45, mostrando a distribuição dos carregamentos; a) linhas com carregamentos elevado, nas regiões de solo convertido para urbano no processo de crescimento; b) pontos de carregamento máximo que flutuam pelo sistema; c) ocorrência de carregamentos mínimos.

Contrariando a tendência centrífuga que os carregamentos urbanos mostram na hipótese de crescimento superior, a centralidade aparece reforçando e convergindo para a zona central preexistente, que se destaca como máximo durante toda a simulação (figuras 6.28 e 6.29). Esse resultado indica uma submissão das mudanças encarregadas do crescimento à estrutura preexistente, pois embora o centro não mantenha hegemonia nos esforços de urbanização, mantém sempre o maior padrão de centralidade celular, a qual está associada à maior concentração de facilidades urbanas. Além disso, mantendo o mesmo número de classes e os mesmos critérios de classificação (9 classes, por intervalos de mesmo valor), a tendência foi de diminuição do número de células com valores máximos, o que indica um processo de concentração (figura 6.35).

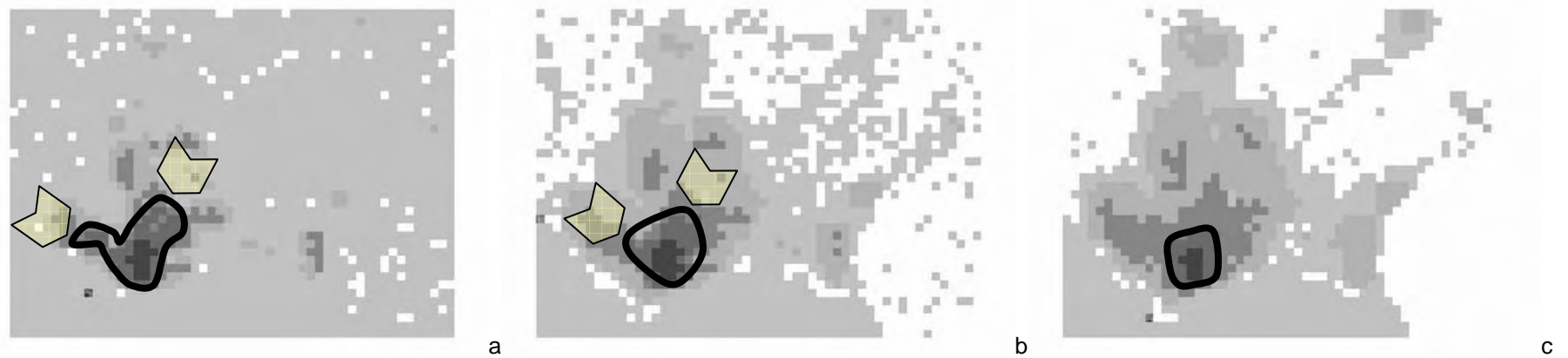


Figura 6.35: hipótese superior, sobre output de CentR1, mostrando a concentração de centralidade; a) na iteração 1 (início); b) na iteração 22 (meio); c) na iteração 45 (fim).

A distribuição dos potenciais de crescimento celular (*Potential*, no modelo) na hipótese de crescimento superior difere dos resultados das hipóteses anteriores pela intensidade e, especialmente, pela forma de faixas mais largas, as quais contêm linhas de valor máximo em seu interior (figuras 6.30 e 6.36). Esse modo de distribuição faz alcançar maiores valores de potencial nos trechos urbanizados em iterações anteriores, bem como no entorno de áreas remotas (como no caso da Vila Princesa, ao norte da área de estudo e o bairro Laranjal, à leste). Os valores máximos continuam a ocorrer na interface com as áreas não urbanizáveis, enquanto que os mínimos ocorrem nos pontos de contato das células urbanas convertidas por simulação com as células urbanas preexistentes. É notável como o avançar das iterações tende a aumentar a linearidade dos máximos de potencial, sugerindo um processo cíclico de distensão-compressão.



Figura 6.36: hipótese de crescimento superior, sobre output de *Potential*, mostrando as faixas largas de incidência; a) na iteração 1 (início); b) na iteração 22 (meio); c) na iteração 45 (fim).

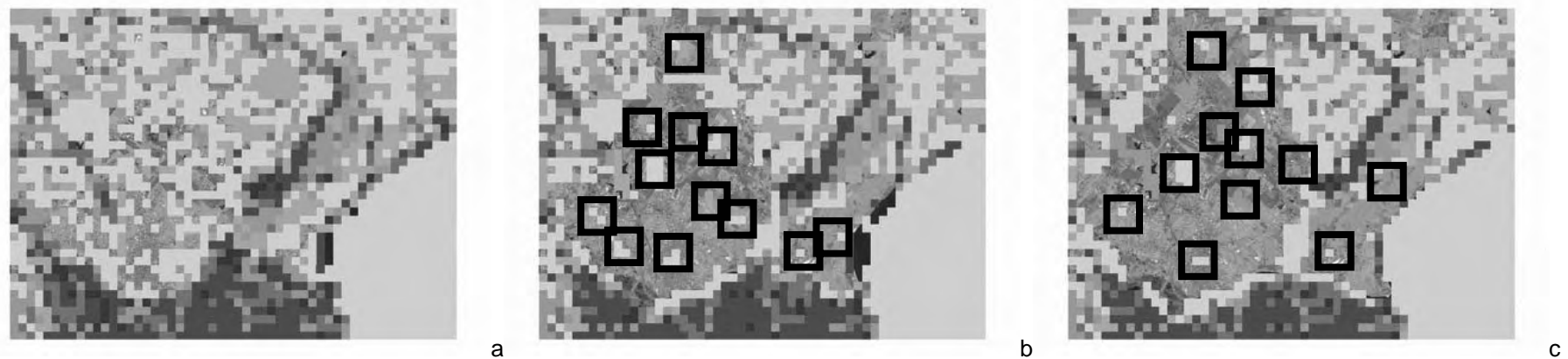


Figura 6.37: hipótese de crescimento superior, sobre output de *ResistE*, mostrando a distribuição de resistências naturais; a) na iteração 1 (início); b) na iteração 22 (meio); c) na iteração 45 (fim).

As resistências naturais são rapidamente consumidas pelo processo de urbanização (figura 6.31), porém restando fragmentos dispersos pelas áreas onde células foram convertidas para o fenótipo urbano (figura 6.37); como isso não ocorre nas hipóteses

de crescimento urbano inferior e intermediário, pode ser admitido que o crescimento rápido, embora consuma maior quantidade de solo e de recursos naturais, é mais permissivo à presença de atributos representantes do ambiente natural, os quais tendem a ocorrer de modo fragmentado. Com o crescimento rápido, até as células que contêm atributos do subsistema de águas tiveram suas resistências diminuídas, as quais só não se urbanizaram por estarem impedidas exogenamente (são células *freezing*, no modelo); isso indica que o crescimento acelerado implica em bordas com contraste elevado entre cidade e natureza, com maior probabilidade de impactos também elevados; é notável a eliminação dos subsistemas de banhados e dunas na região do bairro Laranjal, como aparece nas figuras 6.31 e 6.37, anteriormente. Ao final da simulação, os subsistemas vinculados aos atributos naturais estão diminuídos e fragmentados, em oposição ao subsistema urbano, que cresceu e se compactou.

Diferentemente dos experimentos anteriores, a hipótese de crescimento superior provocou a superação de limiares e o consequente aparecimento de problemas ambientais intra-urbanos. Até o primeiro terço da simulação esses problemas não ocorrem, sendo que daí para frente estão plotados do seguinte modo (figura 6.32): a) numa linha sul, na interface com o canal São Gonçalo, onde se concentram os valores máximos; b) na interface com a Laguna dos Patos; c) em pontos isolados na cidade preexistente. Sendo assim, pode ser admitido o crescimento rápido induz o aparecimento de problemas ambientais intra-urbanos, os quais ocorrem com maior probabilidade no encontro da urbanização com os subsistemas de águas.

Em resumo, do experimento com a hipótese de crescimento superior, estão destacadas as seguintes observações:

- a) a conversão de células não urbanizadas em urbanizadas mostra, no caso de um crescimento rápido, tendência à consolidação e compactação dos núcleos preexistentes, diminuindo fragmentos de vazios internos e mantendo os grandes vazios que separam núcleos urbanos remotos; isso sugere que à intensificação do crescimento corresponde um acirramento da estrutura urbana preexistente, com manchas urbanas bem definidas internamente e claramente separadas externamente;
- b) ao mesmo tempo em que crescem, se consolidam e se compactam os núcleos preexistentes, novos fragmentos são plotados no entorno não urbanizado, como um spray proveniente desses núcleos; esse resultado aponta para um processo cíclico, com compactação e fragmentação ocorrendo não só em tempos diferentes, mas sincronicamente em espaços diferentes;
- c) células com maior intensidade de urbanização se deslocam do centro para a borda da cidade preexistente, constituindo uma espécie de frente de crescimento; pontos de carregamento máximo flutuam pelo sistema, caracterizando grandes e efêmeros pólos de atração; esse resultado indica que o aumento na velocidade de crescimento estimula a atividade edilícia e a urbanização em geral fora do centro tradicional, ficando seu incremento influenciado por forças centrífugas;
- d) embora essa tendência de expansão do solo urbano e de deslocamento dos carregamentos para as bordas, o centro tradicional mantém os valores máximos de centralidade, inclusive com retração de superfície; isso sugere que ao processo de expansão externa corresponde outro de concentração interna, com o crescimento urbano submetido às condições estruturais da cidade preexistente; nesse caso, pode ser admitido que às forças centrífugas de aumento de carregamento urbano correspondem forças centrípetas de aumento de centralidade;

- e) os potenciais de crescimento aparecem menos em formato de linha do que nos experimentos anteriores, aparecendo com valores maiores numa faixa larga que inclui trechos da cidade preexistente e das áreas não urbanizadas; todavia, mantêm o padrão linear de máximos na interface com ambiente natural e de mínimos com a cidade preexistente, sugerindo que, na borda da cidade, o ambiente natural tem maior capacidade de atrair potenciais do que o ambiente urbano preexistente;
- f) as resistências naturais diminuem rapidamente, restando apenas o subsistema de águas superficiais, que não se urbaniza por estar impedido exogenamente; apesar disso, fragmentos do sistema natural restam em maior quantidade do que nas hipóteses de crescimento inferior e intermediária; noutras palavras o crescimento rápido, ao mesmo tempo em que consome mais superfície, suprimindo com isso a paisagem natural do entorno da cidade e provocando maiores contrastes, apresenta maior probabilidade de manter testemunhos naturais no tecido urbano, embora que de modo fragmentado;
- g) os problemas ambientais intra-urbanos aparecem concentrados na interface na cidade com as áreas impedidas de se urbanizarem, onde o potencial tende a ser máximo e limiares de urbanização são superados; esse resultado indica uma maior probabilidade de ocorrência de problemas ambientais intra-urbanos quando há mudança de intensidade na ocupação do solo, particularmente quando provocada exogenamente.

Mas o que poderia acontecer se novos e grandes pólos de atração urbanos fossem implantados na cidade ? Para auxiliar nas respostas a essa questão está o próximo subtítulo, tendo como ponto de partida a regulação do modelo utilizada na simulação referida como hipótese intermediária.

### **6.3 Crescimento urbano na presença de grandes pólos de atração**

Crescimento urbano influenciado por grandes pólos de atração tem sido destacado tema em trabalhos de investigação e em práticas de planejamento urbano (Santoro e Nunes, 2003), cuja importância vem crescendo no caso brasileiro, como revela a legislação que trata dos EIA / RIMA – Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente e mais recentemente dos RIV – Relatórios de Impacto de Vizinhança, o que tem implicado em regulamentação urbanística dedicada, como é o caso das cidades de Campo Grande – MS, de Natal – RN e de São Paulo – SP (Moreira, 2003; Cymbalista, 2003). O modelo SACI, permite incluir livremente usos diferenciados do solo (quer em localização, quer em dimensões ocupadas) e lhes atribuir quaisquer graus de atratividade (quer em intensidade por superfície, quer em importância da atividade), podendo o usuário do modelo especular sobre os efeitos futuros que o pólo de atração poderá trazer na estrutura morfológica da cidade. Nessa direção, tendo como ponto de partida os dados e a regulação do modelo utilizada na simulação referida como hipótese intermediária, estão realizadas simulações com três casos, num *grid* de 40 por 54, com 2160 células, conforme o seguinte:

- a) simulação com um grande pólo de atração urbano, com a presença de um novo distrito industrial, concentrado fora dos limites da área coberta pela urbanização atual (figura 6.38a);
- b) simulação com um grande pólo de atração natural, com a imputação de capacidade de atração diferenciada e equivalente ao centro tradicional para as praias junto à Laguna dos Patos, em toda a extensão da área de estudo, o que equivale a uma circunstância sazonal, posto que em função das características climáticas essa atração diferenciada só se realiza na estação de verão (figura 6.38b);
- c) simulação com pólos de atração urbanos e naturais atuando conjuntamente, considerando os pólos de atração da zona do *Foro*, da estrada do Laranjal e da praia do Laranjal, com duas hipóteses: c.1) incluindo as praias como grande pólo de atração, simulando uma situação de solstício de verão; c.5) incluindo as praias como um atributo natural sem atração de urbanização, simulando uma situação de equinócio (figura 6.38c).

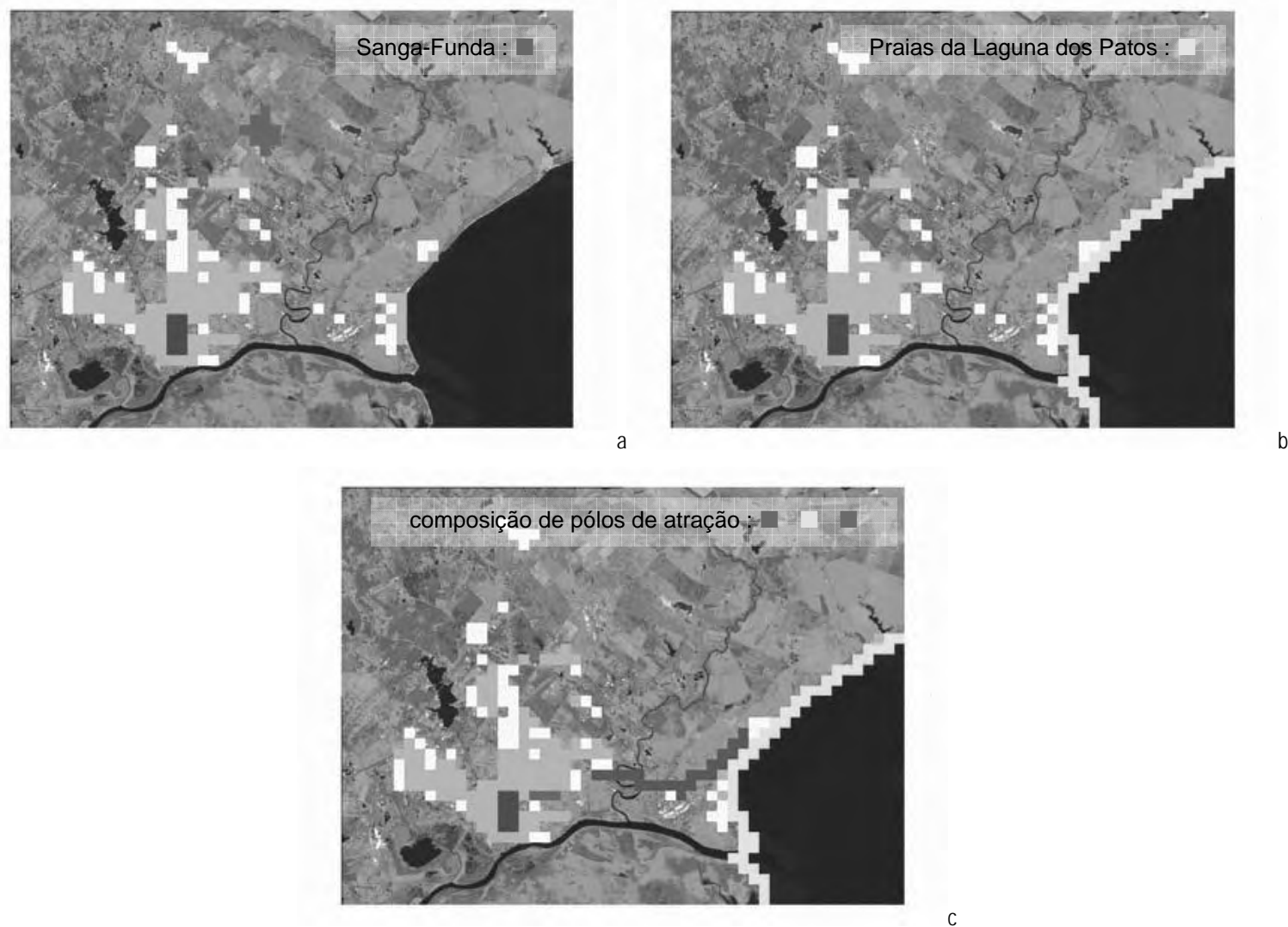


Figura 6.38: grandes pólos de atração urbanos e demais carregamentos utilizados na simulação; a) distrito industrial na Sanga-Funda (em magenta); b) praias da Laguna dos Patos (em amarelo); c) composição de grandes pólos de atração (zona do Foro em magenta; estrada do Laranjal em cinza; praias em amarelo).

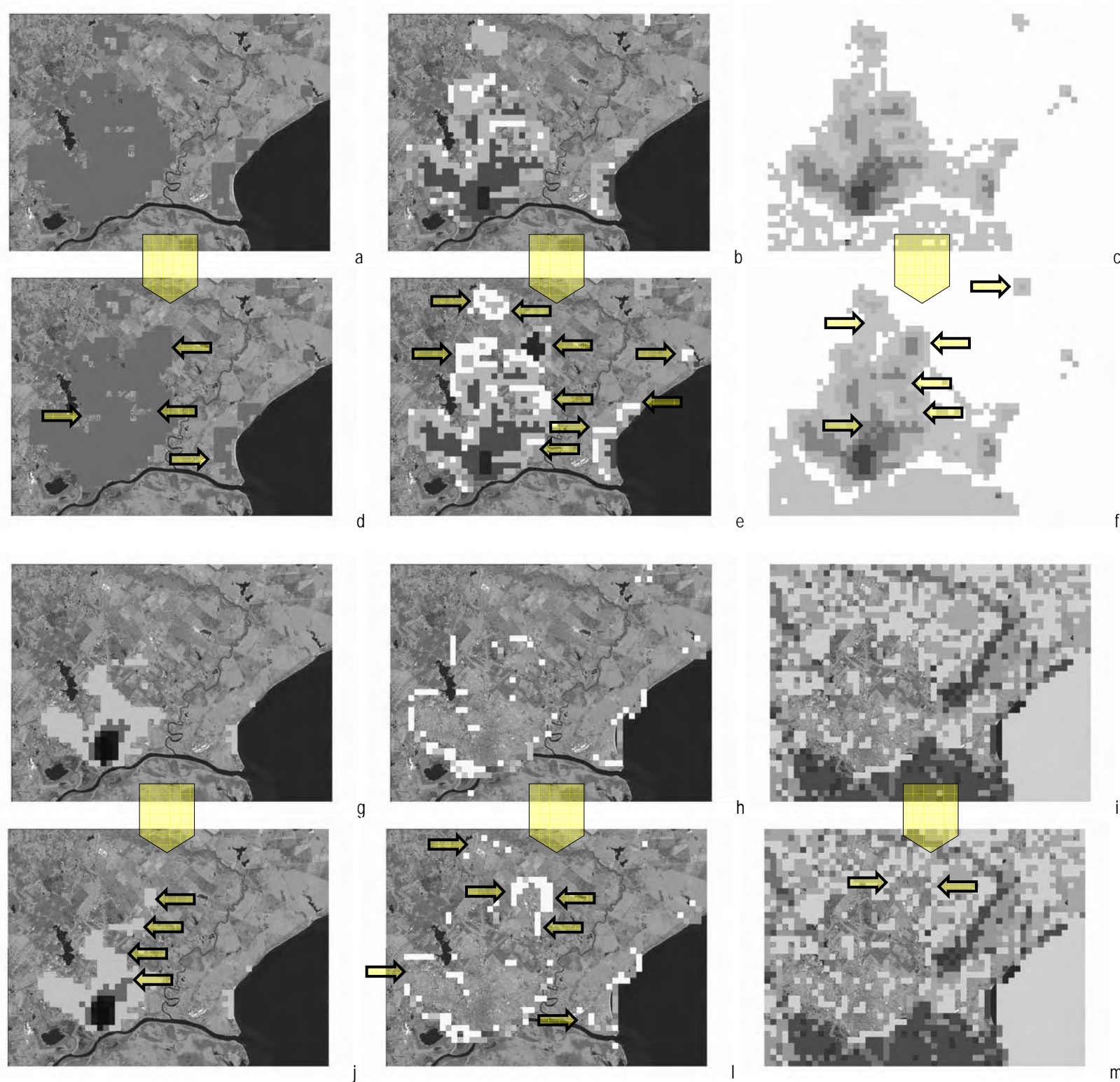


Figura 6.39: simulação de crescimento e grande pólo de atração urbano (distrito industrial na Sanga-Funda), na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem o grande pólo de atração; b) sobre output de LoadU, sem o grande pólo de atração; c) sobre output de CentR1, sem o grande pólo de atração; d) sobre output de CellType, com o grande pólo de atração; e) sobre output de LoadU, com o grande pólo de atração; f) sobre output de CentR1, com o grande pólo de atração; g) sobre output de CentR2, sem o grande pólo de atração; h) sobre output de Potential, sem o grande pólo de atração; i) sobre output de ResistE, sem o grande pólo de atração; j) sobre output de CentR2, com o grande pólo de atração; l) sobre output de Potential com o grande pólo de atração; m) sobre output de ResistE, com o grande pólo de atração.

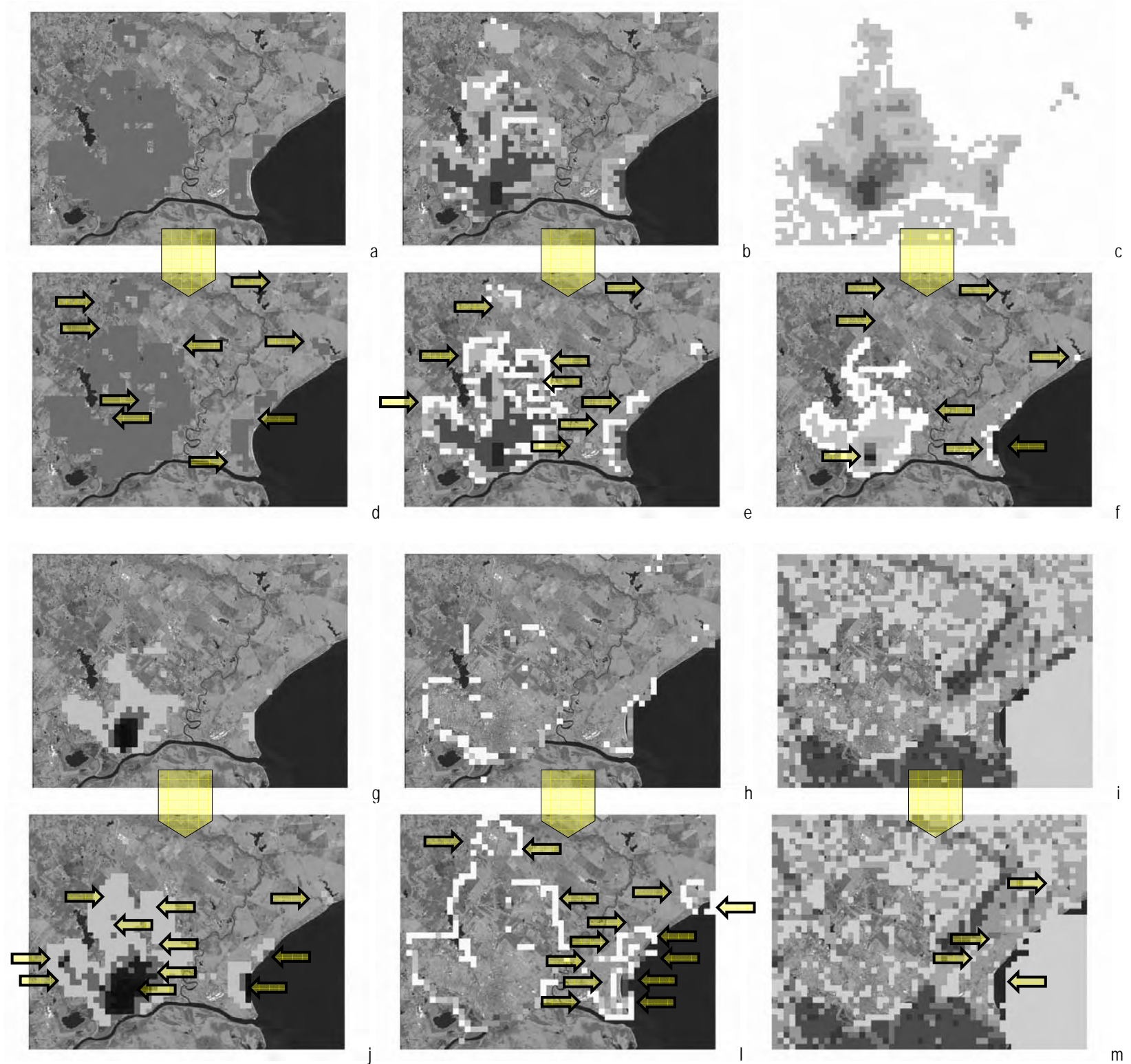


Figura 6.40: simulação de crescimento e grande pólo de atração natural (praias da Laguna dos Patos), na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem o grande pólo de atração; b) sobre output de LoadU, sem o grande pólo de atração; c) sobre output de CentR1, sem o grande pólo de atração; d) sobre output de CellType, com o grande pólo de atração; e) sobre output de LoadU, com o grande pólo de atração; f) sobre output de CentR1, com o grande pólo de atração; g) sobre output de CentR2, sem o grande pólo de atração; h) sobre output de Potential, sem o grande pólo de atração; i) sobre output de ResistE, sem o grande pólo de atração; j) sobre output de CentR2, com o grande pólo de atração; l) sobre output de Potential com o grande pólo de atração; m) sobre output de ResistE, com o grande pólo de atração.

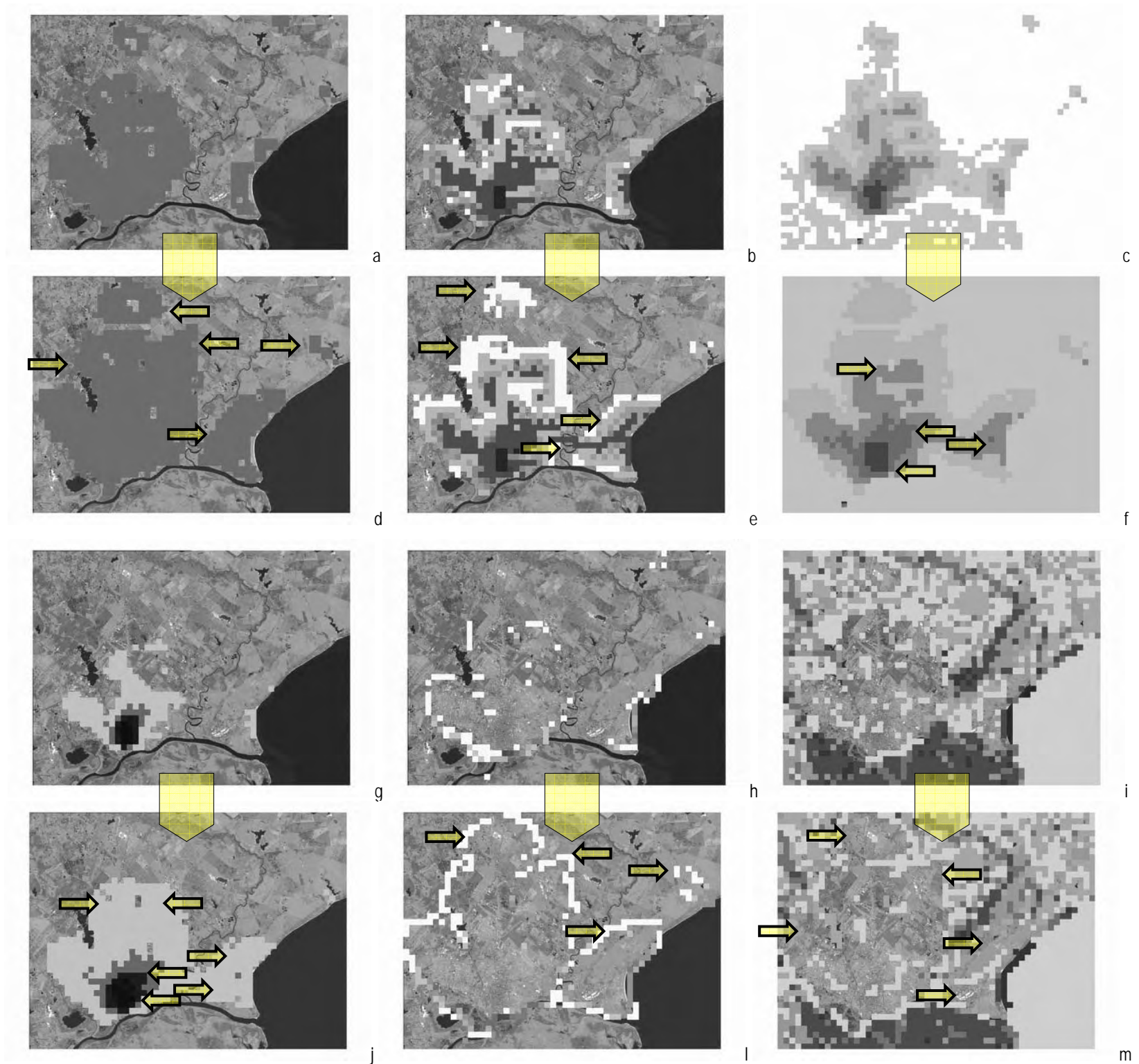


Figura 6.41: simulação de crescimento e composição de grandes pólos de atração, hipótese de equinócio, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem os grandes pólos de atração; b) sobre output de LoadU, sem os grandes pólos de atração; c) sobre output de CentR1, sem os grandes pólos de atração; d) sobre output de CellType, com os grandes pólos de atração; e) sobre output de LoadU, com os grandes pólos de atração; f) sobre output de CentR1, com os grandes pólos de atração; g) sobre output de CentR2, sem os grandes pólos de atração; h) sobre output de Potential, sem os grandes pólos de atração; i) sobre output de ResistE, sem os grandes pólos de atração; j) sobre output de CentR2, com os grandes pólos de atração; l) sobre output de Potential com os grandes pólos de atração; m) sobre output de ResistE, com os grandes pólos de atração.



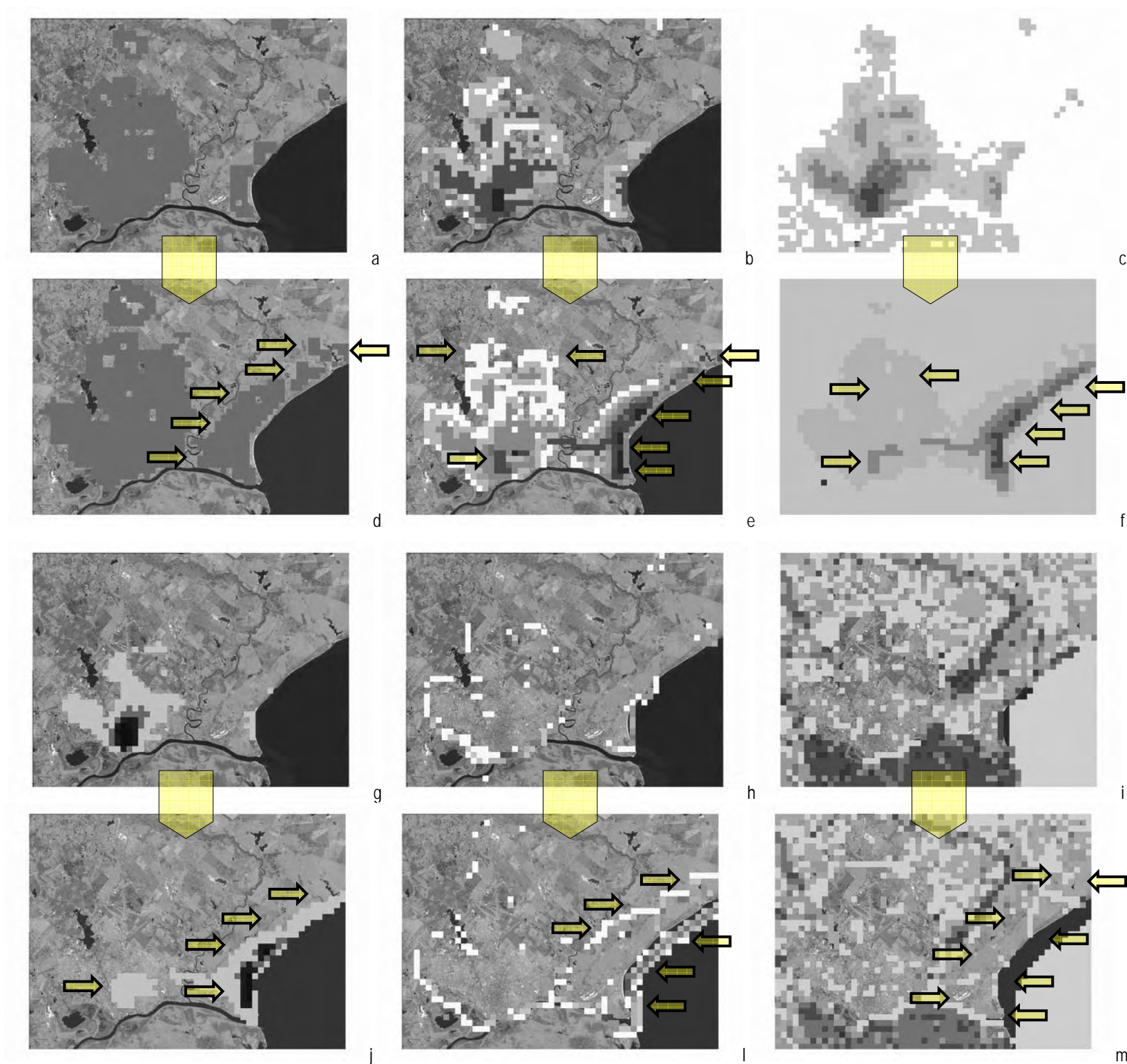


Figura 6.42: simulação de crescimento e composição de grandes pólos de atração, hipótese de solstício de verão, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem os grandes pólos de atração; b) sobre output de LoadU, sem os grandes pólos de atração; c) sobre output de CentR1, sem os grandes pólos de atração; d) sobre output de CellType, com os grandes pólos de atração; e) sobre output de LoadU, com os grandes pólos de atração; f) sobre output de CentR1, com os grandes pólos de atração; g) sobre output de CentR2, sem os grandes pólos de atração; h) sobre output de Potential, sem os grandes pólos de atração; i) sobre output de ResistE, sem os grandes pólos de atração; j) sobre output de CentR2, com os grandes pólos de atração; l) sobre output de Potential com os grandes pólos de atração; m) sobre output de ResistE, com os grandes pólos de atração.

A simulação com um grande pólo de atração urbano, representada pelo distrito industrial da Sanga-Funda, foi realizada introduzindo um novo trecho urbanizado localizado na região conhecida como Sanga-Funda, com intensidade igual à máxima utilizada na hipótese de crescimento intermediário (figura 6.38, anteriormente). O principal efeito da simulação é o aumento da intensidade de urbanização (*LoadU*, no modelo) no local do pólo de atração e entorno imediato, com diminuição sincrônica dessa grandeza nas bordas das áreas periféricas da cidade (figuras 6.39b e 6.39e), o que indica que o grande pólo de atração remoto pode ser capaz de trazer investimentos para sua área contígua, porém traz também rarefação noutros locais; no caso desta simulação, pode então ser identificada uma associação entre formação de novos e distantes núcleos de desenvolvimento e formação de periferias urbanas com baixos níveis de urbanização.

Outros efeitos da simulação do grande pólo de atração na região da Sanga-Funda foram também observados, a saber:

- a) com relação à conversão de células não urbanizadas em urbanizadas (*CellType*, no modelo), a simulação mostra dois efeitos combinados, que mantêm estável a quantidade de conversão ao longo da simulação: a.1) intensificação da conversão no grande pólo de atração e entorno próximo, criando um vetor de expansão urbana naquela direção; a.2) menor conversão nas proximidades dos vazios urbanos e bairros mais distantes (figuras 6.39a e 6.39d); deste modo, pode ser identificada uma associação entre atração do crescimento urbano para um pólo remoto e formação de vazios urbanos;
- b) com relação à distribuição de centralidades (*CenR1* e *CentR2*, no modelo), aparecem dois destaques: b.1) aparecimento de um foco de centralidade média-baixa junto ao grande pólo de atração; b.2) aumento dos valores de centralidade no sentido centro-grande pólo de atração (figuras 6.39c e 6.39f; 6.39g e 6.39j) ; esse resultado indica a possibilidade de influência do pólo de atração na estrutura urbana, embora isso ocorra fracamente em função da localização (que não produz oposição à estrutura atual) e da distância (que pode ser considerada grande, na escala do caso); resultados de maior impacto podem ser esperados se for usado um coeficiente de distância menor ( $K$  ( $k_a$ ), no modelo, o qual emula a eficácia do sistema de circulação urbana; nesta simulação foi utilizado o valor padrão igual a 2);
- c) com relação ao potencial de crescimento (*Potential*, no modelo), a simulação mostra o aumento dessa grandeza na área diametralmente oposta em relação à cidade preexistente (figuras 6.39h e 6.39l); esse resultado indica uma tendência de urbanização “dos fundos para frente” em parcelas remotas que se tornam urbanas, acompanhada de rarefação do interstício com parcelas preexistentes;
- d) o grande pólo de atração implantado provocou intensa alteração dos atributos naturais no seu local de implantação e entorno imediato, com sua eliminação ao final da simulação (figuras 6.39i e 6.39m); esse fato sugere que a ambiente natural, em locais de crescimento urbano provocado por grandes pólos de atração remotos, tende a ser intensamente transformado, sendo sua localização decisiva na constituição da paisagem local.

A simulação com um grande pólo de atração natural pretende verificar a influência de um lugar não urbano na paisagem capaz de atrair urbanização, embora o atributo possa operar ao mesmo tempo como uma resistência local ao crescimento, como é caso das praias da Laguna dos Patos (figura 6.40, anteriormente). Nessa simulação, o principal efeito é a bicentralidade, que faz com que os valores máximos de centralidade sejam compartilhados pelo centro tradicional e pelas praias dos balneários Santo Antônio e Valverde (figuras 6.40c e 6.40f). Esse resultado, que pode se aproximar das características sazonais de atratividade dos balneários (no caso de Pelotas, as praias somente são intensamente procuradas na estação de verão, de dezembro a março), mostra três efeitos integrados: a) aparecimento de uma área de centralidade máxima junto ao grande pólo de atração natural simulado; b) diminuição relativa da área de centralidade máxima no centro tradicional, em relação à simulação sem o pólo de atração natural; c) diminuição dos valores de centralidade nas bordas da cidade, o que ocorre também no bairro Laranjal. Sendo assim, pode ser admitido que à multiplicação de focos de centralidade máxima corresponde a diminuição de centralidade noutras localizações, sendo o fator de atração de facilidades urbanas para um lugar também responsável pelo sua rarefação noutras lugares.

Outros efeitos trazidos pela introdução do grande pólo de atração natural foram também observados, a saber:

- a) com relação à conversão de células não urbanizadas em urbanizadas (*CellType*, no modelo), não foi observado aumento significativo de células urbanas, ao comparar com o experimento sem o pólo de atração natural (figuras 6.40a e 6.40d), o que se deve à compensação entre os lugares que cresceram mais e que crescerem menos;
- b) com relação à concentração de carregamentos urbanos (*LoadU*, no modelo), as principais mudanças ocorrem nas bordas da cidade, que passam a manter menores valores, diminuindo a tendência de urbanização “dos fundos para frente”, que caracteriza a hipótese de crescimento intermediário (figuras 6.40e e 6.40e);
- c) com relação ao potencial de crescimento urbano (*Potential*, no modelo), o principal efeito é a concentração de potencial no bairro Laranjal, o qual só não se realiza plenamente pela concentração de resistências que ocorre no bairro (figuras 6.40h e 6.40l);
- d) com relação às resistências naturais (*ResistE*, no modelo), pode ser verificada uma evidente diminuição dos valores nas proximidades das praias e entorno, onde incide o potencial de crescimento (figuras 6.47i e 6.47m); a continuar nesse ritmo, pode ser esperado que a região mostre intensa conversão para funções urbanas, tornando escassos os representantes do ambiente natural.

É notável como o experimento com o pólo de atração natural provoca o aparecimento de um novo pólo de centralidade sem haver acréscimo de novas construções ou novos loteamentos, sem mudança no sistema viário e sem alteração de atividades. Esse resultado sugere duas observações: a) os atributos naturais podem exercer decisiva influência na estrutura urbana, acentuando processos ou criando novos, com efeitos que podem superar os alcançados por atributos urbanos; b) focos de centralidade não são sempre provocados por concentrações de estoques construídos, podendo ocorrer em áreas sem elevada intensidade de ocupação do solo.

Mas como responderia o modelo se uma composição de grandes pólos de atração atuasse em conjunto sobre a cidade, de modo semelhante ao que ocorre na realidade ? Para testar essa possibilidade com o SACI, de modo a aproximar os resultados do processo de crescimento real que vêm ocorrendo atualmente em Pelotas, RS, estão propostas duas hipóteses de crescimento: a) crescimento de equinócio, que inclui o carregamento em três intensidades de urbanização (como vem sendo utilizado em simulações anteriores) e os grandes pólos de atração da zona do Foro e da estrada do Laranjal; b) crescimento de solstício de verão que, além do que já consta no caso anterior, considera as praias junto à Laguna dos Patos como grandes pólos de atração e potencializa o Foro e a estrada do Laranjal, ambos no caminho para os balneários. Esse cenário está mostrado na figura 6.38c, enquanto que os resultados aparecem nas figuras 6.41 e 6.42, anteriormente.

O principal efeito da introdução de composição de grandes pólos de atração, em ambos os casos, é o aumento de crescimento global da cidade, o qual é estimulado pela presença desses pólos de atração (figuras 6.41a e 6.41d; 6.42a e 6.42d) e aparece de modo diferente nos dois casos simulados: a) no caso do equinócio a conversão de território não urbanizado em urbanizado está distribuída em todos os bairros, mantendo separados ao final da simulação o núcleo central, o da Vila Princesa (no extremo norte), o do Laranjal (no leste) e o da Colônia Z3 (no noroeste); é notável a tendência de unificação do bairro Laranjal com o núcleo central da cidade, o que é influenciado pelo trecho do sistema viário utilizado como pólo de atração; b) no caso do solstício de verão a conversão aparece concentrada junto à orla da Laguna dos Patos, fazendo com que o bairro Laranjal cresça mais que os demais núcleos urbanos da cidade, chegando a estabelecer continuidade até o extremo noroeste da área de estudo, ultrapassando a Colônia Z3. Esse resultado demonstra a elevada capacidade de atração que pode ser exercida pelo sistema viário e por atributos naturais, os quais podem ser determinantes dos vetores de crescimento urbano; além disso, destacam o efeito combinado de diversos pólos de atração, que neste caso reforçam o desenvolvimento de um bairro, em detrimento de outros.

Outros efeitos trazidos pela introdução de composição de grandes pólos de atração foram também observados, a saber:

- a) com relação à concentração de carregamentos urbanos (*LoadU*, no modelo), os resultados mostram concentração dos novos carregamentos nas proximidades dos pólos de atração, sendo que o sistema viário aparece como determinante nas duas simulações (figuras 6.41b e 6.41e; 6.42b e 6.42e); no caso do solstício de verão é evidente a concentração no bairro Laranjal, chegando a superar a posição relativa da área central da cidade;
- b) a distribuição de centralidades (*CentR1* e *CentR2*, no modelo), aparece com marcante diferença nos dois casos simulados (figuras 6.41c e 6.41f; 6.41g e 6.41j; 6.42c e 6.42f; 6.42g e 6.42j): b.1) no caso do equinócio permanece a estrutura tradicional da cidade, ocorrendo um aumento do número de células nas classes de maiores valores de centralidade, num efeito de espalhamento; b.2) no caso do solstício de verão ocorre uma mudança radical na distribuição de centralidades, passando os valores máximos a estarem concentrados na orla da Laguna dos Patos e passando o centro tradicional a assumir uma posição secundária na estrutura urbana;

c) os resultados alcançados no potencial de crescimento urbano (*Potential*, no modelo) e nas resistências naturais (*ResistE*, no modelo) confirmam os resultados dos demais *outputs*, sendo notável a acumulação de potenciais máximos para o interior da Laguna dos Patos (figuras 6.42h e 6.42l), ao final da simulação de solstício de verão, os quais não se realizam em função de as águas da laguna serem consideradas *freezing* na simulação.

Como está demonstrado anteriormente, grandes pólos de atração podem influenciar o crescimento urbano e o futuro da cidade. Mas o que acontece ao serem introduzidas diferenciações no território através de zoneamento, modificando as possibilidades de crescimento em função de decisões do planejamento urbano e ambiental? Para estudar essa possibilidade é que está o próximo subtítulo, utilizando recursos do SACI.

#### 6.4 Crescimento urbano e zoneamento

A cidade tem sido reconhecida como a maior e mais duradoura realização da cultura, não havendo indícios de sua substituição por outra forma de gregarismo humano no planeta (Argan, 1991). Em seu percurso histórico, certos artefatos passam a assumir decisiva importância, quem no campo da representação, da comunicação, da economia, da política ou das práticas sociais (Barrios, 1986). Esses artefatos, que podem-se constituir de bens materiais e imateriais, da natureza e do saber fazer (Lemos, 1981), quando localizados com algum nexo de proximidade espacial que os agregue e os diferencie do conjunto, podem ser reconhecidos através de zonas de preservação cultural. A proposta desta simulação é implantar uma zona com essas características, preservando-a através de regras urbanas que impeçam exogenamente o processo de substituição dos estoques edificados e dos demais atributos urbanos, porém sem interferir na suas relações com o resto da cidade. Essa possibilidade é oferecida pela inclusão de atributos do tipo *freezing* nas células da zona a preservar, como aparece na figura 6.43a, a seguir.

A conservação natural através de zoneamento está regulamentada, no caso brasileiro, pela Lei Federal 9.985/2000, que incide sobre o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal e institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências (Brasil, 2000), podendo a área delimitada nesta simulação ser classificada, pelas condições de uso e ocupação do solo, como uma Unidade de Proteção Integral (artigo 7, inciso I, da referida lei). Para efetivar esses efeitos na simulação, está delimitada uma área (incluindo subsistemas de águas superficiais, dunas, banhados, matas nativas e fauna associada, unificados mediante o uso de *buffers* de duas células e intersecção de temas resultantes), cujas células estão classificadas no modelo como portadoras de atributos *freezing*, o que impede sua urbanização pelo processo de crescimento urbano, como está na figura 6.43b. adiante.

O território onde se estabelece e cresce a cidade pode ser heterogêneo em função de seus atributos naturais, definindo diferentes capacidades de suporte para as funções urbanas e para as mudanças que a cidade acarreta. Zonas com menor capacidade de absorver impactos urbanos têm sido chamadas de zonas de fragilidade ambiental, para as quais se sugerem cuidados espe-

ciais no desenvolvimento e controle urbanos, na direção de minimizar danos ambientais e de oferecer condições para o desenvolvimento da cidade (Guapyassú e Hardt, 1998). Para simular esse caso, está assumida a zona demarcada na figura 6.43c, adiante, como de fragilidade ambiental, cuja menor capacidade de suporte é emulada pelo uso de limiares diferenciados, do seguinte modo: a) zona de fragilidade ambiental, com limiar igual a 50% das demais zonas; b) zona de transição, em verde claro, com limiar igual a 75% das demais zonas.

Para estudar a possibilidade de simulação de crescimento com a interferência de regras que diferenciem determinados trechos da cidade através do zoneamento, tal como foi apontado anteriormente, estão propostos três casos (figura 6.43): a) presença de zona de preservação cultural; b) delimitação de zonas de conservação natural; c) identificação de zonas de fragilidade ambiental. Os resultados das simulações aparecem nas figuras 6.44, 6.45 e 6.46, adiante, com as interpretações que vêm na seqüência.

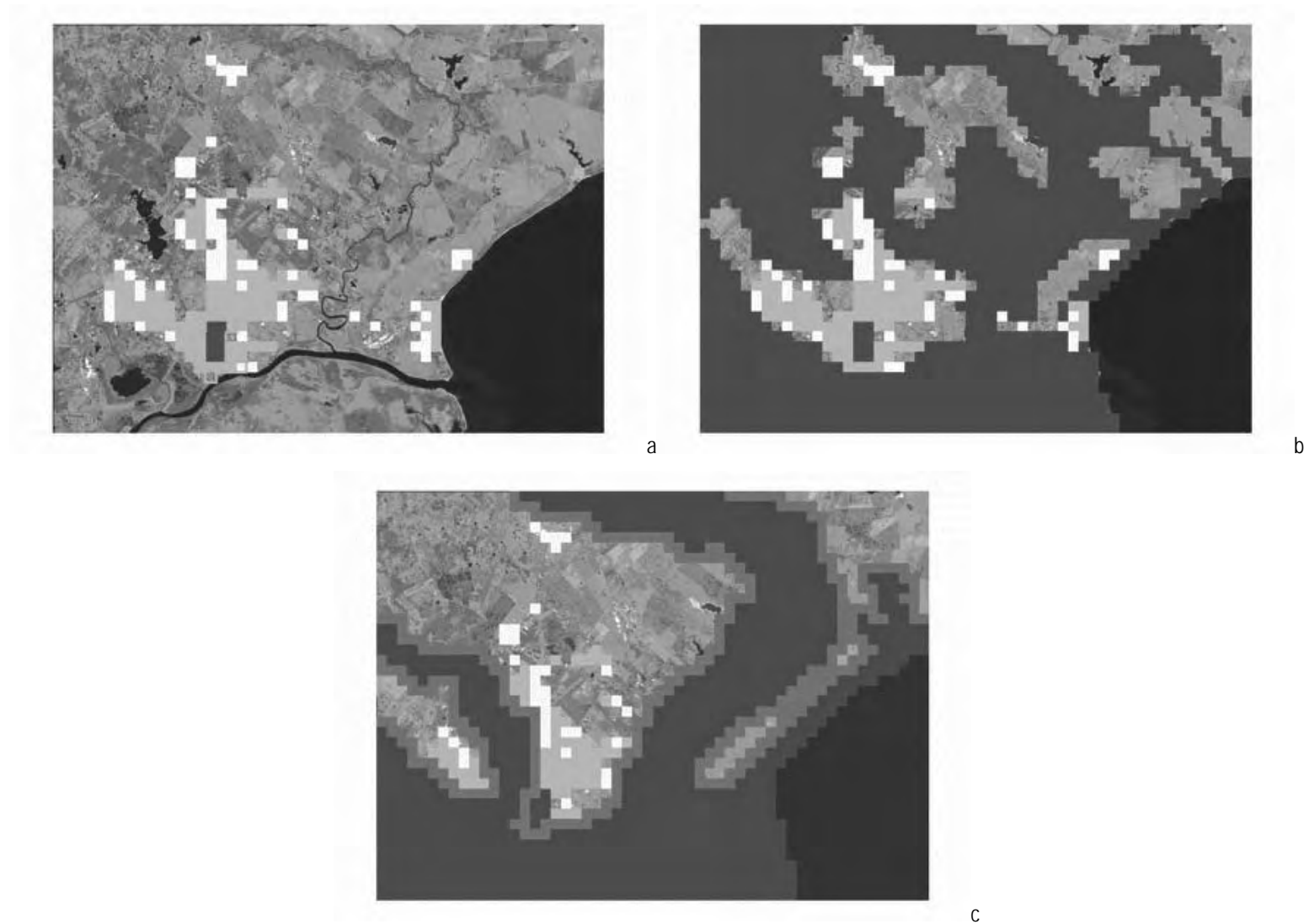


Figura 6.43: zonas e demais carregamentos utilizados nas simulações; a) zona de preservação cultural (em traço azul); b) zona de conservação natural (em verde escuro); c) zona de fragilidade ambiental (com limiar igual a 0,50 na zona verde escuro e igual a 0,75 na zona verde claro).

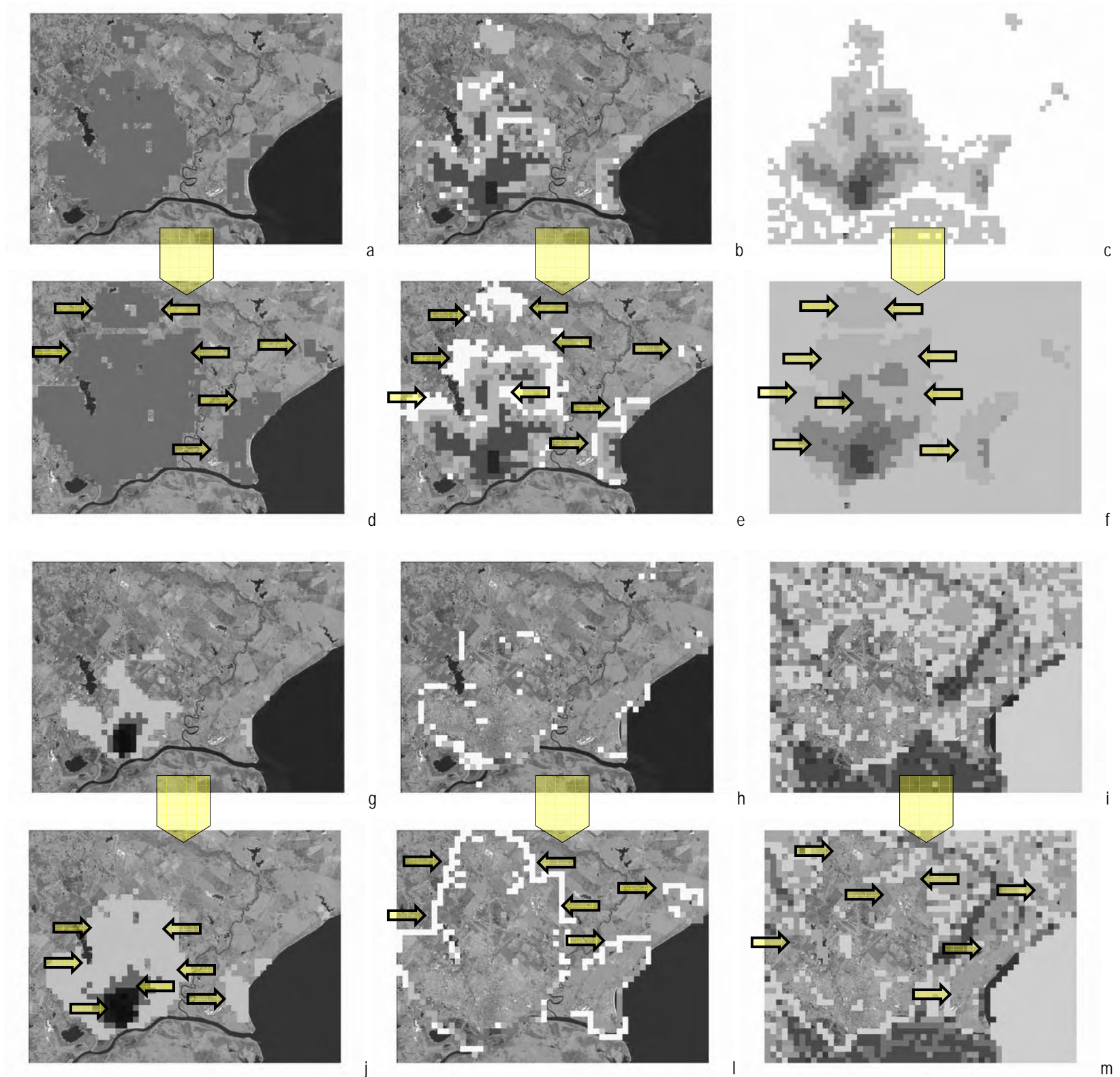


Figura 6.44: simulação de crescimento e zoneamento para a preservação cultural, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem a zona de preservação cultural; b) sobre output de LoadU, sem a zona de preservação cultural; c) sobre output de CentR1, sem a zona de preservação cultural; d) sobre output de CellType, com a zona de preservação cultural; e) sobre output de LoadU, com a zona de preservação cultural; f) sobre output de CentR1, com a zona de preservação cultural; g) sobre output de CentR2, sem a zona de preservação cultural; h) sobre output de Potential, sem a zona de preservação cultural; i) sobre output de ResistE, sem a zona de preservação cultural; j) sobre output de CentR2, com a zona de preservação cultural; l) sobre output de Potential com a zona de preservação cultural; m) sobre output de ResistE, com a zona de preservação cultural.

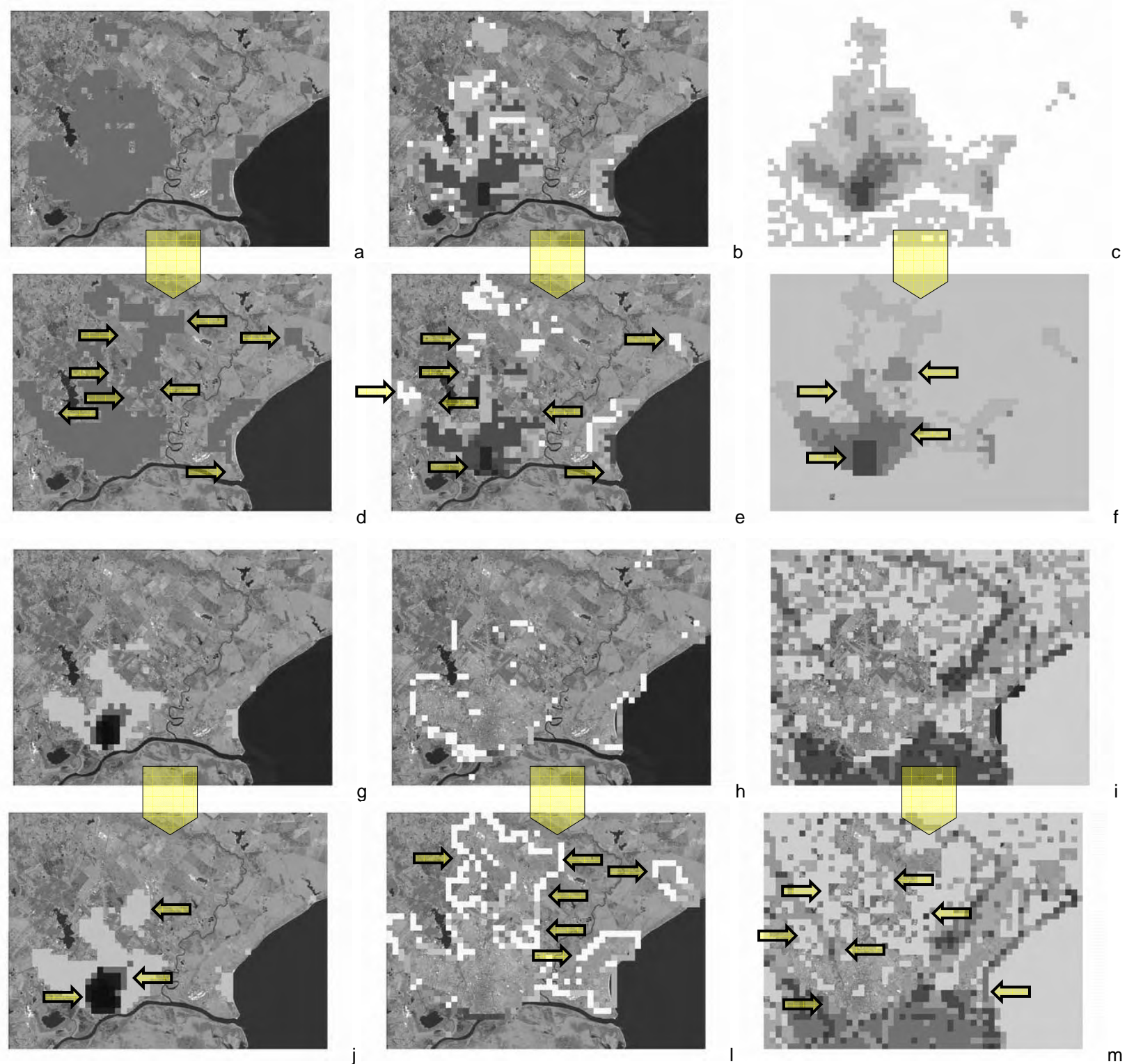


Figura 6.45: simulação de crescimento e zoneamento para a conservação natural, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem as zonas de conservação natural; b) sobre output de LoadU, sem as zonas de conservação natural; c) sobre output de CentR1, sem as zonas de conservação natural; d) sobre output de CellType, com as zonas de conservação natural; e) sobre output de LoadU, com as zonas de conservação natural; f) sobre output de CentR1, com as zonas de conservação natural; g) sobre output de CentR2, sem as zonas de conservação natural; h) sobre output de Potential, sem as zonas de conservação natural; i) sobre output de ResistE, sem as zonas de conservação natural; j) sobre output de CentR2, com as zonas de conservação natural; l) sobre output de Potential com as zonas de conservação natural; m) sobre output de ResistE, com as zonas de conservação natural.



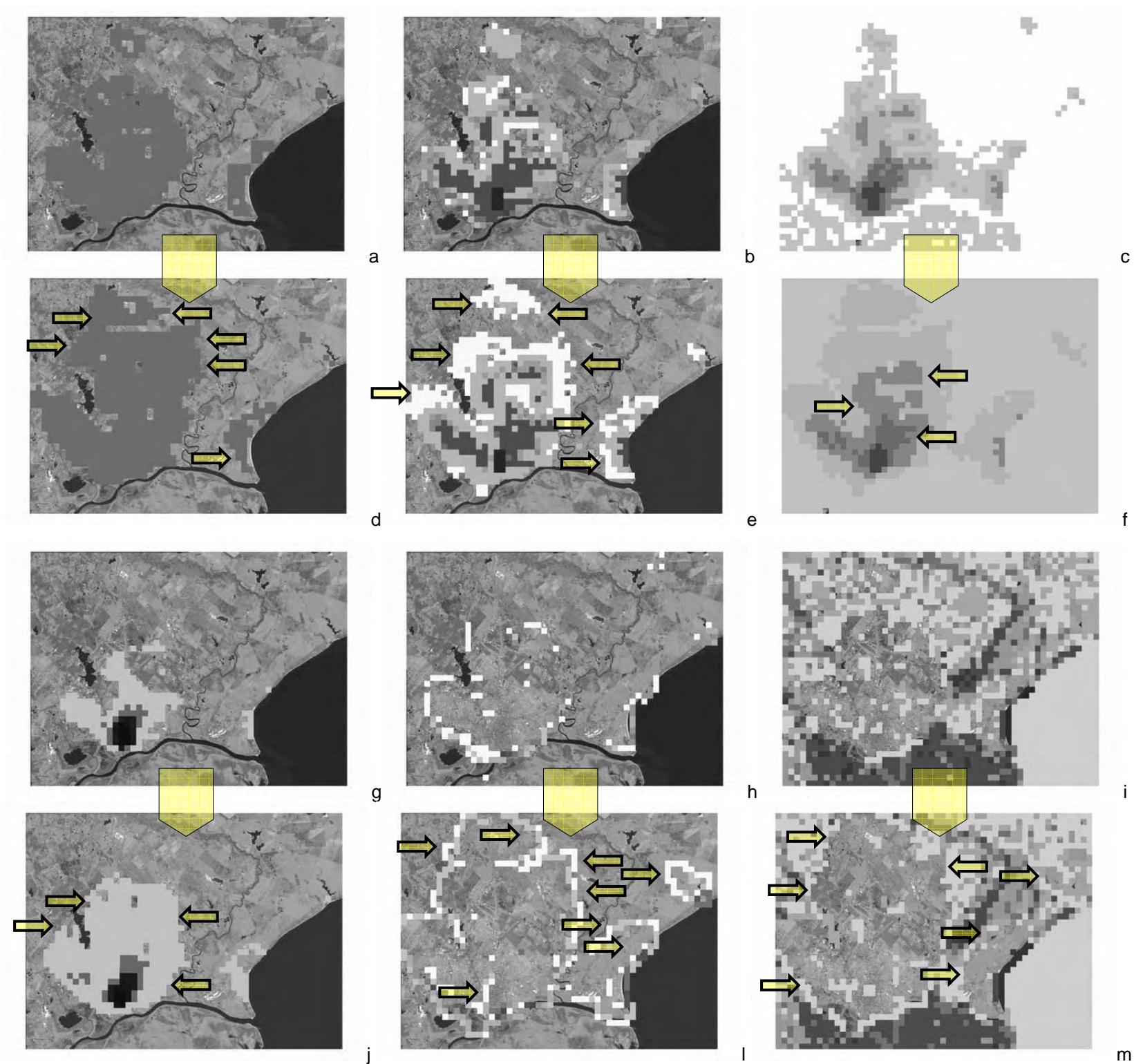


Figura 6.46: simulação de crescimento e zonas de fragilidade ambiental, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem as zonas de fragilidade ambiental; b) sobre output de LoadU, sem as zonas de fragilidade ambiental; c) sobre output de CentR1, sem as zonas de fragilidade ambiental; d) sobre output de CellType, com as zonas de fragilidade ambiental; e) sobre output de LoadU, com as zonas de fragilidade ambiental; f) sobre output de CentR1, com as zonas de fragilidade ambiental; g) sobre output de CentR2, sem as zonas de fragilidade ambiental; h) sobre output de Potential, sem as zonas de fragilidade ambiental; i) sobre output de ResistE, sem as zonas de fragilidade ambiental; j) sobre output de CentR2, com as zonas de fragilidade ambiental; l) sobre output de Potential com as zonas de fragilidade ambiental; m) sobre output de ResistE, com as zonas de fragilidade ambiental.

Os principais efeitos da simulação com a introdução da zona de preservação cultural, comparando com a hipótese sem a zona de preservação, são os seguintes: a) permanência na estrutura geral da cidade e continuidade no processo de crescimento; b) incremento de conversão de território não urbanizado para urbanizado, aumentando o número de células com fenótipo urbano (figuras 6.44a e 6.44d; gráfico 6.6, abaixo). O resultado de continuidade no crescimento indica que as mudanças provocadas pela zona de preservação não trazem empecilho substantivo à dinâmica urbana, demonstrando ausência de contradição entre preservação e crescimento urbano. Os resultados vinculados ao aumento de conversão de território estão associados ao modo como a preservação foi simulada e à localização da área de interesse; com relação ao modo, como a preservação foi emulada introduzindo um atributo institucional *freezing* nas células que integram a zona, pode ser assumido que o impedimento de transformação numa área pode aumentar a probabilidade de transformação em áreas remotas; com relação à localização, considerando que a zona de preservação coincide com a área central tradicional da cidade (que é a de máxima intensidade de urbanização) e que as células que passam a ser convertidas para fenótipo urbano aparecem nas bordas das preexistentes, isso pode indicar que o impedimento exógeno de áreas centrais pode aumentar o processo de produção de periferias urbanas.

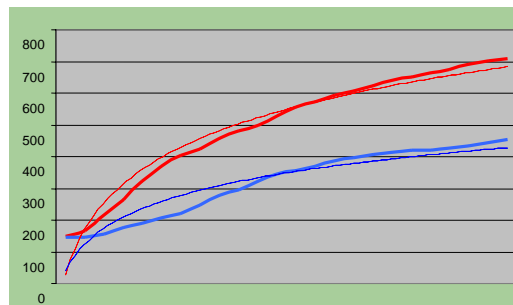


Gráfico 6.6: crescimento e zoneamento para a preservação cultural, em 45 iterações; evolução de CellType sem a zona de preservação (traço azul) e com a zona de preservação (traço vermelho); linhas tracejadas mostram tendências de base logarítmica 10.

Outros efeitos trazidos pela introdução da zona de preservação cultural foram também observados, a saber:

- a) com relação à concentração de carregamentos urbanos (*LoadU*, no modelo), os resultados demonstram que as células convertidas para fenótipo urbano apresentam valores baixos, isto é, o crescimento nas bordas da cidade é realizado com baixos coeficientes de aproveitamento do solo e baixas densidades populacionais (figuras 6.44b e 6.44e);
- b) com relação à distribuição de centralidades (*CentR1* e *CentR2*, no modelo), aparece uma notável desconcentração dessa grandeza, aumentando o número de células em classes superiores (figuras 6.44c e 6.44f); esse resultado indica que a área de preservação traz maior distribuição de facilidades urbanas, embora não altere a estrutura monocêntrica tradicional da cidade;
- c) o potencial de crescimento urbano (*Potential*, no modelo) mostra incremento dessa grandeza nas bordas da cidade, destacadamente nas regiões onde houve maior conversão de células para o fenótipo urbano (figuras 6.44h e 6.44i);
- d) com relação às resistências naturais (*ResistE*, no modelo), ocorre uma diminuição diretamente proporcional ao aumento de células urbanas (figura 6.44j e 6.44m), podendo ser assumido que o impedimento exógeno do crescimento em áreas urbanizadas pode trazer, como efeito indireto, maiores mudanças no sistema natural.

Os principais efeitos da introdução das zonas de conservação natural, são os seguintes: a) as células convertidas para o fenótipo urbano (*CellType*, no modelo) resultam num conjunto polinucleado, com núcleos separados pelos trechos da unidade de conservação simulada, ao que corresponde um resultado com maior fragmentação (figuras 6.45a e 6.45d, anteriormente; gráfico 6.7b, a seguir); b) como era esperado, o resultado final mostra a presença de atributos naturais nas áreas delimitadas como de conservação, as quais tiveram sua modificação impedida exogenamente (figuras 6.45i e 6.45m); todavia, a quantidade células que apresenta atributos naturais preservados varia pouco, comparando com a simulação sem a presença das zonas de conservação natural (gráfico 6.8, a seguir), estando a diferença principal entre as duas simulações na localização das células preservadas e não na sua quantidade. Esse resultado sugere que a questão das unidades de conservação é fundamentalmente qualitativa e não quantitativa (isto é, quais os locais onde é desejável conservar atributos naturais e não qual a quantidade de superfície indicada para conservar), pois o que varia mais intensamente no crescimento urbano sem e com a presença de unidades de conservação é a localização e não a quantidade de células preservadas. É notável um ponto onde se cruzam as linhas dos gráficos 6.7a e 6.7b, o que acontece quando potenciais de crescimento máximos ocorrem no interior das zonas de conservação.

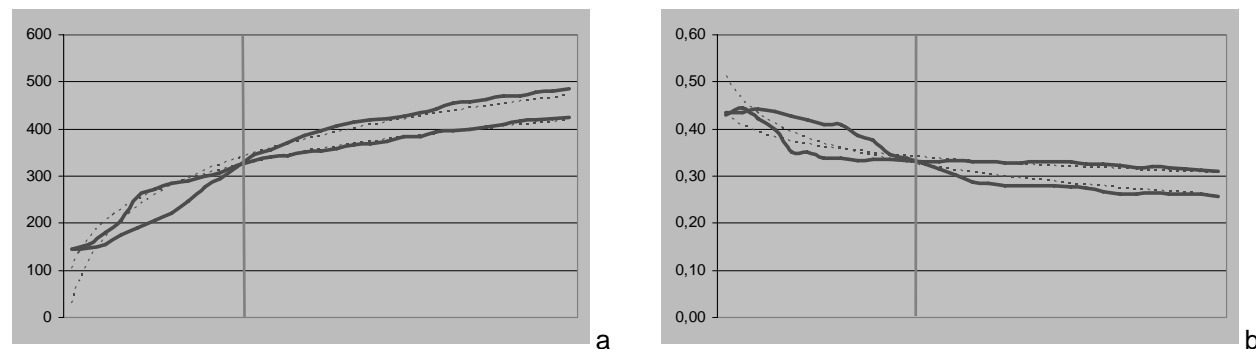


Gráfico 6.7: crescimento e zoneamento para a conservação natural, em 60 iterações, com destaque para a iteração 45; a) evolução de *CellType* sem a zona de conservação (traço vermelho) e com a zona de conservação (traço verde); b) evolução da fragmentação relativa sem a zona de conservação (traço vermelho) e com a zona de conservação (traço verde); linhas tracejadas mostram tendências de base logarítmica 10.

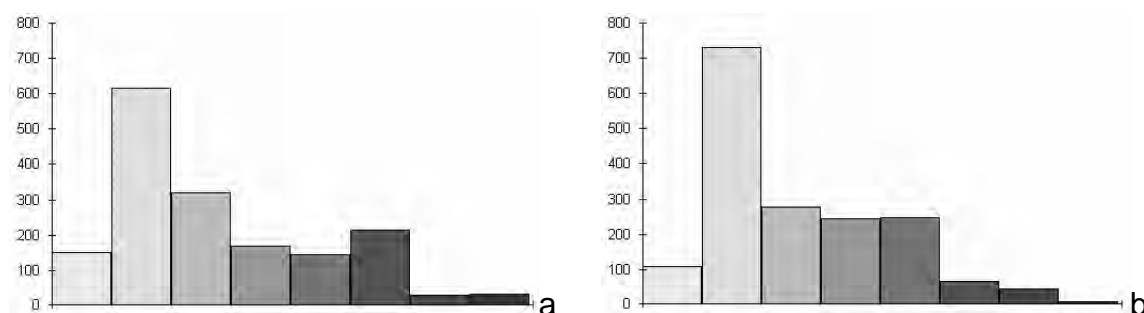


Gráfico 6.8: simulação de crescimento e zoneamento para a conservação natural, na iteração 45, mostrando histogramas dos atributos naturais, em 8 classes a) sem a presença das zonas de conservação; b) com a presença das zonas de conservação.

A simulação com as zonas de conservação natural permite também outras observações, a saber:

- a) com relação à concentração de carregamentos urbanos (*LoadU*, no modelo), o resultado acompanha a polinucleação que aparece no *output* de *CellType*, sendo a menor continuidade a principal diferença em relação à simulação sem as zonas de conservação (figuras 6.45b e 6.45e);
- b) a distribuição de centralidades (*CentR1* e *CentR2*, no modelo) apresenta a localização dos valores máximos de modo semelhante ao caso sem as zonas de preservação, porém com mais células nas classes de valores superiores (figuras 6.45c e 6.45f; 6.45g e 6.45j), o que indica um resultado com estrutura semelhante, porém com concentração diferente;
- c) com relação ao potencial de crescimento urbano (*Potential*, no modelo), o resultado final da simulação mostra um espalhamento do potencial de crescimento pela área de estudo, alcançando regiões sem potencial algum no caso sem as zonas de conservação (figuras 6.45h e 6.45l).

Com relação à introdução de zonas de fragilidade ambiental, o principal efeito aparece como um aumento de conversão de células para o fenótipo urbano (*CellType*, no modelo), nas áreas que não foram consideradas como de fragilidade ambiental (figuras 6.46a e 6.46d, anteriormente). Esse resultado sugere que a presença de restrições ambientais em parcelas da cidade pode provocar crescimento urbano noutras áreas, as quais não se transformam sem a presença dessas restrições. O gráfico 6.9, abaixo, compara a conversão de células não urbanizadas para urbanizadas, mostrando o incremento causado pela presença das zonas de fragilidade ambiental.

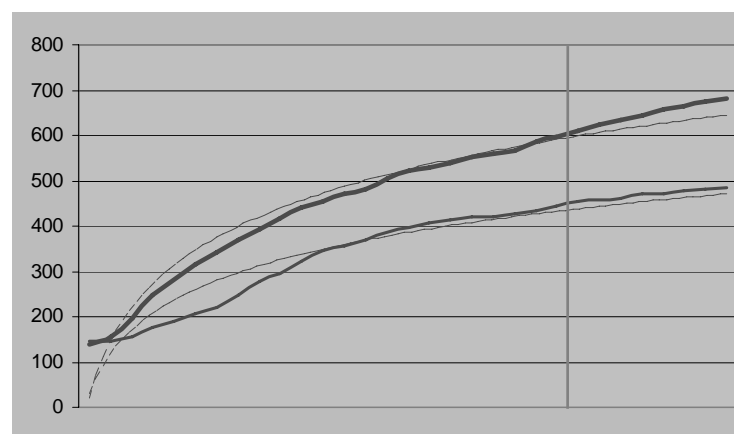


Gráfico 6.9: crescimento e zonas de fragilidade ambiental, em 60 iterações, com destaque para a iteração 45, mostrando a evolução de *CellType*; simulação sem as zonas de fragilidade ambiental (traço vermelho) e com as zonas de fragilidade ambiental (traço verde).

A simulação com as zonas de fragilidade ambiental permite também outras observações, a saber:

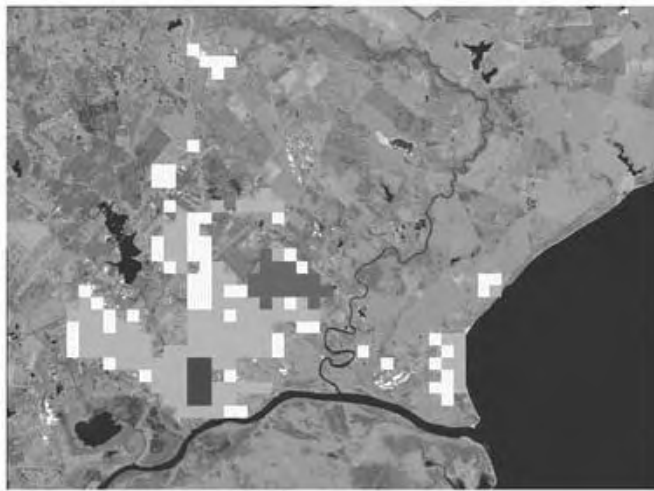
- a) com relação à concentração de carregamentos urbanos (*LoadU*, no modelo), a simulação mostra que as novas células urbanas convertidas no processo de crescimento apresentam fraca intensidade de urbanização (figuras 6.56b e 6.56e), com evidente aumento de quantidade de células em classes inferiores, em relação à simulação sem considerar as zonas de fragilidade ambiental;
- b) a distribuição de centralidades (*CentR1* e *CentR2*, no modelo) não se altera estruturalmente, podendo ser percebido um aumento das células em classes intermediárias, com permanência do centro tradicional e dos vetores de crescimento observados na hipótese sem a zona de fragilidade ambiental (figuras 6.46c e 5.46f; 5.46g e 6.46j);
- c) os resultados para o potencial de crescimento urbano (*Potential*, no modelo) e para as resistências naturais (*ResistE*, no modelo), acompanham o aumento de crescimento observado, com aumento relativo de ambas as grandezas nas células que integram as áreas de fragilidade ambiental (figuras 6.46h e 6.46l; 5.46i e 6.46m).

Mas como estudar o efeito de ações institucionais para induzir o crescimento urbano em localizações desejadas, através dos mecanismos disponíveis no SACI ? Nessa direção está o próximo subtítulo, apresentando experimentos com diferentes proposições em locais urbanizados e não urbanizados, interferindo no processo de crescimento urbano com a introdução de atributos institucionais.

## 6.5 Crescimento urbano e indução institucional de ocupação do solo

Uma das possibilidades do SACI é a de verificar o efeito da utilização de instrumentos de controle urbano (Campos Filho, 1989), para influenciar no processo de produção espacial da cidade. Nesse caminho, duas hipóteses estão testadas: a) implantação de uma zona de crescimento induzido em zona não urbanizada previamente (figura 6.47); b) implantação de uma zona de crescimento induzido em trechos da cidade anteriormente urbanizados (figura 6.48). As zonas de indução estão implementadas no modelo através de rebaixamento do limiar superior de ocupação do solo nas zonas em que a indução não é desejada, emulando diferentes coeficientes de aproveitamento do solo, o que opera como um instrumento de indução para crescimento (Del Rio, 1990), sendo particularmente importante para o caso de planos diretores e de utilização dos instrumentos do Estatuto da Cidade. (Oliveira, 2001).

A simulação para o caso de indução institucional de uso do solo em zona não urbanizada foi realizada introduzindo um rebaixamento do limiar (*threshold*, no modelo) na área de estudo, mudando o parâmetro de 1,00 para 0,50, exceto na área onde a indução é pretendida, o que é conseguido através de um *grid* com o formato de máscara (figura 6.47, a seguir). Para o caso de indução em zonas previamente urbanizada, também foi introduzido um rebaixamento do limiar (*threshold*, no modelo) na área de estudo, mudando o parâmetro de 1,00 para 0,33, exceto na área onde a indução é pretendida, o que é conseguido pelo mesmo recurso de *grid* com o formato de máscara (figura 6.48, adiante). Nesse caso, as áreas de indução estão desenhadas sobre a área central e sobre as principais avenidas da cidade, sendo que atualmente há estudos do poder público que intenciam dotar essas áreas com um coeficiente de aproveitamento igual a três e as demais com um coeficiente igual a um, o que aproxima a simulação de uma situação de interesse para o planejamento urbano local.

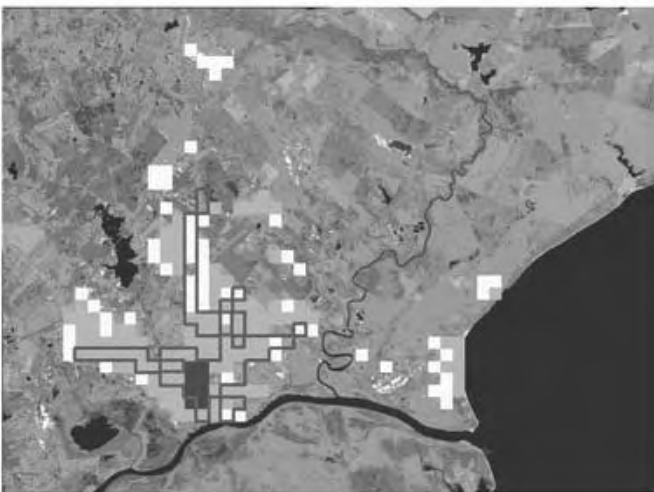


a



b

Figura 6.47: a) zona de indução de crescimento utilizada na simulação, em lilás; b) zona com limiar de 0,50 , em rosa.



a



b

Figura 6.48: a) zona de indução de crescimento utilizada na simulação, em traço azul; b) zona com limiar de 0,33 , em azul.

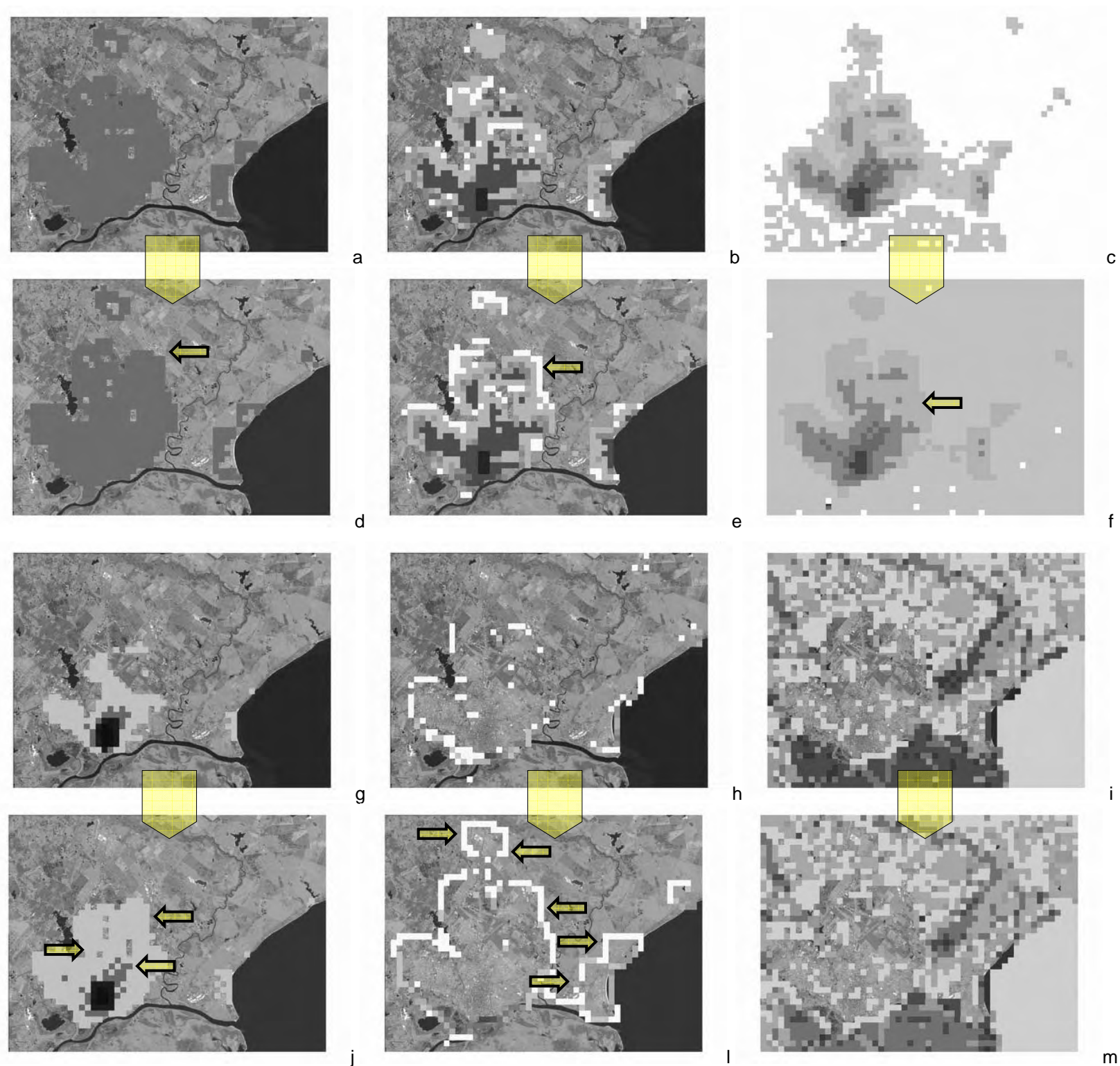


Figura 6.49: simulação de crescimento e indução em zonas não urbanizadas, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem indução em zonas não urbanizadas; b) sobre output de LoadU, sem indução em zonas não urbanizadas; c) sobre output de CentR1, sem indução em zonas não urbanizadas; d) sobre output de CellType, com indução em zonas não urbanizadas; e) sobre output de LoadU, com indução em zonas não urbanizadas; f) sobre output de CentR1, com indução em zonas não urbanizadas; g) sobre output de CentR2, sem indução em zonas não urbanizadas; h) sobre output de Potential, sem indução em zonas não urbanizadas; i) sobre output de ResistE, sem indução em zonas não urbanizadas; j) sobre output de CentR2, com indução em zonas não urbanizadas; l) sobre output de Potential com indução em zonas não urbanizadas; m) sobre output de ResistE, com indução em zonas não urbanizadas.

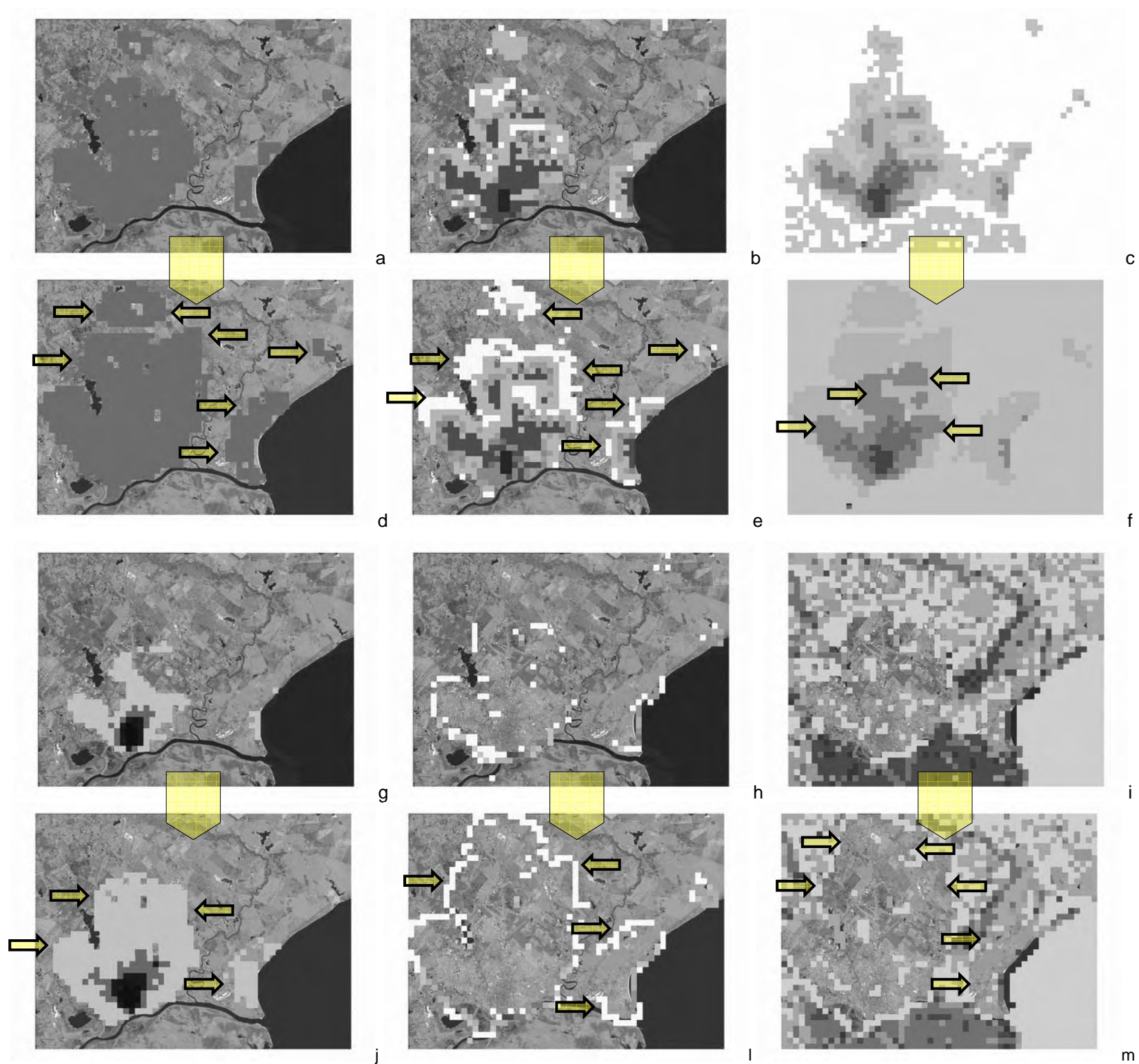


Figura 6.50: simulação de crescimento e indução em zonas urbanizadas, na iteração 45 (setas destacam diferenças principais); a) sobre output de CellType, sem indução em zonas urbanizadas; b) sobre output de LoadU, sem indução em zonas urbanizadas; c) sobre output de CentR1, sem indução em zonas urbanizadas; d) sobre output de CellType, com indução em zonas urbanizadas; e) sobre output de LoadU, com indução em zonas urbanizadas; f) sobre output de CentR1, com indução em zonas urbanizadas; g) sobre output de CentR2, sem indução em zonas urbanizadas; h) sobre output de Potential, sem indução em zonas urbanizadas; i) sobre output de ResistE, sem indução em zonas urbanizadas; j) sobre output de CentR2, com indução em zonas urbanizadas; l) sobre output de Potential com indução em zonas urbanizadas; m) sobre output de ResistE, com indução em zonas urbanizadas.



Como demonstram os resultados da simulação, o efeito do uso de indutores de crescimento em zona sem urbanização é quase nulo, sendo que a principal diferença em relação à zona sem os indutores é uma mudança na distribuição de centralidades, que mostra uma ligeira tendência de extensão no sentido da área onde a indução é pretendida (figuras 6.51c e 6.51f; 6.51g e 6.51j). As figuras a seguir mostram em detalhe a área de indução, com os resultados quase idênticos para os carregamentos urbanos (figuras 6.50a e 6.50b) e com a tendência na distribuição de centralidades (figuras 6.50c e 6.50d).

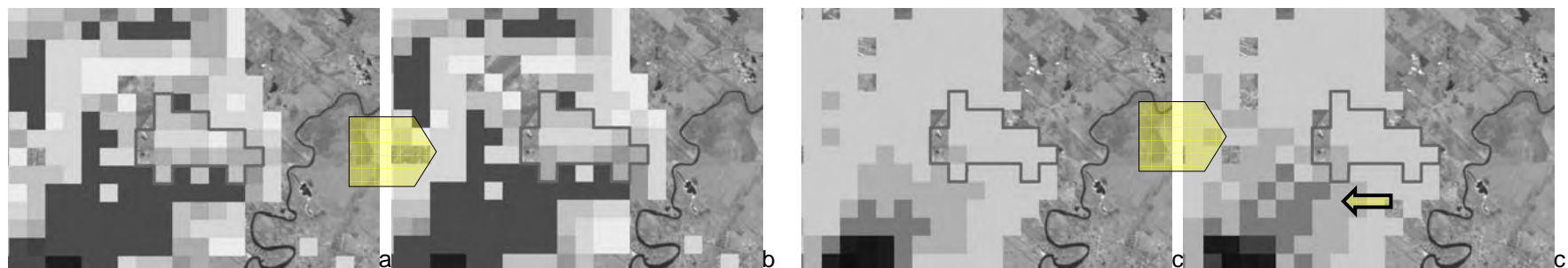


Figura 6.51: simulação de crescimento e indução em zonas não urbanizadas, mostrando detalhe na iteração 45; a) sobre output de LoadU, sem indução; b) sobre output de CentR2, sem indução; c) sobre output de LoadU, com indução; d) sobre output de CentR2, com indução; em traço lilás está a zona de indução.

Um resultado notável na simulação é o registro de parte da área urbanizada como local de incidência de problemas ambientais intra-urbanos, os quais apresentam a intensidade de urbanização superior ao valor máximo de 0,50, usado como limiar (figura 6.52, abaixo).



Figura 6.52: simulação de crescimento e indução em zonas não urbanizadas, na iteração 45, mostrando em vermelho e laranja a incidência de problemas ambientais intra-urbanos e em traço lilás a zona de indução.

Os principais efeitos do uso de indutores de crescimento em zonas urbanizadas são os seguintes: a) aumento na conversão de território não urbanizado para urbanizado (figuras 6.52a e 6.52d); b) concentração dos carregamentos urbanos (figuras 6.52b e 6.52e). No caso do aumento da quantidade de células não urbanizadas que são convertidas para urbanizadas (*CellType*, no modelo), diferentemente do que ocorre no caso anterior, quando a indução foi simulada em zona não urbanizada previamente, pode ser assumido que à imposição de restrições ao teto de carregamento urbano corresponde maior consumo de território, com transformações mais abrangentes no ambiente natural que integra o território da cidade. No caso da concentração dos carregamentos urbanos (*LoadU*, no modelo), os resultados ao final da simulação mostram as áreas convertidas para o fenótipo urbano com baixos valores de carregamento, estando os máximos concentrados nas zonas de indução; esse resultado se aproxima dos obtidos com o uso de pólos de atração, ocasionando ao mesmo tempo urbanização remota de baixa intensidade e aumento de intensidade de urbanização em locais de maior centralidade.

A simulação com indutores de crescimento em zonas urbanizadas permite também outras observações, a saber: a) com relação à distribuição de centralidades (*CentR1* e *CentR2*, no modelo), os resultados mostram desconcentração dessa grandeza, o que aparece com maior visibilidade nas classes de valores intermediários (figuras 6.52c e 6.52f; 6.52g e 6.52j); b) com relação ao potencial de crescimento urbano (*Potential*, no modelo) e às resistências naturais (*ResistE*, no modelo), aparecem confirmações dos resultados anteriores, com aumento do potencial e diminuição das resistências nas áreas onde ocorre o crescimento urbano (figuras 6.52h e 6.52l; 6.52i e 6.52m). Tal como no caso anterior, a simulação registra a ocorrência de problemas ambientais intra-urbanos fora da zona de indução, por ocorrer desenvolvimento acima do limiar estabelecido exogenamente (figura 6.53, abaixo).



Figura 6.53: simulação de crescimento e indução em zonas urbanizadas, na iteração 45, mostrando em vermelho e laranja a incidência de problemas ambientais intra-urbanos e em traço azul a zona de indução.

## 6.6 Conclusões sobre a aplicação do modelo a partir de 2000

As principais conclusões sobre a aplicação do modelo a partir de 2000 estão organizadas pelos grupos de caso referidos anteriormente (velocidade de crescimento, grandes pólos de atração, zoneamento e indutores institucionais de desenvolvimento) e aparecem nos subtítulos à frente.

### 6.6.1 Sobre os experimentos com três hipóteses de velocidade de crescimento

Examinando em conjunto as três hipóteses de crescimento, que apresentam variações na velocidade e que são chamadas de inferior, intermediária e superior, são recorrentes as seguintes observações:

- a) o crescimento urbano mostrado através da conversão de território não urbanizado em urbanizado indica três tendências integradas: a.1) unificação dos núcleos próximos da área central, formando uma extensa área coberta por urbanização; a.2) consolidação dos núcleos remotos, sem unificação; a.3) aparecimento de novos fragmentos, que figuram como satélites dos núcleos que se consolidaram; esse resultado sugere um processo de crescimento com ciclos temporais e locacionais, formado por seqüências de fragmentação e compactação;
- b) vazios urbanos são permanentes em todas as simulações de crescimento urbano, aparecendo com três possibilidades principais: b.1) vazios grandes e duradouros, que separam núcleos remotos; b.2) vazios fragmentados e de duração rápida, que aparecem junto com as expansões também fragmentadas; b.3) vazios associados a zonas de urbanização impedida, como o sistema de águas superficiais ou zonas alagáveis, que assumem os contornos das zonas de origem;
- c) no processo de crescimento, incrementos lentos tendem a se realizarem mediante bordas de baixa densidade de urbanização, enquanto que incrementos rápidos se realizam mediante bordas de maiores carregamentos urbanos; enquanto que no primeiro caso há baixos contrastes com o ambiente natural, no segundo aparecem contrastes elevados;
- d) no caso dos carregamentos urbanos, que emulam esforços edilícios e de urbanização em geral, o aumento da velocidade de crescimento implica em migração dos estoques construídos para zonas de borda, sendo assim comandados por forças centrífugas; todavia, o processo de ocupação no interior da borda em expansão é invertido, com as áreas mais densas localizadas diametralmente opostas em relação aos centros preexistentes; sobre as áreas que concentram os maiores carregamentos flutuam pontos de valor máximo, os quais deixam de ocorrer de forma estável no centro tradicional e passam a ocorrer com instabilidade e mais próximos da periferia urbana;
- e) forças centrípetas comandam a acumulação de centralidade, nas três hipóteses simuladas, sendo influenciadas pelas condições iniciais da simulação (distribuição de núcleos urbanos e intensidade de urbanização nesses núcleos); esse resultado pode estar indicando a presença de *feedback* positivo na constituição de centros urbanos, pois quanto mais a cidade cresce, maior concentrado fica seu centro principal;

- f) os maiores potenciais de crescimento se localizam em zonas de transição entre locais mais e menos urbanizados, isto é, maiores diferenças de urbanização são causadoras de maiores potenciais de crescimento; esse resultado se acirra quando áreas urbanizadas se encontram com áreas de urbanização impedida, formando uma linha de potenciais máximos;
- g) a paisagem natural do entorno da cidade muda com a variação de velocidade no crescimento, sendo possível identificar dois padrões: g.1) no crescimento lento, menos território é convertido para solo urbano, porém a urbanização tende a não deixar vestígios da paisagem natural antecessora; na borda da cidade os contrastes entre a cidade e natureza tendem a ser suaves; g.2) no crescimento rápido, mais território é convertido para solo urbano, porém há maior probabilidade de restarem fragmentos dos antecessores naturais; na borda da cidade aparecem maiores contrastes entre cidade e natureza;
- h) há maior probabilidade de aparecimento de problemas ambientais intra-urbanos quando o crescimento aumenta de velocidade, sendo os trechos de encontro da cidade com áreas impedidas de urbanização as localizações mais vulneráveis;
- i) especificamente com relação ao caso de Pelotas, RS, pode ser admitido que a cidade apresenta uma estrutura urbana com tendência à inércia, com modificações estruturais muito difíceis e improváveis, tendo sido o reforço das condições preexistentes a tendência geral das três simulações.

#### 6.6.2 Sobre os experimentos com crescimento urbano e grandes pólos de atração

Observando em conjunto os experimentos com a presença de grandes pólos de atração aparecem as seguintes conclusões:

- a) grandes pólos de atração são capazes de aumentar o crescimento urbano nas proximidades de sua localização e no conjunto da cidade, porém com dois efeitos correspondentes: a.1) rarefação do crescimento urbano em seu entorno mediato, podendo vir a formar vazios urbanos; a.2) aumento de conversão de território em lugares remotos, com baixas intensidades de urbanização; esse resultado indica uma espécie de compensação entre intensidades de urbanização (aos máximos do grande pólo de atração correspondem os mínimos dos vazios urbanos) e entre localizações preferenciais (ao entorno do grande pólo de atração correspondem as periferias remotas);
- b) o processo de urbanização estimulado por grandes pólos de atração tende a ocorrer “dos fundos para a frente”, isto é, uma vez convertido um conjunto de células para o fenótipo urbano, o aumento do carregamento se dá no sentido das células mais distantes para as mais próximas do grande pólo de atração;
- c) mudanças na estrutura da cidade, particularmente reveladas pela medida de centralidade, dependem da localização do grande pólo de atração em relação à estrutura preexistente, tendo sido encontrados três padrões diferenciados: c.1) crescimento global e reforço da estrutura preexistente, quando os novos pólos de atração se localizam com continuidade espacial em relação à preexistências; c.2) crescimento global e local, com formação de novos focos de centralidade, quando os pólos de atração são excêntricos e sem continuidade espacial com as preexistências; c.3) crescimento local, quando os pólos de atração são excêntricos e separados por áreas não urbanizáveis.

### 6.6.3 Sobre os experimentos com crescimento urbano e zoneamento

Dos três experimentos realizadas com crescimento urbano e zoneamento, simulando uma zona de preservação cultural, zonas de conservação natural e zonas de fragilidade ambiental, podem ser extraídas as seguintes conclusões principais:

- a) as mudanças na conversão de solo não urbanizado em urbanizado (*CellType*, no modelo) provocadas pelo zoneamento são qualitativas e não quantitativas, isto é, enquanto a localização das células acrescidas pelo crescimento urbano tende a mudar, a quantidade de células urbanas tende a ficar semelhante; esse resultado sugere que a delimitação de zonas de preservação ou de conservação, bem como a delimitação de zonas de fragilidade ambiental, não ocasionam frenagem no crescimento urbano, mas podem provocar mudança na forma que a cidade assume ao longo do tempo;
- b) o potencial de crescimento (*Potential*, no modelo) tende a aumentar nas zonas diferenciadas pelo zoneamento, que não se modificam somente pela interferência externa da simulação; sendo assim, os resultados indicam que a delimitação de zonas de preservação, conservação ou fragilidade ambiental no interior ou na interface da cidade preexistente, tende a aumentar seu potencial de transformação, gerando um efeito contrário ao desejado originalmente pelo instrumento do zoneamento;
- c) ao final dos experimentos, particularmente no caso das zonas de conservação natural, é notável que a continuidade das células que representam o ambiente natural corresponde o aumento da fragmentação do conjunto de células urbanas, podendo ser assumido que a continuidade de um subsistema corresponde à descontinuidade do outro.

### 6.6.4 Sobre os experimentos com crescimento urbano e indução institucional de ocupação do solo

Os experimentos com indução institucional de uso do solo foram realizados através da diferenciação dos limiares máximos e indicam as seguintes conclusões:

- a) o uso de diferenciação de limiares, que emula diferentes coeficientes de aproveitamento do solo, mostrou fraca capacidade de influenciar no crescimento urbano, que tende a procurar sempre os lugares com maior potencial, em detrimento de interesses institucionais exógenos ao processo de produção do espaço urbano;
- b) os resultados tendem a ser nulos no caso de uso de limiares diferenciados em áreas desocupadas ou não urbanizadas previamente, sendo mais visíveis quando as áreas de indução têm prévia urbanização;
- c) restrições trazidas pelo limiar rebaixado em determinadas áreas trazem acréscimos de conversão geral no território, relacionando menores limiares com maior conversão de território; o carregamento das células acrescidas é predominante baixo, o que indica a formação de bordas com fraca intensidade de urbanização;
- d) problemas ambientais intra-urbanos tendem a aparecer nas áreas onde incidem maiores potenciais, quando sujeitas a limiares menores; esses resultados sugerem a necessidade de aumento de compatibilização entre essas grandezas, ou aumentando os limiares ou induzindo o crescimento para outros locais da cidade.

### 6.6.5 Sobre todos os experimentos em conjunto

Uma possibilidade de concluir sobre a aplicação do modelo de simulação de crescimento a partir do ano 2000 é sobrepor os experimentos e verificar as áreas onde houve coincidência na conversão de solo urbanizado para urbanizado, usando álgebra de mapas. Para isso, estão utilizados os doze *outputs* obtidos nos experimentos anteriores, referentes às células com fenótipo urbano (*CellType*, no modelo) para a iteração 45, como está na figura 6.54, abaixo.

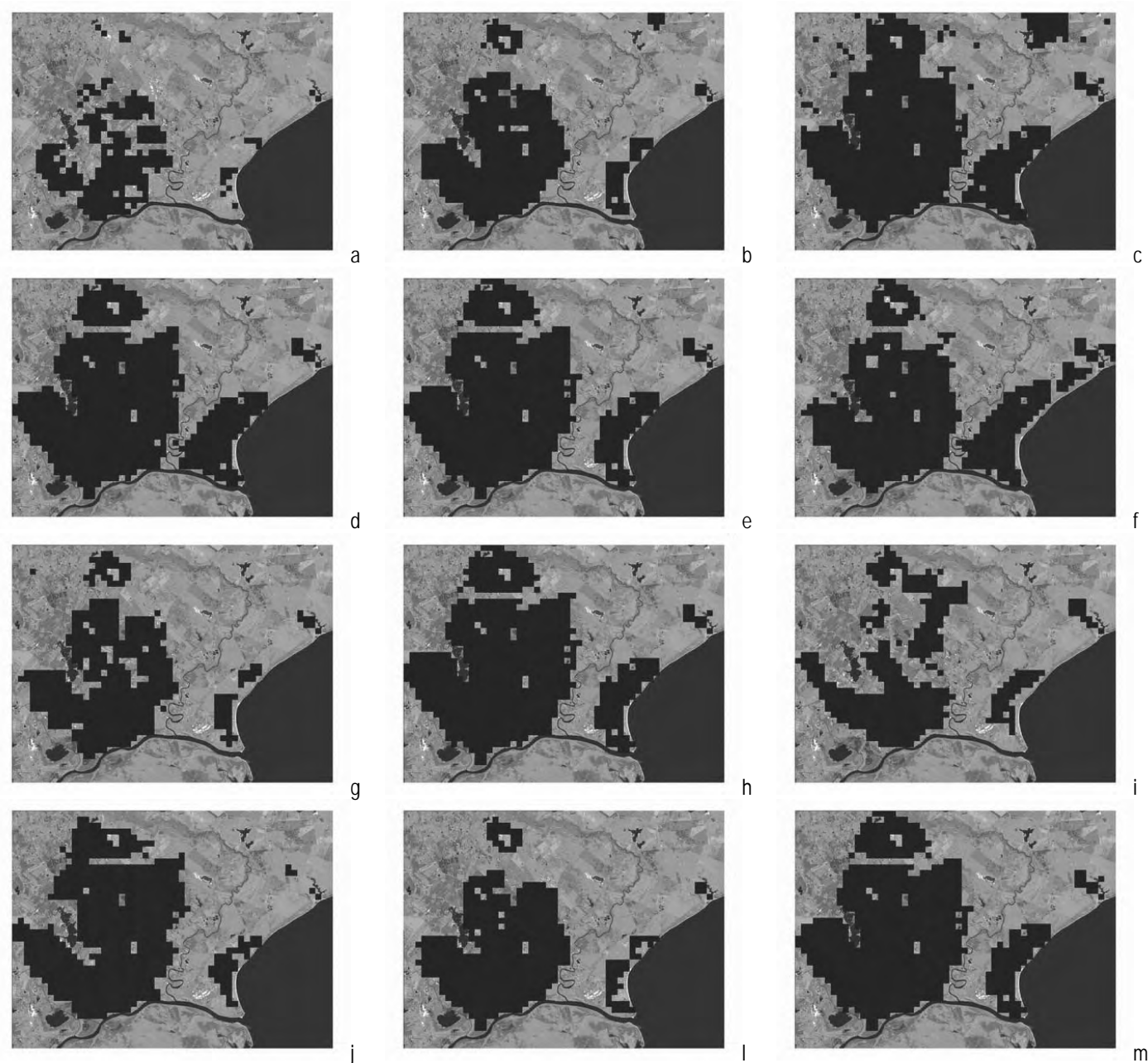


Figura 6.54: resultados de *CellType* para todas as simulações realizadas a partir do ano 2000, na iteração 45; a) hipótese inferior; b) hipótese intermediária; c) hipótese superior; d) grande pólo de atração do distrito industrial da Sanga Funda; e) grande pólo de atração da praia do Laranjal f) composição de pólos de atração no equinócio; g) composição de pólos de atração no solstício de verão; h) zona de preservação cultural; i) zonas de conservação natural; j) zonas de fragilidade ambiental; l) indutores externos de uso do solo; m) indutores externos de uso do solo.

Somando os *grids* com os *outputs* de *CellType* na iteração 45 (mostrados na figura anterior) e extraíndo o *input* do ano 2000 é obtida uma escala de zero a doze, pode ser assumido que maiores valores correspondem a maiores probabilidades de cada célula não urbana ser convertida em urbana. Os resultados estão mostrados na figura 6.55, abaixo.

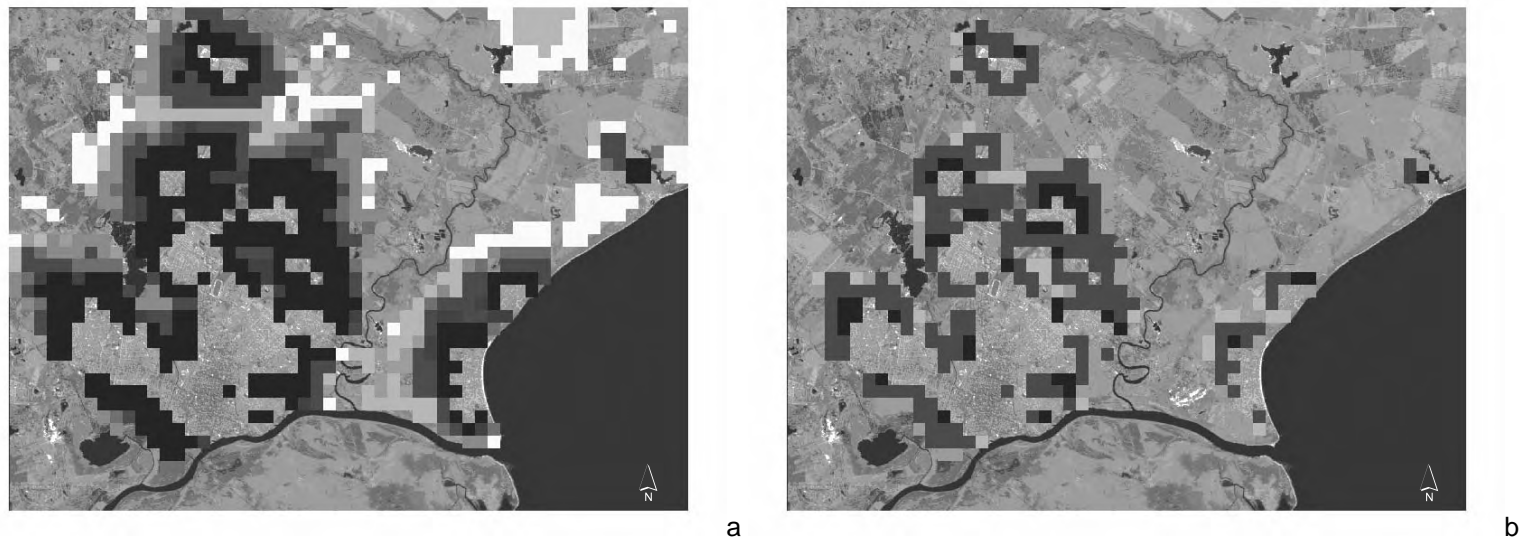


Figura 6.55: probabilidades de conversão de território não urbanizado para urbanizado, considerando todas as simulações em conjunto; a) em 32 classes, de zero a 100%; b) em 9 classes, de 70 a 100%.

Dos resultados mostrados anteriormente, podem ser extraídas as seguintes observações:

a) as maiores probabilidades de conversão de território não urbanizado em urbanizado se concentram nas bordas da cidade preexistente, (figuras 6.55a e 6.56a); b) uma importante zona de expansão aparece à nordeste do núcleo central, acompanhada pela formação de vazios urbanos (figuras 6.55b e 6.56b); c) dentro da borda de expansão, aparecem pontos de probabilidade máxima polinucleados e dispersos na interface das áreas urbanizadas com o ambiente natural (figuras 6.55b e 6.56c); d) considerando esses pontos em agrupamentos, podem ser distinguidas sete frentes de expansão, sendo a de número 1 a que envolve o maior número de células (figuras 6.55b e 6.56d).

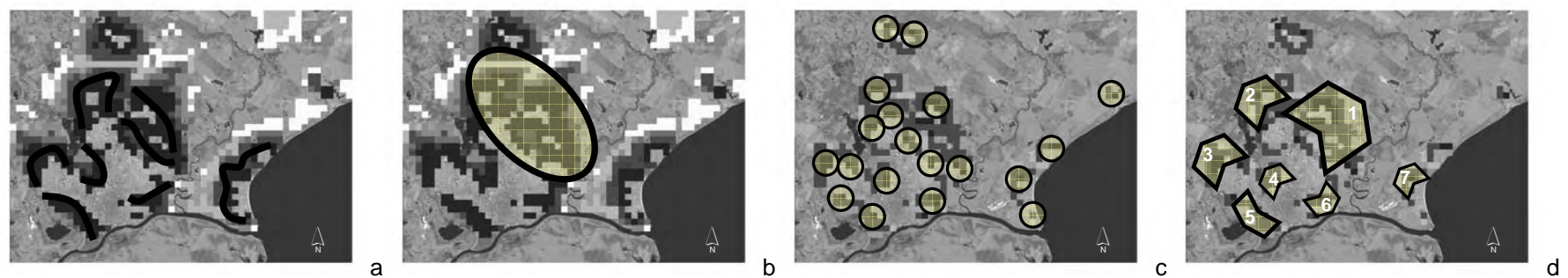


Figura 6.56: todas as simulações de crescimento em conjunto; a) destaque do crescimento nas bordas da cidade preexistente; b) destaque da zona de expansão à nordeste; c) expansão polinucleada no interior das bordas; d) frentes de expansão urbana.

## 6.7 Conclusões gerais do estudo de caso

Os experimentos realizados para o caso de Pelotas estão resumidos nas seguintes conclusões gerais:

- a) inércia estrutural: a cidade apresenta no ano 2000 uma estrutura urbana formada por um centro de maior intensidade de urbanização e eixos de crescimento a oeste (bairro Fragata), a norte (bairro Três Vendas) e a nordeste (bairro Areal); também apresenta núcleos sem continuidade espacial a norte (Vila Princesa), a nordeste (Colônia Z3) e a leste (bairro Laranjal); esse conjunto determina uma estrutura resistente a mudanças, que tende a se manter inerte nas simulações de crescimento, cujos resultados mostram possibilidades de uma cidade maior, porém sem importantes mudanças estruturais (figura 6.57a);
- b) subsistema determinante: no ano 2000, o subsistema de águas naturais é determinante na ocupação do território, sendo o principal restritor natural do crescimento territorial da área urbanizada; são notáveis as implicações, nos resultados das simulações realizadas, do Arroio Fragata, do Arroio Santa Bárbara, do Arroio Pelotas, da Laguna dos Patos e do Canal São Gonçalo, incluindo as regiões de várzea contíguas, (figura 6.57b);
- c) padrão de crescimento: o padrão de crescimento que emerge das simulações aponta para conversões de território não urbanizado em urbanizado localizados na borda da cidade preexistente, em formato de linhas; todavia, no interior dessas linhas acumulam-se máximos em forma de pontos, sugerindo um padrão semelhante a um colar (figura 6.57c);
- d) estrutura sucessora: de um modo geral, pode ser assumido que o padrão de crescimento territorial em forma de colar é submisso à ordem preexistente, posto que articula um conjunto de expansões que não trazem mudanças estruturais; embora esse resultado esteja influenciado pela calibração adotada para o modelo, que se baseia na expansão ocorrida entre aos anos 1965 e 2000, essa submissão é decorrente da força de atração exercida pelo centro tradicional, pelos eixos de crescimento e pela disposição das resistências naturais;
- e) quatro pontos principais: os resultados das simulações para Pelotas, no horizonte de 45 anos, considerando o crescimento ocorrido nos anos anteriores, podem ser resumidos em quatro pontos principais (figura 6.57d): e.1) inércia da estrutura preexistente; e.2) importância condicionante do subsistema de águas naturais; e.3) tendência de crescimento através de borda em da forma de colar; e.4) emergência de picos de carregamento no interior dessa borda.

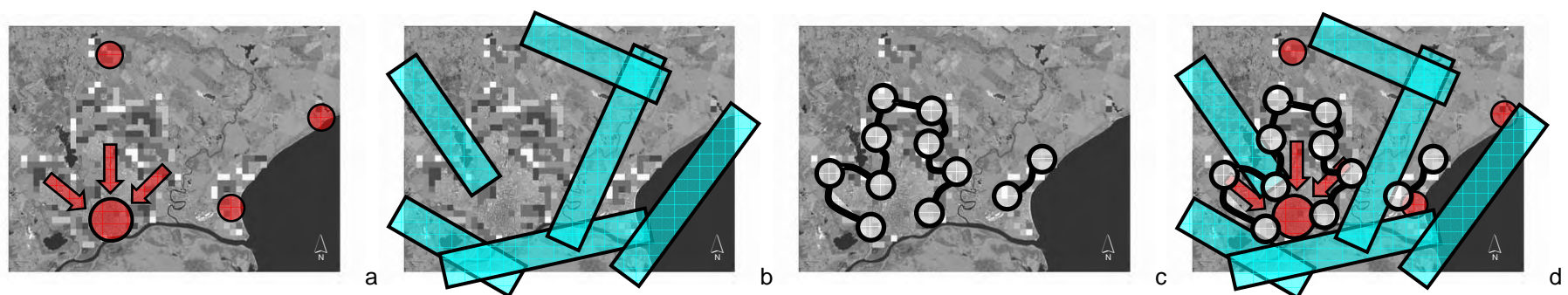


Figura 6.57: conclusões gerais sobre a cidade de Pelotas, RS, em esquema; a) estrutura de centro dominante, eixos e núcleos remotos; b) subsistema de águas naturais; c) padrão de crescimento em forma de colar; d) superposição dos esquemas anteriores.



## 6.8 Conclusões gerais sobre o crescimento urbano

O conjunto de simulações realizado permite observar seis regularidades no processo de crescimento urbano, as quais podem ser consideradas emergências generalizáveis para a cidade contemporânea, podendo ser resumidas nos seguintes itens:

- a) o crescimento urbano através da conversão de solo não urbanizado em urbanizado demonstra que a cidade cresce através de forças centrífugas, porém experimenta falhas na conversão de território, o que ocasiona o aparecimento de vazios urbanos;
- b) no processo de crescimento urbano, os estoques construídos se distribuem mediante a combinação de forças centrípetas e centrífugas, com instabilidades permanentes; enquanto que as primeiras são típicas do crescimento lento, as segundas aparecem quando o crescimento é rápido, particularmente na borda em expansão;
- c) a distribuição de centralidades, que está associada de modo diretamente proporcional a valor do solo, alocação de infraestrutura, dotação de equipamentos urbanos e disponibilidade de facilidades urbanas, mantém um comportamento flutuante em curto prazo, porém tende a diferenciar centros majoritários com o avançar da dinâmica urbana, auto-organizando-se em longo prazo;
- d) o potencial de crescimento se concentra nas interfaces do urbano com o não-urbano e do mais urbanizado com o menos urbanizado; essa concentração tende a demarcar frentes de expansão em forma de linha, determinando uma borda com comportamento diferenciado do resto do sistema;
- e) os experimentos demonstram que ocorre no crescimento urbano um mecanismo de *feedback* positivo, através do qual se diferenciam crescentemente os espaços; todavia, encontrado um limiar urbano, natural ou institucional, entra em ação um mecanismo de *feedback* negativo, num ciclo de crescimento, aparecimento de problemas ambientais intra-urbanos e superação desses problemas, produzindo assim uma auto-regulação do sistema;
- f) a paisagem natural e os seus atributos representam o ambiente antecessor da cidade, funcionando como um campo de irregularidades que influencia o crescimento urbano em curto e em longo prazos, em função da intensidade com que resistem à urbanização; enquanto que no curto prazo as baixas resistências naturais atraem o crescimento urbano, esse processo faz aumentar o potencial de crescimento das resistências maiores, aumentando a pressão de urbanização no longo prazo.

## 6.9 Epílogo do capítulo 6

Neste capítulo me dediquei a utilizar o modelo para especular sobre possibilidades de futuro para cidade, simulando hipóteses mediante a variação da intensidade de crescimento, a implantação de grandes pólos de atração, a implementação de diferentes zoneamentos e a aplicação de indutores de desenvolvimento. Conclusões para cada experimento aparecem ao longo do capítulo, chegando ao final a cinco conclusões gerais e quatro pontos que sintetizam os trabalhos empíricos, bem como a seis regularidades espaciais extraídas das simulações de crescimento urbano e que se caracterizam como contribuições à teoria urbana.



Uma vez demonstrado o funcionamento do modelo para gerar possibilidades e especular sobre o futuro a partir de um caso real, nos próximos dois capítulos desenvolverei e explorarei outros recursos disponíveis no SACI, de modo a melhorar o entendimento sobre o crescimento urbano, o ambiente e as possibilidades de futuro. Nesse caminho, no Capítulo 7 trabalharei com temas recorrentes na formação da cidade contemporânea, através de experimentos com base espacial abstrata; mais adiante, no Capítulo 8, usarei novamente o caso de Pelotas e empreenderei simulações de futuro utilizando de modo integrado os recursos do SACI, o que farei através da análise comparativa do crescimento sustentável e do crescimento convencional.

## 7 Avançando na modelagem do crescimento urbano

Nos dois capítulos anteriores realizei simulações de crescimento para o caso de Pelotas, RS, com dois objetivos principais: a) proceder à calibração do SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>, demonstrando a possibilidade de aproximação entre modelo e realidade; b) especular sobre possibilidades de futuro, variando a velocidade de crescimento e introduzindo grandes pólos de atração, zoneamento e indutores de desenvolvimento. As simulações foram realizadas por variação nos tipos de distribuições de tensões e por regulação na intensidade de crescimento (para o caso da calibração), bem como por variação nos dados de entrada (tanto para a calibração como para os cenários de futuro); essa parametrização foi feita de modo a manter possibilidade de controle nas relações de causa e efeito nas simulações, como é particularmente desejável no processo de calibração (Batty, 1976; Candau, 2000).

Neste capítulo dedico-me a construir e a demonstrar o funcionamento de recursos de modelagem do SACI que permitem trabalhar com questões complexas que aparecem no crescimento urbano, agregando possibilidades à investigação e confluindo para o uso integrado de todos os recursos do modelo, como aparecerá no próximo capítulo. Para isso apresento quinze experimentos dedicados a avançar sobre a questão da simulação no crescimento urbano, utilizando separadamente cada recurso de simulação desenvolvido no modelo, demonstrando suas possibilidades e seus efeitos.

### 7.1 Apresentação

Os experimentos realizados neste capítulo utilizam separadamente recursos desenvolvidos no SACI e avançam sobre aspectos do crescimento urbano que integram enfoques teórico, instrumental e empírico, para o quê estão delineados individualmente e dedicados aos seguintes assuntos: a) crescimento interno e externo integrados; b) distribuição dos estoques construídos; c) formação de vazios urbanos; d) formação de periferias urbanas; e) obsolescência e revitalização nos estoques construídos urbanos; f) raios de interação, raios de vizinhança, mono e policentralidade; g) abrangência dos pólos de atração urbanos; h) influência da distância entre pólos de atração; i) variação da impedância das resistências ao crescimento; j) preservação e renaturalização ambiental; l) limites do crescimento e problemas ambientais intra-urbanos; m) ponderação e autoponderação de atributos; n) crescimento difuso, fragmentação e compacidade. Esses experimentos estão mostrados nos subtítulos 7.2 a 7.14, na seqüência.

Os experimentos estão delineados individualmente e com *inputs* simplificados, de modo a facilitar o processamento e a visualização dos resultados; em cada caso está modificado apenas o parâmetro que ativa o recurso do modelo que está sendo demonstrado, ficando os demais com os valores padrão; todos os casos assumem que os carregamentos são células do tipo urbano e que as resistências são células do tipo naturais, não aparecendo células institucionais. Os *outputs* são de um de dois modos: a) mostrando estados inicial, intermediários e final, quando o efeito a observar aparece na comparação das diversas fases da simulação; b) mostrando somente os estados inicial e final, quando os efeitos da simulação podem ser observados apenas com essas duas fases.

## 7.2 Crescimento externo e interno integrados

Uma freqüente limitação nos modelos de crescimento urbano é a representação exclusiva de dinâmicas intra-urbanas (só crescimento interno) ou então periurbanas (só crescimento externo), embora seja esperado que esses processos sejam interinfluentes (Li e Yeh, 2000; Wu, 2002). O SACI trabalha com integração das dinâmicas de crescimento interno e externo, conseguida através de três dispositivos estruturais do modelo, a saber: a) a distribuição de tensões, que diferencia as células por centralidade, implica todo o território da área de estudo, ao invés de somente o tecido urbano preexistente; b) os diferentes tipos de distribuição de tensões (axial, axial de *buffer*, polar, difuso 1 e difuso 2) tendem a plotar diferenças celulares em localizações remotas, incluindo sítios urbanizados ou não; c) os potenciais de crescimento, que são calculados em função das diferenças de centralidade, são determinados por relações de vizinhança entre células, que ocorrem em todo o sistema, independentemente de cada célula ser ou não ser previamente urbanizada, podendo o raio de vizinhança ser ajustado livremente.

Esse crescimento interno e externo integrados pode ter sua intensidade regulada por dois parâmetros implantados na regra de crescimento, que indicam o percentual de células com potencial que está apta a realizar o crescimento; o parâmetro está designado como  $\rho_{int}$  e  $\rho_{ext}$  ( $\rho$  interno e  $\rho$  externo), com valor máximo igual a 1,00 e mínimo igual a 0,00 (equivalentes a 100% e 0%, respectivamente). Sendo deste modo, o crescimento celular total efetivo do sistema pode ser regulado pelas equações 7.1, 7.2 e 7.3, a seguir.

*Equação 7.1: crescimento celular total efetivo*

$$\text{GrowthCel}_{\text{total efetivo}} = \text{GrowthCel}_{\text{efetivo int}} + \text{GrowthCel}_{\text{efetivo ext}}$$

*Equação 7.2: crescimento celular efetivo interno*

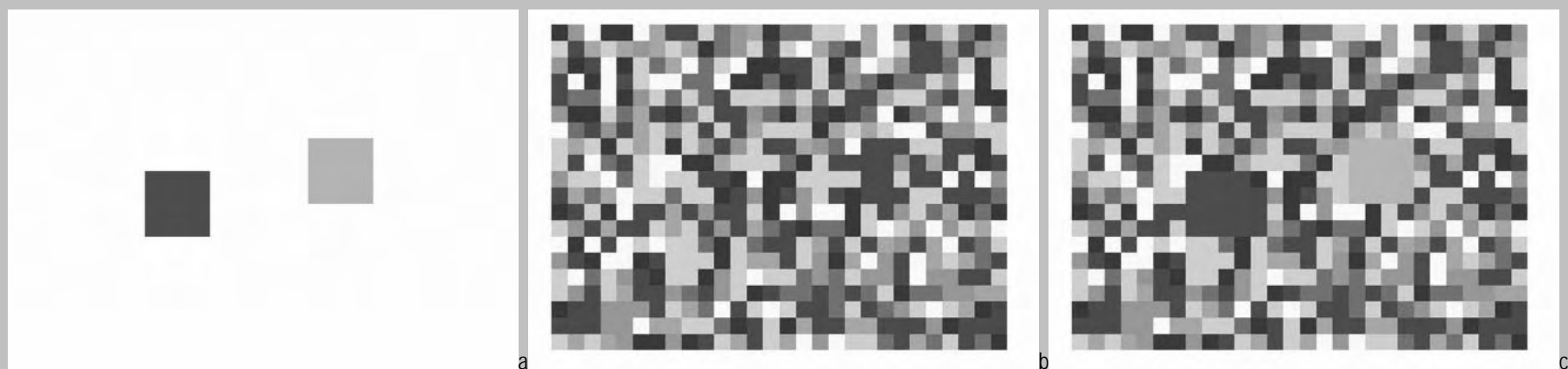
$$\text{GrowthCel}_{\text{efetivo int}} = \text{GrowthCel} \cdot \rho_{\text{int}} \quad \forall \text{ Cel} \subset \text{CellType} = 1$$

*Equação 7.3: crescimento celular efetivo externo*

$$\text{GrowthCel}_{\text{efetivo ext}} = \text{GrowthCel} \cdot \rho_{\text{ext}} \quad \forall \text{ Cel} \subset \text{CellType} = 0$$

*onde se lê, na equação 7.1: o crescimento celular total efetivo é igual ao crescimento efetivo interno mais o crescimento efetivo externo  
na equação 7.2: o crescimento celular efetivo interno é igual ao crescimento celular multiplicado por  $\rho$  (ro) interno, para toda célula com o valor de CellType igual a 1  
na equação 7.3: o crescimento celular efetivo externo é igual ao crescimento celular multiplicado por  $\rho$  (ro) externo, para toda célula com o valor de CellType igual a 0*

As simulações dedicadas a observar variações de crescimento interno e externo estão realizadas mediante quatro casos, a saber: a) crescimento interno e externo simultâneos (figura 7.2), utilizando  $\rho$  interno e externo iguais a 1,00; b) crescimento alternado, isto é, exclusivamente externo na metade inicial da simulação e exclusivamente interno na metade final (figura 7.3), utilizando  $\rho$  interno e depois  $\rho$  externo iguais a zero, respectivamente; c) crescimento exclusivamente externo (figura 7.4), utilizando  $\rho$  interno igual a zero; d) crescimento exclusivamente interno (figura 7.5), utilizando  $\rho$  externo igual a zero. As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.1, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.



*Figura 7.1: inputs utilizados no experimento com variações no valor de  $\rho$  (ro), para simular crescimento interno e externo simultâneos, alternados e exclusivos; a) carregamentos com valores de 10 e 9; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.*

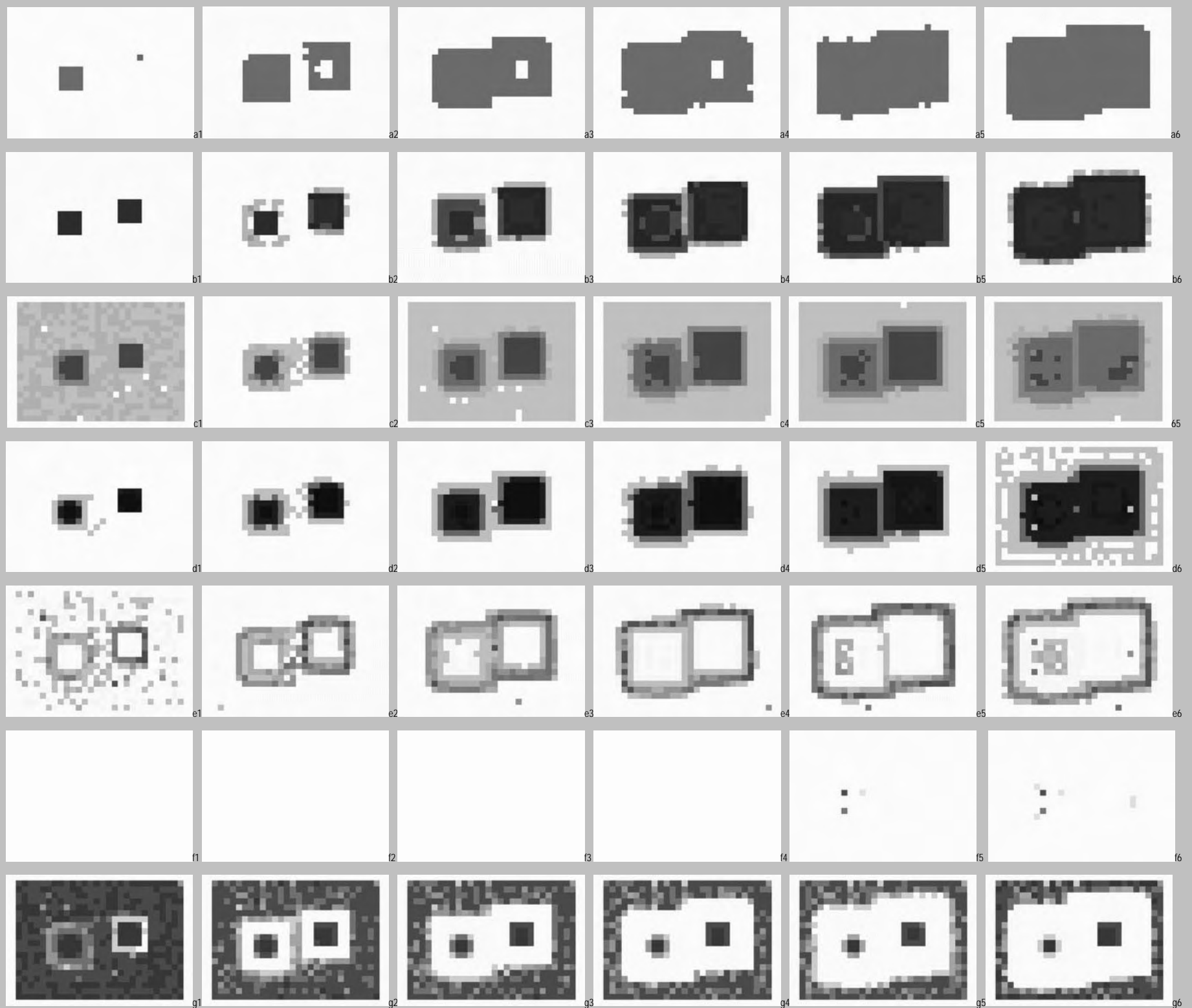


Figura 7.2: output da simulação utilizando  $\rho$  (ro) interno e externo com valor igual a 1,00, simulando crescimento interno e externo simultâneos, em 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE.

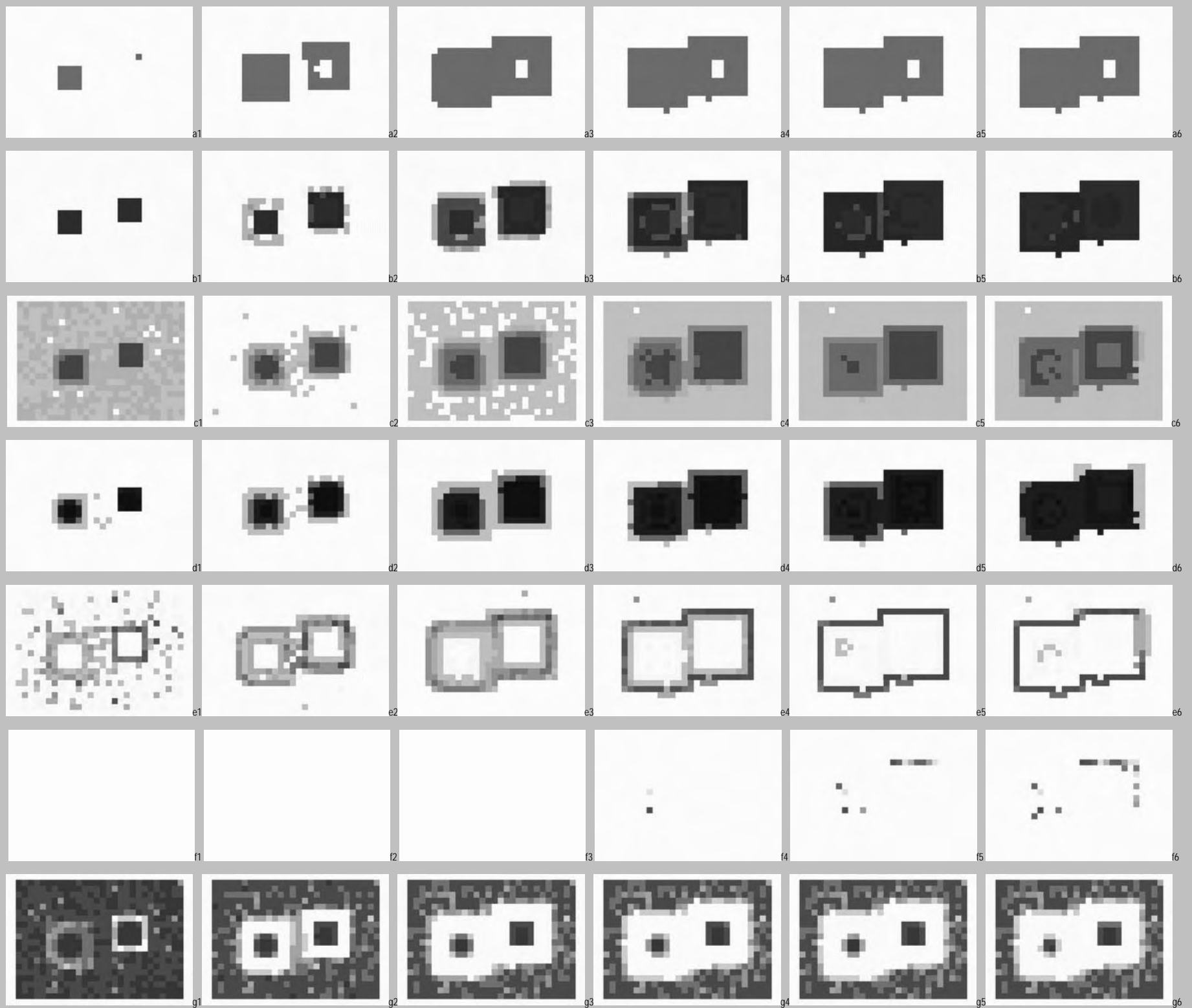


Figura 7.3: output da simulação com crescimento alternado, utilizando  $\rho(ro)$  externo com valor igual a 1,00 e  $\rho(ro)$  interno com valor igual a zero, até a iteração 16 (figuras 1, 2 e 3, simulando crescimento exclusivamente externo) e depois utilizando  $\rho(ro)$  externo com valor igual a zero e  $\rho(ro)$  interno com valor igual a 1,00, da iteração 17 até a 32 (figuras 4, 5 e 6, simulando crescimento exclusivamente interno); a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE.

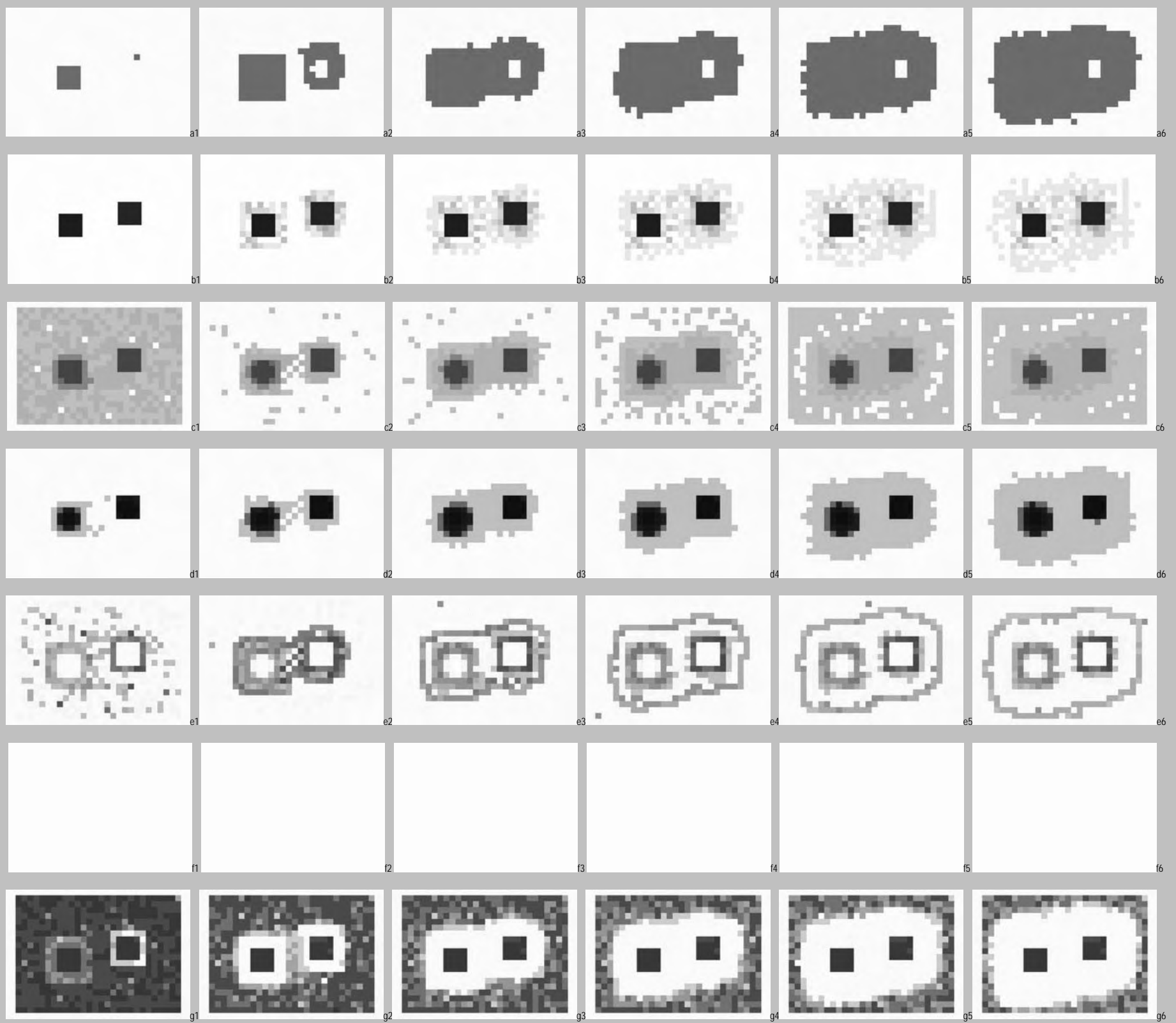


Figura 7.4: output da simulação com crescimento exclusivamente externo, utilizando  $\rho(ro)$  interno com valor igual a zero e  $\rho(ro)$  externo com valor igual a 1,00, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE.



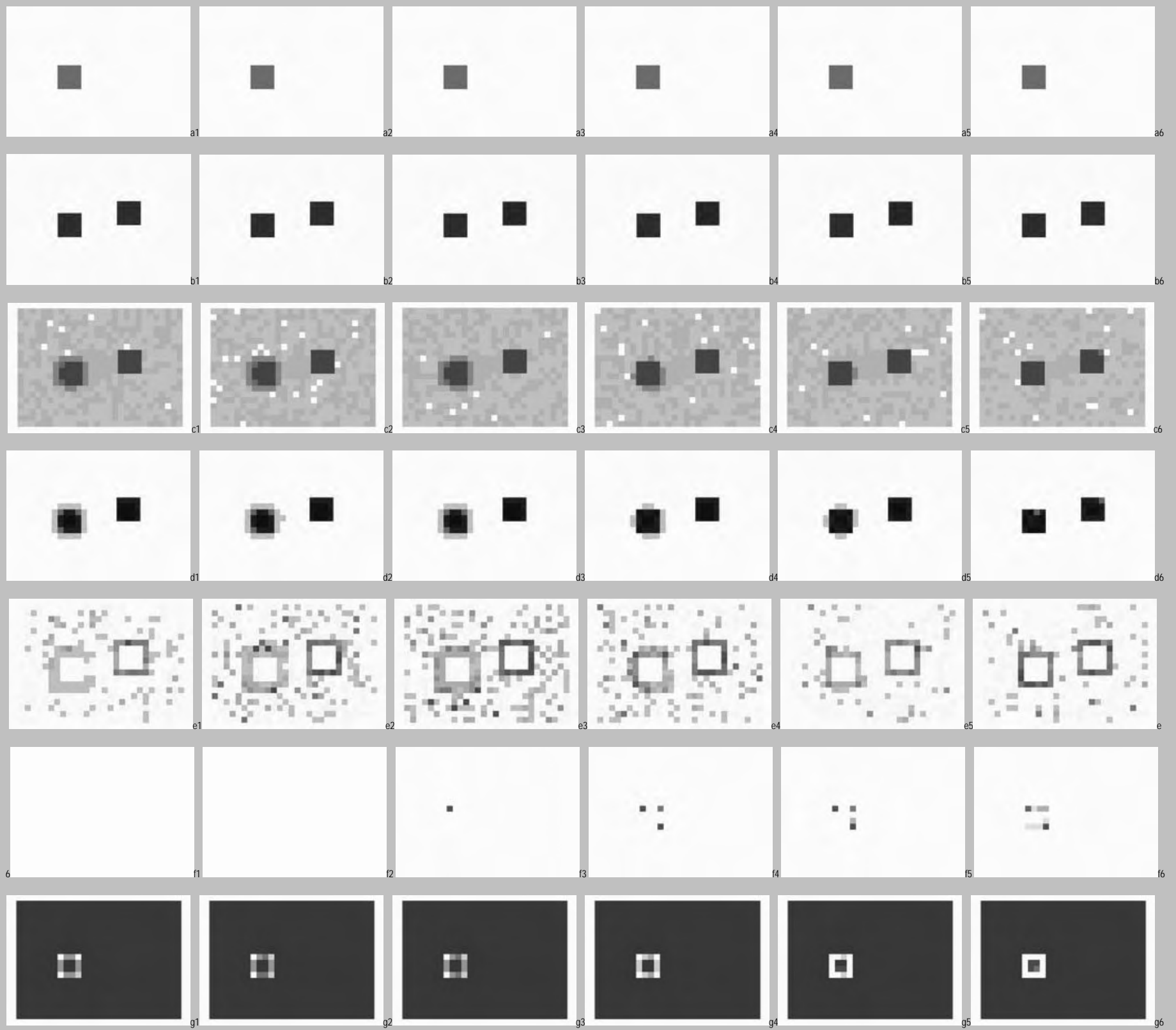


Figura 7.5: output da simulação com crescimento exclusivamente interno, utilizando  $\rho(ro)$  interno com valor igual a 1,00 e  $\rho(ro)$  externo com valor igual a zero, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) EprobT; g) ResistE.

O caso com crescimento interno e externo durante toda a simulação (figura 7.2) é o padrão do modelo e mostra a evolução dos dois núcleos iniciais até a formação de uma mancha única no centro do *grid*, enquanto que o carregamento e a centralidade se acumulam na interface inicial das células urbanas com as demais; o potencial acompanha a borda externa da área coberta por células urbanas, sendo que os problemas ambientais intra-urbanos são registrados nas células com maior intensidade de urbanização iniciais; por fim as resistências denotam o processo de crescimento, restando nas bordas do *grid* e nas células de tipo urbano que deram origem à simulação.

O caso com alternância de crescimento externo e interno, com exclusividade de crescimento externo até a iteração 16 (séries 1, 2 e 3 da figura 7.3) e exclusivamente interno da iteração 17 até a 32 (séries 3, 4 e 5 da figura 7.3), mostra a formação de uma mancha similar ao caso anterior, com duas diferenças principais: a) as células com fenótipo urbano param de evoluir na metade da simulação; b) um vazio se forma e perdura até o final. Diferenças fundamentais ocorrem também com relação aos problemas ambientais e ao potencial de crescimento, a partir da instrução de manter o crescimento exclusivamente interno: c) são registrados problemas ambientais intra-urbanos, o que não ocorre no caso anterior; d) os potenciais máximos se acumulam na interface do espaço urbanizado com o não urbanizado. Esse resultado indica que medidas exógenas de restrição no crescimento externo podem causar efeitos colaterais, a saber: e) estagnação na parcelas interiores do sistema; f) aparecimento de problemas ambientais intra-urbanos na borda.

O crescimento exclusivamente externo apresenta duas notáveis particularidades (figura 7.4): a) embora o número de células convertidas para o fenótipo urbano seja semelhante aos casos anteriores, o carregamento nessas células é muito inferior, pois uma vez convertidas, o carregamento pára de aumentar, o que funciona como um *feedback* negativo; b) o potencial forma dois anéis concêntricos, que correspondem às interfaces inicial e final entre o espaço urbanizado e não urbanizado.

A simulação com crescimento exclusivamente interno (figura 7.5) indica a concentração de potencial e de problemas ambientais intra-urbanos, localizados na interface com o espaço não urbanizado e nas células urbanas preexistentes. Essa modalidade registrou valores de problemas ambientais intra-urbanos cerca de cinco vezes maiores que as demais, o que pode estar dissimulado pelo menor número de células atingidas e pela visualização em classes mostrada anteriormente.

Os experimentos demonstram a capacidade de o modelo simular crescimento interno e externo integrados, alternados e exclusivos, permitindo assumir, a partir do conjunto dos resultados, três características do crescimento integrado: a) a conversão de células não urbanizadas em urbanizadas ocorre em maior intensidade do que no exclusivamente externo, o qual tende à estagnação após a conversão; b) problemas ambientais intra-urbanos ocorrem em menor intensidade do que no caso de crescimento exclusivamente interno, o qual tende a ultrapassar limiares com maior frequência e registra problemas crescentes e cumulativos; c) o potencial de crescimento é mais difuso do que nos demais casos, nos quais os máximos definem bordas mais concentradas com as preexistências e com as células não urbanizadas. Em resumo, a simultaneidade no crescimento interno e externo acarreta maior intensidade de crescimento, menor quantidade de problemas ambientais intra-urbanos e menor concentração do potencial de crescimento.

### 7.3 Distribuição de estoques construídos

A questão da distribuição dos estoques construídos têm sido freqüentemente tratada pelo viés das tipologias arquitetônicas (Caniggia e Maffei, 1979; Duplay, 1985), bem como pelo da economia urbana (Abramo, 2001b); além disso, estudos de sintaxe espacial têm sugerido a vinculação dos estoques edilícios ao desenho do tecido urbano, particularmente representado pelos espaços abertos (Hillier, 1998). Essas abordagens convergem para a noção de razoável previsibilidade da alocação edilícia na cidade, derivada dos processos econômicos, das possibilidades tipológicas e do traçado urbano. Considerando que o modelo produzido nesta investigação aloca formas construídas dinamicamente no processo de crescimento urbano e as considera iterativamente, é possível simular essa alocação e questionar sobre o modo como se distribuem os estoques construídos no processo de crescimento urbano, considerando aspectos urbanos e naturais integradamente. Os exercícios realizados nas simulações sugerem que o processo de alocação dos estoques construídos é turbulento e alternado, diferentemente das supostas estabilidade e continuidade com que são normalmente considerados.

Para observar o modo de distribuição dos estoques construídos no processo de crescimento urbano está realizado um experimento com três simulações, modificando as resistências ao crescimento celular, do seguinte modo: a) resistências aleatórias com valores de 1 a 2 (figura 7.7); b) resistências aleatórias com valores de 1 a 10 (figura 7.8); c) resistências aleatórias com valores de 1 a 100 (figura 7.9). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.6, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

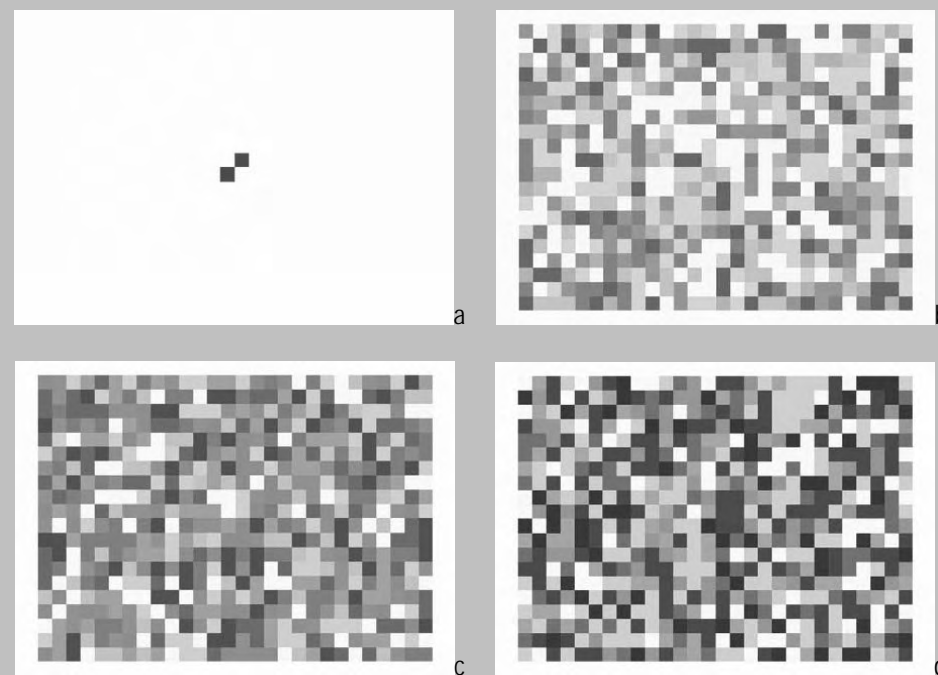


Figura 7.6: inputs utilizados no experimento para observar a distribuição de estoques construídos; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) resistências aleatórias com valores de 1 a 10; d) resistências aleatórias com valores de 1 a 100.

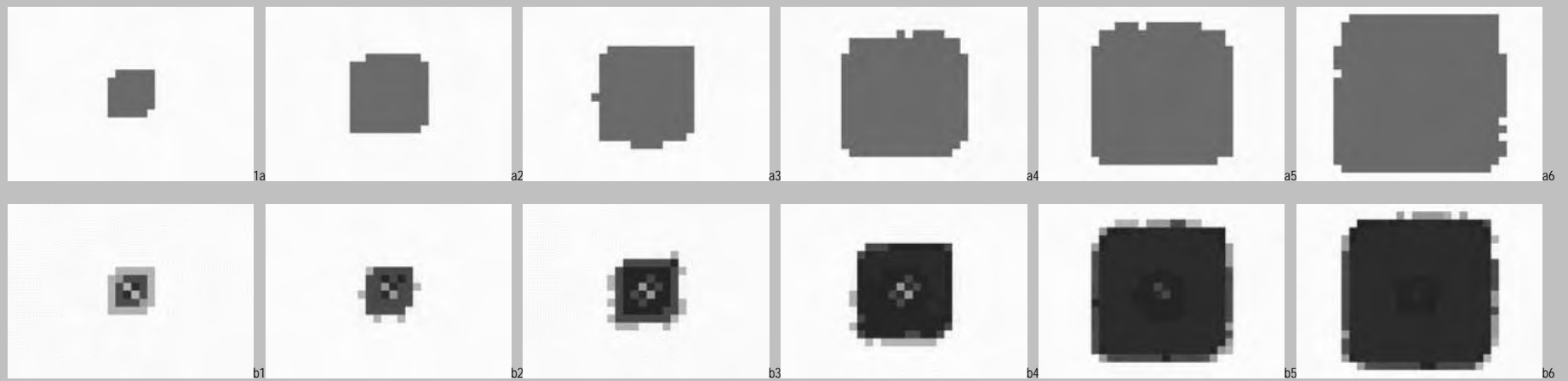


Figura 7.7: output da simulação com resistências aleatórias com valores de 1 a 2, mostrando 6 estados de 60 iterações; a) CellType; b) LoadU.

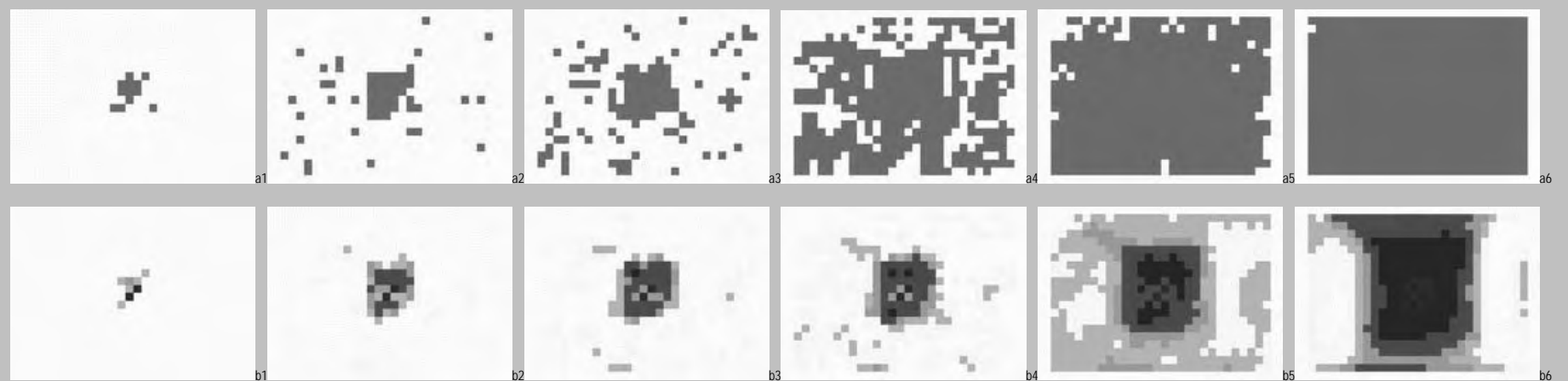


Figura 7.8: output da simulação com resistências aleatórias com valores de 1 a 10, mostrando 6 estados de 60 iterações; a) CellType; b) LoadU.

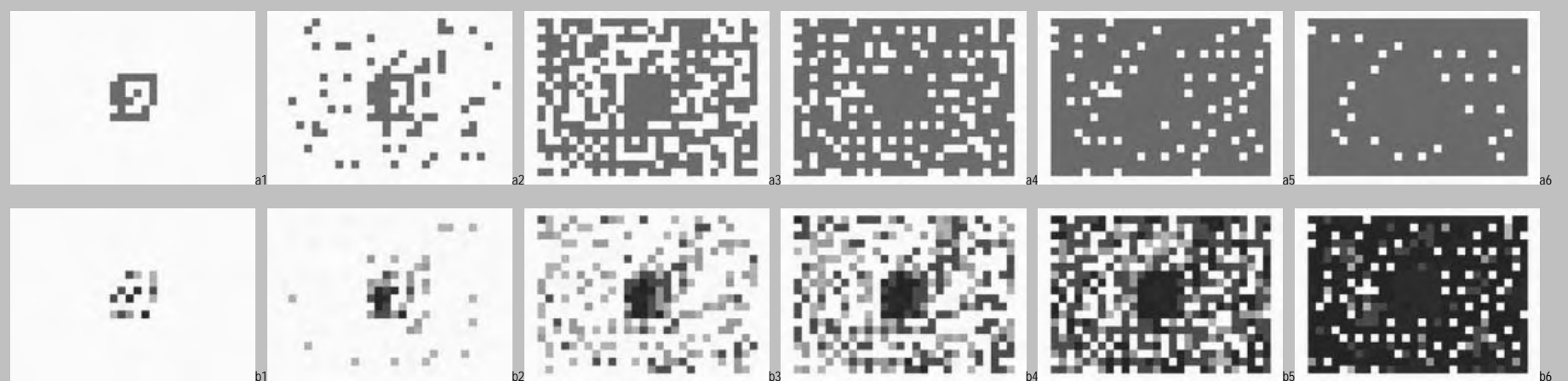


Figura 7.9: output da simulação com resistências aleatórias com valores de 1 a 100, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU.

O resultado da conversão de células para o fenótipo urbano aparece com dois padrões: a) para o caso 1, no qual as resistências têm intervalo de valores menor (entre 1 e 2), a evolução mostra um núcleo compacto de células, aumentando de quantidade de forma homogênea e com localização polarizada ao redor das células antecessoras (ver gráfico 7.1a e figura 7.7); b) para os casos 2 e 3, nos quais as resistências têm intervalo maior (entre 1 e 10 e entre 1 e 100, respectivamente), a evolução mostra duas diferenças fundamentais em relação ao caso anterior: b.1) aparece uma crescente dispersão das novas células urbanas, ao mesmo tempo em que diminui a hegemonia das células antecessoras; b.2) a quantidade de conversão de células para o fenótipo urbano é maior no curto prazo, tendendo a quantidades semelhantes no final da simulação (ver gráfico 7.1a). Os resultados para os carregamentos urbanos acompanham os padrões verificados na conversão de células para o fenótipo urbano, porém com os casos 2 e 3 mais fragmentados, considerando a mancha de células com carregamento diferente de zero (ver figuras 7.7, 7.8 e 7.9); são notáveis também diferenças entre o caso 2 e o caso 3, diferenciando-se o caso 3 pela maior dispersão de células com carregamento diferente de zero em todo o *grid*, incluindo pontos remotos com carregamento máximo. Pode ainda ser observado que os três casos mantêm carregamentos máximos junto ao núcleo de células que deram origem às simulações, porém apresentam dispersão dos carregamentos das células acrescidas de modo diretamente proporcional ao intervalo de máximos e mínimos das resistências. O gráfico 7.1, abaixo, mostra a evolução da conversão de território e da fragmentação para os três casos, bem como apresenta a evolução do carregamento urbano para células tomadas isoladamente.

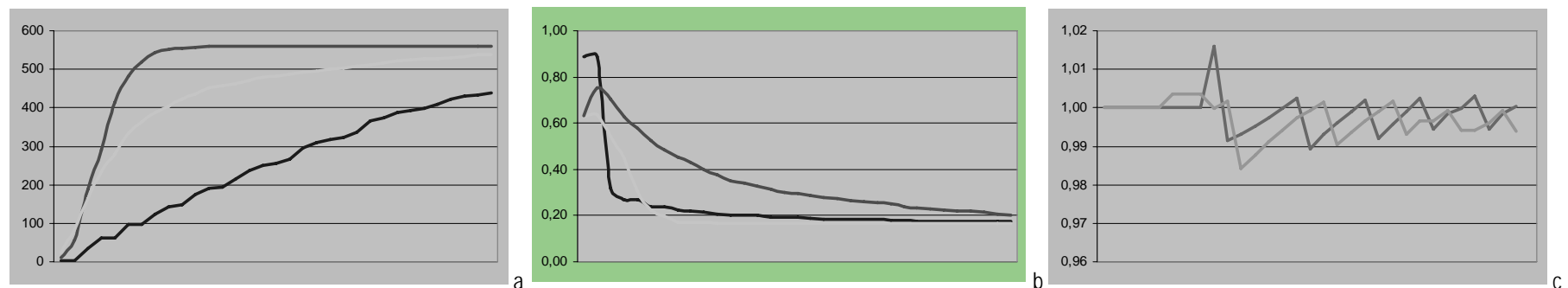


Gráfico 7.1: experimento sobre distribuição de estoques construídos (caso 1 em traço azul, caso 2 em traço laranja e caso 3 em traço vermelho): a) evolução de células urbanas (*Celltype*, no modelo); b) evolução da fragmentação relativa (*FragRel*, no modelo); c) evolução do valor do carregamento urbano em duas células no centro geométrico do *grid* (traço verde e magenta), para o caso 2.

Em resumo, com relação à distribuição dos estoques construídos, o experimento demonstra que, embora a conversão de território e os carregamentos urbanos tendam a padrões semelhantes ao final das simulações, durante a evolução as células apresentam alternância entre valores mais altos e mais baixos, sendo o resultado estável do conjunto construído pela instabilidade permanente de cada parcela, o que sugere um comportamento emergente típico de sistemas complexos (ver a evolução de duas células escolhidas, no gráfico 7.1c). Complementarmente, com relação à conversão de território e aos carregamentos urbanos (*outputs* que foram mostrados neste experimento), é notável que as simulações mostram que intervalos de resistências maiores favorecem a instabilidade e a fragmentação no crescimento, as quais são maiores no curto que no longo prazo.

#### 7.4 Formação de vazios urbanos

Vazios urbanos são áreas contíguas às urbanizadas que resistem à urbanização, implicando em ocupação de áreas mais distantes; normalmente são áreas que apresentam condições adequadas para a finalidade urbana, mas que são retidas e ficam fora do mercado de terras, no aguardo de expectativas de lucros maiores com sua comercialização (Clichevsky, 2001). Como esses lucros maiores são possíveis em função da urbanização de áreas remotas, pode ser assumido que as áreas de vazios urbanos apresentam potenciais de crescimento que não se realizam enquanto outros não se realizarem antes, somente sendo incorporadas ao tecido urbanizado preexistente se houver aumento na expectativa de lucro, que pode ser representada pelo preço da terra urbana.

Considerando que o SACI simula crescimento urbano por realização do potencial de crescimento celular (*PoteCel*, no modelo), o qual é determinado pela diferença entre a centralidade de cada célula e a maior centralidade das células da vizinhança (*CentCel*, no modelo) e considerando também que a centralidade pode ser considerada como indicadora do valor dos imóveis urbanos, é possível simular a formação de vazios imputando às células um teto mínimo de potencial, abaixo do qual não ocorre crescimento urbano. Para isso, um parâmetro  $\Psi$  (phi) está implementado, representando um valor mínimo que impede a realização de potenciais iguais ou menores que esse valor, simulando um mecanismo de retenção imobiliária e induzindo a formação de vazios urbanos.

Para simular o aparecimento de vazios urbanos e observar seus efeitos no sistema está realizado um experimento com dois casos, a saber: a) crescimento sem indução de formação de vazios urbanos, que é a opção padrão do modelo (figura 7.11), utilizando o valor de  $\psi$  igual a 0,00; b) crescimento com indução de formação de vazios urbanos, regulando o valor de  $\psi$  para 0,50 (figura 7.12). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.10, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

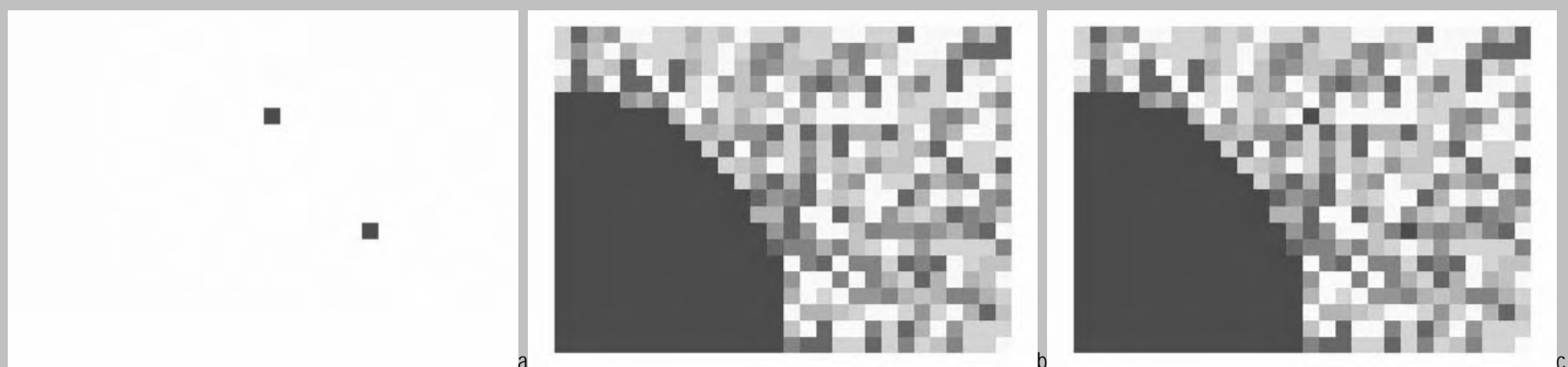


Figura 7.10: inputs utilizados no experimento com variações no valor de  $\psi$  (phi), para simular vazios urbanos; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1 e aleatórias com valor de 1 a 2; c) superposição de carregamentos e resistências.

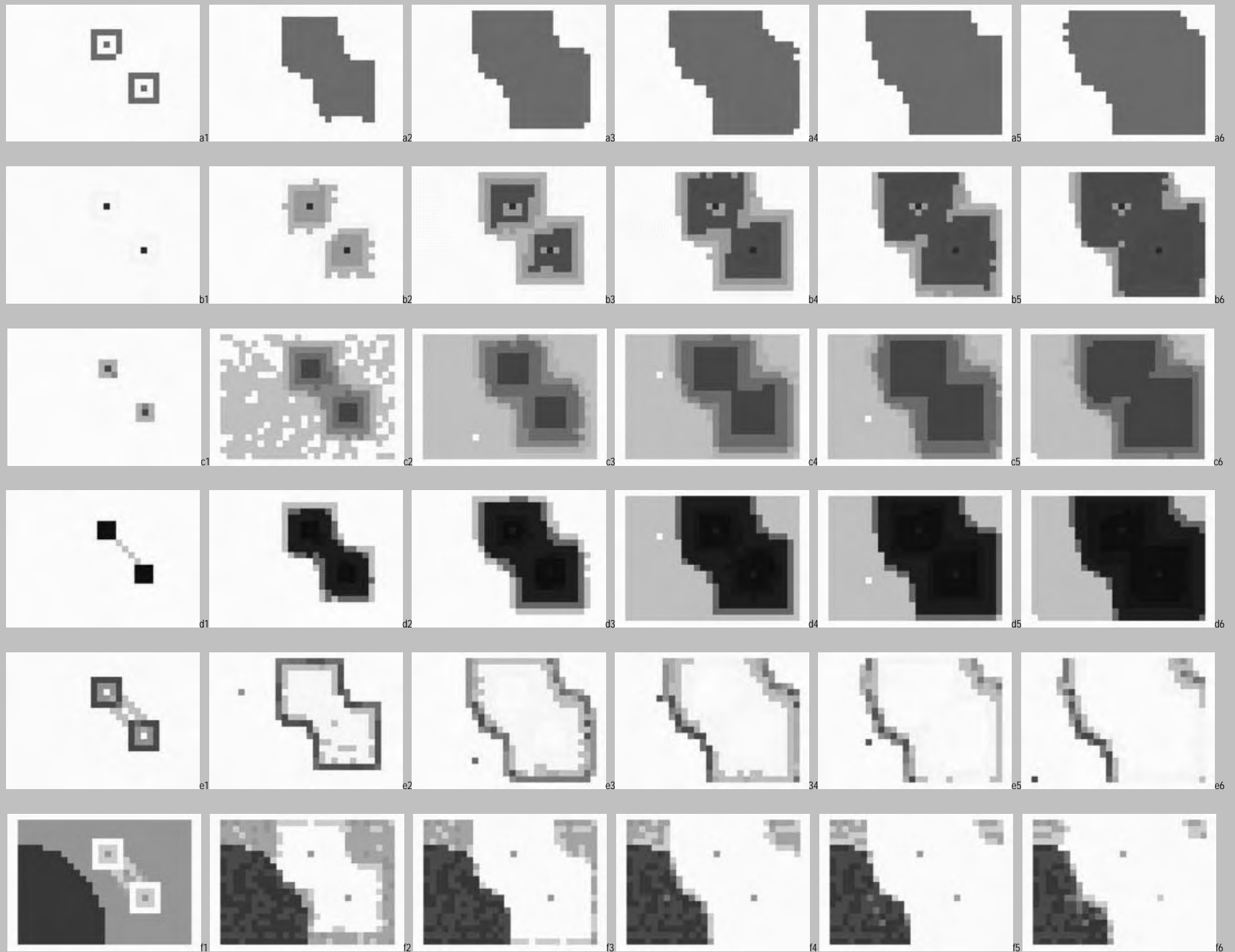


Figura 7.11: output da simulação sem indução de formação de vazios, utilizando  $\psi$  ( $\phi$ ) igual a 0,00, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE.

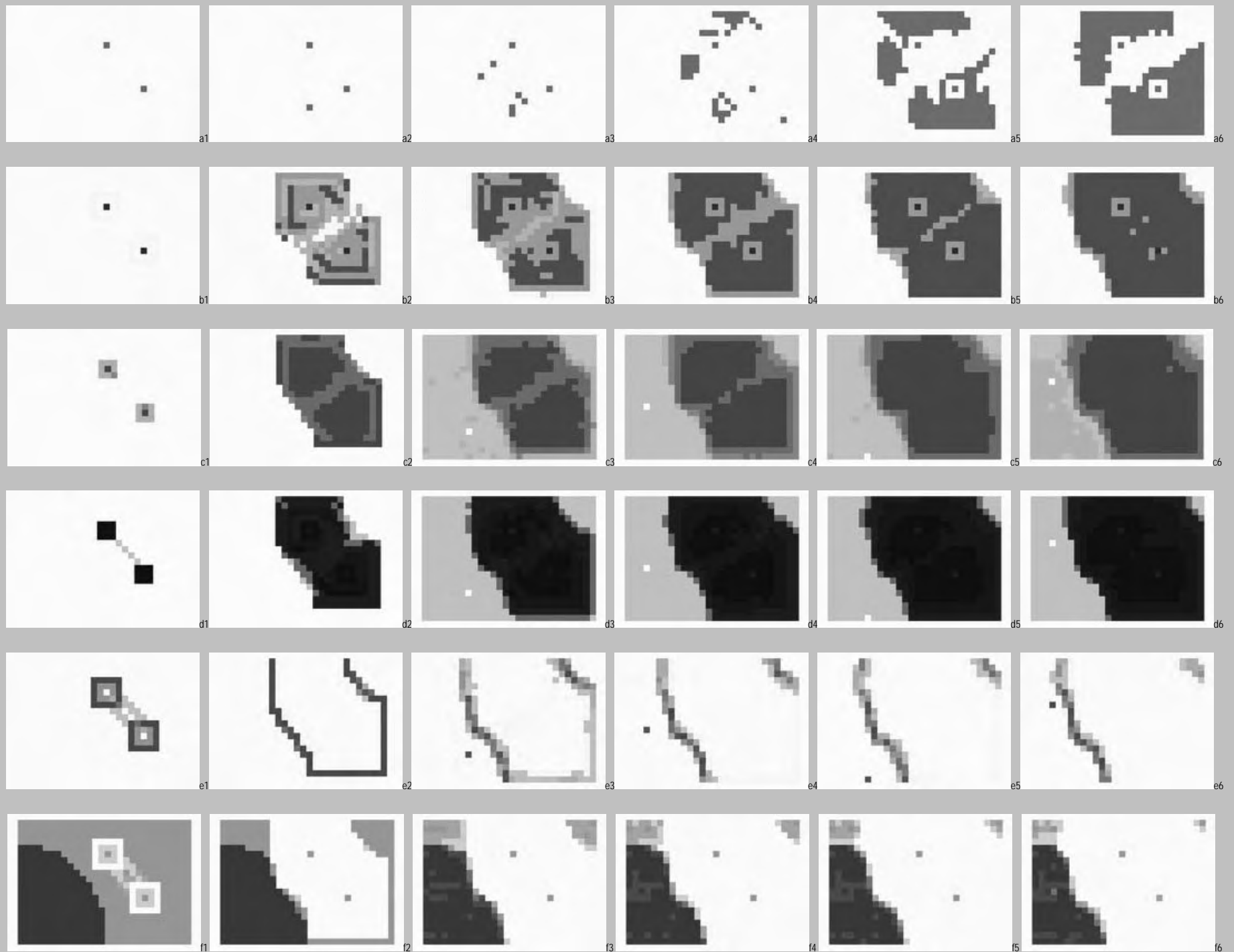


Figura 7.12: output da simulação com indução de formação de vazios, utilizando  $\psi$  (phi) igual a 0,50, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE.



A simulação sem formação de vazios urbanos (figura 7.11) mostra a constituição de uma área de células com fenótipo urbano contínua, com os maiores carregamentos concentrados nas células iniciais e no seu entorno; a distribuição de centralidades segue padrão semelhante, com os máximos localizados na zona de entorno das células iniciais e os mínimos fora da área urbana e na sua interface com a área convertida; os potenciais de crescimento aparecem concentrados na borda da área que vai sendo convertida para o fenótipo urbano e vai acompanhando sua evolução, tendendo à forma de uma linha de contorno; por fim as resistências são consumidas de modo proporcional à conversão de células para o fenótipo urbano e à ocorrência de potenciais difusos no sistema.

A simulação com de formação de vazios urbanos (figura 7.12) mostra um processo de conversão de células para o fenótipo urbano diferente do caso anterior, agora com tendência à dispersão no início da simulação e formação de duas áreas urbanas separadas por um vazio de células que não foram convertidas pelo processo de urbanização (figura 7.12, série a); todavia, ao observar a distribuição de carregamentos urbanos (figura 7.12, série b), pode ser vista uma mancha quase homogênea, presente inclusive nas células do vazio referido; esse resultado indica a ocorrência de mudança nas características naturais das células, porém sem sua anexação ao tecido urbano, o que é justamente o que ocorre em grande parte dos vazios urbanos reais que ocorrem nas cidades contemporâneas. A distribuição de centralidades se assemelha ao caso sem a indução de formação de vazios, porém é mais rarefeita nas células intermediárias às iniciais, onde se localiza o vazio (figura 7.12, séries c, d); o potencial é marcadamente de interface, mais linearizado e mais concentrado que no caso anterior (figura 7.12, série e). Por fim, as resistências naturais são consumidas de modo quase igual ao caso sem indução de vazios urbanos, mostrando que as células tiveram seus atributos naturais modificados, porém sem assumir características de tecido urbanizado (figura 7.12, série f); esse resultado, além de aproximar do que acontece nos vazios urbanos reais, diferencia as células das pertencentes a zonas de ambiente natural preservado, nas quais a permanência dos atributos naturais é um fundamento.

Além de demonstrar a habilidade do modelo de simulação de crescimento para simular a formação de vazios urbanos, o experimento permite três observações principais: a) vazios urbanos são formados através de conversões de território remotas e fragmentadas, ao redor das quais se desenvolvem núcleos urbanos separados, formando descontinuidades espaciais no processo de conversão, localizadas em função dos núcleos urbanos descontíguos com os preexistentes; b) assumindo que essas descontinuidades espaciais são esperadas na dinâmica urbana, como vem sendo demonstrado ao longo deste trabalho, vazios urbanos também podem ser esperados como componentes do tecido urbano, assumindo papel estrutural no processo de formação da cidade; c) vazios urbanos podem ter localização coincidente com zonas de conservação natural, porém não se confundem com elas por terem os atributos naturais preexistentes modificados, bem como por apresentarem baixos potenciais de crescimento. Sendo deste modo, do ponto de vista da morfologia urbana e diferentemente do comumente é afirmado, vazios urbanos se apresentam como integrados ao processo de conversão de território, estando sua retenção especulativa mais próxima da apropriação de um fenômeno espacial do que de sua produção intencional.

## 7.5 Formação de periferias urbanas

Periferias urbanas podem ser compreendidas pelos seus aspectos sócio-econômicos e morfológicos, sendo predominantemente habitadas por população de baixa renda e tradicionalmente localizadas nos lugares mais distantes do centro da cidade, concentrando piores condições de infra-estrutura, de serviços, de equipamentos e de facilidades urbanas de um modo geral (Fernandes, 1997). Esse significado pode ser alargado ao considerar também como periferia urbana as ocupações remotas habitadas por população em quaisquer classes de renda, o que inclui desde as franjas com má qualidade de urbanização, comuns nos países latino-americanos (Bayón e Gasparini, 1977), até os novos núcleos sem continuidade com o tecido da cidade preexistente, conhecidos como *urban sprawl* na América do Norte (Frank, 2000).

No SACI, conforme foi exposto no Capítulo 3, anteriormente, periferias urbanas podem ser simuladas através da distribuição de tensões difusas de crescimento, assumindo que sua formação é probabilística e dependente da distribuição de centralidades e de resistências naturais ao crescimento urbano, do seguinte modo: a) a probabilidade de haver formação de periferia de baixa renda é diretamente proporcional a baixas centralidades e a altas resistências naturais; b) a probabilidade de ocorrer formação de periferias de média-alta e de alta renda é diretamente proporcional a altas centralidades e a baixas resistências naturais. Na regulação padrão do modelo estão alocadas 20% das tensões para o primeiro caso e 20% para o segundo caso (através das tensões difusas de tipo 1 e de tipo 2, respectivamente), somando 40% para as tensões difusas, sendo alocados os mesmos 20% para as distribuições de tensões axiais, axiais de *buffer* e polares.

Para simular a formação de periferias urbanas e observar seus efeitos no sistema urbano em crescimento, está realizado um experimento com três casos: a) crescimento com distribuição de tensões igual a 20% para todos os tipos (axiais, axiais de *buffer*, polares, difusas de tipo 1 e difusas de tipo 2), que é o padrão do modelo (figura 7.14); b) crescimento com distribuição de tensões igual a 100% para as difusas de tipo 1 (figura 7.15); c) crescimento com distribuição de tensões igual a 100% para as difusas de tipo 2 (figura 7.16). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.13, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células, estando os *grids* com os resultados e as interpretações na seqüência.

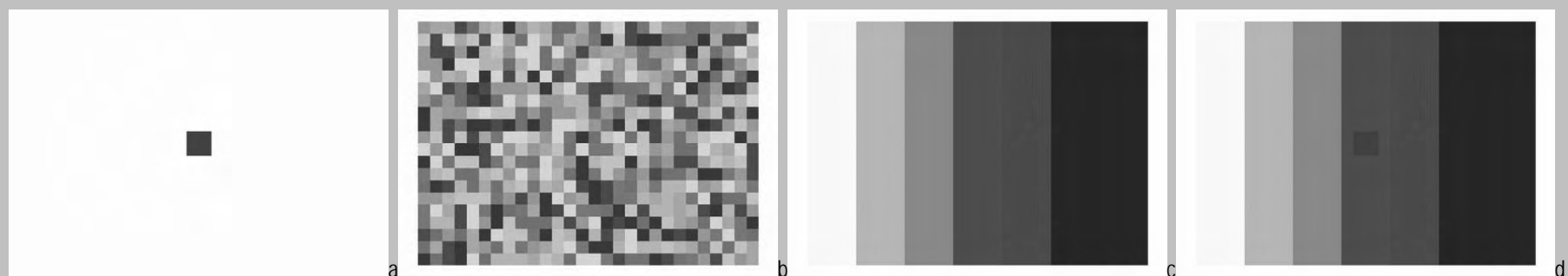


Figura 7.13: inputs utilizados no experimento com variações no valor das tensões, para simular formação de periferias; a) carregamentos com valor igual a 1, com quatro células no centro do grid; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) resistências com valores de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7; d) superposição dos carregamentos e das resistências com valores de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

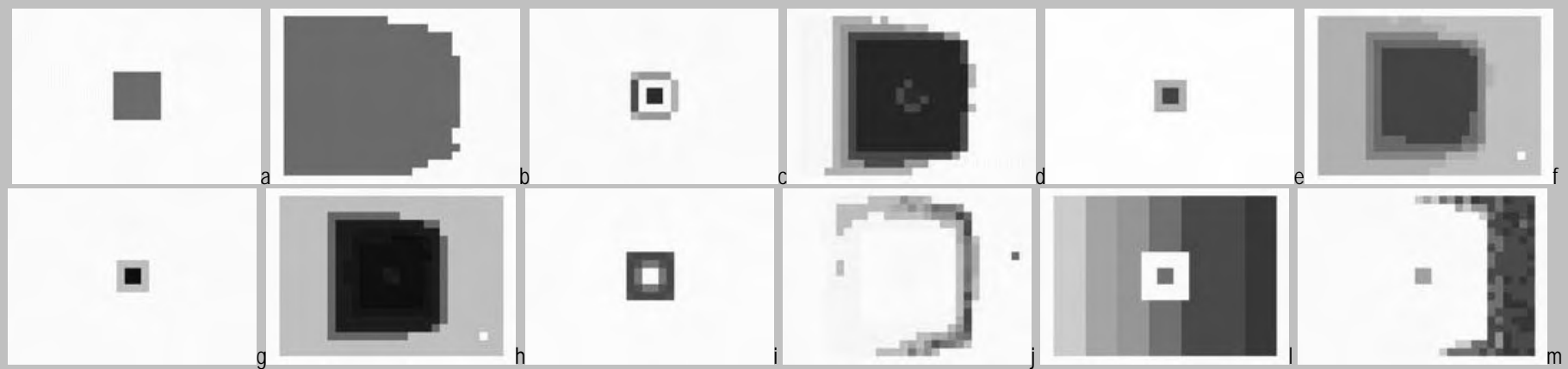


Figura 7.14: outputs das simulações com distribuições de tensões de 20% para todos os tipos (axial, axial de buffer, polar, difuso tipo 1 e difuso tipo 2; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 1; l) ResistE na iteração 32.

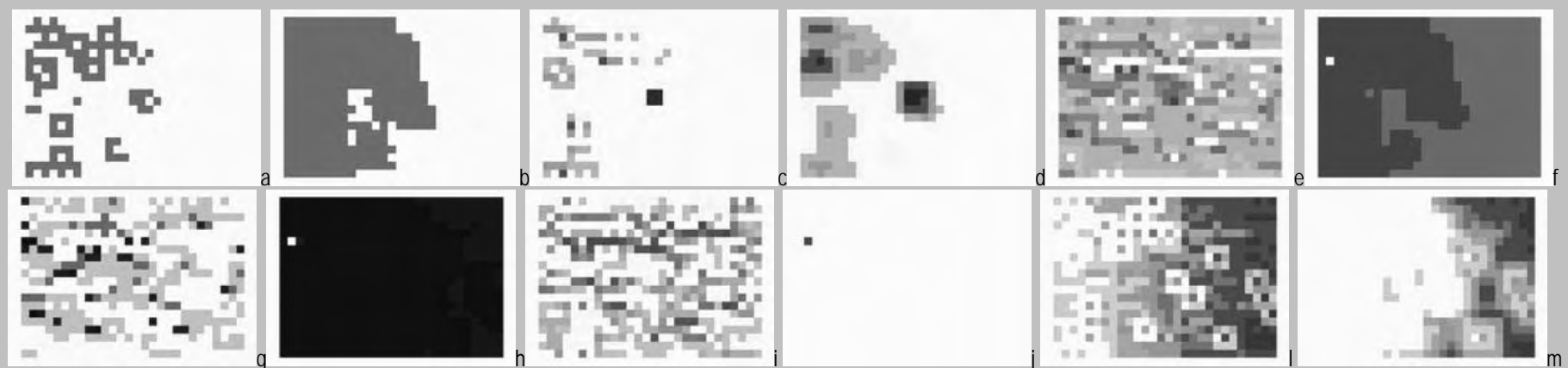


Figura 7.15: outputs das simulações com distribuições de tensões de 100% para difuso tipo 1; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 1; l) ResistE na iteração 32.

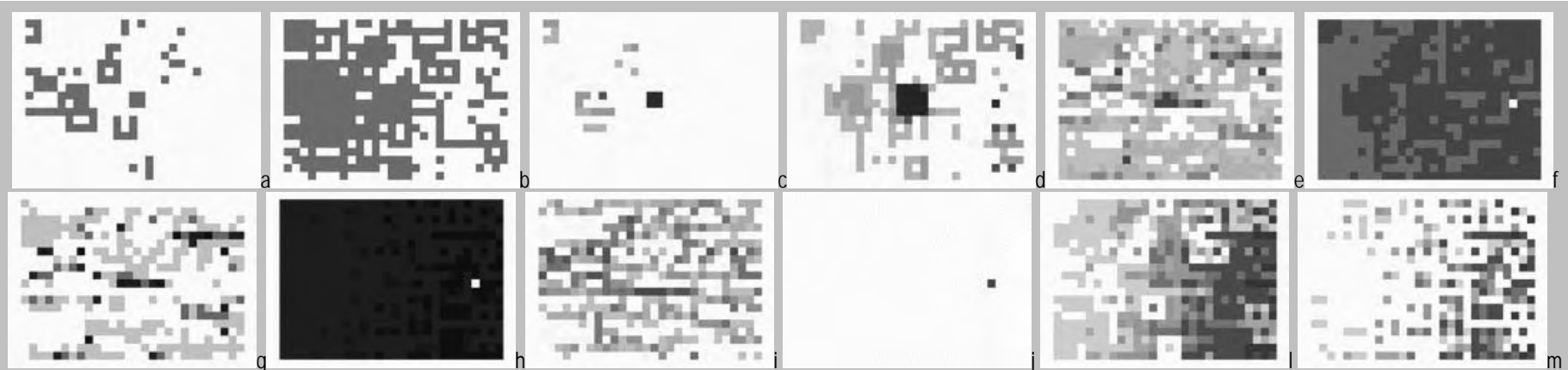


Figura 7.16: outputs das simulações com distribuições de tensões de 100% para difuso tipo 2; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 1; l) ResistE na iteração 32.

O caso simulado com 20% de distribuição para todos os tipos de tensões é o padrão do modelo (figura 7.14), o qual já inclui 20% para as distribuições difusas de tipo 1 e 20% para as difusas de tipo 2; esse experimento serve aqui para ser comparado com os que consideram exclusivamente as tensões difusas como geradoras de crescimento, encarregadas de simular periferias urbanas de modo dedicado. Os resultados mostram uma mancha urbana contínua e homogênea tendendo à esquerda do *grid* (figura 7.14 a, b), onde as resistências têm valor inicial menor; desse modo assimétrico se comportam os carregamentos urbanos e a distribuição de centralidades, com máximos localizados na área central do *grid* (figura 7.14 c, d, e, f, g, h); os potenciais máximos assumem a forma de linha e se acumulam na interface da zona urbanizada com a não urbanizada, como tem sido comum nas demais simulações; por fim as resistências mudam do gradiente implementado no *input* para restar à direita do *grid*, em oposição à área urbanizada final.

O segundo caso simulado está regulado para simular crescimento utilizando 100% da distribuição de tensões como difusas de tipo 1, cuja localização é probabilística e proporcional às menores resistências e às maiores centralidades; o experimento representa a formação de ocupações características de classes econômicas média-alta e alta, semelhante ao padrão conhecido como *urban sprawl*. Todos os *outputs* diferem do caso anterior, com as seguintes características principais (figura 7.15): a) as células com fenótipo urbano vão aparecendo de modo difuso, chegando ao final da simulação com a presença de descontinuidades internas, embora concentradas à esquerda do *grid*, em função do original acúmulo de menores resistências e da formação de maiores centralidades; b) os carregamentos urbanos se mantêm fragmentados durante toda a simulação, chegando ao final com uma típica configuração de *urban sprawl*, onde valores elevados de estoques construídos se localizam na periferia e com independência locacional dos máximos de áreas geometricamente centrais; c) a distribuição de centralidades inicia fragmentada e tende a se tornar menos diferenciada ao final da simulação, com os valores maiores tendendo para as mesmas áreas de acúmulo de células urbanas e de carregamentos máximos; d) os potenciais de crescimento são difusos durante toda a simulação, tendendo à minimização por diminuição de diferenciação espacial, provocada pela repetição do padrão de dispersão do experimento; e) embora sem a homogeneidade do caso anterior, as resistências naturais tendem ao lado direito do *grid*, em oposição ao agrupamento de células urbanizadas.

O terceiro caso simulado utiliza 100% da distribuição de tensões como difusas de tipo 2, cuja localização é probabilística e proporcional às maiores resistências e às menores centralidades, correspondendo à formação de periferias de classes econômicas baixas, freqüentemente referidas como espaços urbanos de segregação espacial (Lago, 2000). Os resultados são diferentes dos dois casos anteriores, podendo ser destacadas as seguintes características principais (figura 7.16): a) as células convertidas para o fenótipo urbano mantêm um padrão difuso durante toda a simulação, de modo mais intenso do que caso anterior; é notável como nesse experimento, diferentemente dos dois casos anteriores, ocorre elevada conversão de células onde as resistências são maiores (área direita do *grid*), conforme condições iniciais da simulação; b) os carregamentos urbanos também se mantêm difusos durante toda a simulação, resultando num padrão de acúmulo de valores máximos na área geometricamente central (onde estavam as células urbanas que originaram a simulação) associado à presença de células com carregamento mé-

dio espalhadas pelo *grid* e com localização migrante da área de menores resistências para maiores resistências (da esquerda para a direita); esse resultado permite três observações, a saber: b.1) a formação de periferias de baixa renda não determina deslocamento na implantação dos estoques construídos em área centrais, mas sim contribui para sua concentração; b.2) ao início da simulação os carregamentos urbanos pendem para o lado das menores resistências, porém migram em maioria para o lado das maiores, o que pode estar associado ao processo de ocupação e edificação em áreas crescentemente mais distantes das preexistentes, o que tem sido chamado de processo de expulsão por diversos autores (Maricato, 1979, Piquet e Ribeiro, 1991); b.3) a localização dos estoques construídos é mais instável e com maior variação entre as células contíguas do que nos casos anteriores, o que pode estar associado à menor durabilidade edilícia e aos processos de renovação urbana (Lamas, 1993); c) embora a ligeira tendência de concentração para o lado direito do *grid*, a distribuição de centralidades mantém um padrão difuso durante toda a simulação; uma diferença fundamental dos casos anteriores é a relação com a conversão de território, que ocorre com maior frequência no lado oposto dos maiores valores de centralidade, como pode ser constatado comparando os estados finais da simulação (figura 7.16 b, h); d) o padrão de localização dos potenciais de crescimento é muito semelhante ao do caso anterior, embora com inversão nos sítios de máximos e mínimos, conforme esperado (figura 7.16 i, j) por fim as resistências resultam numa distribuição mais fragmentada que nos casos anteriores, em função da dispersão dos potenciais de crescimento.

Como ficou demonstrado no experimento, a possibilidade de implementar distribuição de tensões difusas permite aproximar as simulações da formação de periferias urbanas, induzindo a formação de núcleos remotos em relação ao centro que origina o crescimento e seguindo dois padrões, cada um com três características principais: a) padrão de periferia de classes econômicas média-alta e alta, que preferem os lugares com melhores condições naturais e facilidades urbanas (menores resistências e maior centralidade, no modelo; figura 7.15); suas principais características são as seguintes: a.1) conversão de células para o fenótipo urbano concentradas em lugares mais qualificados; a.2) carregamentos urbanos polinucleados, com máximos no centro e em focos remotos; a.3) distribuição de centralidades homogênea; a.4) potencial e resistências difusos; b) padrão de periferia de classes econômicas baixa, que normalmente ocupam os lugares com condições naturais mais restritivas e menor custo de aquisição (maiores resistências e menor centralidade, no modelo; figura 7.16); suas características principais são as seguintes: b.1) conversão de células para o fenótipo urbano em padrão difuso e com elevada frequência em áreas menos qualificadas; b.2) carregamentos urbanos concentrados no centro e difusos no resto do *grid*; b.3) distribuição de centralidade difusa; b.4) potencial e resistências difusos.

Considerando os resultados anteriores, diferentes padrões de dispersão de células urbanas e de concentração dos carregamentos podem ser assumidos como indicadores de formação de periferias urbanas por classes de renda, sendo que: a) no caso das classes de renda mais elevada, as células urbanas resultam menos dispersas e os carregamentos mais concentrados, b) no caso das classes de renda menos elevada, tanto a conversão para o fenótipo urbano como os carregamentos são mais dispersos e menos concentrados (ver gráficos 7.2a e 7.2b, a seguir).

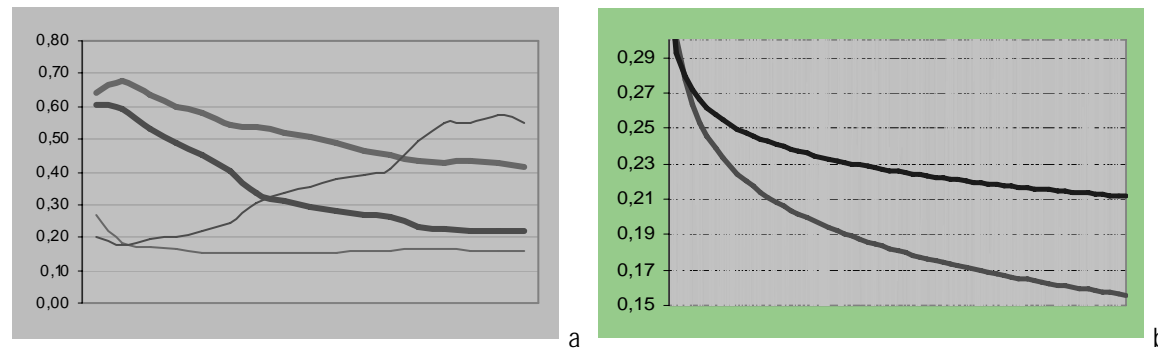


Gráfico 7.2: comparação dos resultados das simulação para o caso de periferias do tipo urban sprawl (traço vermelho) e tipo ocupação de baixa renda (traço azul); a) fragmentação relativa (traço largo) e compacidade relativa (traço fino), em 32 iterações; b) valor do carregamento urbano na iteração 32, mostrando as linhas de tendência (traço largo, em primeiro plano) e o valor para cada célula (traço fino, em segundo plano).

Considerando os padrões de resultados obtidos nas simulações que destacam a formação de periferias urbanas, suas localizações podem ser encontradas superpondo mapas de carregamentos urbanos e centralidades, assumindo que: a) periferias ocupadas por população de média-alta e alta renda do tipo *urban sprawl* aparecem onde há valores médios de carregamento urbano com alta centralidade; b) periferias ocupadas por população de baixa-renda aparecem onde há valores baixos de carregamento urbano e de centralidade. A figura 7.17, abaixo, revela essas localizações, através álgebra de mapas.

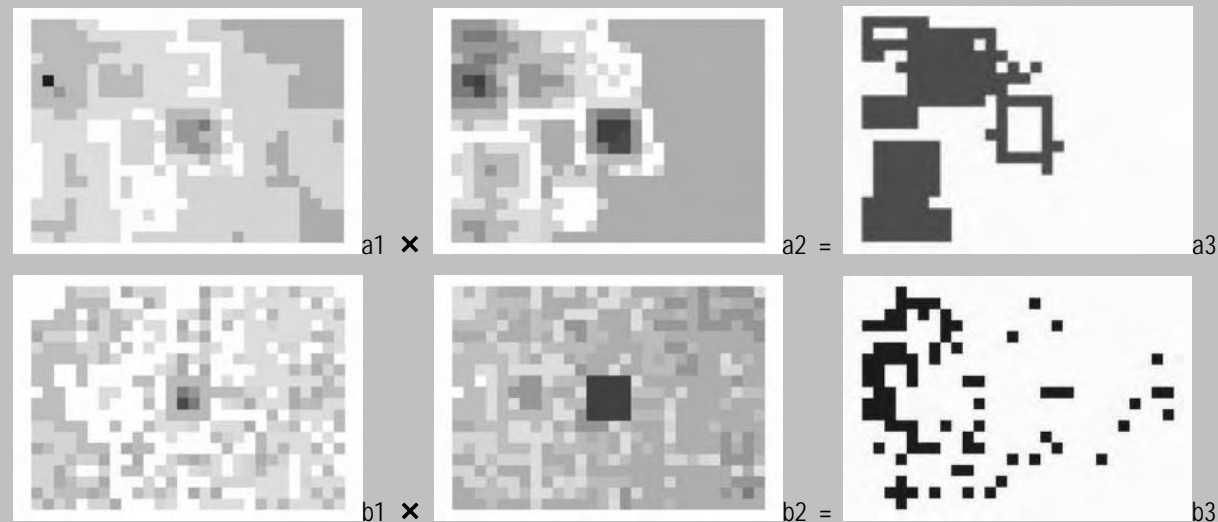


Figura 7.17: localização provável de periferias urbanas (3) considerando carregamentos urbanos (1) e centralidades (2), a partir de álgebra de mapas; a) para o caso de periferias do tipo urban sprawl; b) para o caso de periferias do tipo baixa renda; os carregamentos urbanos e as centralidades estão mostrados por 1/4 do desvio padrão da média; os outros dois são booleanos.

É notável em todos os experimentos deste subtítulo, bem como no conjunto de simulações empreendidas neste trabalho, como aparece um comportamento diferenciado para a interface do ambiente urbanizado com o não urbanizado, lugar que vem sendo denominado freqüentemente de franjas urbanas ou, em dinâmica de autômatos celulares, de *edge of chaos* (respectivamente Bazant, 2001 e Eck, 2004), sugerindo que peculiaridades dessa interface podem ajudar a compreender a lógica configuracional das periferias urbanas; nesse caminho, é possível assumir que a dinâmica urbana e a configuração resultante induzem o aparecimento de periferias na borda da cidade, o que pode ser interpretado como uma dimensão morfológica do processo de periferização.

## 7.6 Obsolescência e revitalização no crescimento urbano

Crescimento urbano pode ser influenciado por processos de obsolescência e de revitalização (Batty, 1998), ocorridos pelo passar do tempo ou pela ação do homem; enquanto que o primeiro pode ser entendido pela degradação de estruturas físicas ou funcionais, o segundo representa a recuperação dessas estruturas, normalmente por ação exógena (Zancheti, 1998). Simulações de dinâmica urbana vêm crescentemente incorporando processos de obsolescência, tradicionalmente formulados pelas abordagens econômicas do espaço, provenientes agora da dimensão ecológica com que podem ser observadas as transformações na cidade (Alberti, 1999).

O SACI permite simular depreciação positiva ou negativa nos estoques construídos, imputando um parâmetro de progressão geométrica exógeno nos carregamentos urbanos, reincidente a cada iteração; para isso, um parâmetro  $\mu$  ( $m_i$ ) está introduzido nas regras de crescimento urbano, podendo ser regulado com valores menores que 1,00 para simular obsolescência e com valores maiores que 1,00 para simular revitalização; diferentes regulagens de  $\mu$  geram então resultados comparáveis, permitindo compreender os efeitos da obsolescência e da revitalização no conjunto.

As simulações dedicadas a observar obsolescência e revitalização dos estoques construídos estão realizadas mediante dois experimentos, cada um com três casos: a) experimento com obsolescência crescente dos estoques construídos; a.1) valor de  $\mu$  igual a 1,00 para simular obsolescência nula (figura 7.19); a.2) valor de  $\mu$  igual a 0,90 (figura 7.20); a.3) valor de  $\mu$  igual 0,80 (figura 7.21); b) experimento com revitalização crescente; b.1) valor de  $\mu$  igual a 1,00 para simular revitalização nula (figura 7.22); b.2) valor de  $\mu$  igual a 1,10 (figura 7.23); b.3) valor de  $\mu$  igual a 1,20 (figura 7.24). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.18, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células, estando os resultados e as interpretações adiante.

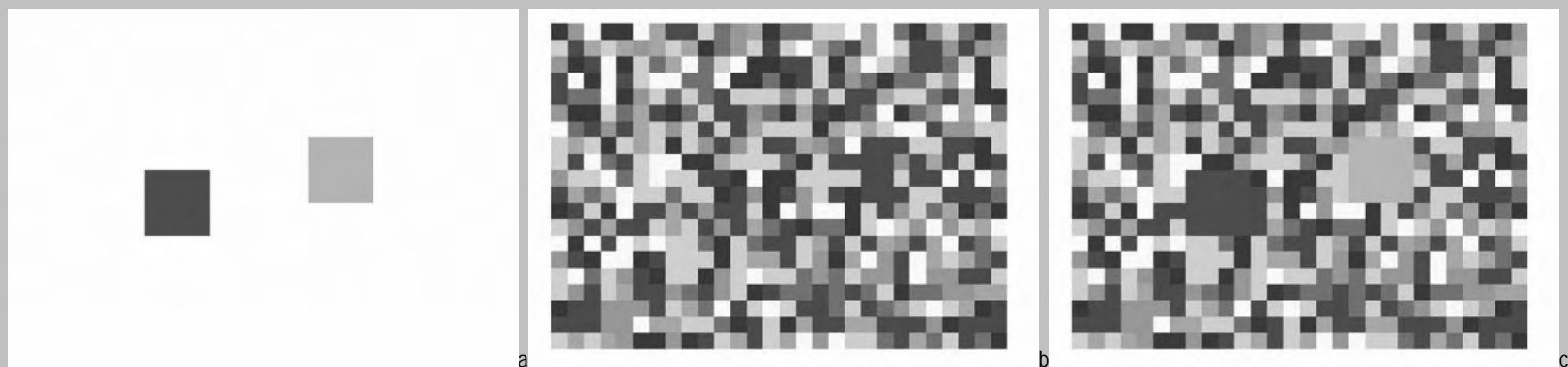


Figura 7.18: inputs utilizados nos experimentos com variações no valor de  $\mu$  ( $m_i$ ), para simular obsolescência e revitalização dos estoques construídos; a) carregamentos com valores de 10 e 9; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.

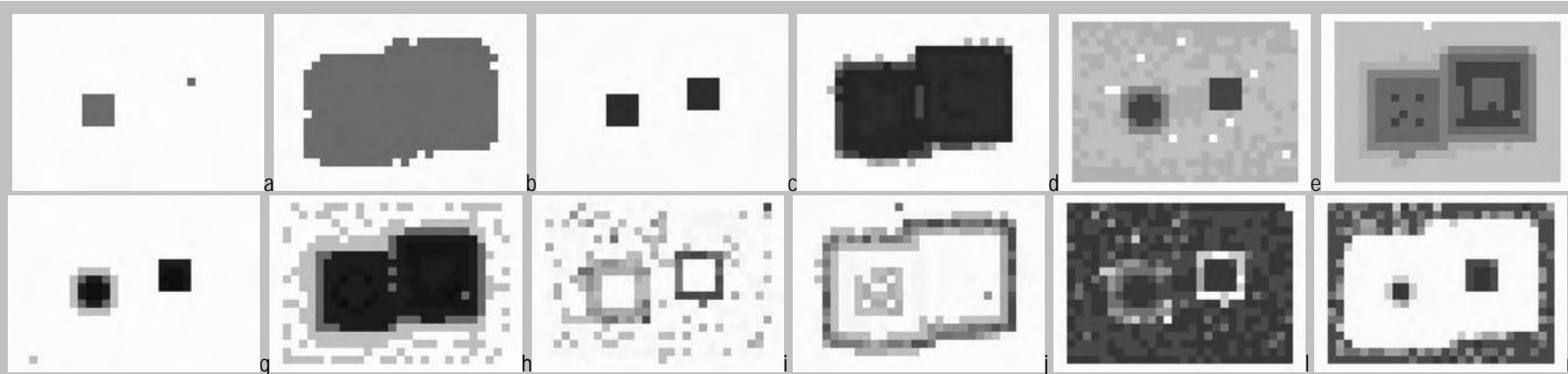


Figura 7.19: outputs das simulações de obsolescência nula dos estoques construídos, utilizando  $\mu$  ( $m_i$ ) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

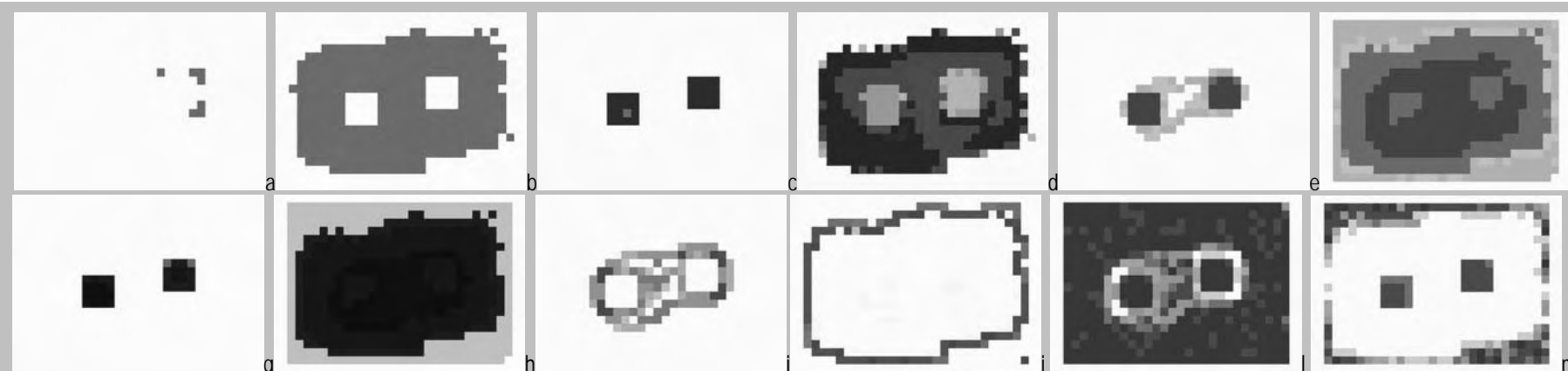


Figura 7.20: outputs das simulações de obsolescência dos estoques construídos, utilizando  $\mu$  ( $m_i$ ) igual a 0,90; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

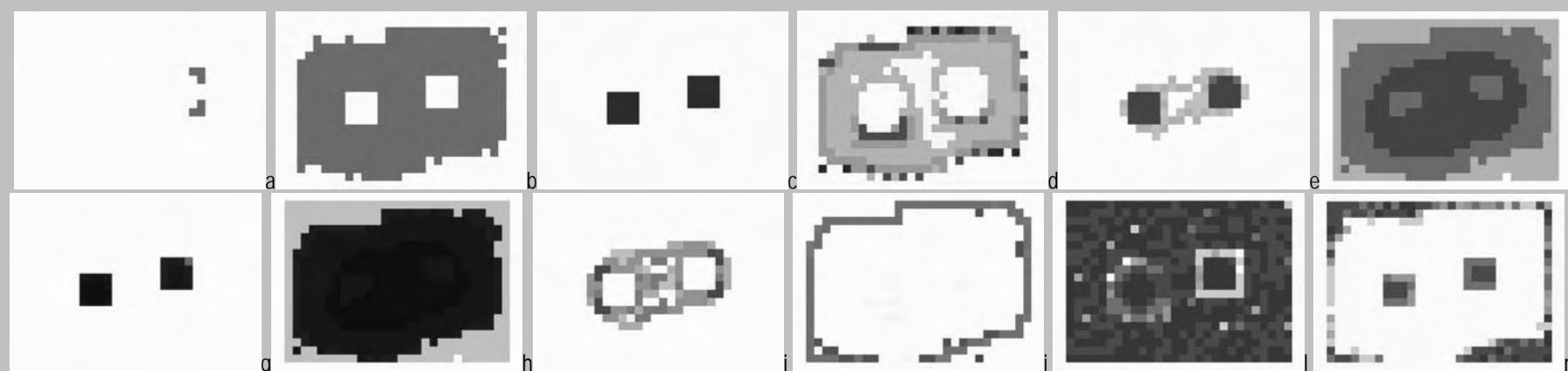


Figura 7.21: outputs das simulações de obsolescência dos estoques construídos, utilizando  $\mu$  ( $m_i$ ) igual a 0,80; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.



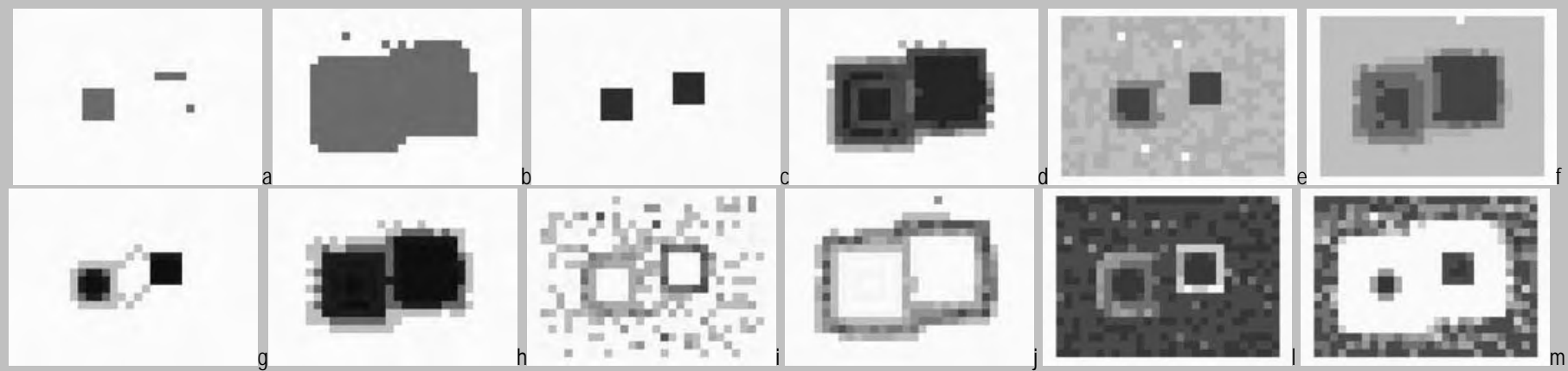


Figura 7.22: outputs das simulações de revitalização nula dos estoques construídos, utilizando  $\mu$  ( $m_i$ ) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

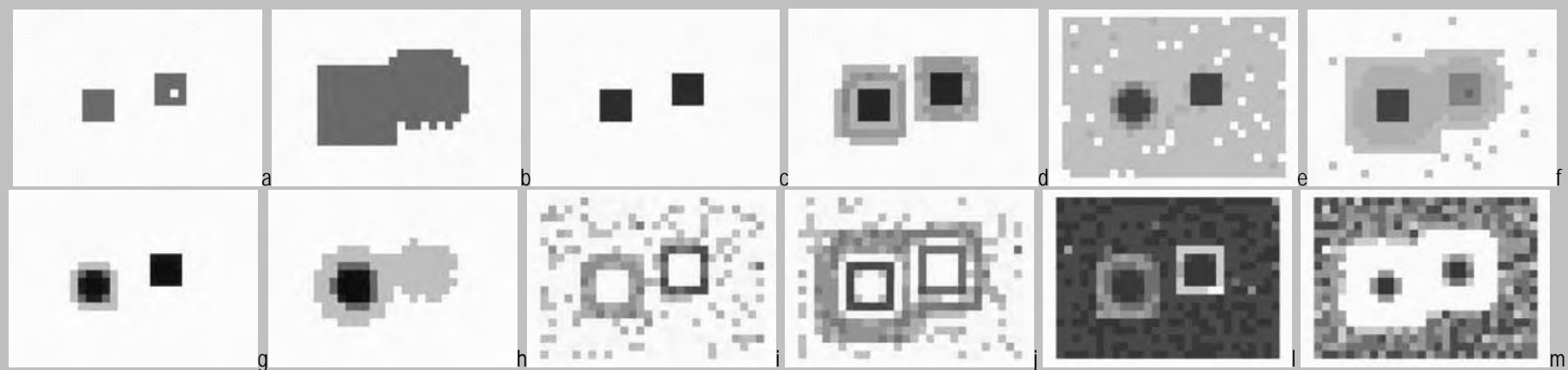


Figura 7.23: outputs das simulações de revitalização dos estoques construídos, utilizando  $\mu$  ( $m_i$ ) igual a 1,10; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

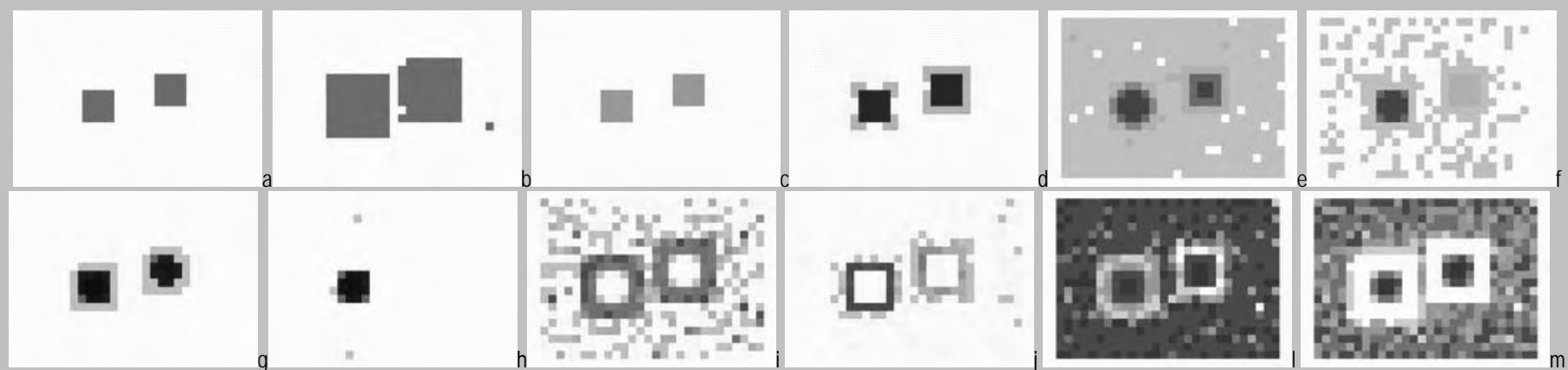


Figura 7.24: outputs das simulações de revitalização dos estoques construídos, utilizando  $\mu$  ( $m_i$ ) igual a 1,20; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

Os casos com obsolescência dos estoques construídos (figuras 7.20 e 7.21) mostram um processo de decadência das células que deram origem à simulação, as quais têm o carregamento progressivamente diminuído pela ação do parâmetro  $\mu$ ; com o avançar das iterações, a distribuição de centralidades fica mais espalhada e mais indiferenciada, o que pode ser interpretado como uma simplificação do sistema (mais células com valores semelhantes e maior aproximação entre valores máximos e mínimos); o potencial torna-se mais linear com o aumento da intensidade da obsolescência, sendo que as resistências não mudam significativamente. Os casos com revitalização dos estoques construídos (figuras 7.23 e 7.24) mostram um processo inverso, diminuindo a conversão de território e concentrando os carregamentos urbanos de modo diretamente proporcional ao aumento do parâmetro  $\mu$ ; a distribuição de centralidades aparece também concentrada, o que é acompanhado por um potencial de crescimento com menos abrangência territorial e por menos consumo de resistências. Esse experimento registra intensa acumulação de problemas ambientais intra-urbanos nas áreas onde os estoques construídos foram estimulados, por superação dos limites de urbanização, como está mostrado na figura 7.25 e no gráfico 7.3, abaixo.



Figura 7.25: outputs das simulações de revitalização dos estoques construído, mostrando os problemas ambientais intra-urbanos acumulados; a) utilizando  $\mu$  (mi) igual a 1,00; b) utilizando  $\mu$  (mi) igual a 1,10; c) utilizando  $\mu$  (mi) igual a 1,20.

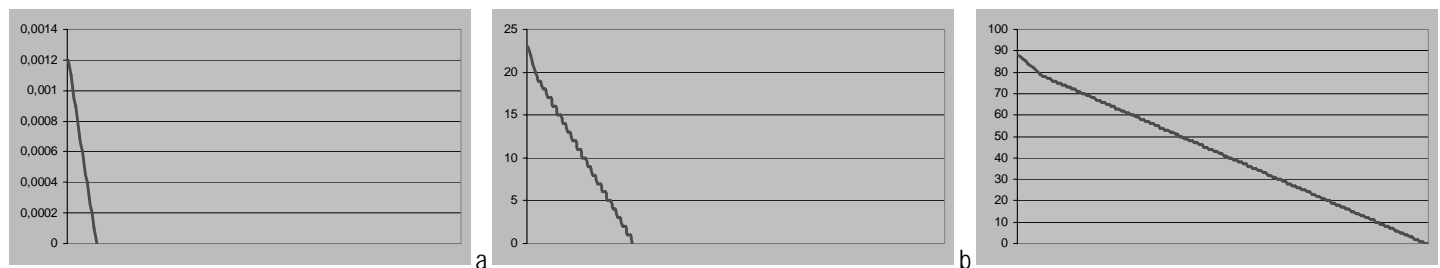


Gráfico 7.3: outputs das simulações de revitalização dos estoques construído, mostrando os problemas ambientais intra-urbanos acumulados; a) utilizando  $\mu$  (mi) igual a 1,00 (máximo igual a 0,0012); b) utilizando  $\mu$  (mi) igual a 1,10 (máximo igual a 28); c) utilizando  $\mu$  (mi) igual a 1,20 (máximo igual a 80).

Em resumo, os experimentos com obsolescência e revitalização mostraram a capacidade de o modelo de simulação de crescimento simular esses dois processos, sugerindo dois efeitos principais: a) no caso da obsolescência, pode ser assumido que esse processo implica numa homogeneização do sistema, com menos afastamento entre mínimos e máximos; b) no caso da revitalização, pode ser percebido que os estoques construídos se concentram e que diminui a conversão de território, o que é acompanhado por crescente superação da capacidade de suporte das células urbanas antecessoras, fazendo com que o potencial seja utilizado para a diminuição dos carregamentos que superam o limiar. Sendo desse modo, os resultados com obsolescência podem representar processos de abandono de áreas centrais, bem como os resultados com revitalização se aproximam de transformações urbanas com aumento real no coeficiente de aproveitamento do solo e com esgotamento das infraestruturas.

### 7.7 Raios de interação, raios de vizinhança, mono e policentralidade

Raios de interação indicam o alcance das entidades espaciais de um sistema, ao interagirem com as demais, (Weber, 2003), enquanto que raios de vizinhança indicam a extensão do entorno de uma entidade espacial que influencia seu estado atual e suas possíveis transformações (Weimar, 1996); enquanto que os primeiros têm origem nos modelos baseados em grafos, os segundos advêm dos modelos baseados em CAs – autômatos celulares (respectivamente Diestel, 2000; Wolfran, 2002). No SACI, raios de interação são utilizados para o cálculo da centralidade celular (utilizando técnicas de grafos), enquanto que raios de vizinhança têm função para o cálculo do potencial de crescimento (utilizando técnicas de autômato celular). Mudanças nos raios de interação e nos raios de vizinhança acarretam diferentes resultados nas simulações, podendo induzir a formação de mono ou de policentralidade, questões que têm mantido importância nas discussões sobre a cidade (Mancuso, 1978; Pesci, 1999; Batty, 2001), sendo que os trabalhos de modelagem em andamento aqui permitem simular seu aparecimento e contribuir para a explicação de seus processos de formação. Nesse caminho, está sugerido que a policentralidade ocorre em função de limitações nos processos de interação que ocorrem na cidade, o que torna as parcelas mais independentes e induz a formação de múltiplos centros.

Para observar a influência dos raios de interação e dos raios de vizinhança sobre o crescimento urbano estão realizados dois experimentos, cada um com quatro casos: a) experimento 1, com carregamentos e resistências dispersos aleatoriamente no *grid* (figura 7.27); b) experimento 2, com carregamentos mononucleados e resistências dispersas (figura 7.28). Esses experimentos (conforme figura 7.26, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células), estão submetidos a quatro condições de crescimento, alcançadas por regulagens dos parâmetros raios de interação e raio de vizinhança, a saber: a) raios de interação com valor máximo e raios de vizinhança com valor mínimo, que são o padrão do modelo (séries a, b, das figuras adiante); b) raios de interação e de vizinhança com valor máximo (séries c, d, das figuras adiante); c) raios de interação e de vizinhança com valor mínimo (séries e, f, das figuras adiante); d) raios de interação com valor mínimo e raios de vizinhança com valor máximo (séries g, h, das figuras adiante).

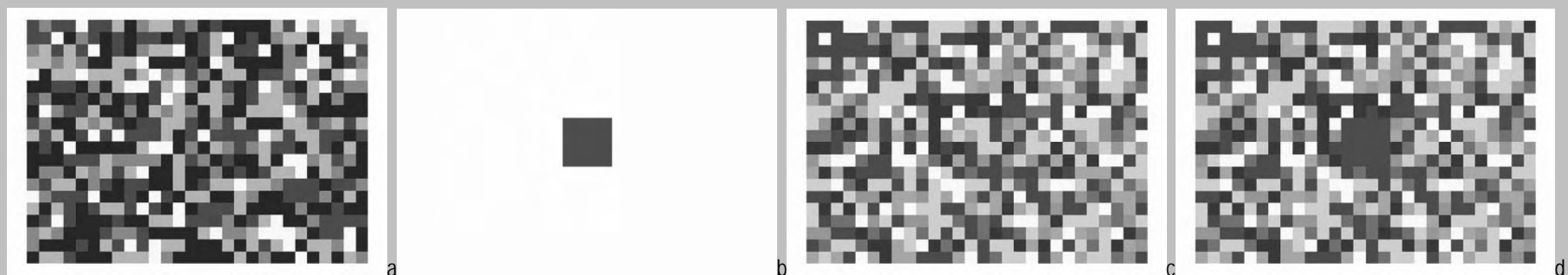
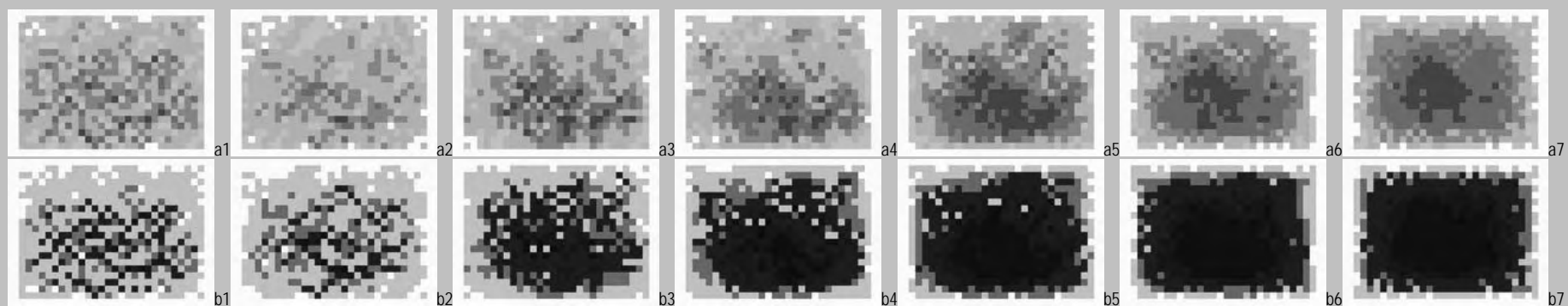
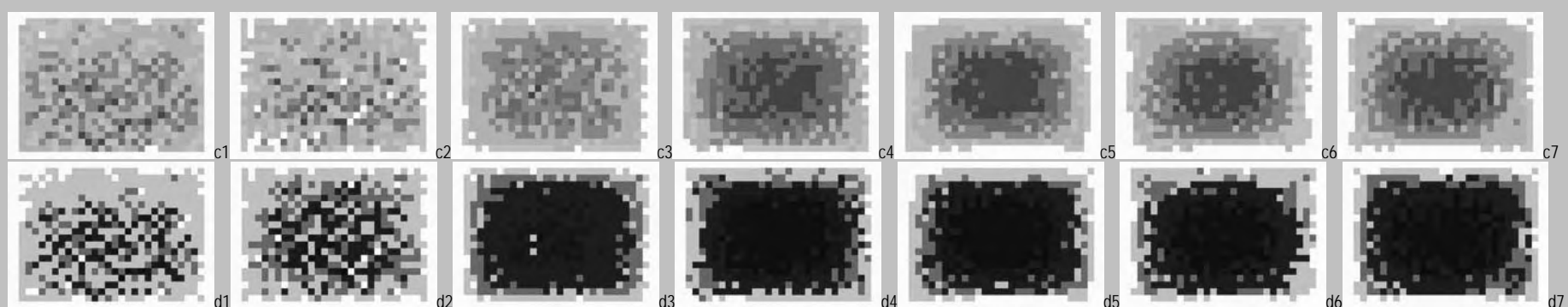


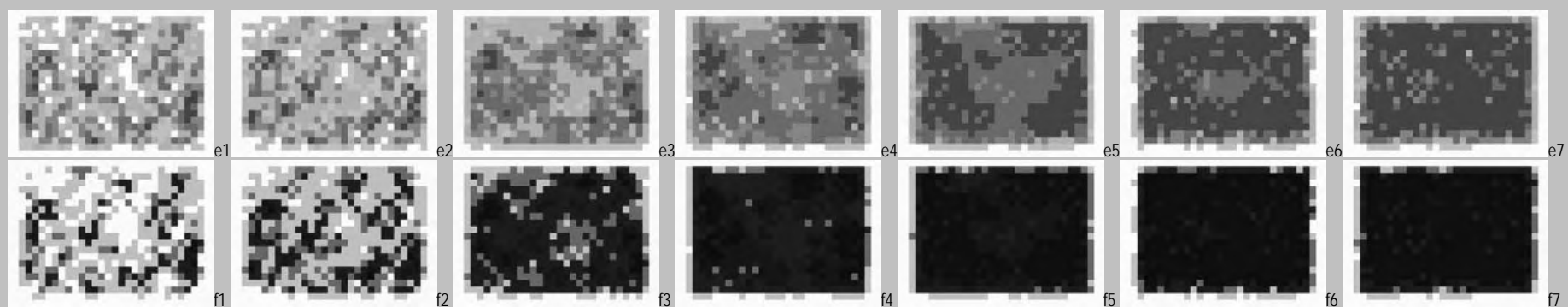
Figura 7.26: inputs utilizados nos experimentos com variação de raios de interação e de vizinhança, de modo a simular mono e policentralidade; a) carregamentos aleatórios com valores de 1 a 10; b) carregamentos com 16 células, num único núcleo com valor igual a 1; c) resistências aleatórias com valores de 1 a 10; d) superposição do carregamento com um núcleo e das resistências aleatórias.



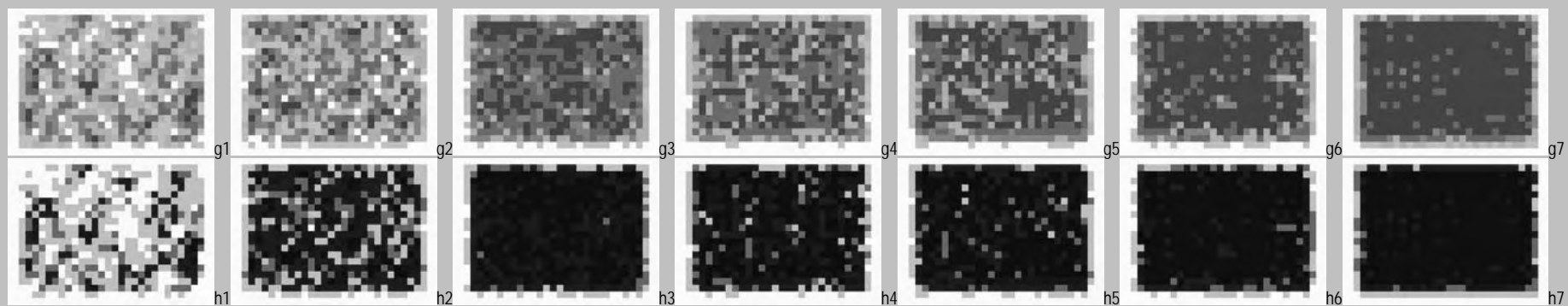
raio de interação = máximo :: raio de vizinhança = 1



raio de interação = máximo :: raio de vizinhança = máximo



raio de interação = 1 :: raio de vizinhança = 1



raio de interação = 1 :: raio de vizinhança = máximo

Figura 7.27: outputs das simulações utilizando input aleatório e diferentes raios, mostrando 7 estados de 64 iterações; a) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; b) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; c) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; d) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; e) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; f) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; g) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo; h) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo.

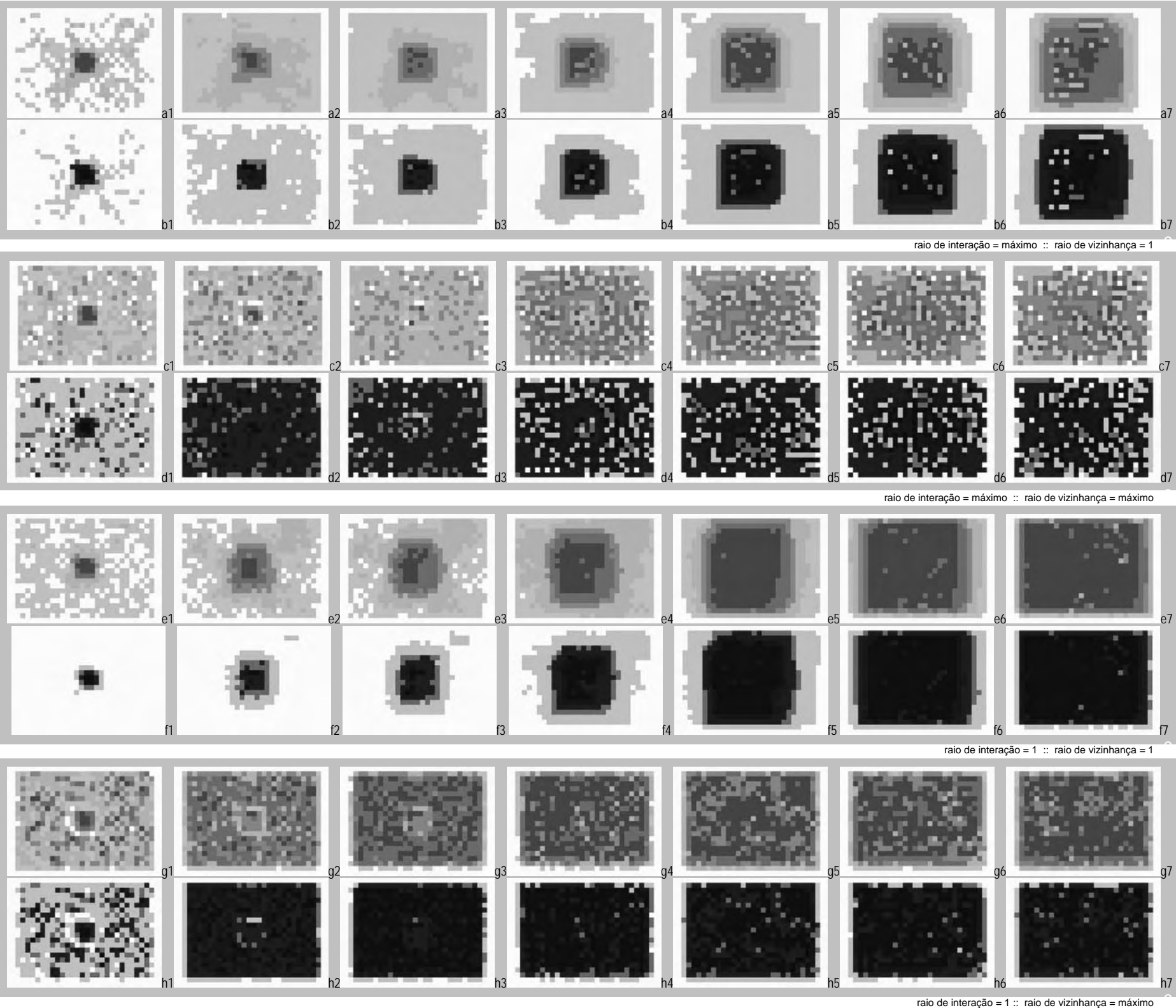


Figura 7.28: outputs das simulações utilizando input com um centro, mostrando 7 estados de 64 iterações; a) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; b) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança mínimo; c) CentR1 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; d) CentR2 com raio de interação máximo e raio de vizinhança máximo; e) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; f) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança mínimo; g) CentR1 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo; h) CentR2 com raio de interação mínimo e raio de vizinhança máximo.

Os resultados dos experimentos com variação de raios de interação e de raios de abrangência, representados pelo *output* de distribuição de centralidades (como constam das figuras 7.27 e 7.28, anteriores), permitem construir as seguintes observações:

- a) para o raio de interação máximo (todo o *grid*) e o raio de vizinhança mínimo (igual a 1): essa regulagem tende a manter ou formar estruturas monocêntricas e com centro nítido, tendência que apareceu em todas as simulações, tanto nas iniciadas com carregamentos aleatórios como com carregamento mononucleado (ver as séries a; b, nas figuras anteriores);
- b) para os raios de interação e de vizinhança máximos (todo o *grid*): o uso desses raios favorece também as estruturas monocêntricas, porém com limites mais difusos do que no caso anterior (em função do raio de interação e do raio de vizinhança máximos, respectivamente); as simulações com raio de vizinhança máximo, particularmente nas iniciadas com carregamentos concentrados (ver as séries c, d, g, h, nas figuras anteriores), demonstram o efeito de dispersão que o aumento do raio de vizinhança acarreta, o que ocorre desde as primeiras iterações;
- c) para os raios de interação e de vizinhança mínimos (iguais a 1): essa regulagem tende a manter ou formar estruturas policêntricas, com os múltiplos centros razoavelmente nítidos; esse resultado é particularmente visível nas iterações intermediárias, nas quais o *grid* ainda não está inteiramente coberto por células urbanas;
- d) para o raio de interação mínimo (igual a 1) e o raio de vizinhança máximo (todo o *grid*): o uso desses raios favorece as estruturas policêntricas, porém com os centros difusos, tal como observado na alínea “b”, anteriormente (em função do raio de interação mínimo e do raio de vizinhança máximo, respectivamente).

Em síntese, os experimentos demonstram que raios de interação maiores favorecem a monocentralidade, enquanto que raios de interação menores favorecem a policentralidade, pois enquanto que no primeiro caso os valores máximos de centralidade estão unitariamente agrupados, no segundo tendem a diversos focos; demonstram também que raios de vizinhança maiores tendem a tornar esses centros mais difusos, enquanto que raios de vizinhança mínimos aumentam sua nitidez. Esses resultados, que confirmam a associação de maiores raios de interação com monocentralidade e menores com policentralidade, estão destacados na figura 7.29, abaixo, obtida mediante análise de vizinhança nos *outputs* das simulações.

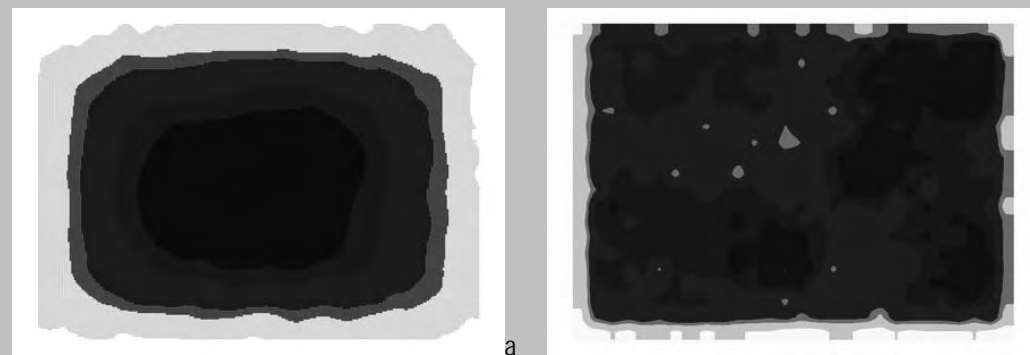


Figura 7.29: análises de vizinhança (representando cada células pela média de uma vizinhança retangular de raio igual a 15 células), realizadas sobre os resultados de CentR2, a partir do experimento 1, com carregamentos e resistências dispersos no grid, em 64 iterações; a) raio de interação máximo (todo o grid) e monocentralidade; b) raio de interação mínimo (igual a 1) e policentralidade.

## 7.8 Abrangência das funções urbanas

A questão da abrangência das funções urbanas é tradicionalmente expressa como uma área onde está contida uma determinada atividade, com superfície determinada por duas possibilidades: a) pela área na qual é esperada alguma influência da atividade (determinada por um raio ou por mosaicos de Voronoi (Halls et al., 2000); b) pela distância que é razoável percorrer para acessar a atividade (Camino e Goethert, 1978). No caso do SACI, as distribuições de tensões de crescimento do tipo axial de *buffer* e polar valem-se de áreas de abrangências, as quais são habilitadas a absorverem as tensões geradas dos processos de interação espacial, a cada iteração da dinâmica de crescimento urbano. Essas áreas de abrangência, que podem ser simplesmente denominadas de *buffers*, podem ser geométricas (expressas como uma distância – no caso axial, ou como um raio de um círculo – no caso polar) ou topológicas (expressas como uma vizinhança em células, como é típico dos CAs – autômatos celulares). Assumindo que há consistência entre carregamento e atratividade, esses *buffers* tem relação direta com a força de atração das células, a qual é expressa no modelo pelos seus carregamentos natural, urbano e institucional, os quais abstratamente podem ser associados a áreas de abrangência do sistema viário, no caso axial (como sugere Prinz, 1984) ou a usos do solo, no caso polar (ibidem). Deste modo, o raio máximo e mínimo dos *buffers* podem ser definidos pelo usuário do modelo, sendo os valores intermediários interpolados pelos carregamentos, como está nas equações 7.4 e 7.5, abaixo.

Equação 7.4: *buffer axial*

$$\text{Buffer}_{\text{axial}} = \left[ \sum_{\text{celli}} \text{Load}_{E,U,I} + \left( \sum_{\text{cellj}} \text{Load}_{E,U,I} \right) \right] \cdot n^{-1} \cdot \text{Buffer}_{\text{máx}}, \quad \forall \text{Load}_{E,U} \text{ ou } I \neq \text{zero}$$

*onde se lê:*

o valor do *buffer* para a distribuição axial é igual ao somatório dos carregamentos naturais, urbanos e institucionais da célula *i* mais o somatório dos carregamentos naturais, urbanos e institucionais da célula *j*, dividido pelo número de células cujo carregamento é diferente de zero, vezes o valor de *buffer* máximo informado pelo usuário

Equação 7.5: *buffer polar*

$$\text{Buffer}_{\text{polar}} = \left( \sum \text{Load}_{E,U,I} \right) \cdot n^{-1} \cdot \text{Buffer}_{\text{máx}}, \quad \forall \text{Load}_{E,U} \text{ ou } I \neq \text{zero}$$

*onde se lê:*

o valor do *buffer* para a distribuição polar é igual ao somatório dos carregamentos naturais, urbanos e institucionais da célula *i*, dividido pelo número de células cujo carregamento é diferente de zero, vezes o valor de *buffer* máximo informado pelo usuário

*sendo, para as equações anteriores:*

*Buffer*<sub>axial</sub> : valor do *buffer* para a distribuição axial

$\sum$  *Load* *E, U, I* : somatório dos carregamentos naturais, urbanos e institucionais da célula *i*

$\sum$  *Load* *E, U, I* : somatório dos carregamentos naturais, urbanos e institucionais da célula *j*

*n* : número de células cujo carregamento é diferente de zero

*Buffer*<sub>máx</sub> : valor de *buffer* máximo informado pelo usuário

Para observar a influência dos raios de distribuição das tensões estão realizadas duas simulações, variando o valor dos *buffers*, do seguinte modo: a) *buffer* máximo igual a uma célula, que é a padrão do modelo (figura 7.31); b) *buffer* máximo aumentado para duas células (figura 7.32). Ambas são iniciadas por uma seqüência de pontos com espaçamento crescente (utilizados como carregamentos) e por resistências aleatórias, conforme figura 7.30, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

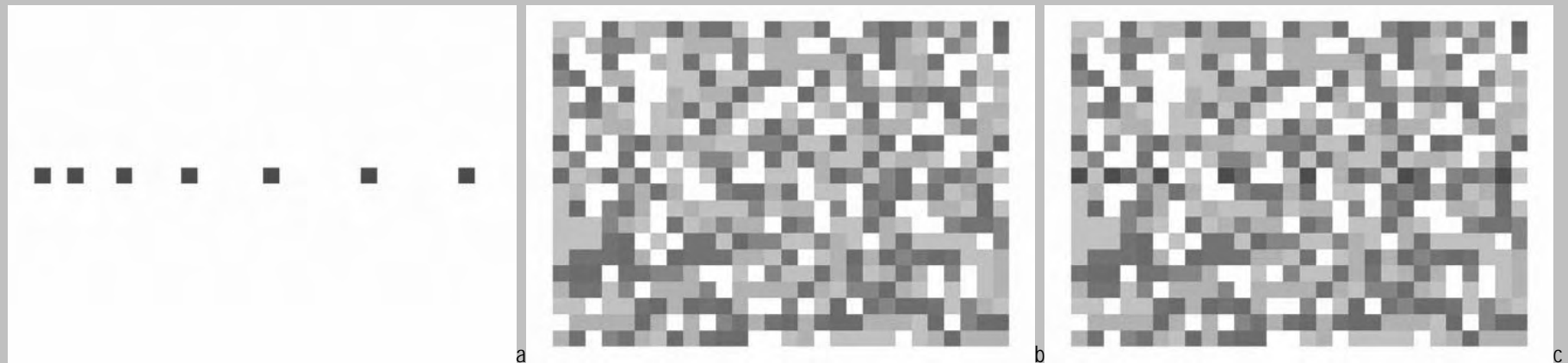


Figura 7.30: inputs utilizados no experimento com variação no valor dos *buffers*, para simular diferentes áreas de abrangência nas distribuições de tensões; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.

O primeiro caso (figura 7.31, à frente) está regulado com o raio para distribuição das tensões axiais de *buffer* e polares iguais a uma célula, valor padrão do modelo e que tem sido usado em todas as demais simulações; esses valores representam a área de abrangência dos carregamentos urbanos, definindo o alcance das mudanças que as relações entre eles pode provocar. O segundo caso (figura 7.32, adiante) está com o raio aumentado para duas células, provocando os seguintes efeitos: a) a conversão de território é mais homogênea, embora mantenha quantidades de células com fenótipo urbano semelhantes; b) os carregamentos urbanos têm seus máximos localizados nos entornos das células urbanas iniciais da simulação, demarcando o aumento do raio utilizado neste experimento; c) a distribuição de centralidades fica mais espalhada no *grid*, com um resultado menos hierárquico; d) os potenciais de crescimento também estão mais espalhados, mantendo todavia os máximos no entorno nas células urbanas iniciais; e) as resistências acompanham os demais resultados das simulações, aparecendo de modo mais difuso no caso do raio maior. Esses resultados indicam dois padrões principais: a) raios maiores tornam a conversão de território mais homogênea, bem como a distribuição de centralidades mais difusa, o que implica em potencial de crescimento menos concentrado e, conseqüentemente, em maior espalhamento dos carregamentos urbanos; b) sendo assim, pode ser assumido que a presença de carregamentos com raios de abrangência maiores favorece a dispersão dos estoques construídos no território, tornando as centralidades mais difusas e os potenciais de crescimento mais homogêneos.



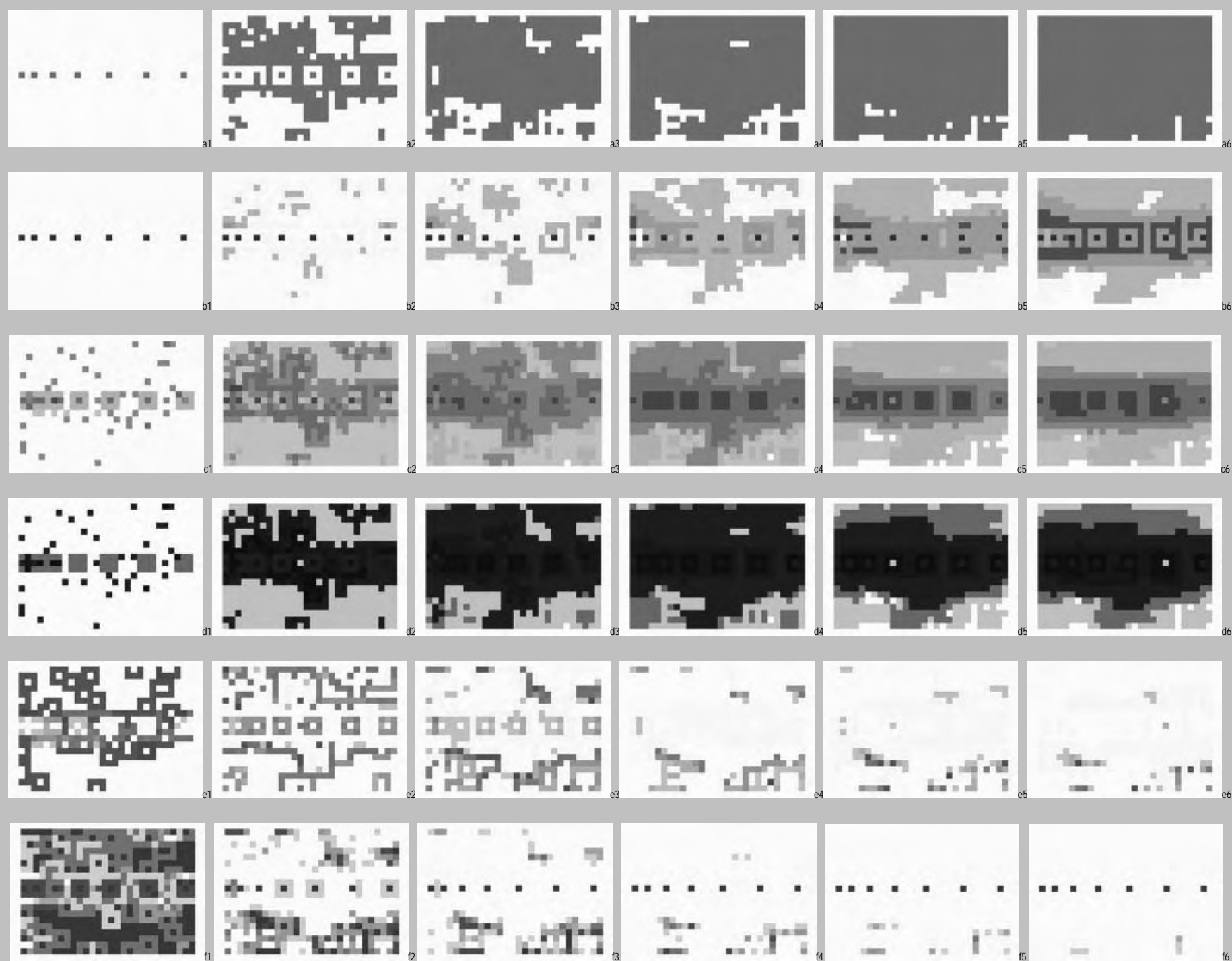


Figura 7.31: output da simulação com variação nos valores dos buffers, utilizando o buffer máximo igual a 1 célula (padrão do modelo, mostrando 6 estados de 32 iterações); a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE.

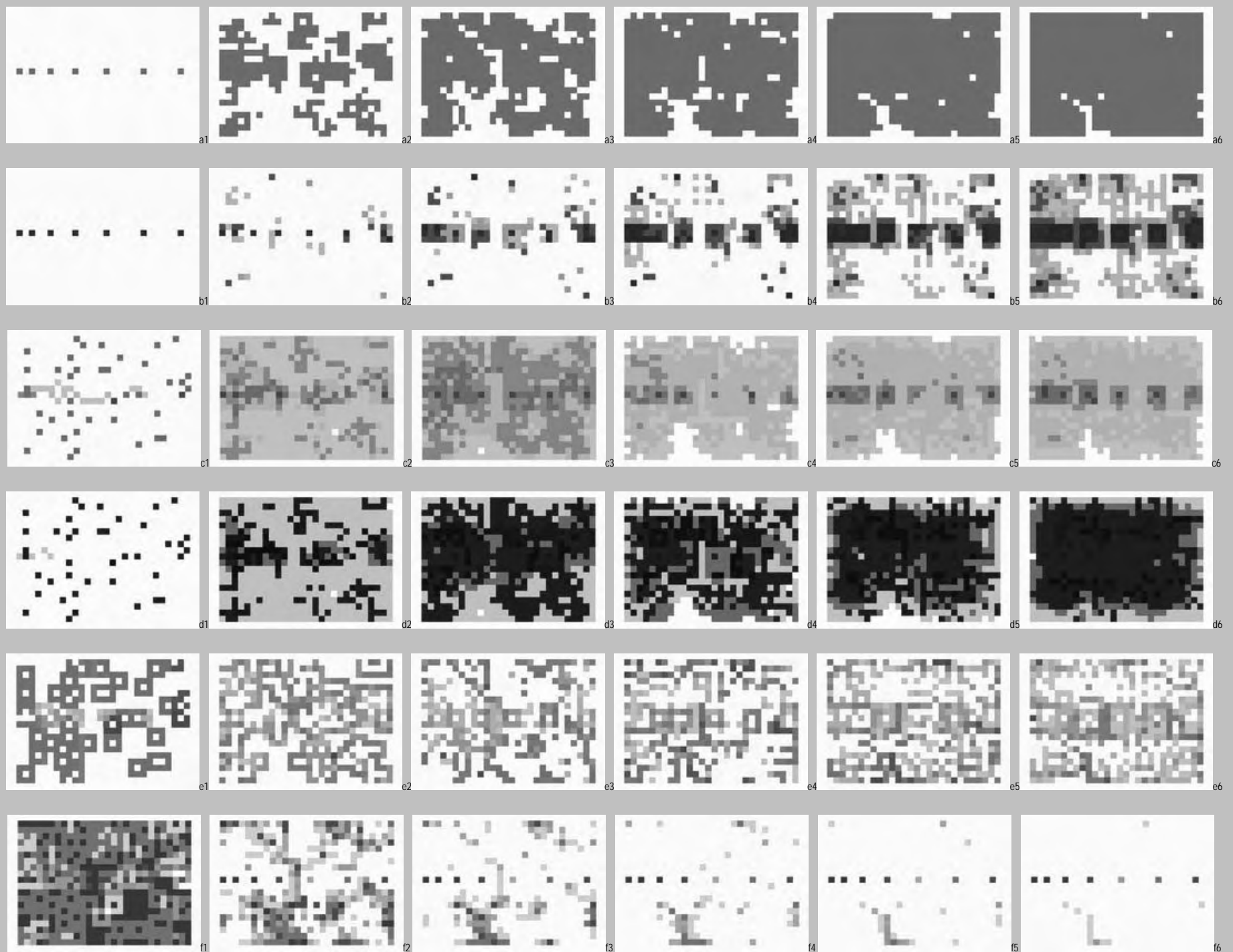


Figura 7.32: output da simulação com variação nos valores dos buffers, utilizando o buffer máximo igual a 2 células, mostrando 6 estados de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) Potential; f) ResistE.

## 7.9 Influência da distância entre carregamentos

Distância tem sido considerada como componente fundamental na geração de medidas que envolvem interações espaciais, como aparece em modelos de acessibilidade, de oportunidades e de escolha espacial (Torrens e Alberti, 2000); com origem comum na física Newtoniana, esses modelos consideram a possibilidade de uma entidade espacial influenciar as demais como inversamente proporcional à distância que separa essa entidade de todas as outras do sistema (Weber, 2003), ajustando a distância a um coeficiente de maximização, normalmente geométrico ou exponencial (Thomas e Hugget, 1980). O SACI, ao determinar o caminho preferencial entre duas células, no processo de cálculo da centralidade, utiliza recurso similar, permitindo regular a intensidade das tensões entre cada par de células em função da distância entre elas. Considerando que todas as células são de mesmo tamanho, está implementado um coeficiente que diminui exponencialmente a fração de tensões axiais e axiais de *buffer* distribuída para cada célula, em função do número total de células que acumula essas tensões (coeficiente de distância ou *Distance Effect*, no modelo, denominado de K (ka), conforme equações 7.6 e 7.7, abaixo (retomadas do subtítulo 3.2.1, equação 3.8 e seguintes):

*Equação 7.6: distribuição axial das tensões para a célula p, considerando o efeito da distância k*

$$A1_p = \sum_{i=1}^{i=j} \frac{T_{ij} \cdot x}{N_{Cel}^k}$$

*onde se lê:*

*a tensão axial na célula p é igual ao somatório das tensões entre as células i e j multiplicado por pelo grau de participação das tensões axiais no sistema, dividido pelo número de células do caminho preferencial, elevado ao coeficiente de distância k*

*Equação 7.7: distribuição axial de buffer das tensões para a célula p, considerando o efeito da distância k*

$$A2_p = \sum_{i=1}^{i=j} \frac{T_{ij} \cdot y}{N_{Cel}^k}$$

*onde se lê:*

*a tensão axial de buffer na célula p é igual ao somatório das tensões entre as células i e j multiplicado por pelo grau de participação das tensões axiais de buffer no sistema, dividido pelo número de células do caminho preferencial e do buffer, elevado ao coeficiente de distância k*

*sendo, para as equações anteriores:*

*A1<sub>p</sub> : distribuição do tipo A1 (axial) na célula p*

*A2<sub>p</sub> : distribuição do tipo A2 (axial de buffer) na célula p*

*T<sub>ij</sub> : tensão entre as células i e j*

*x : quantidade relativa de distribuição do tipo axial*

*y : quantidade relativa de distribuição do tipo axial de buffer*

*N<sub>Cel</sub> = número de células do caminho preferencial*

*k : coeficiente de distância*

Como está enunciado nas equações acima, o efeito do coeficiente de distância K é função da quantidade de tensões que são distribuídas no modo axial e axial de *buffer*, as quais podem variar de zero a 100% do total; se esse tipo de tensão não participar da simulação, o efeito da distância será nulo.

Para observar a influência da distância no crescimento urbano está realizado um experimento com três casos, variando o valor de  $K$  ( $ka$ ): a) utilizando o valor de  $K$  igual a 1,00 (sem influência da distância; figura 7.34); b) utilizando  $K$  igual a 2,00 (influência da distância ao quadrado, valor que tem sido usado como padrão nas demais simulações; figura 7.35); c) utilizando  $K$  igual a 4,00 (influência da distância na quarta potência; figura 7.36). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.33, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

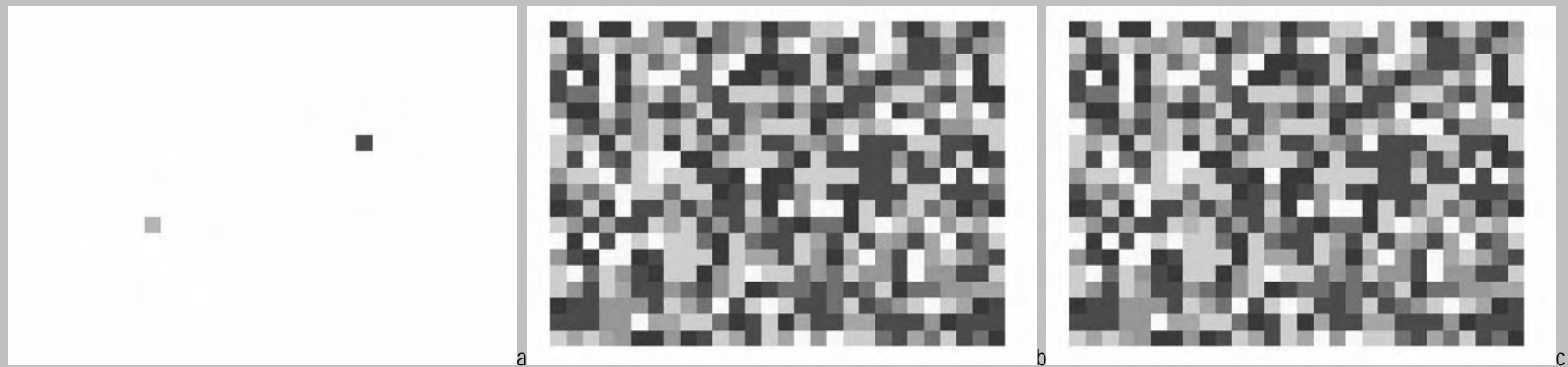


Figura 7.33: inputs utilizados no experimento com variações no valor de  $K$  ( $ka$ ), para observar a influência da distância nas simulações; a) carregamentos com valores de 9 e 10; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.

Os principais efeitos provocados pelo aumento de  $K$ , como aparece nas figuras 7.34, 7.35 e 7.36, adiante, são os seguintes: a) a área de células convertidas tem a fragmentação aumentada de modo diretamente proporcional ao aumento do efeito da distância, modificando o aspecto da borda, que fica mais recortada; b) os carregamentos, as centralidades e os potenciais de crescimento tendem a se concentrar nos pólos de maior atração, diminuindo o número de células em classes intermediárias, o que indica um processo de simplificação; c) as resistências ao crescimento diminuem mais rapidamente nos pólos e mais lentamente nos eixos, chegando mais fragmentadas ao final da simulação. Esse resultado sugere que ao aumento da influência da distância podem estar associados dois processos: 1) um processo de fragmentação do tecido urbano em crescimento e do entorno natural ainda não urbanizado, representados pelas células com fenótipos urbanos e pelas resistências naturais (*CellType* e *ResistE*, respectivamente, no modelo); 2) outro processo de concentração de estoques construídos e de facilidades urbanas, representados aqui pelos carregamentos urbanos e pela distribuição de centralidades (*LoadU* e *CentR1*, *CentR2*, respectivamente, no modelo). Sendo deste modo, o aumento do efeito da distância, que representa o aumento de restrições do sistema de circulação, implica em fragmentação e concentração simultaneamente.

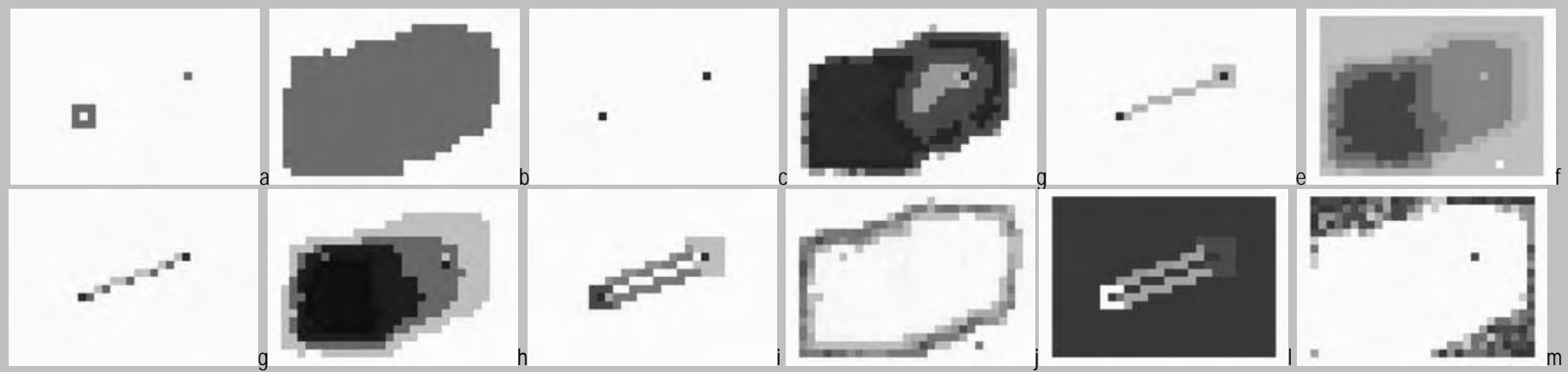


Figura 7.34: outputs das simulações utilizando o efeito de distância ( $K$ ) igual a 1,00(neutro); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

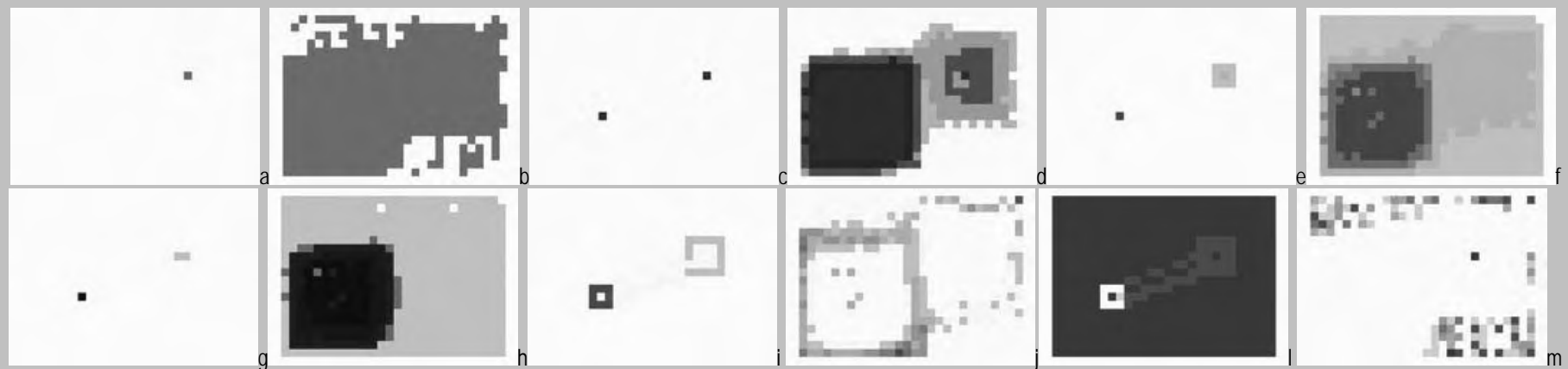


Figura 7.35 :outputs das simulações utilizando o efeito de distância ( $K$ ) igual a 2,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

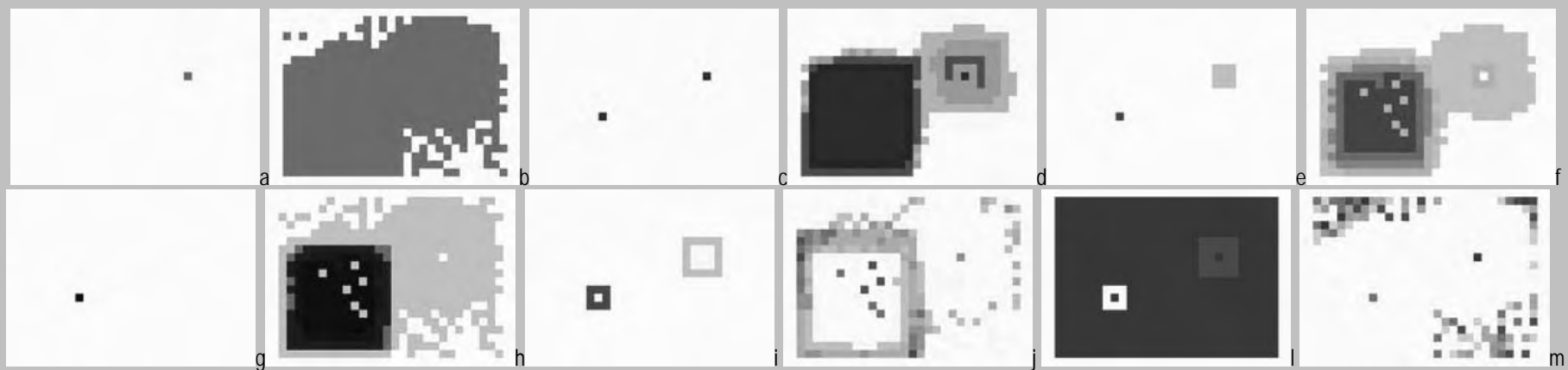


Figura 7.36: outputs das simulações utilizando o efeito de distância ( $K$ ) igual a 4,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

### 7.10 Variação da impedância

Processos de modelagem que trabalham mediante conexões entre entidades espaciais ou com trocas entre elas permitem informar a eficácia das conexões e o grau de esforço necessário para realizar essas trocas, o que é conhecido tecnicamente como custo de ligações (Mariani, 2001). Esse custo, que é convencionalmente usado em processos baseados em grafos (Diestel, 2000) e em modelos com autômatos celulares (como os de dinâmica hídrica, em Al-Sabhan, Mulligan e Blackburn, 2003), é utilizado aqui como impedância vinculada a cada célula, com efeito na distribuição de tensões axial e axial de *buffer*, como foi apresentado no Capítulo 3, anteriormente. No SACI, impedâncias estão aderidas aos atributos urbanos, naturais ou institucionais e são espacializáveis, operando como restritores nas trocas intercelulares e modificando a qualidade das conexões entre as células, o que pode alterar os resultados nas buscas de caminhos preferenciais, como ocorre no cálculo da medida de centralidade celular, estrutural na determinação do crescimento urbano.

O modelo permite dois modos de imputar a impedância: a) um modo implementa a impedância dinamicamente, em função do total de resistências urbanas e naturais, calculadas a cada iteração; esse modo é o padrão do modelo, em função da fidelidade aos atributos que participam da simulação e da capacidade de atualização permanente; b) outro modo permite imputar a impedância para cada atributo individualmente, informando o valor a ser usado e o tema gráfico ao qual o atributo está associado; esse modo pode estar informado por tabelas temáticas, nas quais podem ser usados métodos de análise multicritério para determinar o valor das impedâncias.

Para observar os efeitos de diferentes impedâncias no crescimento urbano está realizado um experimento com dois casos: a) utilizando a impedância igual ao somatório das resistências, que é o padrão do modelo (figura 7.38); b) interpondo uma área de impedância superior entre os carregamentos que dão início ao crescimento urbano, com valor igual a 10,00 (figura 7.39). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.37, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

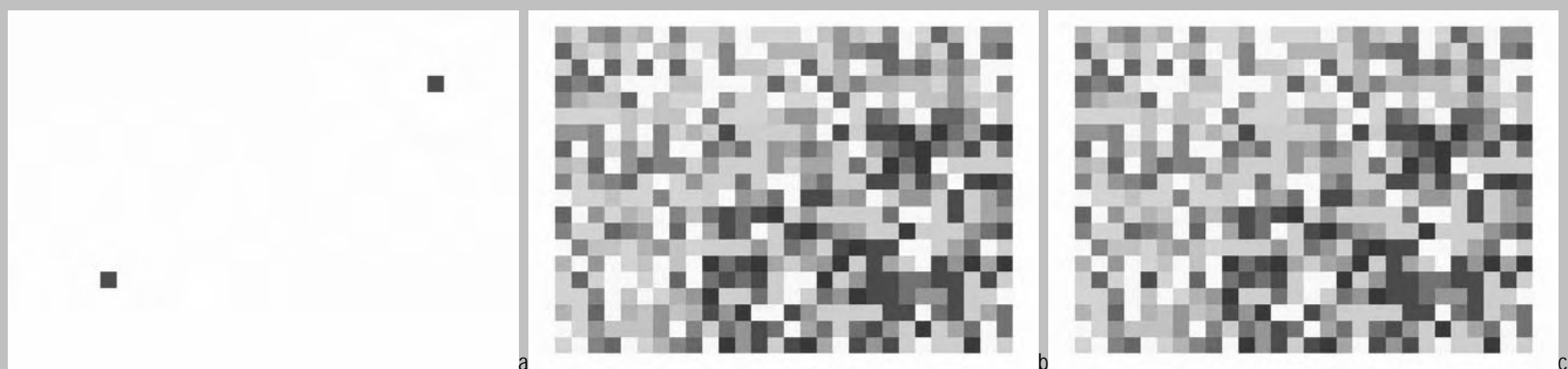


Figura 7.37: inputs utilizados no experimento com variações no valor da impedância, para observar seus efeitos nas simulações; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências com valores aleatórios entre 1 e 2 e impedâncias variáveis (impedância igual ao somatório das resistências na área em tons de verde claro e igual a 10 na área em tons de verde escuro); c) superposição dos carregamentos e das resistências.

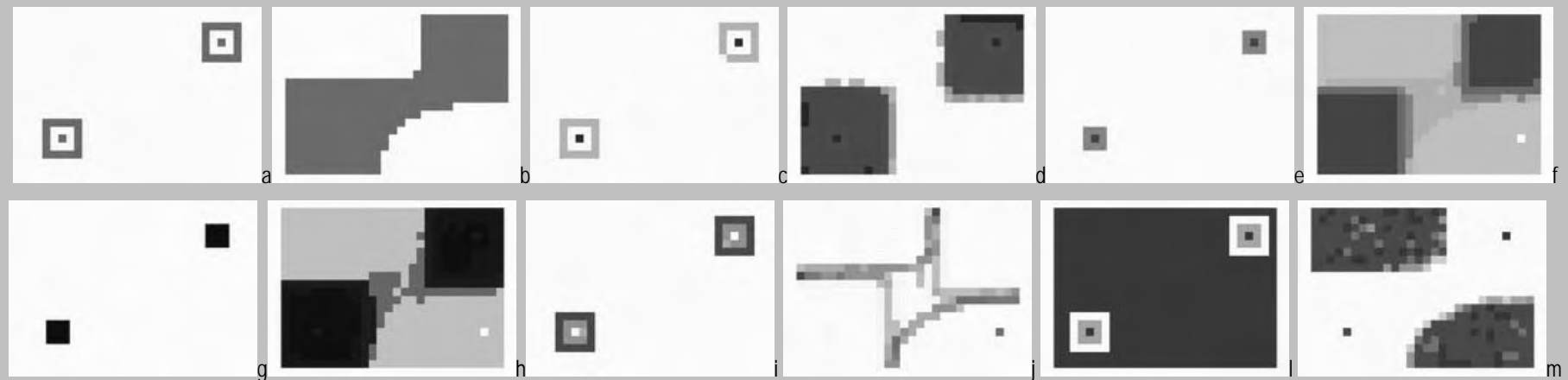


Figura 7.38: outputs das simulações utilizando a impedância igual ao somatório das resistências (padrão do modelo) para todos os themes; a) CellType na iteração 10; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 10; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 10; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 10; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 10; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 10; l) ResistE na iteração 32.

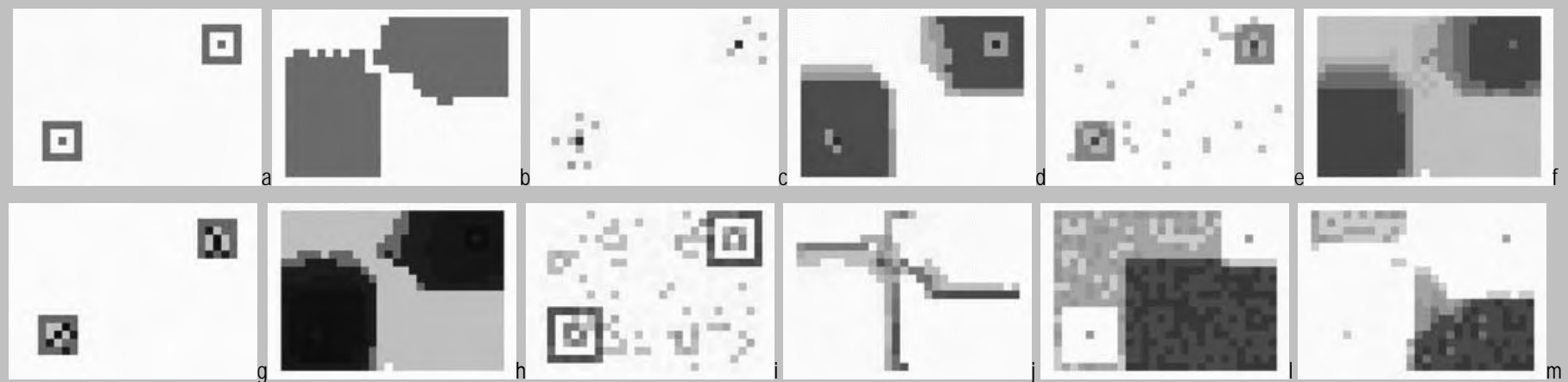


Figura 7.39: outputs das simulações utilizando a impedância igual ao somatório das resistências (padrão do modelo) para o theme 1 e igual a 10 para o theme 2; a) CellType na iteração 10; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 10; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 10; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 10; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 10; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 10; l) ResistE na iteração 32.

A simulação com o aumento da impedância de parte do *grid* (figura 7.39) provocou dois efeitos principais: a) o crescimento urbano evitou a área de impedância maior, onde ocorreu menor conversão de território, carregamento urbano, centralidade e também menor consumo de resistências naturais; b) o potencial de crescimento concentrou os valores máximos na interface com a área de impedância maior, onde restam as células com maior resistência. Esse resultado permite observar, em resumo: c) o modelo é sensível ao aumento de impedância, sendo o crescimento urbano diminuído no interior da área diferenciada e dirigido para áreas de menor impedância; d) o aumento da impedância provoca concentração de potencial nas bordas da área diferenciada, de modo diretamente proporcional.

### 7.11 Preservação e renaturalização ambiental

A questão da preservação e da renaturalização ambiental (ou restauração ecológica, como está em Lake, 2001) têm sido destacada a partir de movimentos internacionais interessados na conservação de nível global, como demonstram os argumentos do “Clube de Roma”, da “Conferência de Estocolmo”, do “Relatório Brudtland”, da “Cúpula da Terra” e da “Agenda 21” (Franco, 2001). Os estudos freqüentemente indicam a necessidade de conhecer e proteger atributos biológicos de determinadas zonas (Primack e Rodrigues, 2001), porém raramente incluem alguma relação com o ecossistema urbano (Alberti, 1999; Franco, 2001). Para enfrentar essa questão, os esforços de modelagem empreendidos neste trabalho permitem duas possibilidades: a) implantar unidades de conservação e observar suas relações com a dinâmica urbana (logo a seguir); b) implementar políticas de valorização ambiental e estudar seus efeitos sobre o crescimento urbano (mais adiante).

Para simular preservação ambiental e renaturalização e observar sua influência sobre a dinâmica urbana estão delineados dois experimentos, cada um com três casos. O primeiro experimento considera três possibilidades: a.1) uma simulação com todos os parâmetros com regulagem padrão, para comparação de resultados (figura 7.41); a.2) implantação de uma unidade de conservação ambiental com urbanização impedida (*freezing*, no modelo; figura 7.42); a.3) implantação de uma área de resistência elevada, com peso aumentado para 10 vezes (*weight*, no modelo; figura 7.43). Para realizar o segundo experimento, está introduzido o parâmetro  $\theta$  (teta), que impõe um incremento iterativo no valor dos atributos naturais, operando como um multiplicador; b.1)  $\theta$  igual a 1,00, que é o valor padrão e que não interfere na simulação; b.2)  $\theta$  igual a 1,10; b.3)  $\theta$  igual a 1,50 (figuras 7.44, 7.45 e 7.46, respectivamente);. As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.40, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

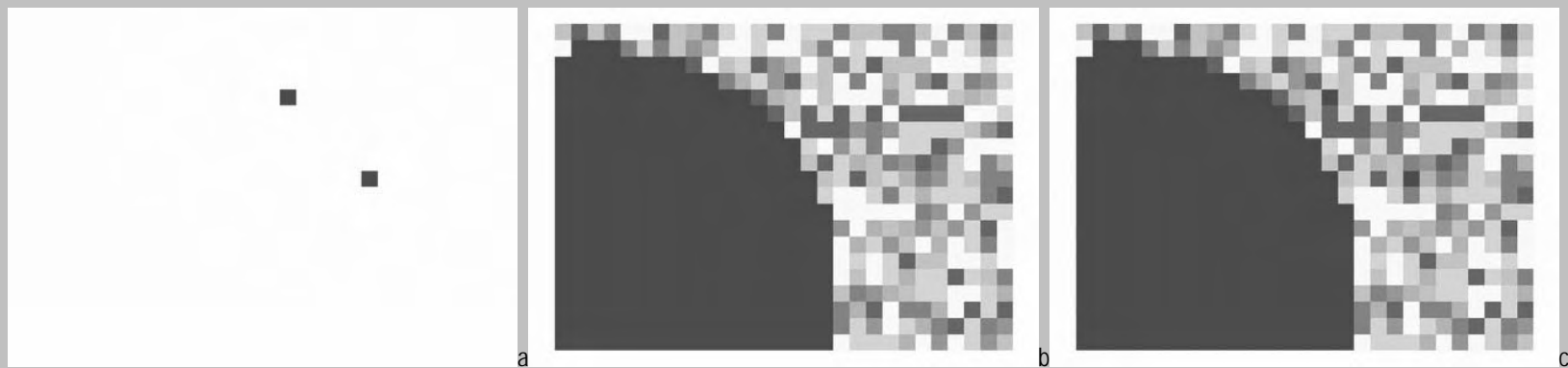


Figura 7.40: inputs utilizados nos experimentos para simular preservação e renaturalização de células com atributos naturais; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1 (verde escuro) e aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.

Os resultados do experimento aparecem nos *grids* com os estados inicial e final de 32 iterações (figuras 7.40 a 7.45, adiante) estando as interpretações na seqüência.



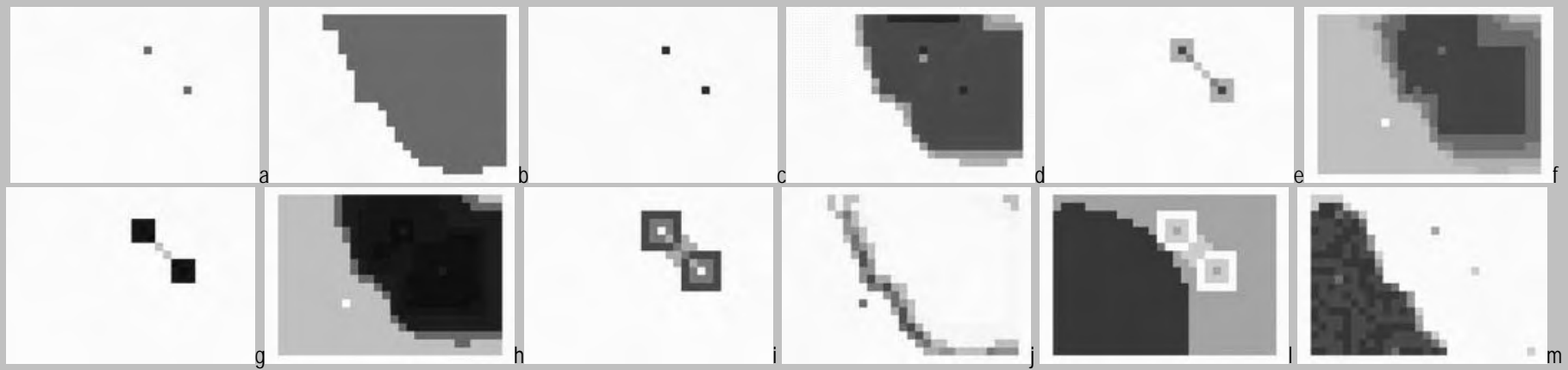


Figura 7.41: outputs das simulações sem preservação (todos os themes são removable), utilizando  $\theta$  (teta) igual a 1,0; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

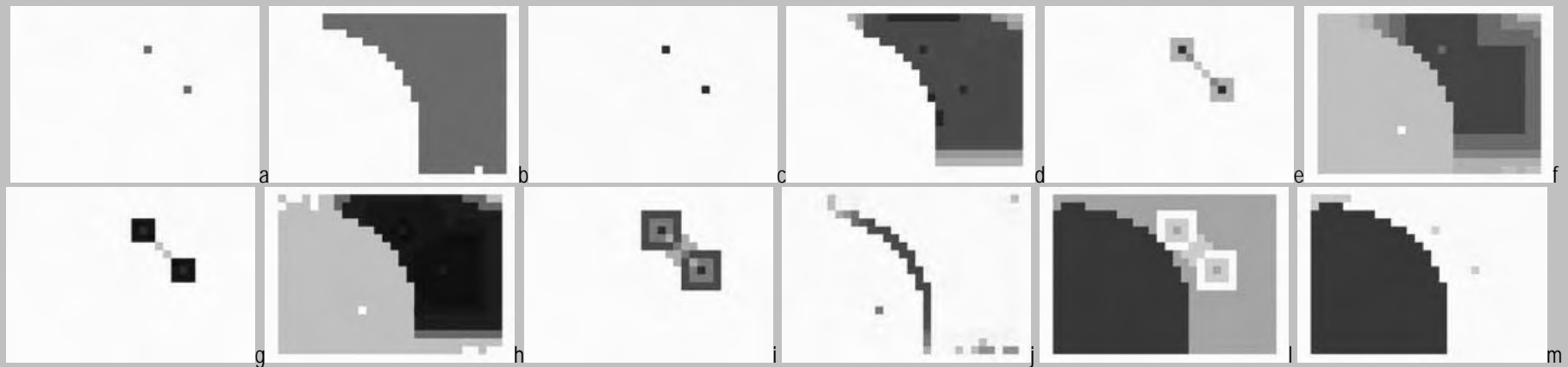


Figura 7.42: outputs das simulações com preservação de nível superior (theme freezing), utilizando  $\theta$  (teta) igual a 1,0; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

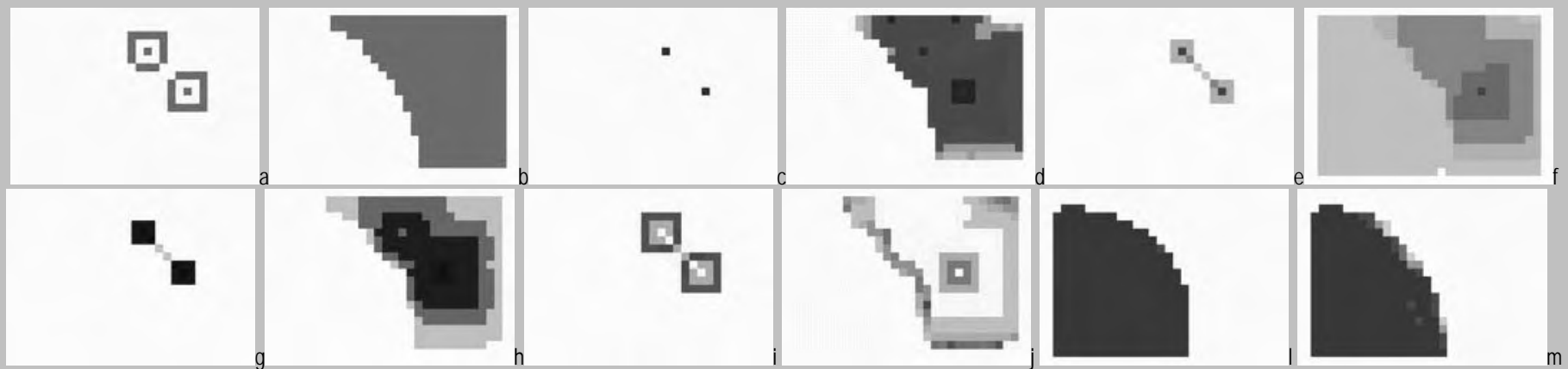


Figura 7.43: outputs das simulações com preservação de nível intermediário (theme com peso = 10), utilizando  $\theta$  (teta) igual a 1,0; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

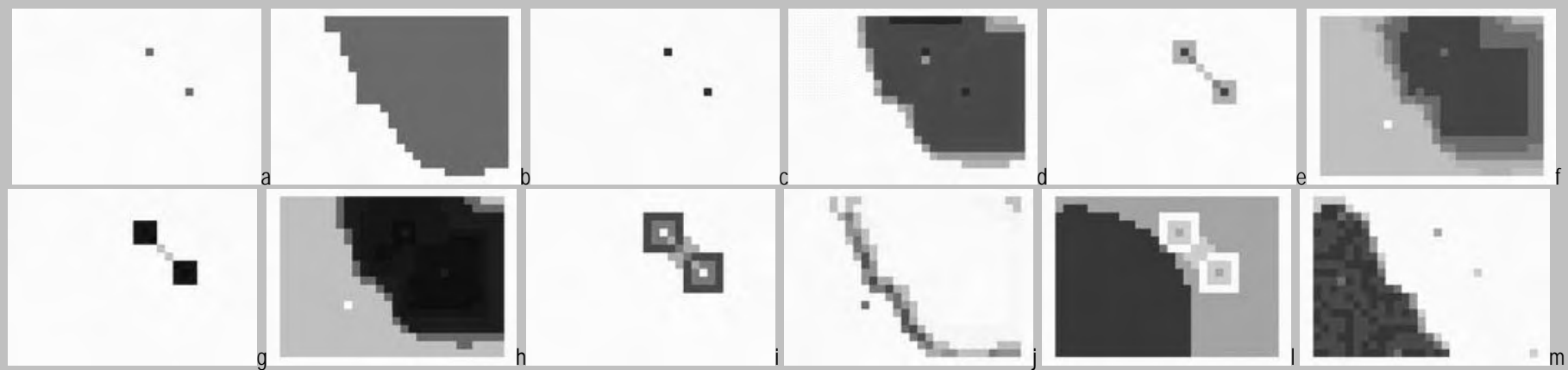


Figura 7.44: outputs das simulações de renaturalização, utilizando  $\theta$  (teta) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

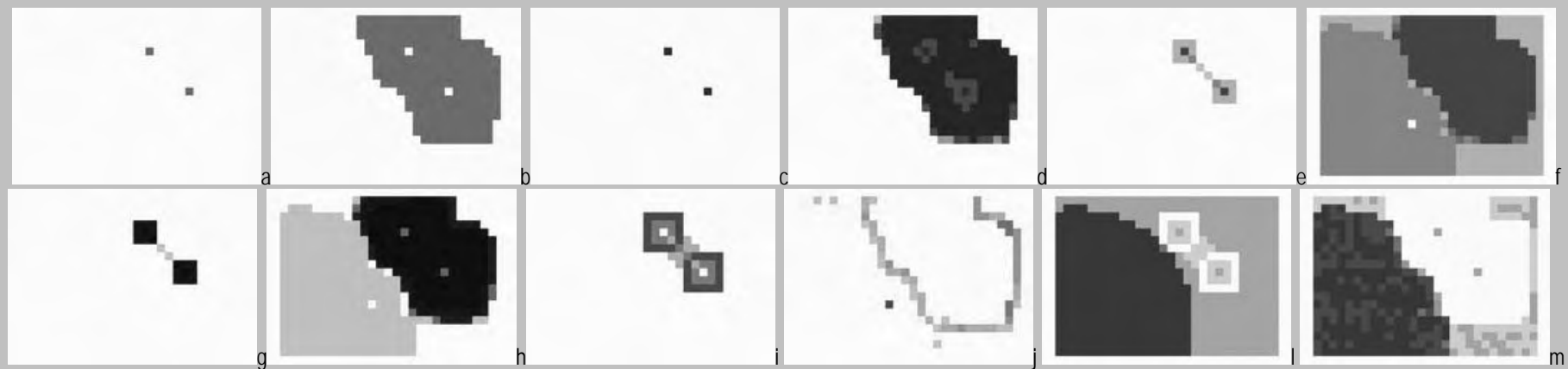


Figura 7.45: outputs das simulações de renaturalização, utilizando  $\theta$  (teta) igual a 1,10 (10% por iteração); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

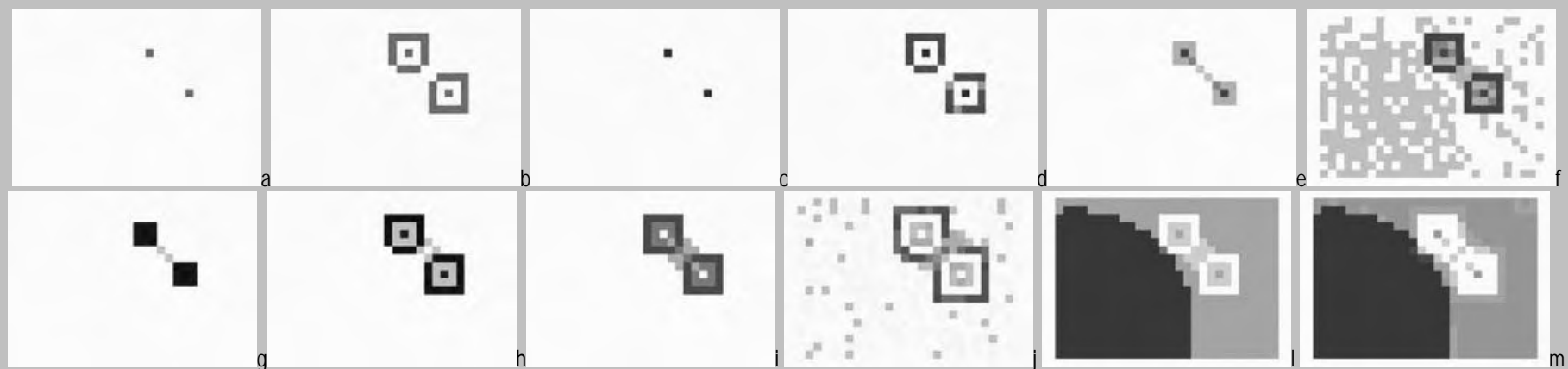


Figura 7.46: outputs das simulações de renaturalização, utilizando  $\theta$  (teta) igual a 1,50 (50% por iteração); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

A preservação foi simulada mediante duas possibilidades: a) implantação de uma área com urbanização impedida (*freezing*, no modelo); b) modificação no peso de um atributo que representa resistência natural (*weight*, no modelo). No caso de utilização de área de urbanização impedida (figura 7.42) aparecem dois efeitos principais: a.1) o crescimento se transfere para fora dessa zona, ficando demarcado o contorno na área onde a conversão é impedida; a.2) o potencial de crescimento fica acumulado na interface entre a área convertida para o fenótipo urbano e a de urbanização impedida. No caso do aumento do peso das resistências em parte do *grid* (figura 7.43), a principal diferença com relação aos casos anteriores é que o potencial que se concentra na borda realiza as diminuições de resistências e a conversão para o fenótipo urbano, como pode ser percebido ao final da simulação.

O experimento dedicado a simular renaturalização foi realizado com a aplicação do parâmetro  $\theta$  crescente (figuras 7.44, 7.45 e 7.46), aumentando iterativamente os atributos naturais que operam como resistências, sem suspender o processo de urbanização; os resultados implicaram em efetiva permanência dos atributos naturais, chegando ao final das simulações com maior quantidade de células nas classes superiores de resistência máxima (o que é mais visível no caso do parâmetro  $\theta$  igual a 1,50, na figura 7.46); esse processo, que pode ser compreendido como um fortalecimento dos atributos naturais, ocorreu de modo associado à diminuição da quantidade de células convertidas para o fenótipo urbano e à concentração de carregamentos e centralidades urbanas, de modo diretamente proporcional ao aumento de  $\theta$ .

Esses resultados permitem observar o seguinte: a) através do recurso de impedimento de urbanização de uma área (células *freezing*, no modelo), o modelo permite verificar os efeitos de áreas com conservação integral; b) nesse caso, aparece uma tendência de concentração de potencial de crescimento na interface entre a área convertida para o fenótipo urbano e a de urbanização impedida; e ainda: c) mediante o aumento do peso natural de áreas que operam como resistências à urbanização, o modelo retarda sua conversão para o fenótipo urbano, mas não impede mudanças no longo prazo; d) o consumo de resistências e a conversão de território tendem a se concentrar na borda dessas áreas; e também: e) através do parâmetro  $\theta$ , o modelo efetivamente consegue incrementar os atributos naturais, simulando processos de renaturalização; f) o uso crescente desse parâmetro pode inibir a urbanização do entorno e provocar com simultaneidade processos de concentração de carregamentos urbanos e de centralidades.

Resumindo os resultados desses experimentos, pode ser sugerido que: a) o impedimento de urbanização numa determinada área aumenta o potencial de crescimento na borda da área impedida, tornando cada vez mais intensas as pressões de urbanização; b) o aumento do peso natural de um atributo retarda transformações acarretadas pelo processo de crescimento urbano, ao mesmo tempo em que concentra transformações na borda da área que contém esse atributo; c) crescimento urbano acompanhado por renaturalização ocorre em conjunto com concentração urbana, tanto de estoques construídos como de centralidades.

Para observar os efeitos da implementação de políticas de valorização ambiental está mostrado um experimento variando o valor do parâmetro  $\alpha$  (alfa), o que implica no fortalecimento dos atributos naturais a cada iteração (como foi enunciado no Capítulo 3), mediante três simulações: a) com o valor de  $\alpha$  igual a 1,00, o que significa ausência de influência no processo de crescimento urbano (figura 7.48); b) com valor de  $\alpha$  igual a 0,90 (figura 7.49); c) com o valor de  $\alpha$  igual a 0,80 (figura 7.50), o que implica em valorização crescente dos atributos naturais (conforme foi exposto no Capítulo 3, anteriormente). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.47, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

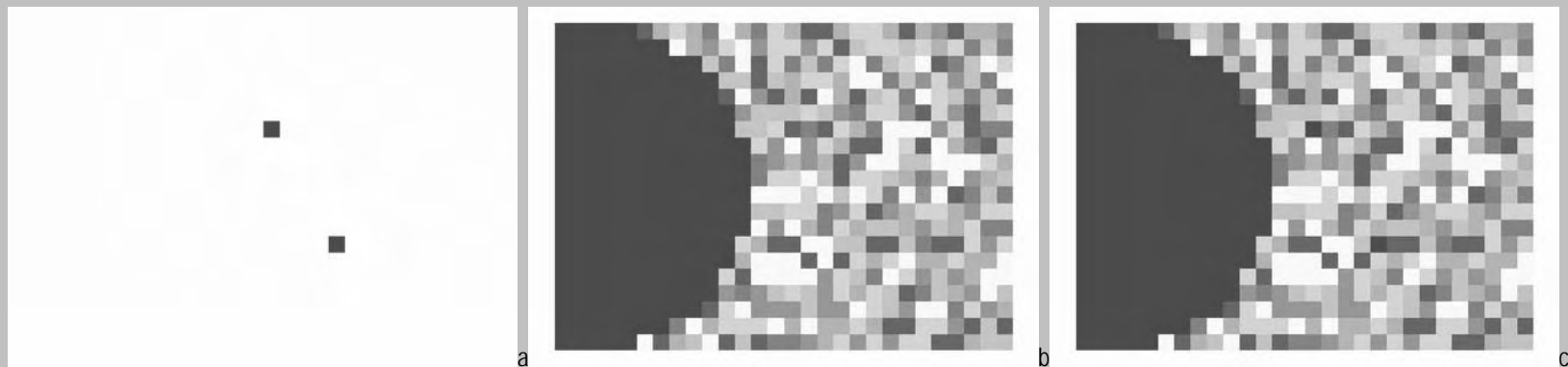


Figura 7.47: inputs utilizados nos experimentos para simular a implementação de políticas de valorização ambiental; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1 (verde escuro) e aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.

Os resultados alcançados no experimento (figuras 7.48, 7.49 e 7.50, adiante) demonstram que: a) o modelo simula eficazmente a implementação de políticas públicas para a valorização ambiental, o que implicou num efeito de permanência e aumento de valor das células que contêm atributos naturais (como é particularmente evidente nas figuras adiante, letras l; m); b) ocorre uma diminuição geral no crescimento urbano, em função do aumento iterativo das resistências, causado pela ação do parâmetro  $\alpha$ ; c) os resultados de concentração de carregamentos urbanos, de distribuição de centralidade e de potencial mantêm padrões de localização semelhantes, porém com aumento de fragmentação diretamente proporcional ao aumento da ação do parâmetro  $\alpha$ . Sendo assim, os resultados do experimento permitem associar a maior permanência dos atributos naturais à maior fragmentação no crescimento urbano, como poder ser visualizado no gráfico 7.4, abaixo.

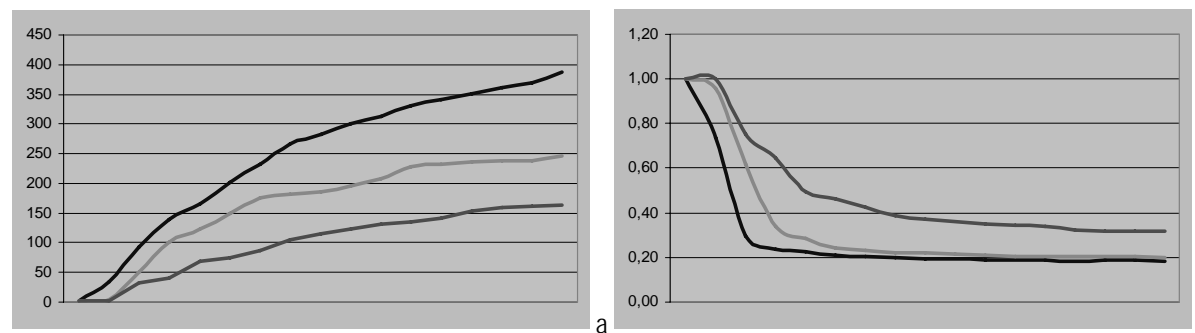


Gráfico 7.4: simulação com variação no valor de  $\alpha$  (alfa), com  $\alpha=1,00$  (traço azul),  $\alpha=0,90$  (traço laranja) e  $\alpha=0,80$  (traço vermelho); a) evolução das células com fenótipo urbano (*CellType*, no modelo); b) evolução da fragmentação relativa (*FragRel*, no modelo).

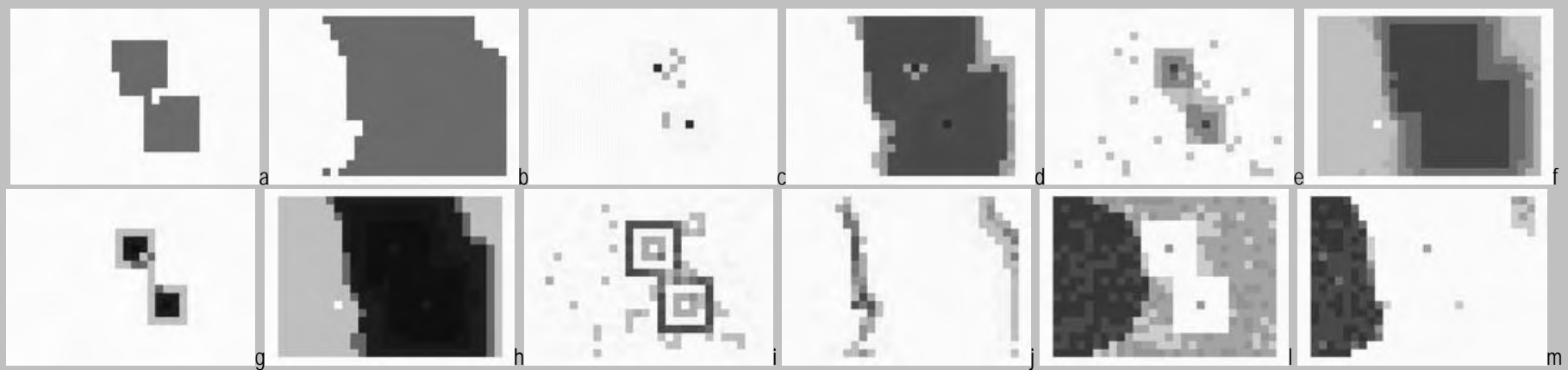


Figura 7.48: outputs das simulações utilizando  $\alpha$  (alfa) igual a 1,00; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

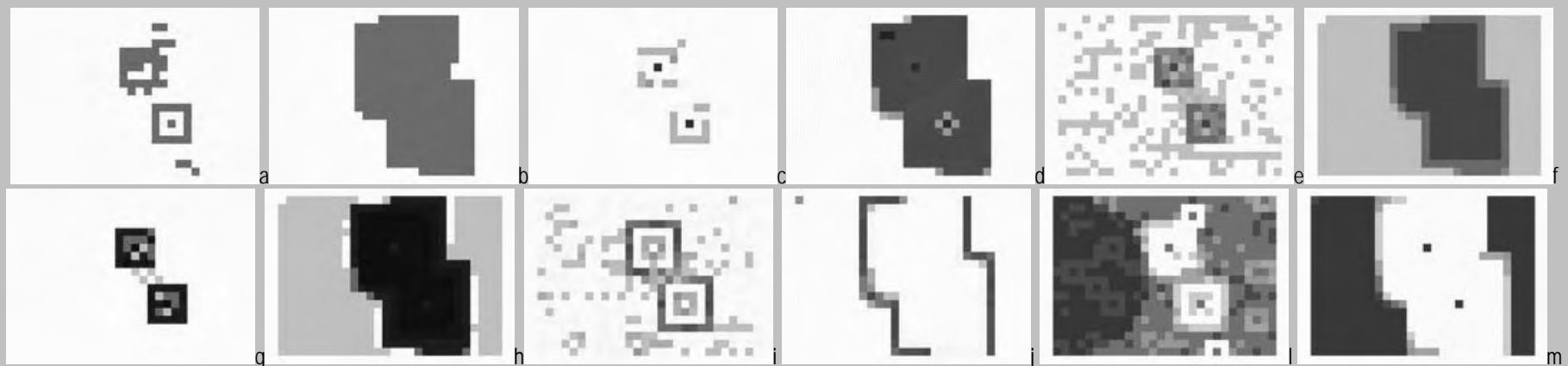


Figura 7.49: outputs das simulações utilizando  $\alpha$  (alfa) igual a 0,90; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

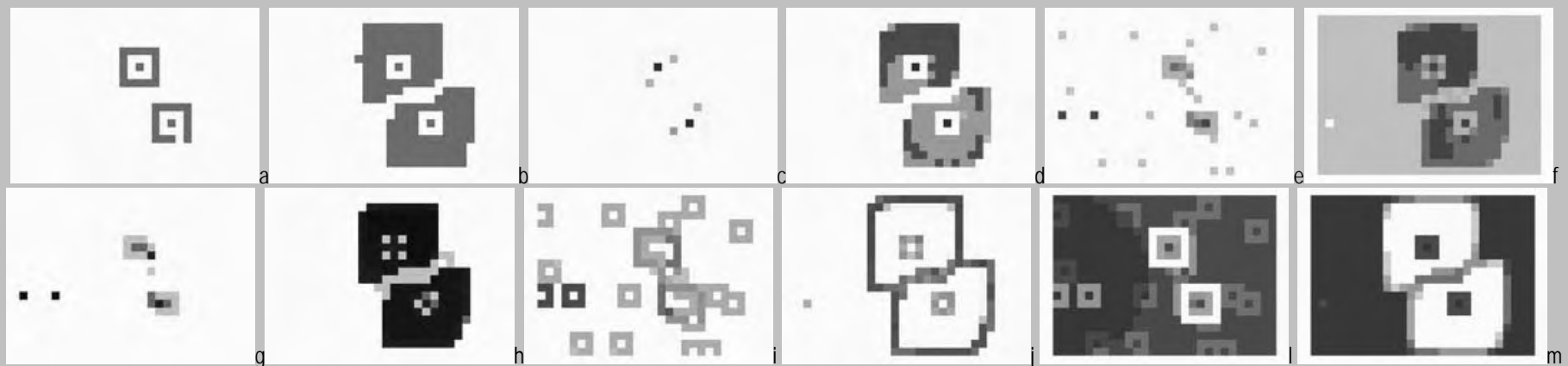


Figura 7.50: outputs das simulações utilizando  $\alpha$  (alfa) igual a 0,80; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

### 7.12 Limites de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos

A questão dos limites de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos está associada à disponibilidade de recursos naturais (Alberti, 1999) e aos limites de capacidade de suporte dos sistemas urbano e natural (Rees e Wackernagel, 1996), pelo que pode ser argüido que problemas ambientais podem ocorrer pela degradação dos recursos naturais e pela superação de limiares urbanos. Os trabalhos de modelagem realizados nessa investigação permitem aferir as duas possibilidades, sendo a primeira através da questão de conversão de território urbanizado em não urbanizado (conforme tem sido mostrado em todas as simulações) e a segunda através da imputação de limiares, o que será mostrado a seguir.

Limiares são tetos máximos para os carregamentos urbanos, acima dos quais aparecem problemas por superação da capacidade de absorção dos impactos do crescimento urbano (como geração de poluição, impossibilidade de co-presença com fatores bióticos, más condições de drenagem, insegurança, estabilidade de solos ou algum tipo de fragilidade ambiental (Guapyassú e Hardt, 1998), ou das possibilidades de alocação de infra-estrutura (Burton, Willians e Jenks, 1998), ou diminuição de eficácia do sistema de circulação (Vasconcelos, 2000). Ocorrendo a superação de limiares, cujos valores são informados exogenamente (como foi mostrado nos capítulos 3 e 4, anteriormente), o potencial de crescimento passa a ser utilizado para diminuir o carregamento, ao invés de aumentar; nessa mudança, o modelo deixar de operar temporariamente através de um *feedback* positivo (mais potencial implicando em mais carregamento, que por sua vez implica em mais potencial) e passa a realizar um *feedback* negativo (mais potencial implicando em menos carregamento, o que produz menos potencial), até que o valor do carregamento fique abaixo do limiar; como o processo é iterativo, há tendência de o carregamento variar acima e abaixo do valor especificado, provocando uma oscilação em torno do limiar<sup>29</sup>.

O SACI tem como padrão o limiar de valor 1,00 para todos os atributos, o qual pode ser modificado para valores menores e maiores; com a diminuição do limiar de crescimento, uma célula passa a apresentar problemas ambientais com valores abaixo de 1,00 e é impedida de crescer mais, o que pode acontecer precocemente, em função do limiar rebaixado; com o aumento do limiar de crescimento, uma célula pode manter-se crescendo com valores acima de 1,00, sem que isso signifique problema ambiental; esse aumento de limiar pode representar investimentos estruturais no espaço urbano, que passa a ter maior capacidade de absorver os impactos da urbanização. Cada vez que o limiar é superado, o modelo registra problemas ambientais de dois modos: a) a cada iteração, mostrando sua incidência no transcorrer do tempo; b) no total, somando os problemas de todas as iterações anteriores e mostrando o resultado cumulativo (como sugere Alberti, 1999, para a melhor interpretação dos efeitos dos problemas ambientais).

---

<sup>29</sup> Como será mostrado adiante, foi também desenvolvida para o SACI uma regra de crescimento que considera o crescimento ilimitado, sem o uso de limiares, de modo a permitir análise comparativa e a aumentar as possibilidades de geração de cenários de futuro (ver subtítulo 8.2.1, com a regra sem limiares, bem como seu uso experimental no subtítulo 8.5).

Uma vez estabelecidos os recursos de simulação capazes de gerar e de resolver problemas ambientais intra-urbanos, com registros de resultados instantâneos e acumulados, experimentos podem ser delineados sobre a relação entre crescimento urbano e a ocorrência desses problemas ambientais. Deste modo, estão a seguir simulações dedicadas a observar onde ocorrem problemas ambientais intra-urbanos no processo de crescimento da cidade e como interferem diferentes limiares no acúmulo desses problemas. A hipótese indicada aqui é que problemas ambientais intra-urbanos tendem a se concentrar nas bordas das áreas urbanizadas e nas áreas de transição entre maior e menor intensidade de urbanização.

Para observar os efeitos da diferenciação de limiares de crescimento (*threshold*, no modelo) e visualizar o registro de problemas ambientais intra-urbanos estão realizadas duas simulações: a) limiares iguais para todo o *grid* (figura 7.52); b) utilização de uma área com limiar rebaixado para 50% (figura 7.53), utilizando uma área com atributos institucionais com peso igual a zero. Ambas as simulações maximizam o crescimento interno, utilizando o parâmetro  $\lambda$  (lambda) interno igual a 0,80 para obter contraste no registro de problemas ambientais. As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.51, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.



Figura 7.51: inputs utilizados nos experimentos com variação no valor de limiares (*threshold*, no modelo), para observar modificações no crescimento e simular problemas ambientais intra-urbanos; a) carregamentos com valores de 9 e 10; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) células com limiar modificado para 50% (azul) e superposição dos carregamentos e das resistências.

Os resultados do experimento aparecem nos *grids* com os estados inicial e final de 32 iterações (figuras 7.51 e 7.52), nos gráficos com a evolução da conversão de células para o fenótipo urbano e com o registro de problemas ambientais intra-urbanos (gráfico 7.4), bem como com histogramas de carregamentos e de problemas ambientais intra-urbanos (gráficos 7.5 e 7.6); ao final estão juntadas as principais interpretações.

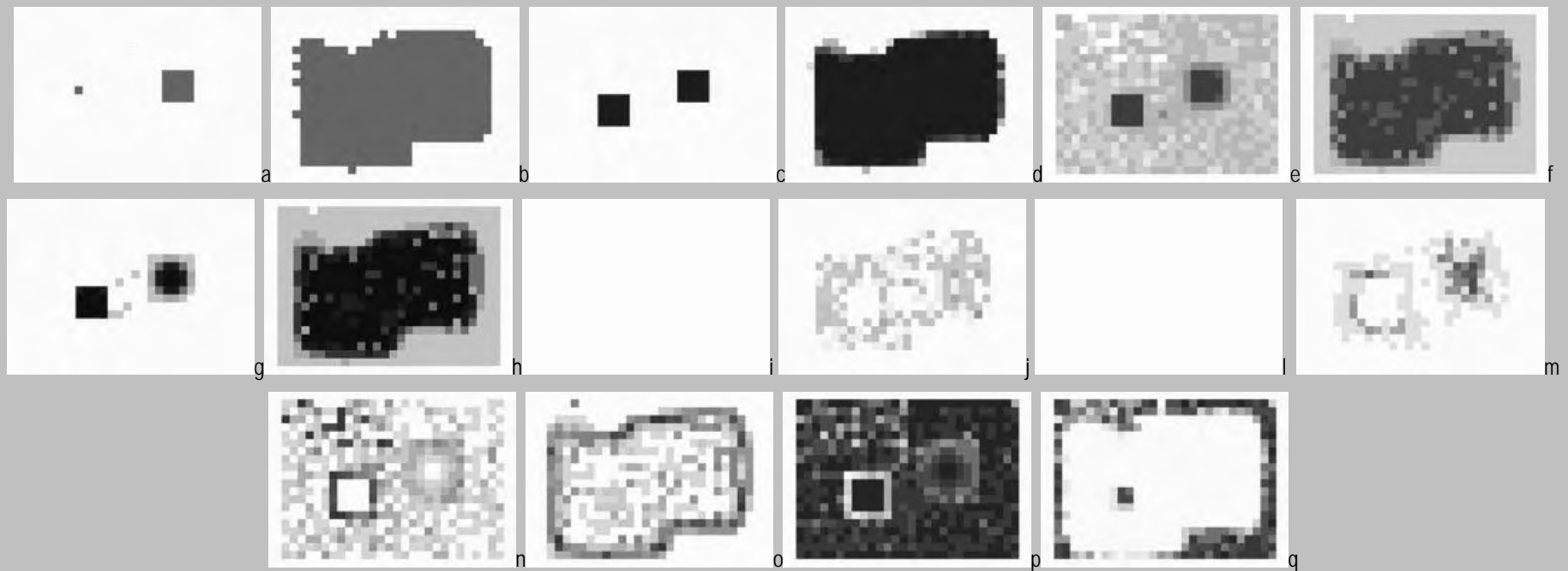


Figura 7.52: outputs das simulações utilizando limiar igual a 1 para todas o grid (padrão no modelo); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 0; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) EProbl na iteração 1; j) EProbl na iteração 32; l) EprobT na iteração 1; m) EprobT na iteração 32; n) Potential na iteração 1; o) Potential na iteração 32; p) ResistE na iteração 1; q) ResistE na iteração 32.

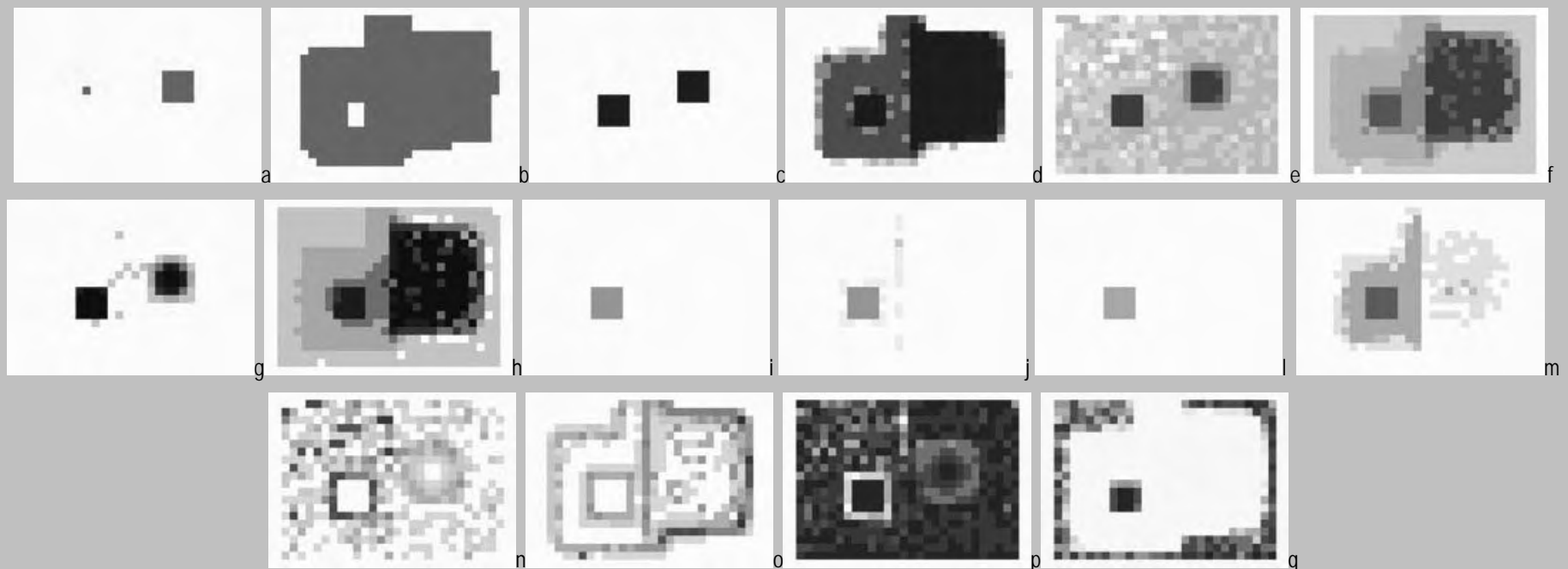


Figura 7.53: outputs das simulações utilizando limiar igual a 0,5 na metade esquerda do grid; a) CellType na iteração 10; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 10; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 10; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 10; h) CentR2 na iteração 32; i) EProbl na iteração 1; j) EProbl na iteração 32; l) EprobT na iteração 1; m) EprobT na iteração 32; n) Potential na iteração 10; o) Potential na iteração 32; p) ResistE na iteração 10; q) ResistE na iteração 32.



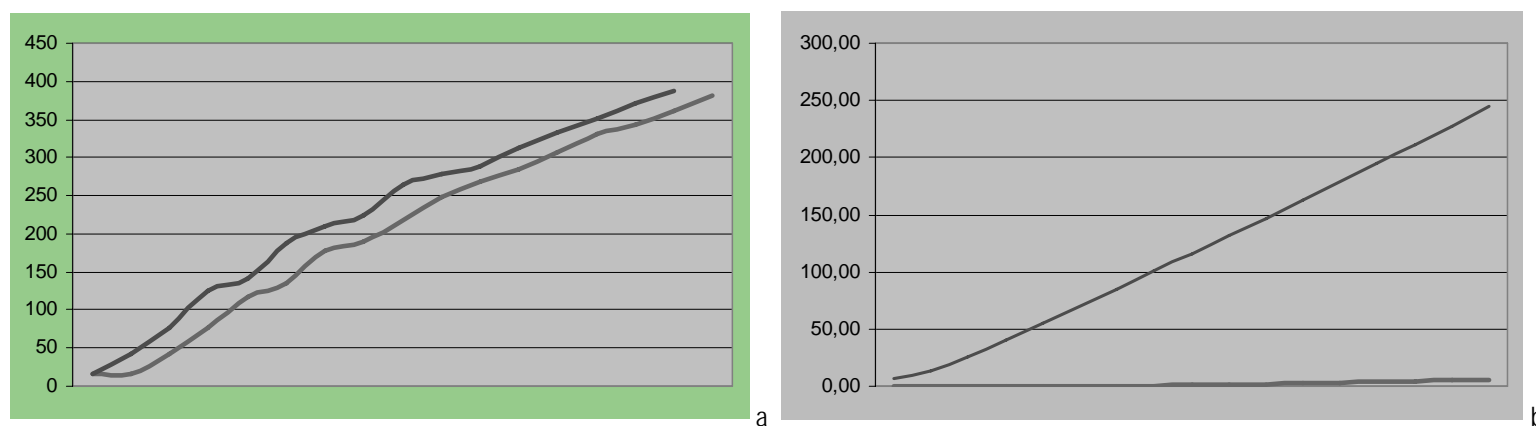


Gráfico 7.5: simulação com variação no valor de limiares, mostrando os resultados com limiares iguais em todo o grid (linha azul) e com limiar modificado em parte do grid (linha vermelha); no eixo vertical está a quantidade de células e no horizontal as iterações; a) evolução da conversão de células para o fenótipo urbano; b) evolução do registro de problemas ambientais intra-urbanos.

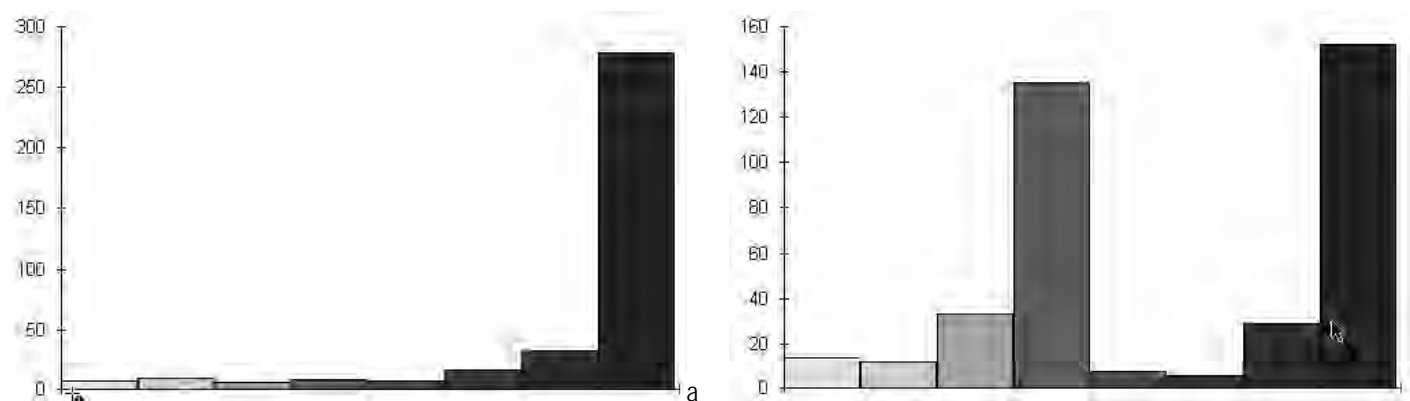


Gráfico 7.6: simulação com variação no valor de limiares, mostrando histogramas com os resultados para os carregamentos urbanos; no eixo vertical está a quantidade de células e no horizontal a intensidade do carregamento; a) com limiares iguais em todo o grid; b) com limiar modificado em parte do grid.

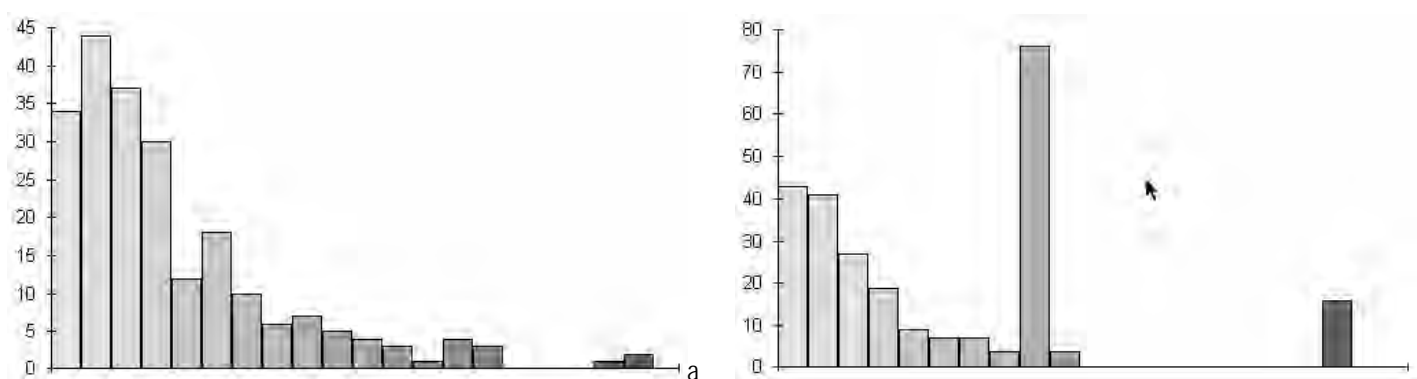


Gráfico 7.7: simulação com variação no valor de limiares, mostrando histogramas com os resultados para os problemas ambientais intra-urbanos; no eixo vertical está a quantidade de células e no horizontal a intensidade dos problemas ; a) com limiares iguais em todo o grid; b) com limiar modificado em parte do grid.

O caso realizado com a aplicação de limiares iguais em todo o *grid* e com limiares diferentes apresenta os seguintes resultados principais (figuras 7.52 e 7.53): a) a quantidade de células convertidas para o fenótipo urbano não se altera significativamente, pois embora seja ligeiramente maior no caso do limiar modificado, mantém os padrões de evolução (gráfico 7.5a) e de quantidades semelhantes (388 e 382 células urbanas na iteração final, respectivamente); b) os carregamentos urbanos mostram evidente variação nos resultados, com número maior de células portadoras de maior carregamento no caso de limiares iguais em todo o *grid*, em comparação com os carregamentos do caso com limiar modificado (279 e 152 células com carregamento máximo na iteração final, respectivamente; ver gráfico 7.6); além dessa diferença quantitativa, são notáveis as diferenças qualitativas na concentração de carregamentos, com um pico de células com carregamento de média intensidade, o que é consequência direta do limiar menor (gráfico 7.6b); c) de mesmo modo que nos carregamentos urbanos, a distribuição de centralidades é diminuída na área com limiar modificado, sendo inclusive decrescente nas células que iniciam a simulação, nessa área; d) o registro de problemas ambientais intra-urbanos é evidente diferencial entre as duas simulações, os quais se acumulam na área de menor limiar e invertem a localização dos valores máximos obtida quando os limiares são iguais para todo o *grid* (ver figuras 7.52 e 7.53 i, j, l, m); além disso: d.1) os valores acumulados dos problemas ambientais intra-urbanos são decididamente superiores, com os máximos registrados em 0,11 e 12,80, respectivamente para os casos sem e com o limiar modificado; d.2) a quantidade de células que apresenta problemas é quase duas vezes maior para o caso do limiar modificado, como mostram os histogramas que aparecem no gráfico 7.7; outra característica que diferencia a ocorrência de problemas ambientais intra-urbanos nos dois casos é o seu padrão de distribuição no *grid*, o qual é difuso no caso dos limiares iguais em todo o *grid* e concentrado no caso do limiar modificado (como pode ser visto na figura 7.52 e 7.53 i, j, l, m; e) o caso do potencial de crescimento é semelhante ao que ocorre para os fenótipos urbanos, não aparecendo fortes diferenças nos dois casos; a diferença mais marcante nesse resultado refere-se ao padrão de distribuição no *grid* que, como no caso dos carregamentos, é mais difuso quando é aplicado o limiar modificado; é notável também o acúmulo de potencial de crescimento em áreas de interface, tanto com relação às preexistências como em relação às áreas de limiares diferentes; f) as resistências naturais apresentam fraca alteração nos dois casos, recebendo maior visibilidade no interior das células urbanas preexistentes na área de menor limiar, onde restam mais concentradas até o final da simulação.

Em resumo, com relação ao experimento que destaca o uso de limiares de crescimento e torna evidente os problemas ambientais intra-urbanos, pode ser verificado o seguinte: a) o modelo oferece efetiva possibilidade de modificação dos limiares de crescimento e de registro de problemas ambientais intra-urbanos; b) a mudança de limiares altera pouco a conversão de células para o fenótipo urbano, o que implica em fraca importância para a expansão territorial urbana; c) todavia, o carregamento e a centralidade das áreas acrescidas mudam significativamente, sendo diretamente proporcional ao rebaixamento dos limiares; d) é notável como se modificam pouco as resistências naturais ao processo de crescimento, acompanhando a evolução da conversão de células para o fenótipo urbano; e) como efeito mais evidente do rebaixamento de limiar está o aparecimento de problemas ambientais intra-urbanos em áreas que crescem acima dos limiares, o que ocorre em maior quantidade, em maior número de células e em localização de modo concentrado em células de interface, no caso de área com limiar rebaixado.

### 7.13 Ponderação e autoponderação de atributos

Métodos e critérios para imputar pesos a atributos têm sido desenvolvidos para diversos campos do conhecimento, particularmente em sistemas de avaliação multicritério e avaliação de impacto (respectivamente Soares, 2003 e Baylei, 1997), com trabalhos dedicados a classificar fatores e a ordená-los numa escala de valores (Spellerberg, 1994; Santos, 2004). Em trabalhos de modelagem urbana, a ponderação de atributos está ligada a duas questões principais: a) ajustar o modelo para melhor corresponder à realidade (Candau, 2000); b) representar experimentalmente conceitos ou juízos de valor (Lovett e Bateman, 2001).

O modo como está proposto o SACI implica em classificar todos os atributos em uma de duas possibilidades: a) ou o atributo atrai crescimento urbano; b) ou o atributo resiste a esse crescimento. Sendo assim, aumentar ou diminuir o peso de um atributo em relação aos demais implica em informar maior ou menor capacidade de atração ou de resistência, o que é aplicado aos atributos naturais, urbanos e institucionais.

Para realizar a ponderação de atributos, o SACI oferece duas alternativas: a) ponderação heurística; b) autoponderação. A ponderação heurística é construída por experimentação nos trabalhos de simulação, sendo que o usuário do modelo vai testando diferentes pesos para os atributos e verificando os resultados. Esse processo pode ser aplicado a todos os atributos, servindo para os urbanos, os naturais e os institucionais.

No caso de atributos urbanos que operam como carregamentos, são recomendados três critérios para construir os pesos (adaptado de Acioly e Davidson, 1998 e de Vasconcelos, 2000): a) o tipo de uso do solo, com pesos decrescentes entre usos industriais, comerciais, institucionais e habitacionais; b) a densidade de ocupação do solo por tipo de uso, com pesos diretamente proporcionais à densidade; c) a intensidade de tráfego, sendo o peso diretamente proporcional à atratividade; no caso de atributos urbanos que operam como resistências, podem ser considerados (adaptados de Souza, 2003): d) a incompatibilidade do uso com os demais, sendo maior o peso dos mais incompatíveis; e) o potencial para produzir poluição, sendo o peso diretamente proporcional; f) a densidade de ocupação do solo por tipo de uso, com pesos diretamente proporcionais à densidade.

No caso de atributos naturais que funcionam como carregamentos, interessam os seguintes critérios (adaptado de Kohlsdorf, 1986): a) estruturação da paisagem, concedendo maior peso aos locais com maior importância cognitiva; b) presença de barreiras localizadas, com peso inversamente proporcional à dificuldade de acesso local (acessibilidade na estrutura urbana e proximidade de outras áreas urbanizadas são residentes no modelo); c) habitabilidade e segurança, conferindo maior peso às áreas com implantação de infra-estrutura difícil ou consideradas áreas de risco; quando os atributos naturais funcionarem como resistências, deve ser considerado como critério o grau de impedimento que o atributo oferece à urbanização, que pode ser expresso pelos fatores (adaptado de Caminos e Goethert, 1978 e de Santos, 2004): d) incompatibilidade de co-presença com a urbanização, conferindo maior peso aos atributos mais incompatíveis; e) dificuldade de remoção, com peso diretamente proporcional; f) impacto ambiental causado pela ausência do atributo, também com peso diretamente proporcional.

Para o caso de atributos do tipo institucional, os pesos devem ser congruentes com as políticas a implementar no experimento, sendo determinados a cada caso.

A autoponderação é realizada de modo automático pelo modelo, auferindo pesos diretamente proporcionais à escassez dos atributos no sistema, o que implica pesos inversamente proporcionais à quantidade de células de cada um dos atributos. Esse processo interessa para os atributos que ocorrem como cobertura do solo, tal como águas, matas, dunas, campos e outros; pode ser usado também para subsistemas específicos, tal como águas subterrâneas, estrutura geológica ou qualidade do ar, desde que tratados separadamente. A autoponderação atende a duas demandas tradicionais em ecologia de paisagem e de conservação (Sklar e Constanza, 1991; Forman, 1995): a) a importância de um atributo está associada a uma variável espacial; b) essa importância depende de uma relação com o conjunto. Sendo assim, o peso de um atributo pelo processo de autoponderação é função do tamanho do sistema e da quantidade do atributo, podendo ser calculado como está nas equações 7.8, 7.9 e 7.10, a seguir.

---

*Equação 7.8: função do peso do atributo i pelo processo de autoponderação*

---

$$P_{iA} = f(S, Q_i)$$

*onde se lê:*

*o peso do atributo i pelo processo de autoponderação é função do tamanho do sistema e da quantidade do atributo*

*sendo:*

*P<sub>iA</sub> : peso do atributo i pelo processo de autoponderação*

*S : tamanho do sistema*

*Q<sub>i</sub> : quantidade do atributo i*

Assumindo o sistema como um *grid* bidimensional, o peso do atributo pelo processo de autoponderação pode ser calculado do seguinte modo:

---

*Equação 7.9: peso do atributo i pelo processo de autoponderação*

---

$$P_{iA} = \frac{S_g}{Q_{ig}}$$

*onde se lê:*

*o peso do atributo i pelo processo de autoponderação é igual ao número de células do grid dividido pelo número de células em que ocorre o atributo*

*sendo:*

*P<sub>iA</sub> : peso do atributo i pelo processo de autoponderação*

*S<sub>g</sub> : número de células do grid*

*Q<sub>ig</sub> : número de células em que ocorre o atributo*

Considerando a experimentação que vem sendo realizada nesta investigação, é adequado proceder a uma transformação escalar nos dados, de modo a aproximar os resultados dos pesos a valores entre 1 e 10 (sem limite de máximo), resultando a fórmula final do processo de autponderação na seguinte:

*Equação 7.10: peso do atributo i pelo processo de autponderação, com transformação escalar*

$$P_{iA} = \ln \frac{Sg}{Q_{ig}} + 1$$

*onde se lê:*

*o peso do atributo i pelo processo de autponderação é igual ao logaritmo neperiano do número de células do grid dividido pelo número de células em que ocorre o atributo, mais um*

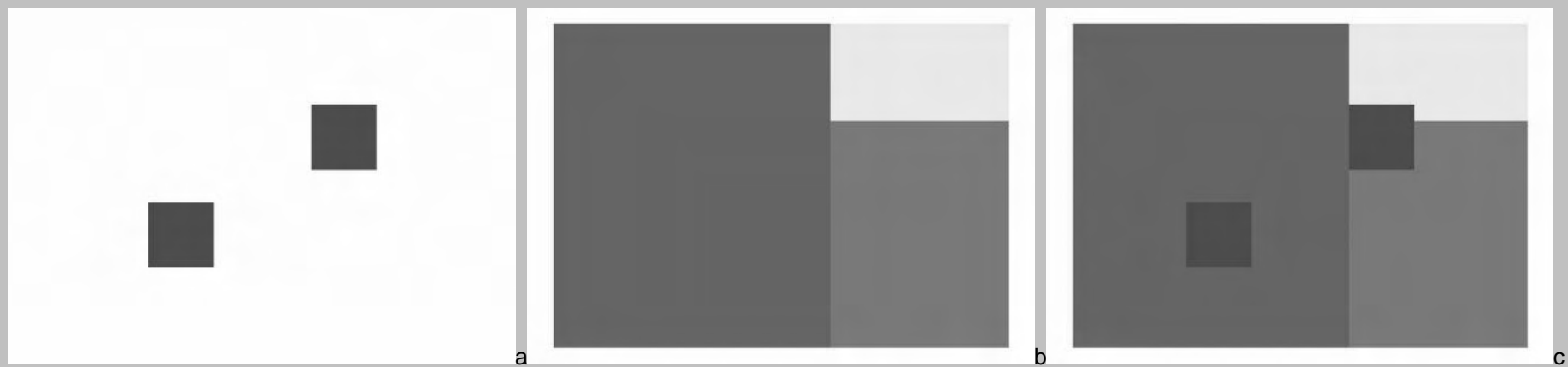
*sendo:*

*P<sub>iA</sub> : peso do atributo i pelo processo de autponderação*

*Sg : número de células do grid*

*Q<sub>ig</sub> : número de células em que ocorre o atributo*

Para verificar os efeitos da utilização de pesos diferentes entre os atributos (*weight*, no modelo) estão construídas três simulações, com diferentes pesos para as resistências: a) todas as resistências com o mesmo peso (figura 7.55); b) pesos de 1, 10 e 100 para os diferentes temas (figura 7.56); c) autponderação para os três temas que representam as resistências (figura 7.57). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.54, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.



*Figura 7.54: inputs utilizados no experimento com variações nos pesos dos atributos, para demonstrar os efeitos da autponderação e observar efeitos no crescimento; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências com área 1 (azul), 2 (verde) e 3 (amarelo); c) superposição dos carregamentos e das resistências.*

Os resultados do experimento com variações nos pesos dos atributos de resistências estão mostrados na seqüência, com os estados inicial e final de 32 iterações (figuras 7.55, 7.56 e 7.57), gráficos de comparação da conversão de território (gráfico 7.8) e interpretações.

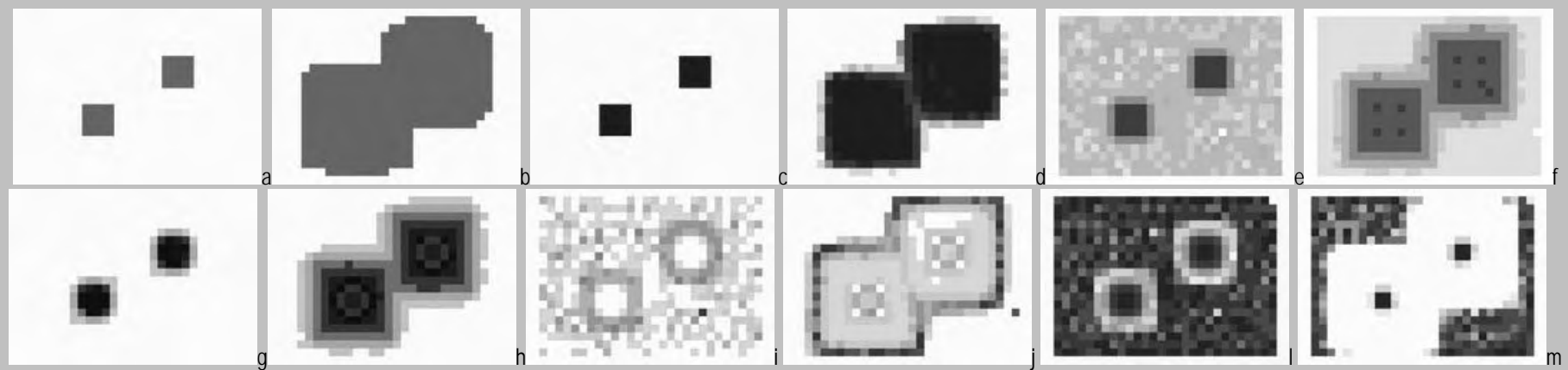


Figura 7.55: outputs das simulações com mesmo peso para as resistências (1 para todas as células); a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

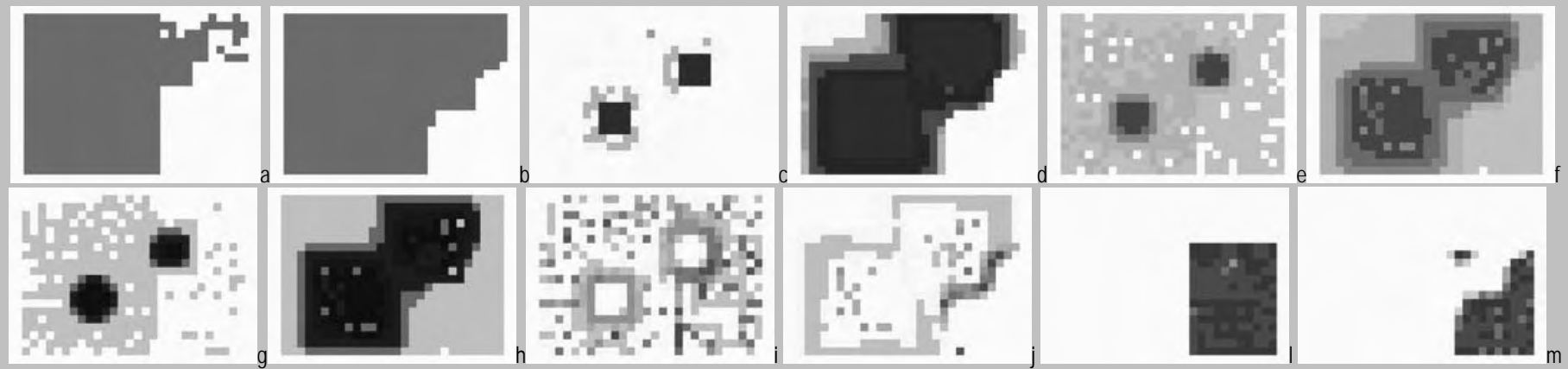


Figura 7.56: outputs das simulações com ponderação manual de 1, 10 e 100 para as áreas 1, 3 e 2, respectivamente; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

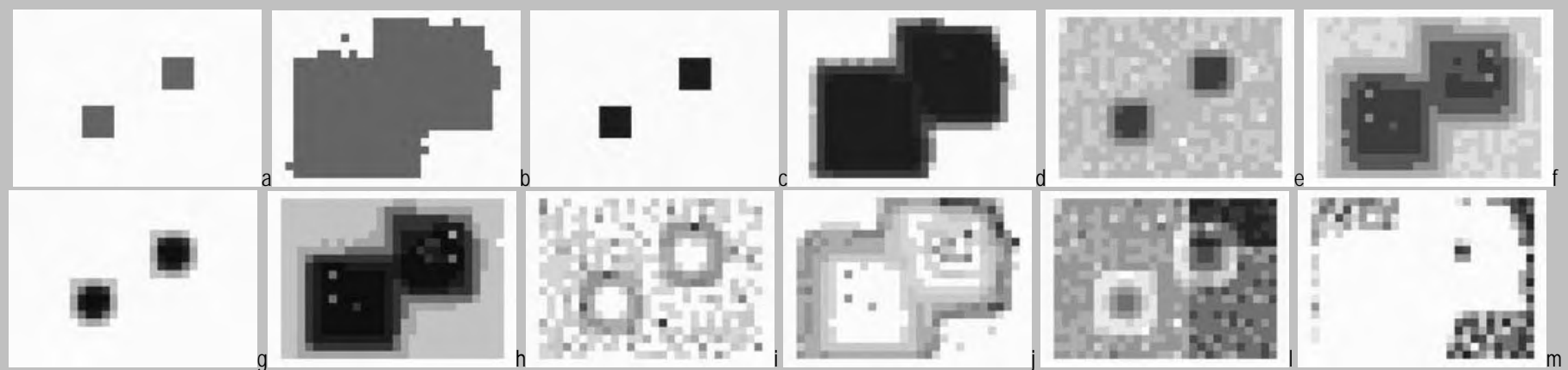


Figura 7.57: outputs das simulações com autoponderação; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; l) ResistE na iteração 1; m) ResistE na iteração 32.

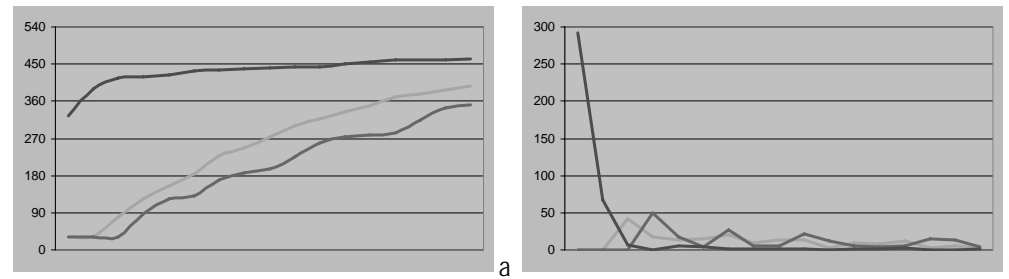


Gráfico 7.8: simulação com variação no valor dos pesos dos atributos, mostrando a evolução das células com fenótipo urbano (*CellType*, no modelo), para o caso com mesmo peso para todas as resistências (linha azul), com ponderação manual de 1, 10 e 100 (linha vermelha) e com autoponderação (linha laranja); no eixo vertical está a quantidade de células e no horizontal as iterações; a) evolução acumulada; b) evolução por iteração.

A simulação com ponderação manual dos atributos que exercem resistência ao crescimento, utilizando pesos iguais a 1, 10 e 100 (figura 7.55) apresenta os seguintes resultados principais: a) aparece um aumento de conversão de território na área de menor peso para as resistências, com todas as células convertidas para o fenótipo urbano desde as primeiras iterações (gráfico 7.8), o que é acompanhado por maior abrangência dos carregamentos e das centralidades urbanas de classes superiores; b) ao final da simulação o potencial de crescimento aparece acumulado na interface com a zona que recebeu maior peso, onde restam células não convertidas para o fenótipo urbano; c) as resistências ao crescimento com menor peso são consumidas desde as primeiras iterações, ficando os remanescentes concentrados no caso oposto, na área de resistências com maior peso.

No caso da simulação com autoponderação, o modelo auferiu os pesos 1,48 , 1,85 e 2,42 , em função inversa da quantidade de células de cada atributo autoponderado, conforme método de cálculo mostrado anteriormente. O resultados são semelhantes aos do caso anterior, aparecendo mais moderadamente, em função do menor intervalo no valor dos pesos, podendo ser destacados os seguintes (figura 7.56): a) aumento de crescimento nas áreas de menor peso, com maior conversão de território (gráfico 7.8), carregamento e centralidade nessas áreas; b) concentração de potencial de crescimento na interface da zona de maior peso, nas iterações finais, mostrando o mesmo fenômeno do caso anterior, mas em local diferente; c) a evolução das mudanças nas resistências naturais segue um padrão mais próximo da simulação com mesmo peso para todos os atributos, em função do referido menor intervalo de pesos resultante da autoponderação.

Resumindo os resultados com o experimento de ponderação e autoponderação está o seguinte: a) o modelo oferece efetivamente a possibilidade de diferenciar os atributos através de pesos, que podem ser auferidos manual ou automaticamente, com implicações evidentes no processo de crescimento; b) três efeitos são notáveis nesse processo: b.1) áreas com resistências com pesos menores atraem o crescimento urbano, aumentando a conversão de território e o carregamento urbano; b.2) os remanescentes dos atributos naturais tendem a se concentrar nas áreas de maior peso, sendo que as de menor peso tendem a manifestar o fenótipo urbano desde as iterações iniciais; b.3) com o avançar das iterações, a tendência do potencial de crescimento é de aumentar na interface das zonas de maior peso com as demais; c) esses resultados indicam que as relações entre o crescimento e os pesos dos atributos naturais variam no tempo, sendo que: c.1) áreas com resistências maiores têm o crescimento retardado em curto prazo, porém têm o potencial aumentado em longo prazo; c.2) áreas com resistências menores têm o crescimento acelerado em curto prazo, mas têm o potencial diminuído em longo prazo.

### 7.14 Crescimento difuso, fragmentação e compacidade

A questão do crescimento difuso, fragmentação e compacidade pode ser testada em função das possibilidades de incremento positivo e negativo no crescimento difuso que a estrutura do modelo oferece, mediante o ajuste das distribuições das tensões de crescimento, como foi mostrado no Capítulo 3 e seguintes. Estudos dedicados à relação entre forma e crescimento urbano, ao se interessarem pela questão ambiental e ao discutirem sustentabilidade, têm passado por questões ligadas à dispersão da cidade no território e à concentração que ocorre nos centros urbanos (Breheny, 1992; Gordon e Richardson, 1997). De um modo geral, esses trabalhos apontam para problemas causados na cidade e no ambiente, ou pela sua fragmentação ou pela concentração excessiva, que são consideradas indesejáveis para a sustentabilidade urbana (Echenique, 1999; Royal, 2000), sendo tomados como estados causadores de problemas, como algo a ser evitado ou removido. Noutro caminho, esta investigação explora a possibilidade de a fragmentação e a compactação da cidade serem recursos para a sua permanência, sendo soluções para a morfologia urbana, ao invés de problemas, os quais tenderiam a ocorrer mais pela ausência duradoura (ou de longo prazo) desses estados. De fato, o que vem sendo observado neste trabalho é que enquanto o crescimento difuso e fragmentado tende a aumentar o consumo de território no curto prazo e a gerar menos problemas ambientais, o crescimento com compacidade aumenta o consumo de território no longo prazo e não diminui a ocorrência de problemas ambientais.

O experimento dedicado a verificar os efeitos do crescimento difuso está implementado através de três simulações, variando a distribuição de tensões: a) com distribuição de tensões igual a 20% para todos os tipos, que é o padrão do modelo (figura 7.59); b) com 100% de distribuições axiais, para alcançar a compacidade máxima (figura 7.60); c) com 100% de distribuições difusas, para conseguir a fragmentação máxima (figura 7.61). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 7.58, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

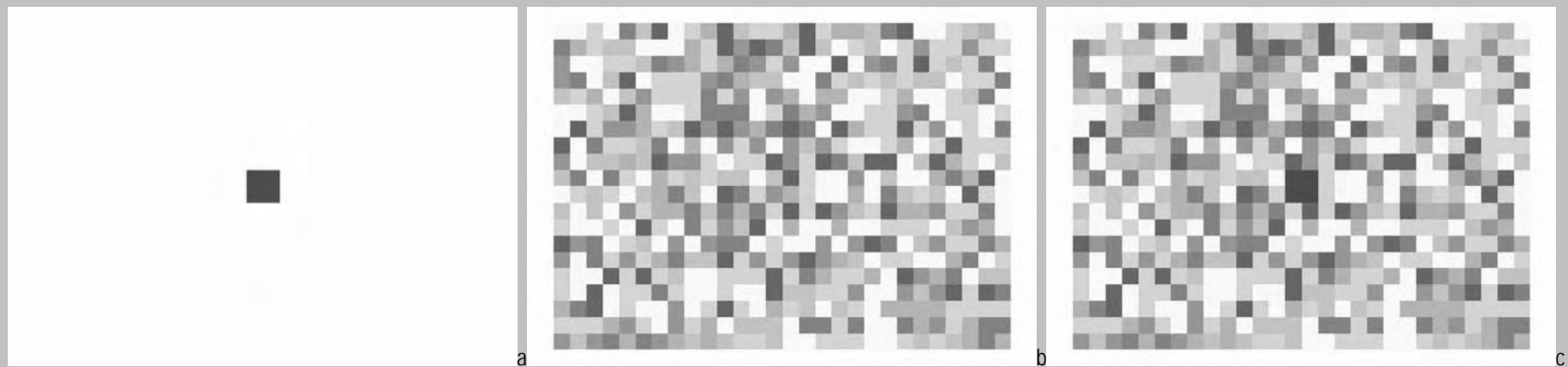


Figura 7.58: inputs utilizados no experimento para verificar os efeitos do crescimento difuso; a) carregamentos com valor igual a 1 (quatro células contíguas); b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.



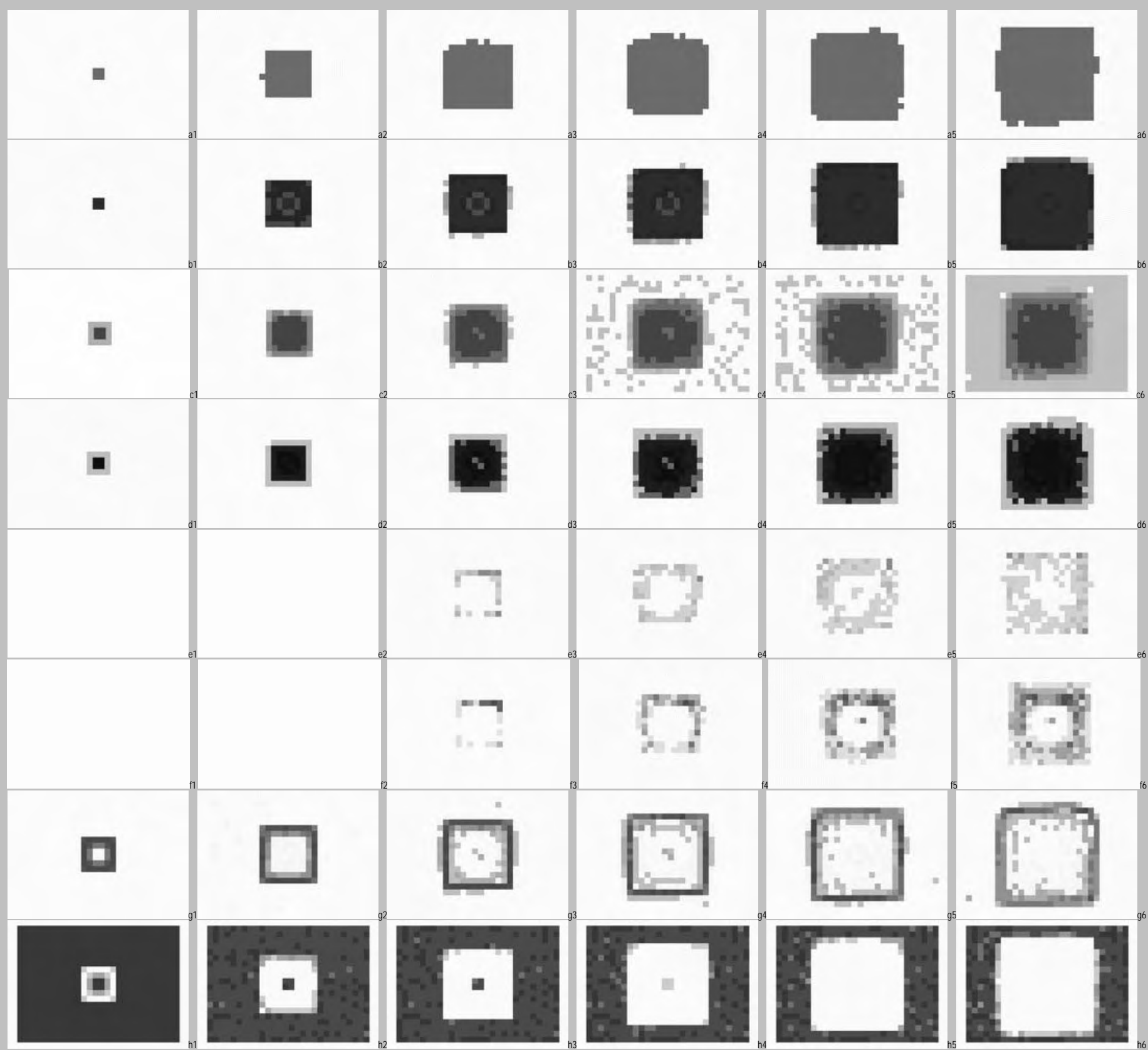


Figura 7.59: outputs da simulação com 20% de distribuição de tensões para todos os tipos, mostrando 6 de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EProbl; f) EProbt; g) potential; h) ResistE.

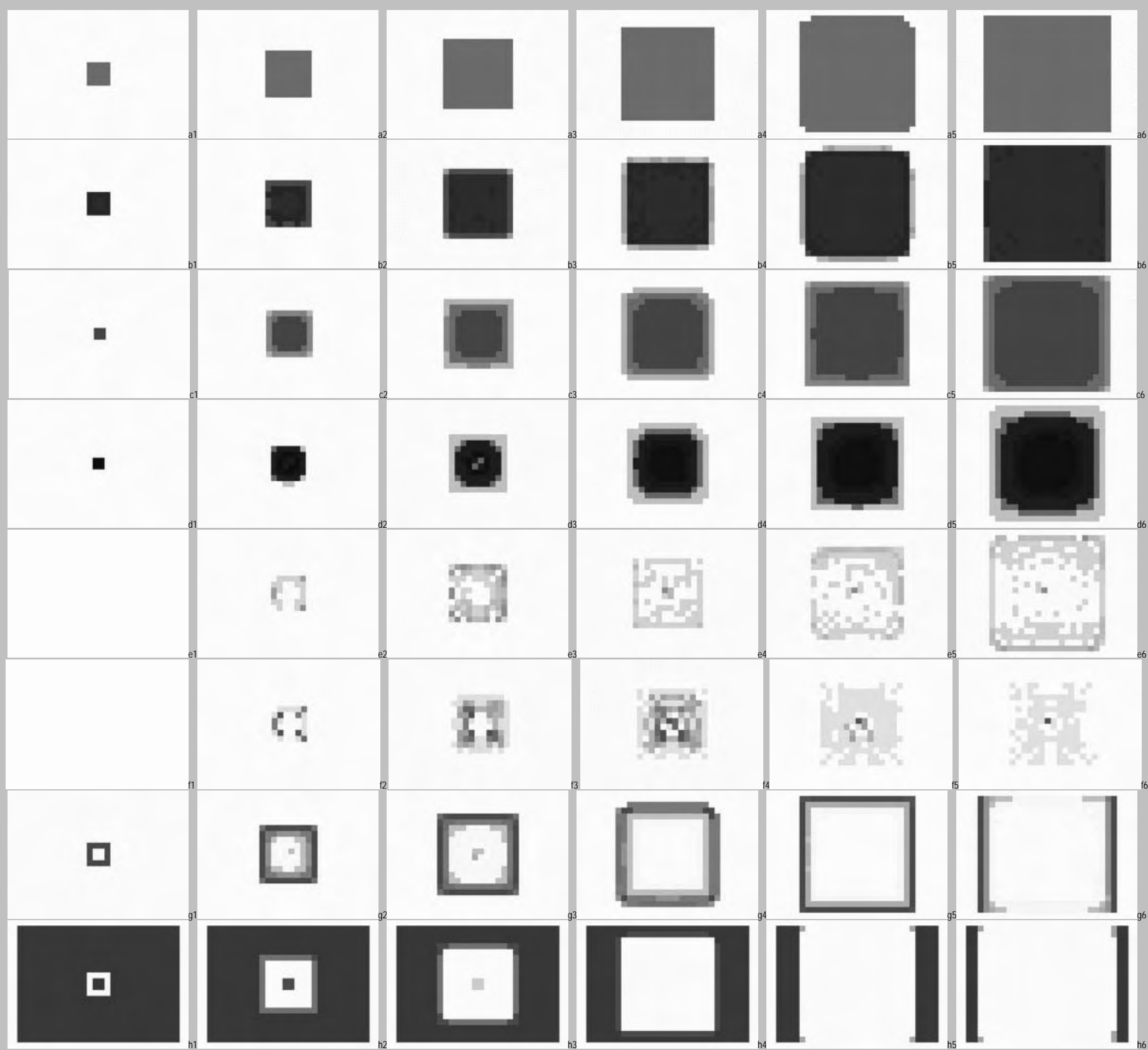


Figura 7.60: outputs da simulação com 100% de distribuição de tensões axiais, mostrando 6 de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EProbl; f) EProbt; g) potential; h) ResistE.

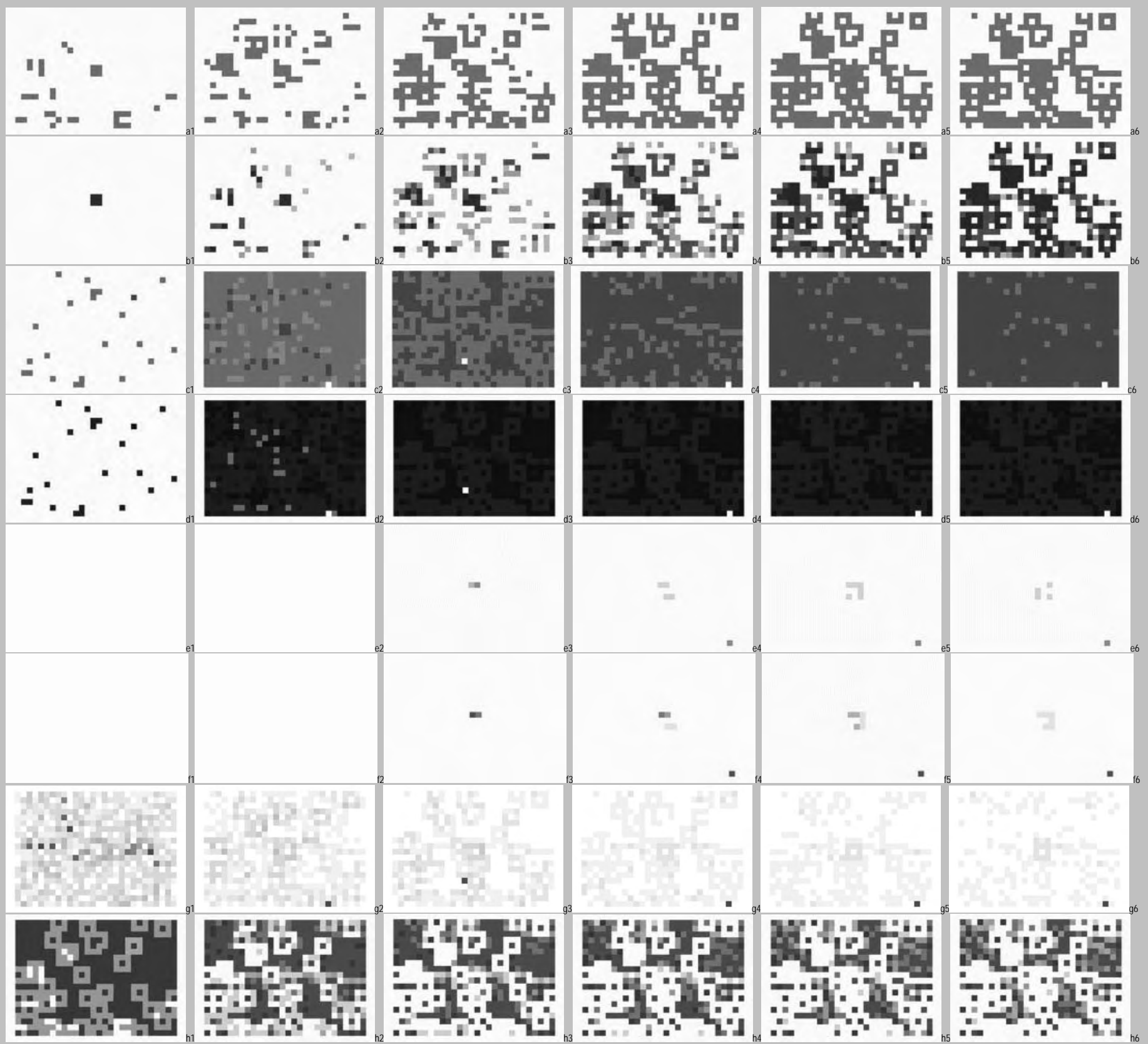


Figura 7.61: outputs da simulação com 100% de distribuição de tensões difusas, mostrando 6 de 32 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EProbI; f) EProbT; g) potential; h) ResistE.

iteração	fragmentação máxima	fragmentação absoluta	fragmentação relativa	compacidade máxima	compacidade absoluta	compacidade relativa	conversão de território por iteração	conversão de território acumulada	problemas ambientais intra-urbanos por iteração	problemas ambientais intra-urbanos acumulados
1	36	24,00	0,67	0,56	0,50	0,89	0	0	0,00	0,00
2	36	24,00	0,67	0,56	0,50	0,89	0	0	0,00	0,00
4	324	104,00	0,32	1,69	1,50	0,89	8	32	0,00	0,00
6	567	153,00	0,27	2,24	1,97	0,88	24	59	0,00	0,00
8	585	159,00	0,27	2,27	1,91	0,84	1	61	0,00	0,00
10	900	216,00	0,24	2,82	2,50	0,89	18	96	0,00	0,00
12	900	216,00	0,24	2,82	2,50	0,89	0	96	0,41	0,41
14	1206	270,00	0,22	3,27	2,68	0,82	24	130	0,46	0,79
16	1296	284,00	0,22	3,39	3,00	0,89	1	140	1,27	1,88
18	1368	302,00	0,22	3,48	2,62	0,75	8	148	1,23	2,59
20	1647	337,00	0,20	3,82	3,16	0,83	13	179	1,40	3,69
22	1755	357,00	0,20	3,94	3,48	0,88	2	191	1,67	5,02
24	1791	369,00	0,21	3,98	3,21	0,81	3	195	1,91	6,58
26	2115	413,00	0,20	4,32	3,56	0,82	14	231	1,98	7,85
28	2214	426,00	0,19	4,42	3,73	0,84	3	242	2,24	9,39
30	2295	441,00	0,19	4,50	3,98	0,88	2	251	2,47	11,01
32	2466	470,00	0,19	4,67	3,81	0,81	13	270	2,43	12,59

tabela a

iteração	fragmentação máxima	fragmentação absoluta	fragmentação relativa	compacidade máxima	compacidade absoluta	compacidade relativa	conversão de território por iteração	conversão de território acumulada	problemas ambientais intra-urbanos por iteração	problemas ambientais intra-urbanos acumulados
1	36,00	24,00	0,67	0,56	0,50	0,89	0	0	0,00	0,00
2	144,00	60,00	0,42	1,13	1,00	0,89	12	12	0,00	0,00
4	144,00	60,00	0,42	1,13	1,00	0,89	0	12	0,01	0,01
6	324,00	104,00	0,32	1,69	1,50	0,89	0	32	0,22	0,46
8	477,00	131,00	0,27	2,05	1,66	0,81	17	49	1,30	1,87
10	576,00	156,00	0,27	2,26	2,00	0,89	0	60	1,65	3,82
12	666,00	170,00	0,26	2,43	2,06	0,85	10	70	1,06	4,88
14	900,00	216,00	0,24	2,82	2,50	0,89	4	96	1,48	7,57
16	900,00	216,00	0,24	2,82	2,50	0,89	0	96	1,31	9,24
18	1260,00	272,00	0,22	3,34	2,92	0,87	8	136	3,08	12,65
20	1296,00	284,00	0,22	3,39	3,00	0,89	0	140	2,10	16,30
22	1656,00	332,00	0,20	3,83	3,29	0,86	40	180	3,40	20,02
24	1764,00	360,00	0,20	3,95	3,50	0,89	4	192	3,05	23,25
26	1764,00	360,00	0,20	3,95	3,50	0,89	0	192	3,25	26,78
28	2268,00	432,00	0,19	4,48	3,94	0,88	8	248	4,39	32,93
30	2304,00	444,00	0,19	4,51	4,00	0,89	4	252	3,22	38,18
32	2700,00	496,00	0,18	4,89	4,17	0,85	44	296	4,10	42,92

tabela b

iteração	fragmentação máxima	fragmentação absoluta	fragmentação relativa	compacidade máxima	compacidade absoluta	compacidade relativa	conversão de território por iteração	conversão de território acumulada	problemas ambientais intra-urbanos por iteração	problemas ambientais intra-urbanos acumulados
1	36,00	24,00	0,67	0,56	0,50	0,89	0	0	0,00	0,00
2	306,00	252,00	0,82	1,64	0,35	0,22	30	30	0,00	0,00
4	333,00	277,00	0,83	1,72	0,35	0,20	3	33	0,00	0,00
6	486,00	392,00	0,81	2,07	0,35	0,17	12	50	0,00	0,00
8	873,00	623,00	0,71	2,78	0,41	0,15	28	93	0,00	0,00
10	1188,00	822,00	0,69	3,24	0,43	0,13	21	128	0,02	0,02
12	1521,00	987,00	0,65	3,67	0,46	0,12	19	165	0,01	0,03
14	1809,00	1049,00	0,58	4,00	0,53	0,13	19	197	0,06	0,09
16	2115,00	1143,00	0,54	4,32	0,59	0,14	13	231	0,09	0,19
18	2250,00	1166,00	0,52	4,46	0,63	0,14	8	246	0,35	0,53
20	2304,00	1180,00	0,51	4,51	0,64	0,14	4	252	0,38	0,91
22	2385,00	1191,00	0,50	4,59	0,66	0,14	4	261	0,43	1,34
24	2412,00	1196,00	0,50	4,62	0,67	0,14	3	264	0,56	1,91
26	2466,00	1202,00	0,49	4,67	0,69	0,15	4	270	0,53	2,51
28	2484,00	1212,00	0,49	4,69	0,69	0,15	2	272	0,51	3,10
30	2529,00	1233,00	0,49	4,73	0,69	0,15	2	277	0,43	3,53
32	2565,00	1235,00	0,48	4,76	0,70	0,15	3	281	0,45	4,00

tabela c

Tabela 7.1: output das simulações utilizadas no experimento para verificar os efeitos de alternância entre compacidade e fragmentação; a) caso com distribuição de tensões de 20% para todos os tipos; b) caso com distribuição de tensões 100% axiais; c) caso com distribuição de tensões 100% difusas.

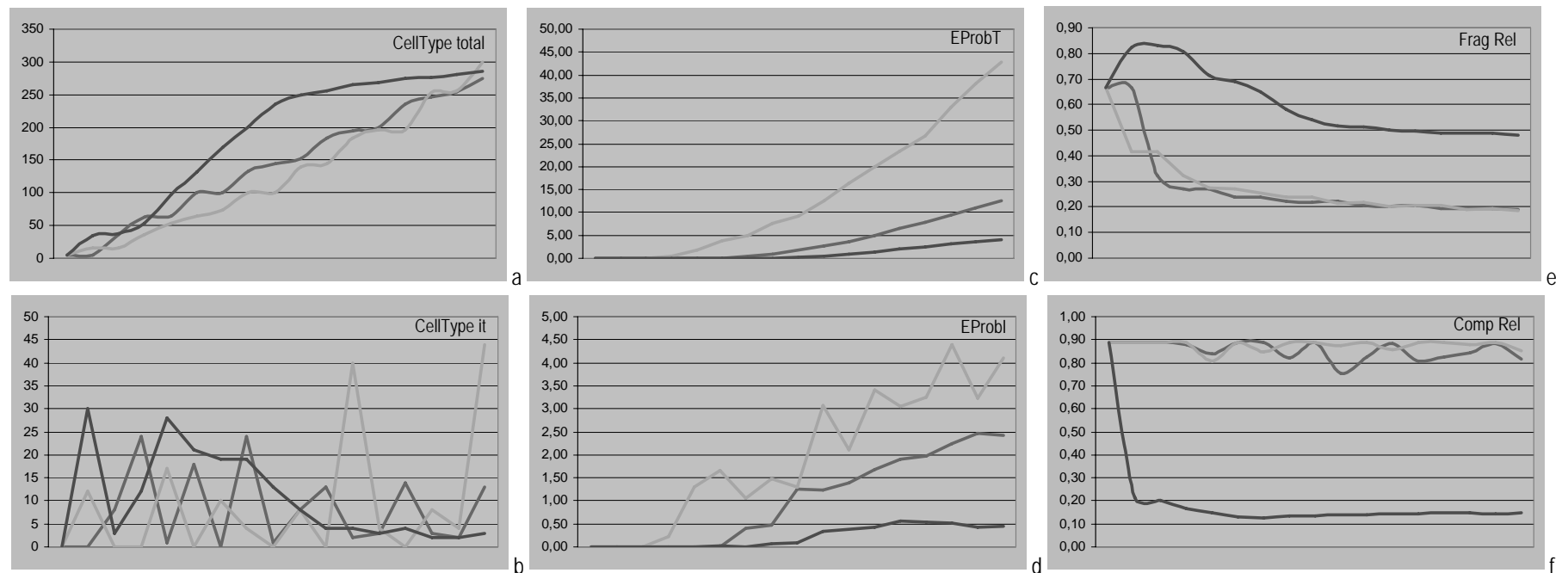


Gráfico 7.9: comparação entre os resultados das simulações com distribuição de tensões de 20% para todos os tipos (em traço azul), com 100% axiais (traço laranja) e com 100% difusas (traço vermelho), em 32 iterações; a) conversão de território para o fenótipo urbano acumulada (CellType, no modelo); b) conversão de território para o fenótipo urbano por iteração (CellType, no modelo); c) problemas ambientais intra-urbanos acumulados (EProbT, no modelo); d) problemas ambientais intra-urbanos por iteração (EProbl, no modelo); e) fragmentação relativa; f) compacidade relativa.

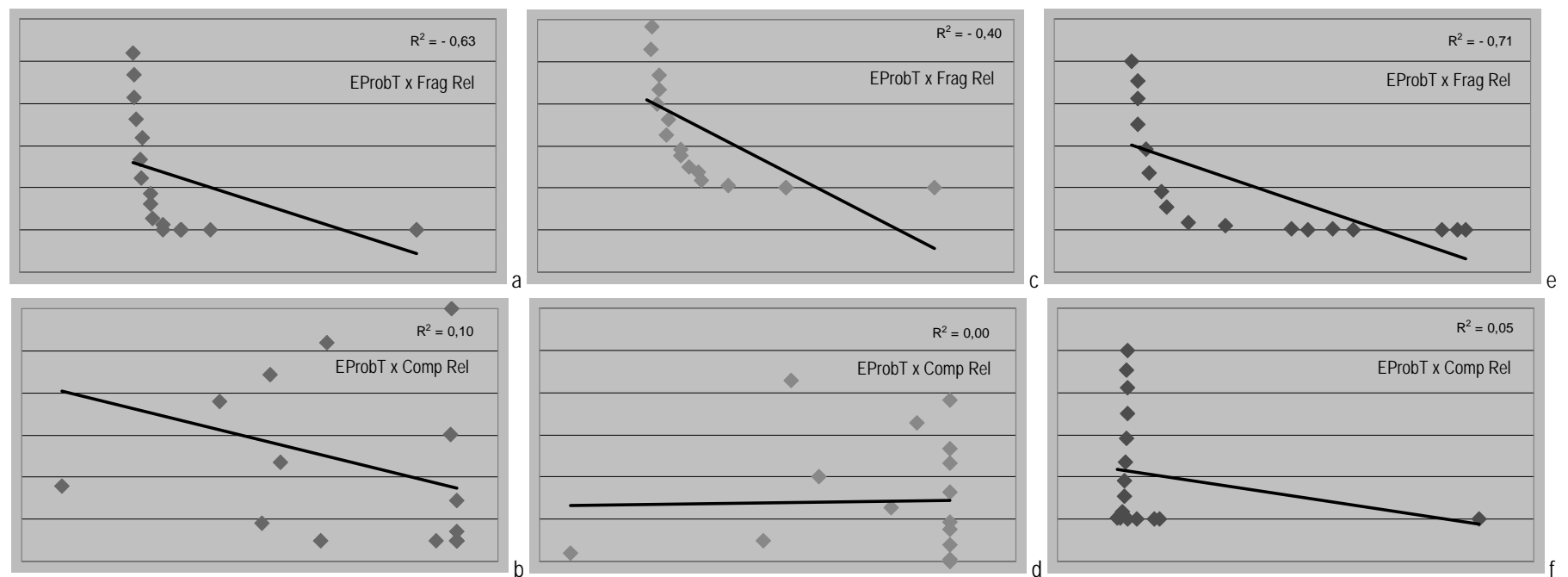


Gráfico 7.10: a) dispersão e correlação entre problemas ambientais intra-urbanos e fragmentação relativa, para o caso com distribuição de tensões de 20% para todos os tipos ( $r = -0,63$ ); b) dispersão e correlação entre problemas ambientais intra-urbanos e compacidade relativa, para o caso com distribuição de tensões de 20% para todos os tipos ( $r = 0,10$ ); c) dispersão e correlação entre problemas ambientais intra-urbanos e fragmentação relativa, para o caso com distribuição de tensões 100% axiais ( $r = -0,40$ ); d) dispersão e correlação entre problemas ambientais intra-urbanos e compacidade relativa, para o caso com distribuição de tensões 100% axiais ( $r = 0,00$ ); e) dispersão e correlação entre problemas ambientais intra-urbanos e fragmentação relativa, para o caso com distribuição de tensões 100% difusas ( $r = -0,71$ ); f) dispersão e correlação entre problemas ambientais intra-urbanos e compacidade relativa, para o caso com distribuição de tensões 100% difusas ( $r = -0,05$ ).

Os resultados dos *grids* com o experimento para verificar os efeitos do crescimento difuso, da fragmentação e da compacidade mostram diferenças evidentes quando 100% das tensões são distribuídas de modo difuso (figura 7.61), com relação aos casos com 20% de distribuição de tensões para todos os tipos e com 100% de tensões axiais, os quais apresentam resultados semelhantes (figuras 7.59 e 7.60). As principais diferenças são as seguintes:

- a) são evidentes desde o início das simulações as diferenças entre os resultados para as células com fenótipo urbano, para os carregamentos, para a distribuição de centralidades e para as resistências naturais (respectivamente *CellType*, *LoadU*, *CentR1*, *CentR2* e *ResistE*, no modelo), sendo que no caso de 100% de tensões difusas ocorre um espalhamento por todo o *grid*, enquanto que nos outros dois casos os resultados gravitam e se concentram no entorno das células antecessoras;
- b) uma diferença fundamental aparece no registro dos problemas ambientais intra-urbanos acumulados (*EProbT*, no modelo), que no caso de 100% de tensões difusas têm menor valor e ocorrem em menor quantidade de células do que nos demais casos; esse resultado informa que o crescimento difuso produz menor quantidade de problemas ambientais, sendo que o espalhamento de células urbanas, de estoques construídos e de centralidades concorre para evitar a superação de limiares;
- c) os resultados de potencial de crescimento (*Potential*, no modelo) também diferem no caso de 100% de tensões difusas, sendo decrescentes e difusos, enquanto que nos demais casos são crescentes, lineares e concentrados na borda;

As seqüências de gráficos mostram comparações entre os casos simulados, estando organizados em dois grupos: a) gráficos com a evolução dos fenótipos urbanos, dos problemas ambientais intra-urbanos, da fragmentação relativa e da compacidade relativa; b) dispersão e correlação linear dos problemas ambientais intra-urbanos com a fragmentação relativa, depois com a compacidade relativa. O primeiro grupo de gráficos evidencia as diferenças da simulação com as tensões 100% difusas em relação aos demais casos, mostrando que o crescimento difuso produz menos problemas ambientais intra-urbanos, o que é acompanhado de maior fragmentação e menor compacidade, para a mesma conversão de território final (ver os gráficos 7.9c, d, e, f, a, b, respectivamente). O segundo grupo de gráficos demonstra que há relação de aleatoriedade entre ocorrência de problemas ambientais intra-urbanos e aumento de compacidade, bem como demonstra que há correlação negativa entre esses problemas e o aumento de fragmentação; sendo assim, pode ser verificado que a variação na compacidade não interferiu na geração de problemas ambientais intra-urbanos, enquanto que o aumento de fragmentação diminuiu a geração desses problemas (ver gráficos 7.10a, b, c, d, e, f).

Resumindo, o experimento permite concluir que: a) o modelo construído é capaz de simular alternativas de crescimento difuso e compará-las com outros casos; b) o crescimento difuso tende a gerar resultados com menor concentração, o que ficou evidente nas células convertidas para o fenótipo urbano, nos carregamentos urbanos, na distribuição de centralidades e nas resistências naturais; c) o crescimento difuso produz menor quantidade de problemas ambientais intra-urbanos, considerando simulações com mesma intensidade de crescimento. Ao cabo, assumindo que a menor geração de problemas ambientais intra-urbanos como indicador, pode ser admitido que o crescimento urbano difuso colabora com a sustentabilidade urbana.

### 7.15 Conclusões sobre a simulação avançada

Considerando o conjunto de experimentos realizados neste capítulo e denominados de simulação avançada, podem ser recuperadas as seguintes conclusões gerais:

- a) o SACI apresenta efetiva capacidade para realizar as simulações, permitindo os trabalhos exploratórios com sensibilidade às mudanças de *input* e de parâmetros que os experimentos exigiram; esse desempenho é favorável a sua utilização para o caso de modelagem dinâmicas de crescimento urbano, como vem sendo sustentado neste trabalho;
- b) crescimento urbano interno e externo simultâneos é a modalidade que mais converte território, superando o caso do crescimento exclusivamente externo, no qual as áreas convertidas ficam estáveis e provocam a diminuição dos potenciais; também no caso da simultaneidade correm menos problemas ambientais intra-urbanos do que no caso do crescimento exclusivamente interno, no qual os limiares são rapidamente ultrapassados em toda a área preexistente; esse resultado reforça a idéia de que crescimento interno e externo são integrados, indicando uma relação de complementaridade e mútuo reforço;
- c) a distribuição dos estoques construídos demonstra comportamento instável, o que aparece ao observar as células isoladamente, havendo uma tendência de alternância entre valores relativos mais altos e mais baixos a cada iteração; essa instabilidade das parcelas, todavia, implica numa tendência geral homogênea, o que sugere um comportamento característico dos sistemas complexos; esse resultado indica que o manejo com estoques construídos, comuns no planejamento urbano e nos planos diretores, considere estar tratando com um fenômeno de tendência irregular e descontínuo, sendo sua eventual regularidade e continuidade um estado não permanente;
- d) vazios urbanos ocorrem como resultado da urbanização remota e descontínua, a qual pode ser percebida como um modo recorrente nos experimentos; sendo assim, está sugerido que vazios urbanos são componentes estruturais da cidade e esperados no seu processo de crescimento, não se caracterizando como sinônimo de anomalia ou mal-formação, o que contraria a idéia corrente de que a presença de vazios é indicador de problemas urbanos;
- e) periferias urbanas são esperadas nas bordas da cidade, podendo ser representadas por ocupações de população de renda média-alta e alta (conhecidas como *urban sprawl*) ou por população de renda baixa (conhecidas como periferias de baixa renda ou simplesmente como periferias); assumindo essa assertiva, pode ser considerado mais conseqüente compreender e manter atitudes com relação às periferias do que se empenhar na sua condenação ou no seu desaparecimento; considerando a extensiva formação de periferias de baixa renda nos países de terceiro mundo, pode ainda ser assumido que existe uma morfologia da desigualdade, sendo a descrição de suas características e a compreensão de sua lógica espacial fundamentais para a mitigação de suas mazelas;

- f) as simulações demonstraram que obsolescência nos estoques construídos tende a acarretar maior homogeneidade na área urbanizada, enquanto que, pelo contrário, revitalização de áreas preexistentes tende a favorecer maior concentração no conjunto; esse resultado contraria a noção corrente de que obsolescência é segregadora e de que revitalização favorece a igualdade, pois a associa obsolescência com normalização e revitalização com diferenciação;
- g) a variação dos raios de interação utilizados no processo de determinação da centralidade celular e dos raios de vizinhança utilizados no cálculo da medida de potencial de crescimento celular mostra influência na estrutura de organização de lugares centrais, demonstrando que os raios de interação maiores favorecem a monocentralidade, enquanto que os menores favorecem a policentralidade; está demonstrado também que raios de vizinhança maiores diminuem a nitidez dos referidos centros, enquanto que raios menores aumentam sua nitidez; esse resultado indica que a formação de mono ou policentralidade não depende simplesmente de funções urbanas que confirmam autonomia a parcelas remotas, ou de característica dos bairros tomados isoladamente, mas sim de relações entre as partes e da estrutura total da cidade, incluindo atributos naturais, urbanos e institucionais;
- h) carregamentos urbanos com raios de abrangência maiores implicam em maior homogeneidade do tecido urbano, diminuindo o intervalo de valores mínimos e máximos dos carregamentos urbanos, centralidades e potenciais; de modo contrário, raios de abrangência menores implicam em maior concentração dessas grandezas, ficando seus efeitos confinados na vizinhança; esse resultado demonstra que funções urbanas de maior raio de abrangência podem concorrer para o espalhamento do crescimento urbano e não para sua concentração;
- i) o aumento do efeito da distância, representando maiores restrições impostas pelo sistema de circulação urbana, ocasiona efeitos diferentes na escala global e na local; na escala global aparecem núcleos de bairro com tendência de crescimento autóctone, o que pode estar associado com menor acessibilidade; na escala local aparecem centros mais definidos e bordas mais fragmentadas, reproduzindo parcialmente a estrutura da cidade completa; sendo deste modo, os resultados indicam um dilema para as cidades, pois sugerem que o aperfeiçoamento do sistema de circulação, do que se esperam melhorias irrestritas, pode ao mesmo tempo ocasionar aumento da hegemonia e dependência dos centros tradicionais;
- j) áreas com maior impedância repelem o crescimento urbano internamente, o qual se transfere para áreas de menor impedância e para a interface das áreas com impedância diferente, efeito que ocorre de modo diretamente proporcional à percentagem de tensões axiais e axiais de buffer que são usadas na simulação; esse resultado confirma o argumento corrente de que áreas menos dotadas de infra-estrutura ou com usos de largo espectro de incompatibilidade têm o crescimento urbano abrandado, sendo que a implantação ou disponibilidade de infra-estrutura e a presença de usos complementares atrai o crescimento;



- k) preservação e renaturalização ambiental aplicadas em áreas integradas com a cidade produzem simultaneamente o aumento do potencial de crescimento na interface com outras áreas, aumentando com isso a pressão de urbanização; no caso de áreas que não tem a urbanização impedida permanentemente, a conservação só ocorre em curto prazo, tendendo a perder eficácia com o passar do tempo; políticas de valorização ambiental podem ser mais eficazes no longo prazo, porém acarretam maior fragmentação do tecido urbano e demandam esforços exógenos permanentes; esses resultados implicam em reconhecer a dificuldade de manter áreas de conservação em zonas contíguas à cidade, sugerindo o adequado direcionamento do crescimento urbano como prática fundamental para a preservação da paisagem natural; uma vez estabelecida a co-presença de áreas de conservação e de áreas urbanizadas, os experimentos realizados nesta investigação sugerem a consideração de zonas de amortecimento no espaço urbano e de renaturalização no espaço natural;
- l) a consideração de limiares de crescimento altera pouco a conversão de território, porém o rebaixamento do limiar implica em diminuição dos carregamentos urbanos, diminuição de centralidade, aparecimento de problemas ambientais e concentração de potencial na interface das áreas de menor limiar com as demais; sendo deste modo, pode ser assumido que o uso dos instrumentos tradicionais de controle urbano (como o coeficiente máximo de aproveitamento do solo, a taxa de ocupação máxima e o coeficiente máximo de impermeabilização do solo, que podem especificar os referidos limiares), são fracamente eficazes no manejo do crescimento urbano externo, pois são poucos os efeitos sobre a conversão de território; com relação ao crescimento interno, os experimentos mostram que a consideração de diferentes limiares traz efeitos notáveis sobre o crescimento, mas não sobre o potencial de crescimento, o que pode implicar em acúmulo de problemas ambientais intra-urbanos no longo prazo;
- m) ponderação de atributos afeta diferentemente aqueles que operam como resistências e como carregamentos; no caso das resistências, os experimentos realizados neste capítulo mostram que a diminuição relativa do peso de um atributo acelera sua transformação pelo processo de urbanização, enquanto que o aumento relativo do peso mantém as características naturais das células por mais tempo, porém ocasiona aumento de potencial na interface e induz transformações no longo prazo; no caso dos carregamentos, contrariando o que poderia ser esperado, os experimentos mostram que atributos com pesos menores atraem maior crescimento urbano do que os atributos com pesos maiores, sendo a diferença de centralidades do entorno dos primeiros maior do que a dos segundos;
- n) crescimento urbano difuso produz intensa conversão de território no curto prazo, o que tende a diminuir com o transcorrer do tempo, produzindo menos problemas ambientais intra-urbanos; ao contrário, crescimento urbano compacto produz maior conversão de território no longo prazo e mais problemas ambientais intra-urbanos; esse resultado permite questionar a idéia corrente de que menor fragmentação e maior compactidade aproximam a cidade de padrões de sustentabilidade, pois o experimento demonstra que o crescimento difuso apresenta melhor desempenho, assumindo como critérios a permanência de áreas naturais e a menor produção de problemas ambientais intra-urbanos.

### 7.16 Epílogo do capítulo 7

Neste capítulo tratei de construir e de demonstrar recursos de modelagem do SACI que o habilitam a investigar ampla temática de interesse para o crescimento urbano. Foram realizados experimentos específicos com os seguintes temas: a) crescimento interno e externo integrados; b) distribuição dos estoques construídos; c) formação de vazios urbanos; d) formação de periferias urbanas; e) obsolescência e revitalização nos estoques construídos urbanos; f) raios de interação, raios de vizinhança, mono e policentralidade; g) abrangência dos carregamentos urbanos; h) influência da distância entre carregamentos; i) variação da impedância das resistências ao crescimento; j) renaturalização e preservação ambiental; l) limites do crescimento e problemas ambientais intra-urbanos; m) ponderação e autponderação de atributos; n) crescimento difuso, fragmentação e compacidade.



No capítulo seguinte estarei realizando dois tipos de experimentos: a) um tipo mais geral, apresentando a questão das regras de crescimento alternativas, construindo um recurso de compressão de dados e oferecendo melhorias na visualização dos resultados gráficos; b) outro tipo destinado a aplicar os recursos do SACI de modo integrado, construindo cenários de futuro para o caso de Pelotas, RS.

## 8 Simulação avançada e o caso de Pelotas, RS

No capítulo anterior realizei experimentos com o objetivo de avançar sobre a questão da simulação no crescimento urbano, trabalhando com temas específicos e utilizando separadamente cada recurso de simulação desenvolvido no modelo, demonstrando suas possibilidades e seus efeitos. Neste capítulo me dedico a dois tipos de simulações: a) um primeiro tipo direcionado para a manipulação de regras de crescimento, compressão de dados e alternativas de visualização (subtítulos 8.2, 8.3 e 8.4) ; b) um segundo tipo dedicado à utilização integrada de diversos recursos construídos ao longo deste trabalho, simulando dois cenários alternativos para o caso de Pelotas, RS (subtítulo 8.5).

### 8.1 Apresentação

O primeiro tipo de simulações avança sobre três assuntos: a) a possibilidade de utilização de diferentes regras de crescimento, com e sem reconhecimento de limites para o crescimento urbano, bem como permitindo crescimento por percolação; b) a capacidade de processamento com compressão de dados, o que permite trabalhar com quantidades maiores de células e de tamanho menor, aumentando a complexidade das simulações e as possibilidades de operar com casos reais; c) a possibilidades de aperfeiçoamento na visualização dos resultados, a partir dos recursos nativos no programa de geoprocessamento e da montagem de animações (subtítulos 8.2, 8.3 e 8.4). O segundo tipo de simulações trata do caso de Pelotas, RS, demonstrando a utilização conjunta dos parâmetros e recursos disponíveis no SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>, oferecendo dois cenários alternativos de futuro: d) crescimento urbano na direção da sustentabilidade; e) crescimento urbano de modo convencional (subtítulo 8.5).

### 8.2 As regras de crescimento urbano

Em sistemas dinâmicos, regras de crescimento informam a lógica de modificação do estado de uma entidade (Torrens, 2000a), incidindo iterativamente em função do transcorrer do tempo; em sistemas que trabalham com CAs – autômato celulares, alterações ocorrem em função das características da própria célula e da sua vizinhança (ibidem), sendo que o modelo de simulação de crescimento urbano SACI trabalha com três regras principais, a saber:

a) potencial com limiar (*Threshold Potential*, no modelo), que é a regra padrão: como foi referido no Capítulo 2, anteriormente, é a regra dedicada à produção e ao crescimento de células com atributos urbanos, assume a cidade como um campo de oportunidades de obtenção de renda, mediadas pelo espaço, o qual é composto integradamente por atributos naturais, urbanos e institucionais, que funcionam como carregamentos ou como resistências para o crescimento urbano; a configuração espacial e a

distribuição desses atributos geram tensões que diferenciam o espaço qualitativa e quantitativamente – através da medida de centralidade (construída com o apoio de técnicas de grafos), vindo a provocar crescimento em lugares com maior potencial de desenvolvimento (determinado com a ajuda de técnicas de CA – autômato celular); crescimentos acima de determinados limiares são considerados problemas ambientais, gerados e superados no mesmo processo de produção do espaço urbano; iterações desse processo oferecem um comportamento dinâmico ao sistema, posto que a realização dos potenciais implica em novos valores de carregamentos, em diferentes tensões e centralidade e assim sucessivamente;

b) potencial livre (*Free Potential*), que é uma regra alternativa do modelo: também dedicada à produção e ao crescimento de células com atributos urbanos, difere da regra anterior por não considerar limiares para o crescimento urbano e, conseqüentemente, não gerar problemas ambientais intra-urbanos;

c) percolação (*Percolation*, no modelo), que é uma regra complementar do modelo: é dedicada à produção e ao crescimento de células com atributos naturais, através da passagem de atributos entre células contíguas, o que é determinado exclusivamente por técnicas de CA – autômato celular.

### 8.2.1 Crescimento por potencial com limiar e por potencial livre

Para verificar os efeitos da utilização das regras de crescimento está construído um experimento com duas simulações, primeiro utilizando a regra de potencial com limiar (*Threshold Potential*, no modelo; figura 8.2) e depois utilizando a regra de potencial livre (*Free Potential*, no modelo; figura 8.3). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 8.1, a seguir, num *grid* de 20 por 28, com 560 células.

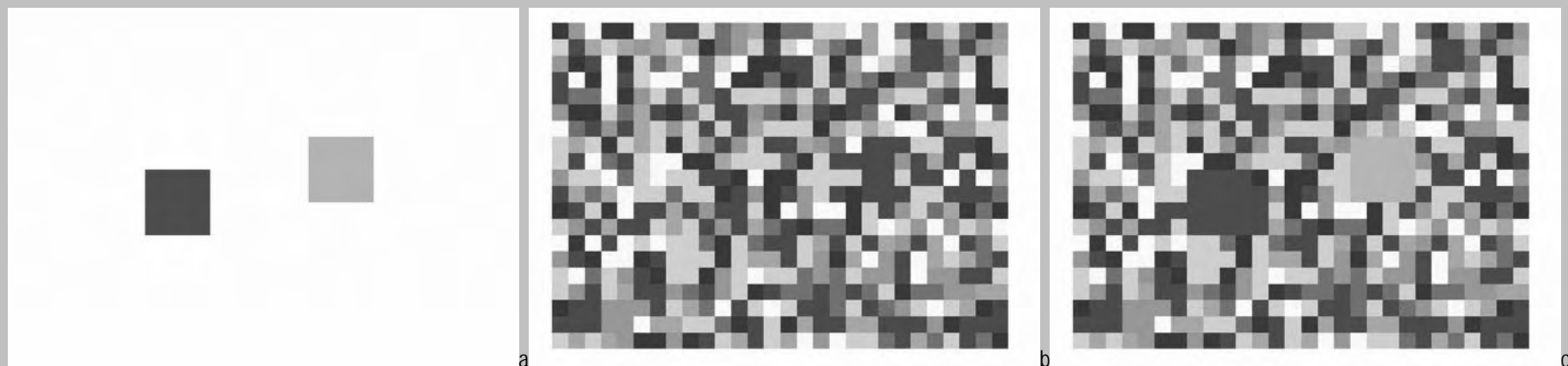


Figura 8.1: inputs utilizados no experimento com potencial com limiar e potencial livre (*Threshold Potential* e *Free Potential*, no modelo); a) carregamentos com valores de 10 e 9; b) resistências aleatórias com valores de 1 a 2; c) superposição dos carregamentos e das resistências.

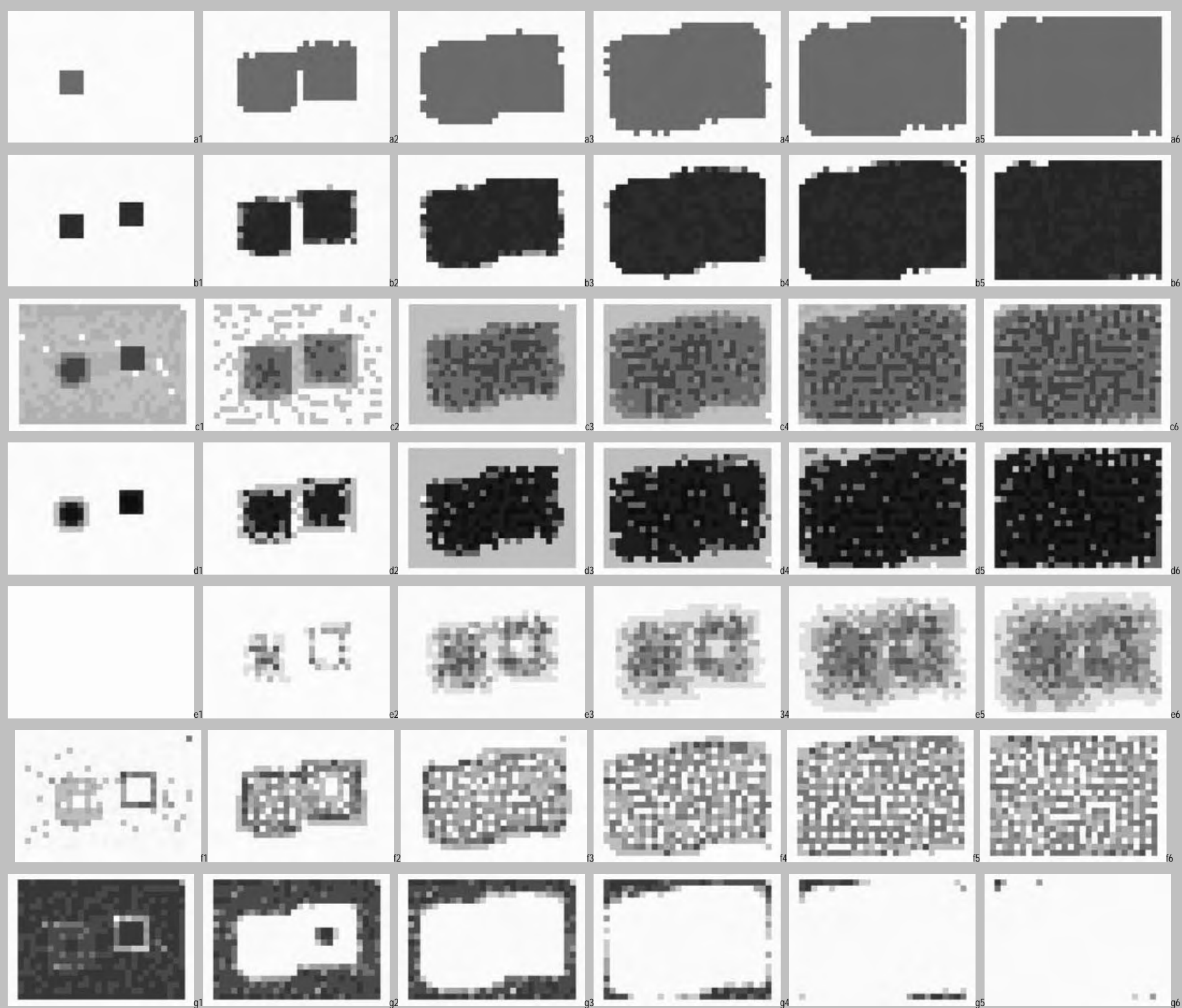


Figura 8.2: outputs da simulação utilizando o *Threshold Potential*, mostrando 6 de 64 iterações; a) *CellType*; b) *LoadU*; c) *CentR1*; d) *CentR2*; e) *EprobT*; f) *Potential*; g) *ResistE*.

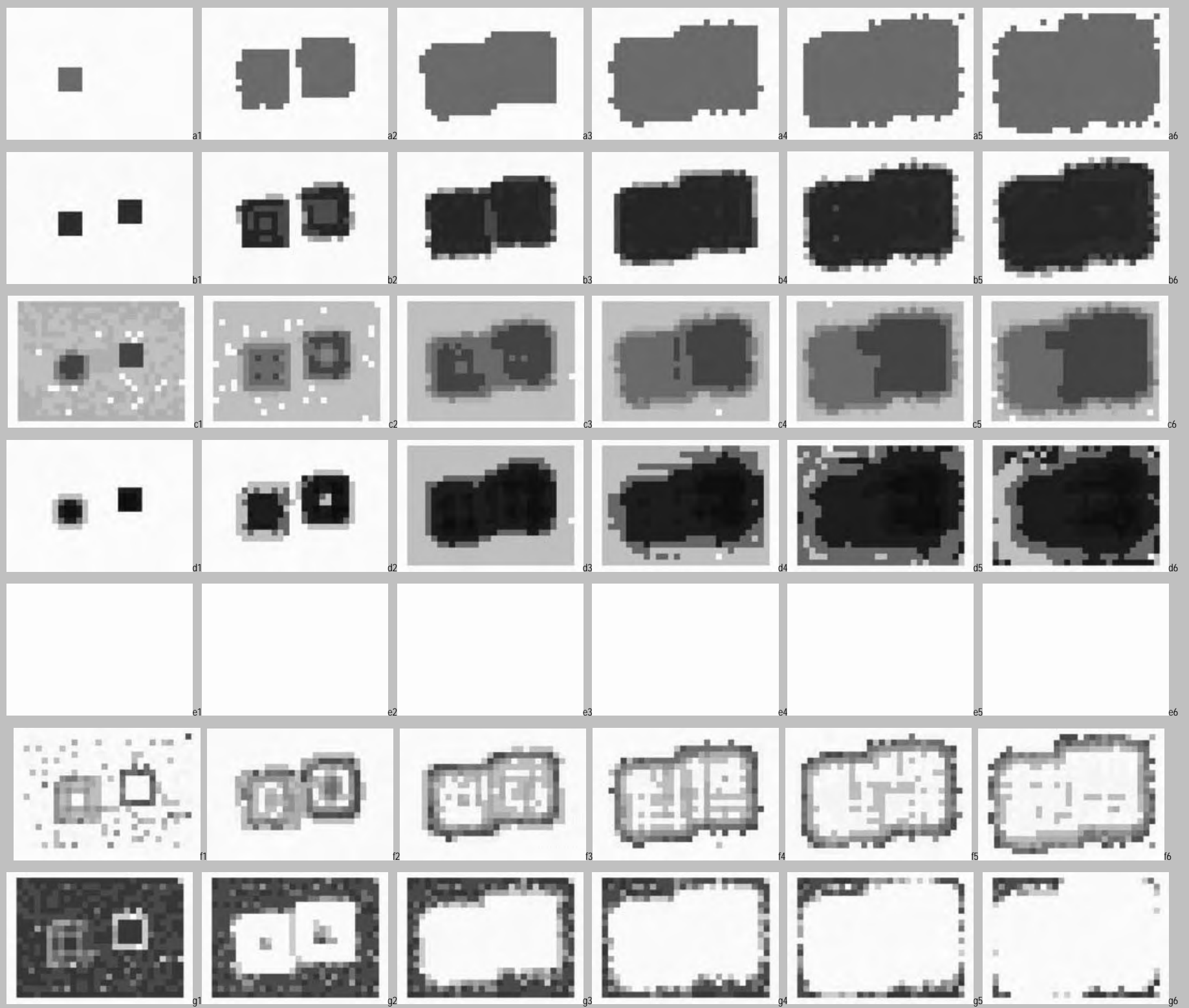


Figura 8.3: outputs da simulação utilizando o Free Potential, mostrando 6 de 64 iterações; a) CellType; b) LoadU; c) CentR1; d) CentR2; e) EprobT; f) Potential; g) ResistE.

Os resultados das simulações de crescimento com as regras de potencial com limiar e potencial livre, mostrados nas seqüências das figuras 8.2 e 8.3, anteriormente, permitem as principais observações:

- a) a conversão de células para o fenótipo urbano (*CellType*, no modelo) é maior com a regra de potencial com limiar, pois as tensões de crescimento são menos concentradas espacialmente do que no caso da regra de potencial livre, atingindo mais células e provocando mais conversão;
- b) a distribuição de carregamentos urbanos (*LoadU*, no modelo) e de centralidades (*CentR1* e *CentR2*, no modelo) são menos concentradas com a regra de potencial com limiar, o que ocorre em decorrência do limite que é imposto aos carregamentos (ver destaque na figura 8.4, abaixo);
- c) como era esperado, problemas ambientais somente são registrados mediante o uso da regra de potencial com limiar, por condição inicial das simulações;
- d) o potencial de crescimento se distribui de modo mais homogêneo com o uso da regra de potencial com limiar, enquanto que com o uso da regra de potencial livre aparece de modo mais concentrado na borda;
- e) as resistências naturais são consumidas de modo semelhante nos dois casos, sendo ligeiramente menores com o uso da regra de potencial com limiar, em função da maior conversão de território.

Resumindo, dois efeitos principais decorrem das regras de potencial com limiar e potencial livre: a) a regra de potencial com limiar registra e corrige problemas ambientais intra-urbanos, o que não ocorre na regra de potencial livre; b) o crescimento urbano simulado com a regra de potencial com limiar implica em resultados mais desconcentrados do que com a regra de potencial livre, o que é particularmente notável pela localização dos valores máximos dos carregamentos urbanos e das centralidades, como pode ser visto através da figura 8.4, abaixo.

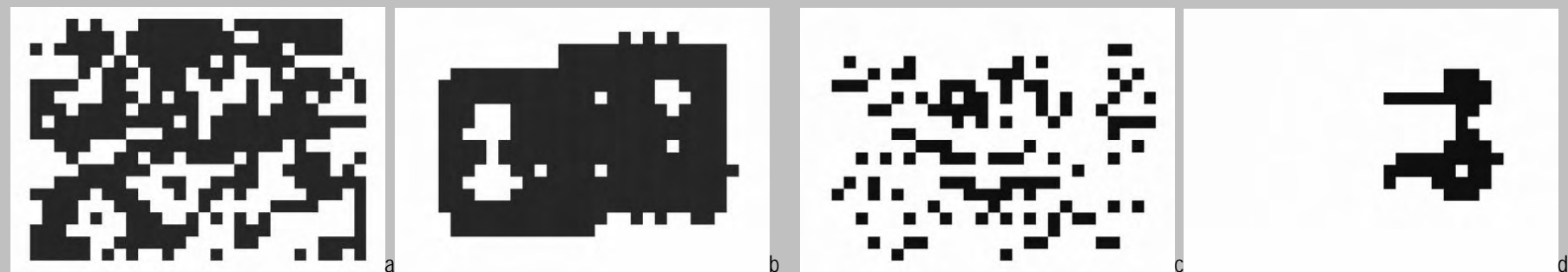


Figura 8.4: comparação de outputs na iteração 64, mostrando as células de duas classes com valores mais altos, de um total de nove classes; a) *LoadU* com a regra de potencial com limiar; b) *LoadU* com a regra de potencial livre; c) *CentR2* com a regra de potencial com limiar; d) *CentR2* com a regra de potencial livre.

### 8.2.2 Crescimento por percolação

A dinâmica dos fatores naturais, considerados neste trabalho como aqueles que não são gerados ou modificados pela lógica de produção do espaço urbano, está tratada de dois modos, a saber: a) por acirramento de resistências; b) por crescimento por percolação. A questão do acirramento de resistências naturais (*ResistE*, no modelo), implica em assumir que os atributos que a compõem podem aumentar em intensidade, sem aumento na ocupação do território, provocando variação de intensidade do atributo na célula, conforme foi demonstrado no experimento com preservação ambiental, anteriormente. O crescimento por percolação oferece o recurso de expansão territorial para os atributos naturais, o que ocorre simultaneamente com o crescimento dos atributos urbanos, que segue a lógica dos modelos de centralidade e potencial, apresentados anteriormente. Por suas características, o crescimento por percolação está operacionalizado como uma regra de crescimento com seus próprios parâmetros, como está enunciado a seguir.

O fenômeno da percolação, entendido como a passagem ou transporte de matéria ou energia através de um leito poroso (Frey e Decker, 1998) e explicado através da chamada teoria da percolação (ibidem), aparece com frequência em trabalhos vinculados à porosidade, erosão, hidráulica e correlatos, em abordagens micro e macroscópicas (Hilfer, 1996). No campo dos estudos urbanos aparecem esforços dedicados a descrever, compreender e simular crescimento urbano, normalmente com modelos parcial ou plenamente estocásticos (Friedrich; Kaufman e Kaufman, 1994; Makse et al., 1998; Kulkarni; Stough e Haynes, 2000). O interesse pela percolação decorre aqui do fato de que os atributos naturais não se modificam pelos modelos de centralidade e potencial, fundados em aspectos de morfologia e economia, os quais são fonte da dinâmica urbana proposta nesta investigação. Estudos de ecologia têm feito intenso uso da chamada teoria da percolação para reconhecer e quantificar padrões espaciais na paisagem (Naveh e Lieberman, 1994), para analisar interações entre organismos heterogêneos (Frey e Decker, 1998), bem como para representar dinâmicas naturais através de estudos de conectividades e suas complexidades (Green, 1993b e 1995).

No caso deste trabalho, está proposta uma maneira de emular ocupação territorial por percolação, aplicada a atributos naturais. Uma nova regra está implementada, através da passagem de atributos entre células contíguas, utilizando técnica de análise de vizinhança e raios de abrangência, o que é frequentemente usado como um recurso de análise em geoprocessamento (Brandalize et al., 1996; Câmara, 2001) e é típico em trabalhos utilizando CA – autômatos celulares estendidos para as simulações urbanas (Batty, Couclelis e Eichen, 1997; Torrens e O’Sullivan, 2001a). Esse processo permite simular, por exemplo, o crescimento de matas nativas sobre espaços contíguas, oferecendo às células que contêm esse atributo a capacidade de expansão bidimensional, o que melhora características dinâmicas do sistema e permite ao modelo simular ao mesmo tempo o crescimento de células com atributos urbanos e naturais. A figura 8.5, a seguir, exemplifica o crescimento por percolação.



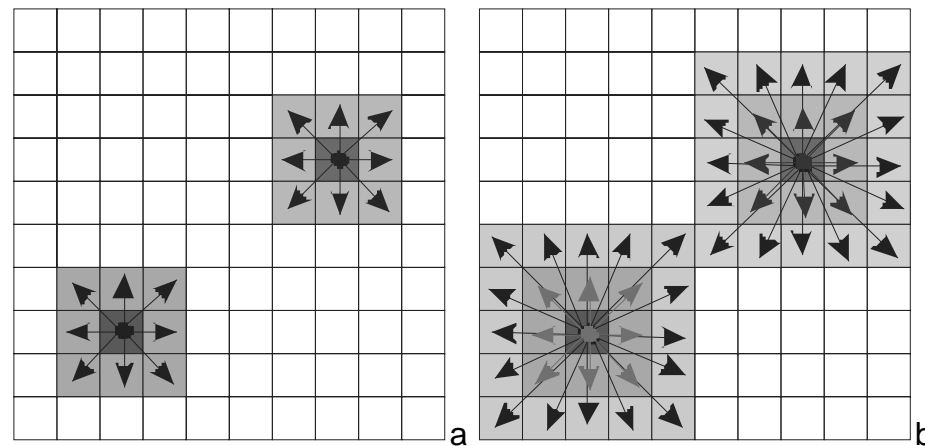


Figura 8.5: esquemas do processo de percolação com diferentes raios; a) raio igual a 1; b) raio igual a 2.

O processo de percolação está implementado para o caso das resistências naturais ( $ResistE$ ) e mediante o enunciado matemático que está na equação 8.1, abaixo.

Equação 8.1: resistência natural gerada pelo processo de percolação.

$$ResistE_{iP} = \left( \sum_j^i ResistE_{viz} \cdot r_p^{-1} \right)^p$$

onde se lê:

a resistência natural da célula  $i$  gerada pelo processo de percolação  $P$  é igual ao somatório das resistências naturais das células da vizinhança, vezes o inverso do raio de percolação, elevada ao expoente  $p$

sendo:

$ResistE_{iP}$  = resistência natural da célula  $i$  gerada pelo processo de percolação  $P$

$ResistE_{viz}$  = resistência natural da célula da vizinhança

$r_p$  = raio de percolação

$p$  = coeficiente  $p$

O raio de percolação  $r_p$  indica o número de células que são modificadas a partir de uma célula capaz de provocar crescimento, sendo que o coeficiente  $p$  ( $p\hat{e}$ ) opera como parâmetro de regulação da intensidade desse crescimento (que aumenta com valores entre zero e 1 e diminui com valores maiores que 1); a aplicação desses dois parâmetros implica em crescimento não linear, que se torna complexo ao interagir com as demais dinâmicas ativas no modelo. Interessa observar que as células assumem características de percolação por intermédio de seus atributos, tal qual no caso das células que se tornam congeladas (*freezing*, no modelo) ou mutantes (*mutable*, no modelo), como apresentadas anteriormente (ver o Capítulo 3 e seguintes) e que repassam esse conjunto de características às células geradas por esse processo de crescimento. Para exemplificar o mecanismo de percolação estão as figuras 8.7, 8.8 e 8.9, logo adiante.

A possibilidade de crescimento por percolação incluída no modelo em construção nesta investigação pode ser considerada como um “modelo neutro” (Andren, 1994), posto que não estão oferecidos recursos de legitimação dos resultados e que os mecanismos implementados servem para ser utilizados em estudos de monitoramento de casos reais, controle de simulações, análise comparativa e em esforços de especulação.

O crescimento por percolação está implementado mediante um experimento com três simulações, regulando os parâmetros  $p$  com valor igual a 2 e  $r_p$  com valor igual a 1: a) crescimento com a regra de percolação inativa, que é o padrão do modelo; figura 8.7); b) percolação sem interferência de crescimento urbano (figura 8.8); c) percolação com interferência de crescimento urbano (figura 8.9). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências mostrados na figura 8.6, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células, estando a seguir os resultados e um resumo com as principais observações do experimento.

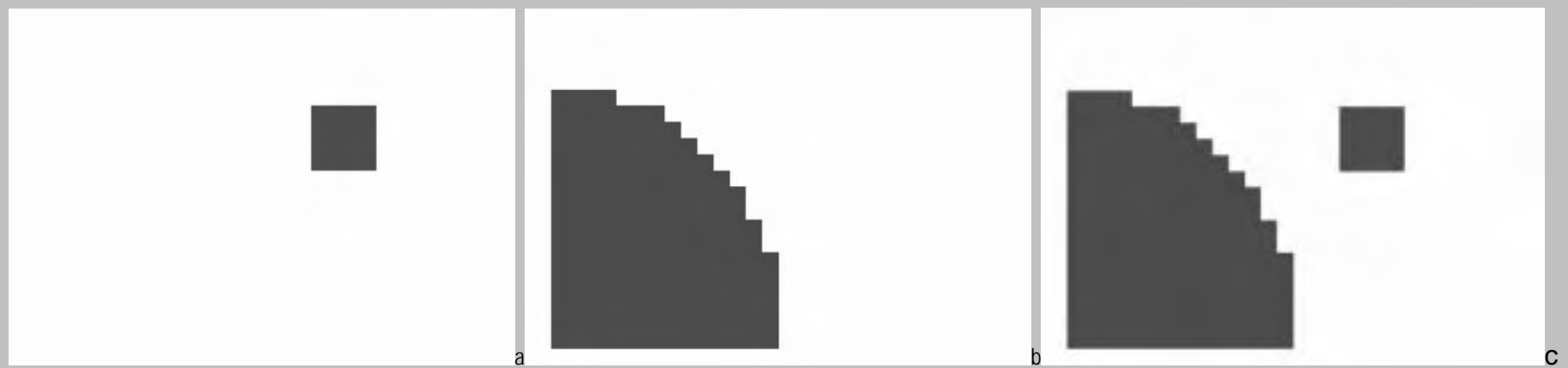


Figura 8.6: inputs utilizados no experimento de crescimento com percolação; a) carregamentos com valor igual a 1; b) resistências localizadas com valor igual a 1; c) superposição dos carregamentos e das resistências.

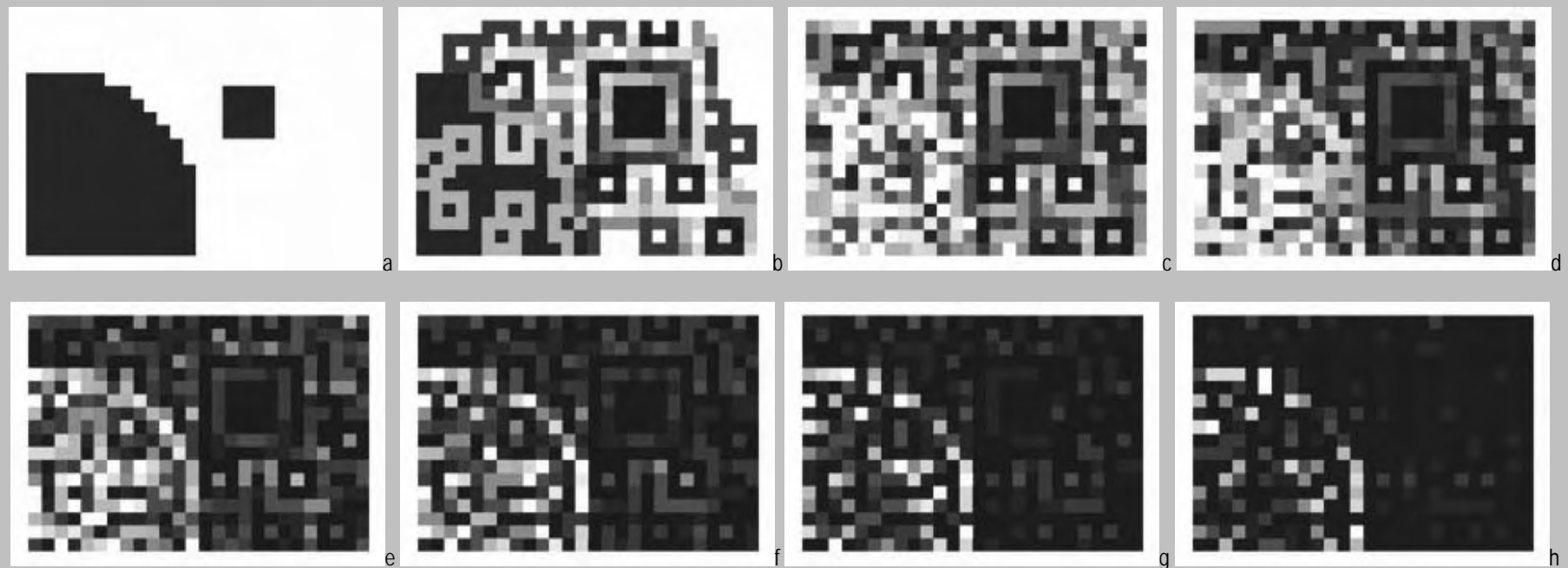


Figura 8.7: outputs da simulação de crescimento com a regra de percolação *inativa*, mostrando 8 de 32 iterações, com os dois atributos ativos, mostrando *ResistE* e *LoadU* superpostos.

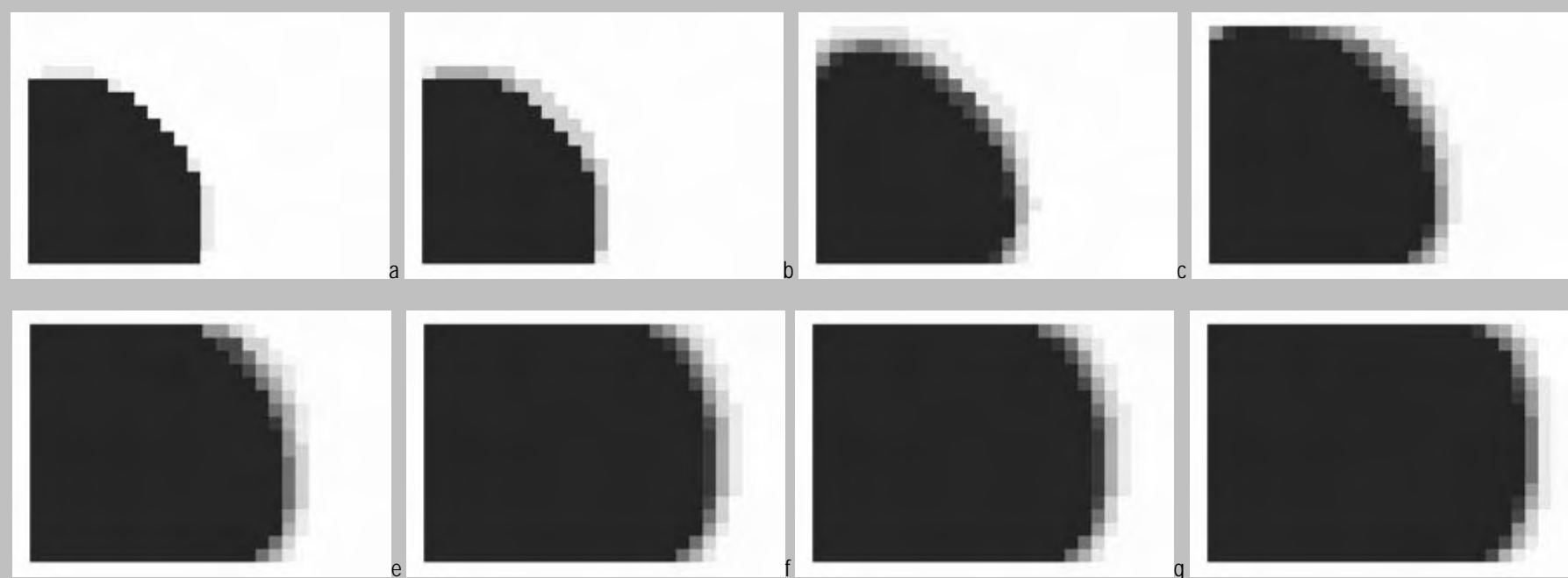


Figura 8.8: outputs da simulação de crescimento com a regra de percolação ativa, mostrando 8 de 32 iterações, somente com o atributo natural sujeito à percolação ativo.

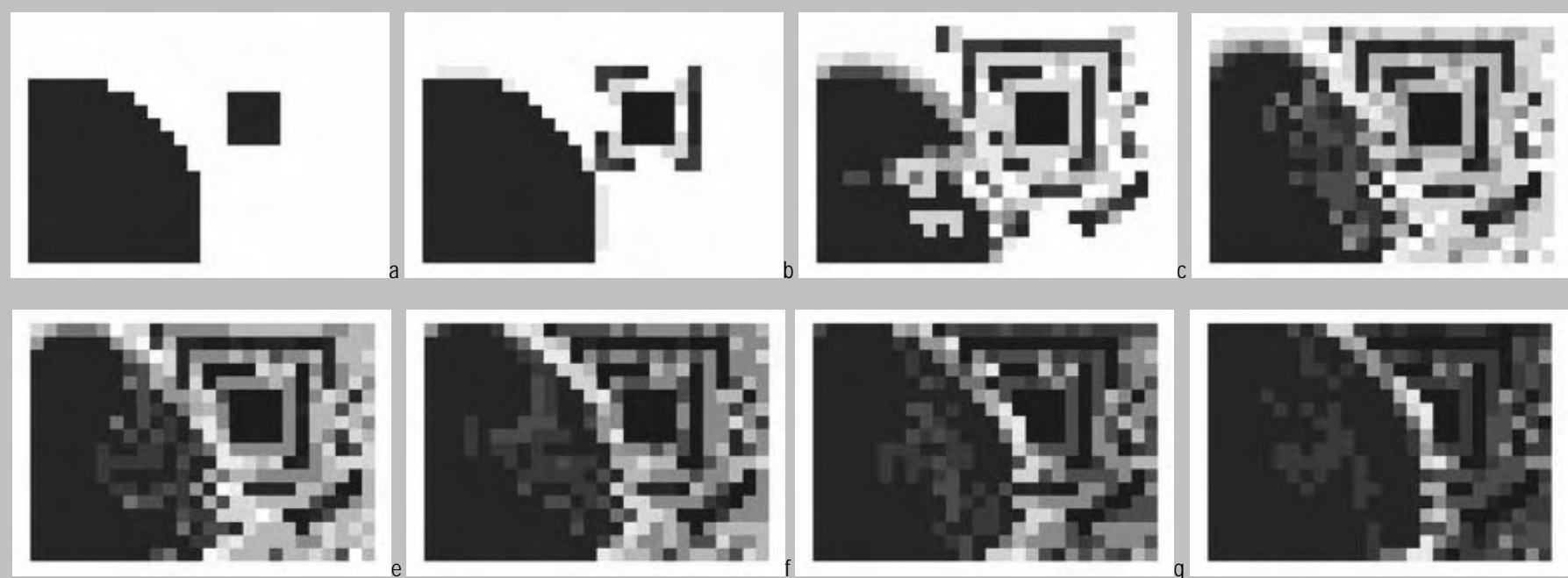


Figura 8.9: outputs da simulação de crescimento com a regra de percolação ativa, mostrando 8 de 32 iterações, com os dois atributos ativos, mostrando ResistE e LoadU superpostos.

O crescimento por percolação pode ter suas implicações resumidas no seguinte:

- a) aspectos dinâmicos de sistemas naturais podem ser representados, desde que assumidos como neutros, isto é, usados para monitoramento, controle, análise comparada ou estudos especulativos; o crescimento proposto pode ser regulado por intensidade (coeficiente  $p$ , no modelo) e por raios de abrangência ou alcance (raio de percolação, regulado pelo parâmetro  $r_p$ , no modelo);
- b) o modo de crescimento apresentado é simples, alcançado através da passagem de atributos entre células contíguas, oferecendo àquelas que contêm esse atributo a capacidade de expansão bidimensional, como pôde ser observado na figura 8.8, anteriormente; esse modo simples se torna complexo ao interagir com as demais dinâmicas ativas no modelo, cujo efeito sistêmico provoca alternância e heteronomia nos atributos naturais, como pôde ser visualizado na figura 8.9, na página anterior;
- c) são evidentes as diferenças nos resultados quando ocorre percolação, sendo as principais as seguintes: c.1) permanência maior dos atributos naturais no sistema; c.2) menor difusão dos atributos urbanos, cujo processo de crescimento é compensado pelo crescimento dos atributos naturais; c.3) maior nitidez na separação entre o ambiente urbano e o natural, com fronteiras bem demarcadas.

### 8.3 Compressão de dados e análise de vizinhança

Uma das dificuldades para trabalhar com modelos que incluem técnicas de grafos associadas à estrutura celular, como é o caso do SACI, é o tempo de processamento, em função do número de entidades que compõem o sistema (cada uma representada por uma célula) e das possibilidades de interação que aparecem. Considerando que todas as células interagem uma com a outra, o número de interações pode ser calculado pela equação 8.2, abaixo.

*Equação 8.2: número de iterações num sistema celular, sem compressão de dados*

$$N_i = 2^{N_{\text{Cel}} - 1}$$

*onde se lê:*

*o número de iterações é igual a dois elevado ao número total de células menos 1*

Para diminuir o tempo de processamento, três alternativas estão indicadas: a) aumentar a capacidade de processamento; b) diminuir o número de células do sistema; c) utilizar compressão de dados. A primeira alternativa, de aumento da capacidade de processamento, pode ser alcançada através de processamento paralelo, pelo qual múltiplas tarefas podem ser realizadas simultaneamente; essa possibilidade exige *hardware* específico e, no caso do SACI, exige também adaptação do *software*. A segunda alternativa, de diminuição do número de células do sistema, é a que vem sendo utilizada neste trabalho até agora,

sendo que o caso de Pelotas, RS e os demais experimentos, foram delineados para conter a menor quantidade possível de células. A terceira alternativa, de compressão de dados, é a que será mostrada adiante.

A possibilidade de compressão permite a diminuição artificial na quantidade de dados, permitindo trabalhar com maior rapidez e sem utilizar equipamento diferenciado. Técnicas de compressão têm sido utilizadas para processar e armazenar informações (Müller, 2004), tendo também importante utilização em arquivos *raster* (Fonseca Neto, 1999), que têm semelhança estrutural com os *grids* utilizados nos autômatos celulares (Couclelis, 1997); nesse caminho, o modelo permite representar a estrutura celular por células centrais (chamadas de células nodo), que acumulam as informações da vizinhança e são usadas no processamento, diminuindo exponencialmente a quantidade de entidades envolvidas; realizado o processamento, as informações são redistribuídas, sendo restituída a resolução original do sistema. Complementarmente, análises de vizinhança podem ser realizadas, distribuindo os erros que o processo pode acumular, como é comum nos procedimentos convencionais de geoprocessamento em ambiente *raster*, auxiliando em análise espaciais e na interpretação de resultados (Rana e Dykes, 2002).

O recurso de compressão de dados desenvolvido para o SACI (*Cluster*, no modelo), permite que células nodo acumulem os carregamentos das células vizinhas, diminuindo o número de interações espaciais em função do raio de vizinhança utilizado; uma vez calculadas as tensões com as células nodo, os resultados são distribuídos à vizinhança, de modo diretamente proporcional ao carregamento original (ver esquemas da figura 8.10, adiante); a partir daí os demais cálculos de centralidade, potencial e crescimento celular seguem os procedimentos padrão, conforme mostrados nos capítulos anteriores. Os resultados, que tendem a perder qualidade com o aumento do raio de vizinhança, podem ter os efeitos dos erros diminuídos através de análise de vizinhança complementar, devendo a qualidade dos resultados ser verificada a cada caso. Considerando que somente as células nodo interagem no processamento, o número de interações pode ser expresso pelas equações 8.3 e 8.4, abaixo.

---

*Equação 8.3: número de iterações num sistema celular, com compressão de dados*

$$N_i = 2^{N_{\text{Cel}} \text{Nodo} - 1}$$

*onde se lê:*

*o número de iterações é igual a dois elevado ao número de células nodo menos 1*

---

*Equação 8.4: número de células nodo*

$$N_{\text{Cel}} \text{Nodo} = N_{\text{Cel}} / (2r + 1)^2$$

*onde se lê:*

*o número de células nodo é igual ao número total de células dividido pelo quadrado do dobro mais 1 do raio de vizinhança*

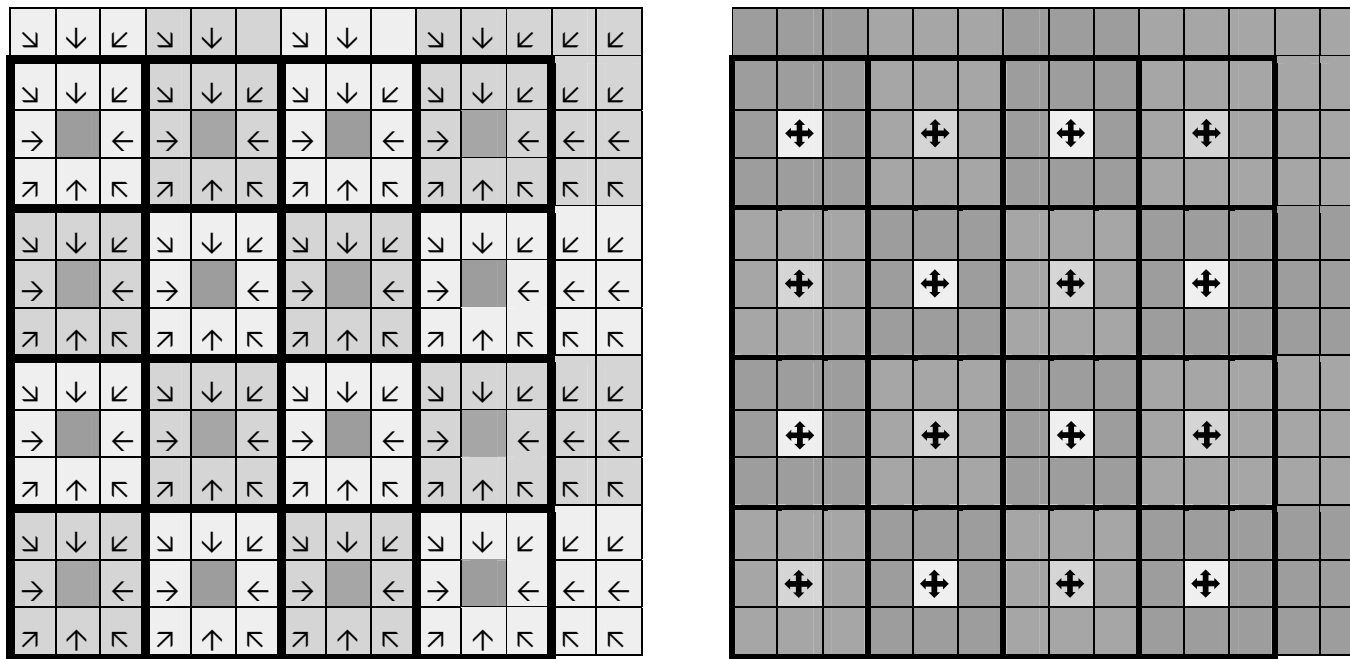


Figura 8.10: esquema de compressão de dados no grid base, para o caso de *Cluster* igual a 1, com a identificação das células nodo e transferência de dados (setas); a) operação de acumulação: células nodo recebem informações para serem usadas no processamento; b) operação de distribuição: células nodo transmitem informações processadas.

Para demonstrar os efeitos da utilização da compressão de dados, (*Cluster*, no modelo), está realizado um experimento com três casos: a) ausência de compressão (*Cluster* igual a zero); b) compressão com raio de vizinhança igual a 1 (*Cluster* igual a 1); c) compressão com raio de vizinhança igual a 2 (*Cluster* igual a 2). As simulações utilizam os carregamentos e as resistências que aparecem na figura 8.11, abaixo, num *grid* de 20 por 28, com 560 células; adiante estão os resultados do experimento, mostrando: *grids* conforme emitidos pelo modelo (figuras 8.12, 8.13 e 8.14); análises de vizinhança (figuras 8.15 e 8.16); gráficos de dispersão e correlações, que comparam os resultados obtidos com e sem compressão de dados (gráficos 8.1 e 8.2).

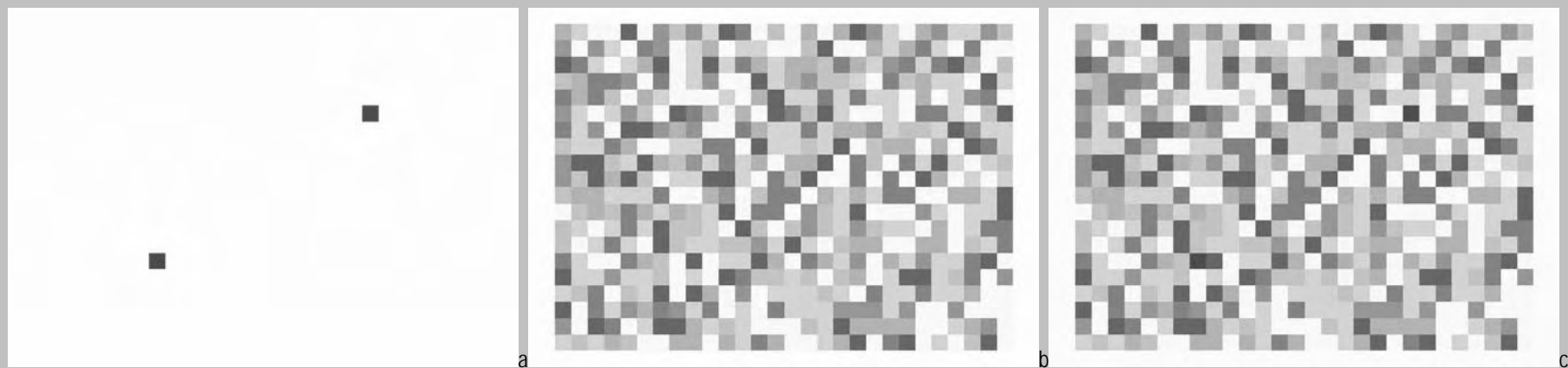


Figura 8.11: inputs utilizados no experimento para testar o recurso de *Cluster*; a) carregamentos com valor igual a 1; b) grid com resistência aleatória, com valores de 1 a 10; c) superposição de carregamentos e resistências.

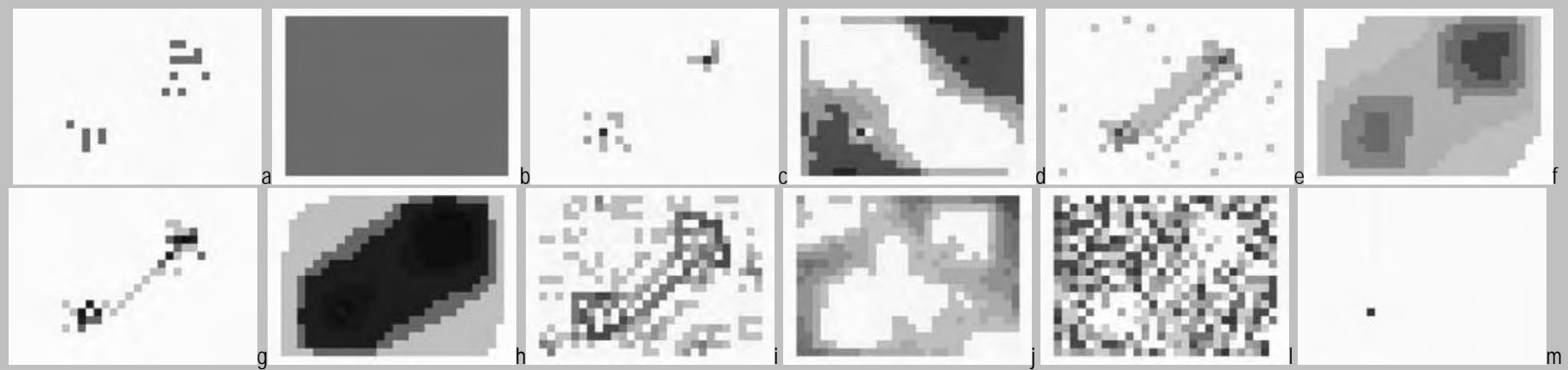


Figura 8.12: outputs das simulações utilizando Cluster igual a zero; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 1; l) ResistE na iteração 32.

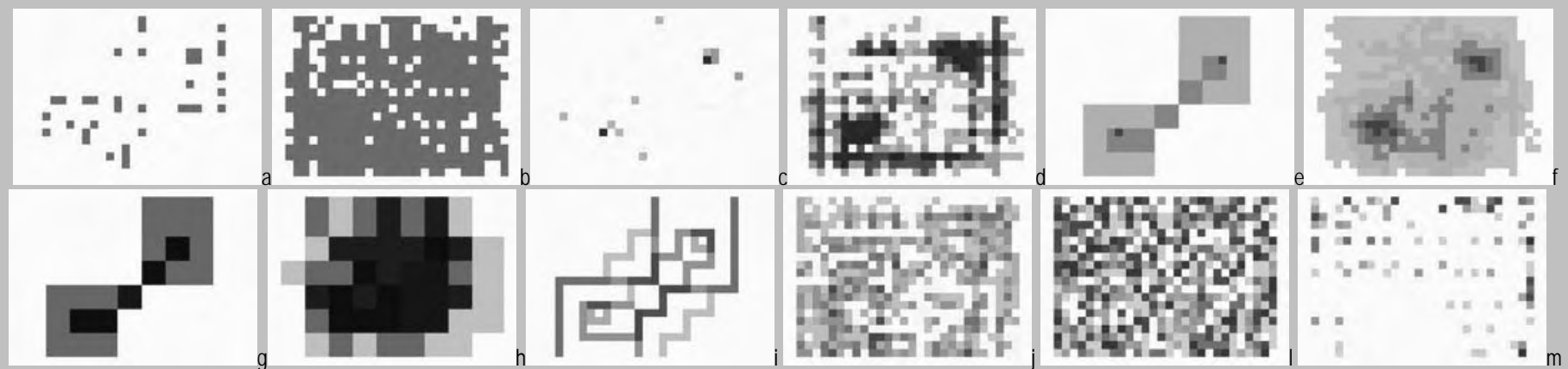


Figura 8.13: outputs das simulações utilizando Cluster igual a 1; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 1; l) ResistE na iteração 32.

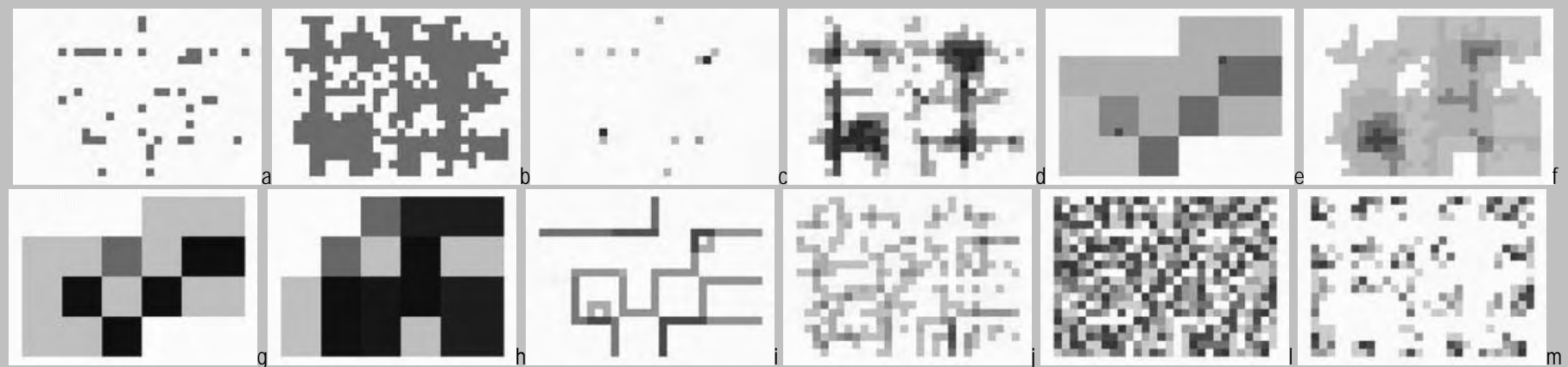


Figura 8.14: outputs das simulações utilizando Cluster igual a 2; a) CellType na iteração 1; b) CellType na iteração 32; c) LoadU na iteração 1; d) LoadU na iteração 32; e) CentR1 na iteração 1; f) CentR1 na iteração 32; g) CentR2 na iteração 1; h) CentR2 na iteração 32; i) Potential na iteração 1; j) Potential na iteração 32; k) ResistE na iteração 1; l) ResistE na iteração 32.

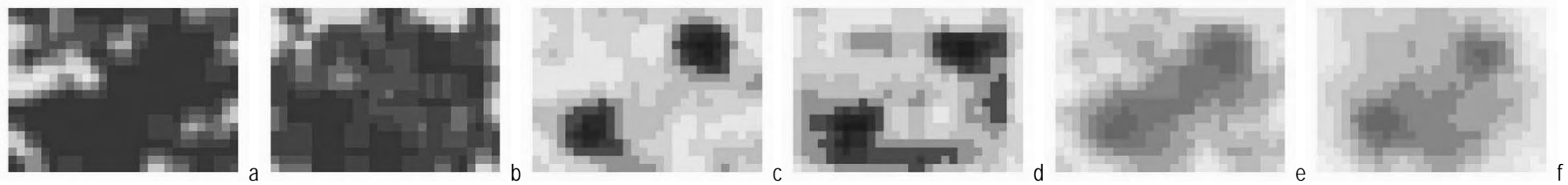


Figura 8.15: outputs das simulações mostrando as diferenças causadas pelo uso do Cluster 1, em relação ao Cluster zero, com análise de vizinhança pela média e raio 3; a) CellType com Cluster zero; b) CellType com Cluster 1; c) LoadU com Cluster zero; d) LoadU com Cluster 1; e) CentR1 com Cluster zero; f) CentR1 com Cluster 1.

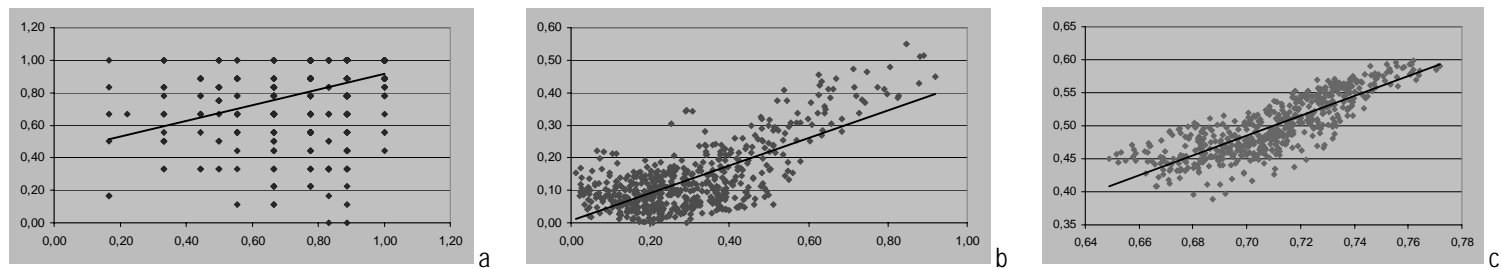


Gráfico 8.1: dispersões mostrando as diferenças causadas pelo uso do Cluster 1, em relação ao Cluster zero, com análise de vizinhança pela média e raio 3; a) Cluster zero e Cluster 1, para CellType ( $r = 0,15$ ); b) Cluster zero e Cluster 1, para LoadU ( $r = 0,51$ ); c) Cluster zero e Cluster 1, para CentR1 ( $r = 0,69$ ).

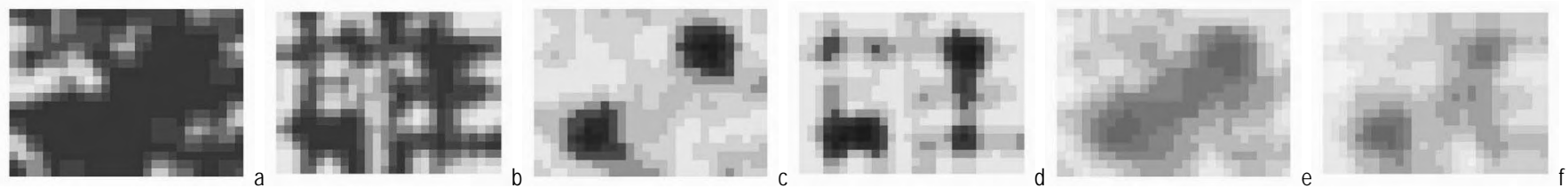


Figura 8.16: outputs das simulações mostrando as diferenças causadas pelo uso do Cluster 2, em relação ao Cluster zero, com análise de vizinhança pela média e raio 3; a) CellType com Cluster zero; b) CellType com Cluster 2; c) LoadU com Cluster zero; d) LoadU com Cluster 2; e) CentR1 com Cluster zero; f) CentR1 com Cluster 2.

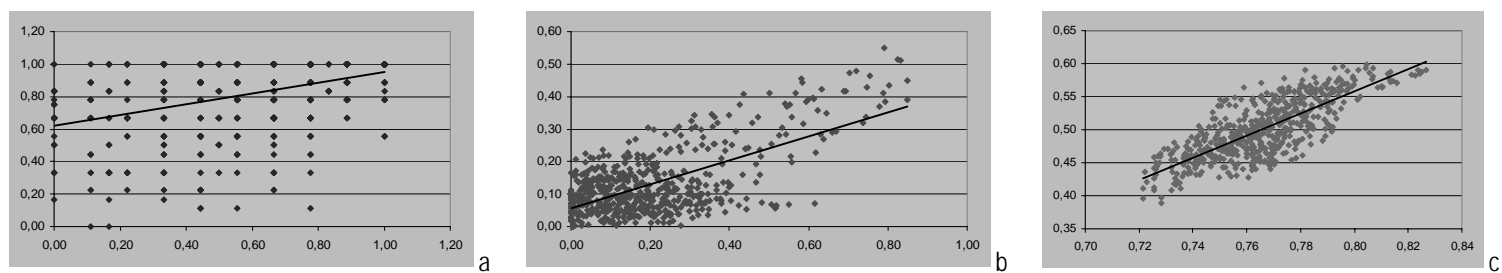


Gráfico 8.2: dispersões mostrando as diferenças causadas pelo uso do Cluster 2, em relação ao Cluster zero, com análise de vizinhança pela média e raio 3; a) Cluster zero e Cluster 1, para CellType ( $r=0,17$ ); b) Cluster zero e Cluster 1, para LoadU ( $r=0,43$ ); c) Cluster zero e Cluster 1, para CentR1 ( $r=0,60$ ).

O experimento com a compressão de dados (*cluster*, no modelo) permite as seguintes conclusões principais: a) a diminuição no tempo de processamento é efetiva, atendendo às necessidades do projeto; b) todavia, a perda de informações e o ruído que aparecem demandam teste a cada caso, de modo a comparar os resultados sem usar a técnica de compressão, para a partir daí dar prosseguimento às simulações. É particularmente importante destacar que o pior desempenho com o uso do *cluster* ocorre na conversão de território, o que deve ser considerado nas construções das interpretações.



#### 8.4 Alternativas de visualização para os resultados gráficos

A visualização representa um dos principais resultados dos experimentos com simulações, o que é particularmente importante no caso das cidades e da explicitação de possibilidades de futuro (Royal, 2000). Embora o uso da computação gráfica esteja mais desenvolvido para o caso dos projetos e de monitoramento do que para o caso da investigação científica, (Smith, Dodge e Doyle, 1998; Batty e Doyle, 1998; Batty et al., 2000), alternativas de visualização para resultados de modelos urbanos têm alcançado progressos nos últimos anos, particularmente através da integração com as possibilidades dos SIG – Sistemas de Informações Geográficas (Tobón, 2001; Batty, Steadman e Xie, 2004) e de técnicas de pós-processamento. Tratando-se de modelagem dinâmica há o problema adicional de os SIGs convencionais serem dedicados a gerar imagens estáticas, sendo necessário exportar resultados parciais e construir resultados dinâmicos em aplicativos dedicados à animação (Rana e Dikes, 2002).

No caso do SACI, a visualização tem importância nas três etapas fundamentais de modelagem: a) no *input*, realizada através de mapas temáticos, incluindo dados através de arquivos *raster*, desenhos vetoriais e *grids* (que são a forma adotada para as demais etapas); b) no processamento, como primeira etapa de calibração, quando o processo pode ser pausado e os resultados parciais checados; c) no *output*, quando os resultados finais podem ser observados.

No caso do *output*, cinco grupos de visualizações para os resultados gráficos podem ser obtidas no SACI: a) visualização padrão, com um conjunto de mapas estáticos (como vem sendo utilizado neste argumento); b) animação por visualização seqüencial dos mapas estáticos (como vem sendo usado deste trabalho e como está na figura 8.17, a seguir); c) visualização com mudança na desagregação celular e análise de vizinhança (figura 8.18a; b; c; d, adiante); d) visualização em 3D – três dimensões, podendo incorporar aumento da escala vertical (figura 8.18e; f; g; h, adiante); e) visualização em 3D, utilizando imagem de satélite como cobertura (figuras 8.19 e 8.20, mais adiante).

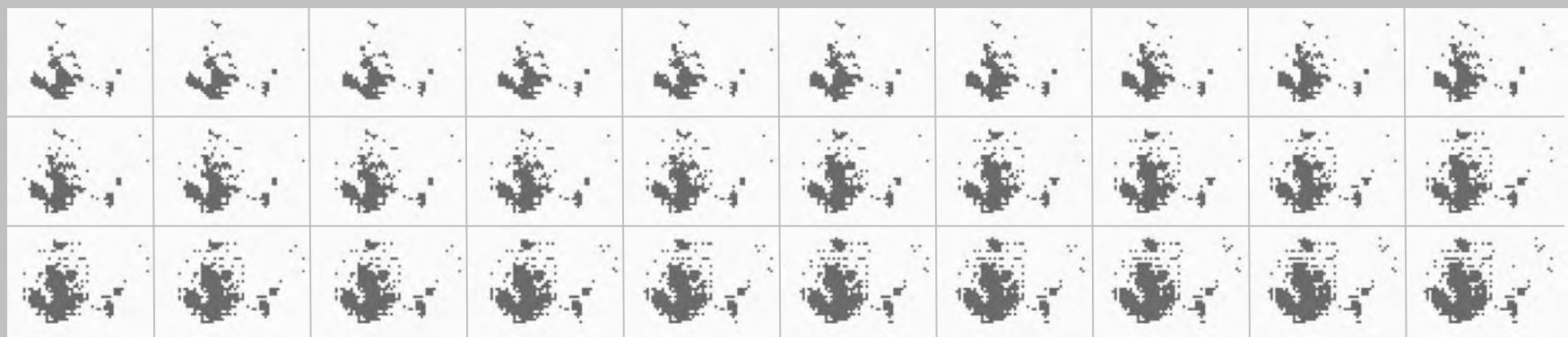


Figura 8.17: exemplo de mapas estáticos gerados no modelo e a alternativa de visualização por animação seqüencial (ver em [C:\Animacoes\\_Tese\CellType.gif](C:\Animacoes_Tese\CellType.gif) ou [C:\Animacoes\\_Tese\CellType.ppt](C:\Animacoes_Tese\CellType.ppt)).

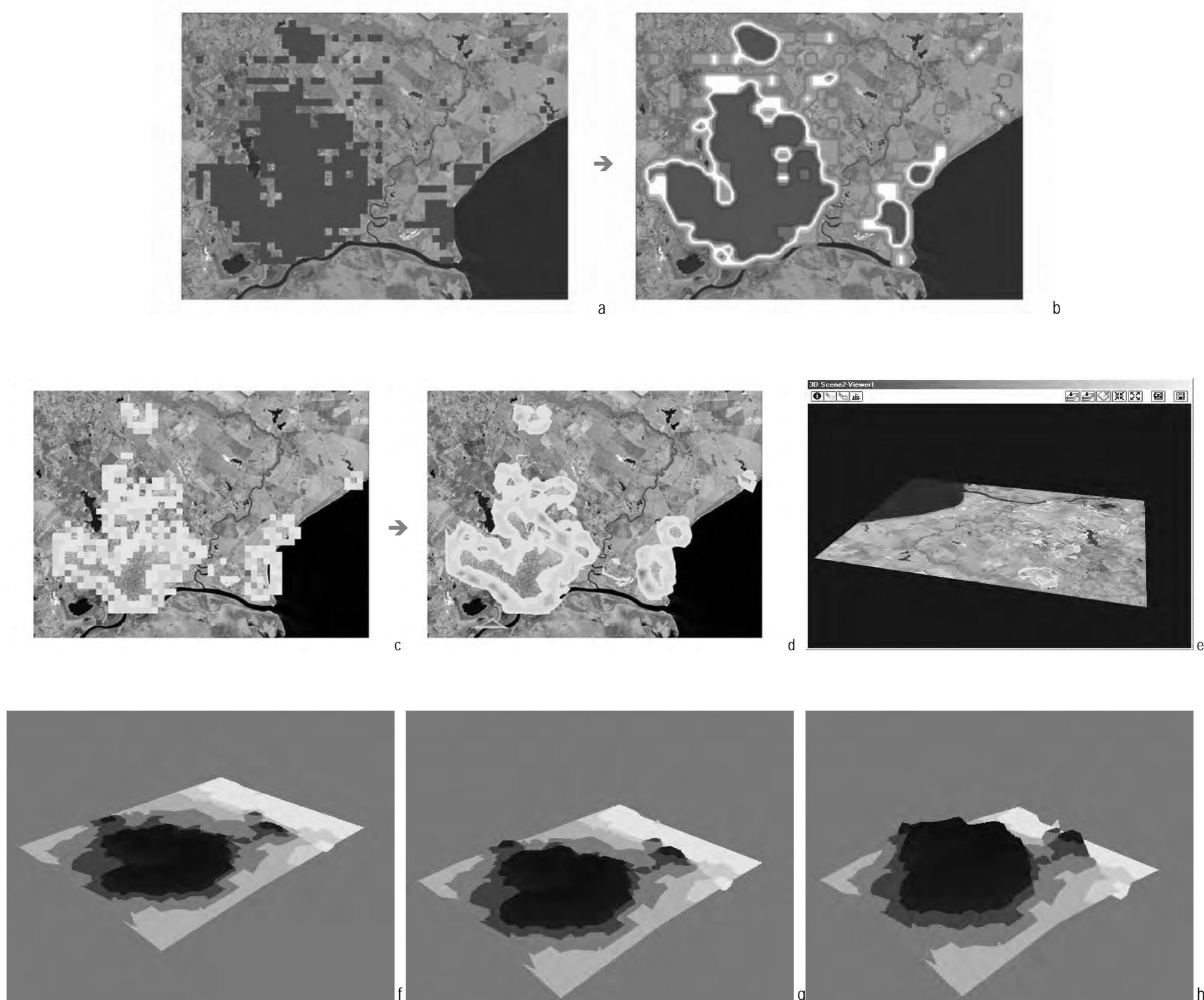


Figura 8.18: alternativas de visualização para resultados das simulações de crescimento urbano; a) output para CellType padrão do modelo, com células de 500m em vermelho; b) transformação do resultado anterior por redimensionamento das células para 50m e análise de vizinhança com raio igual a 20, em paleta de cores do vermelho ao cinza; c) output padrão do modelo, com células de 500m; d) transformação do resultado anterior por análise de vizinhança com raio igual a 3; e) vista em 3D do resultado anterior, com animação por rotação (ver em *C:\Animacoes\_Tese\Visualizacoes\movie1.avi*); f) output para CentR1, em 3D, em escala vertical de 10.000 vezes; g) mesmo caso anterior, em escala vertical de 20.000 vezes; h) mesmo caso anterior, em escala vertical de 4.000 vezes.

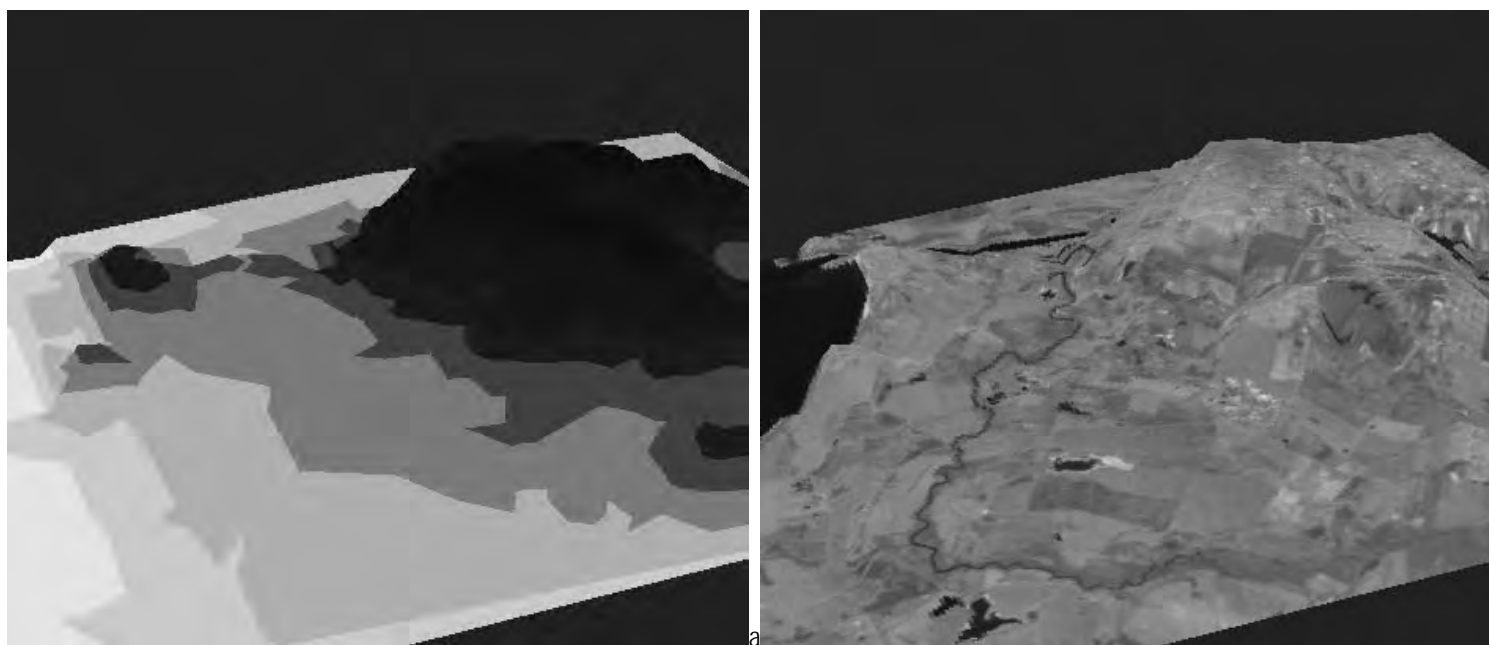


Figura 8.19: alternativas de visualização para resultados das simulações de crescimento urbano; a) output para CentR1, em 3D, em escala vertical de 5.000 vezes; b) mesmo caso anterior, utilizando como base uma imagem de satélite Landsat 7 ETM+, com resolução de 15 metros.

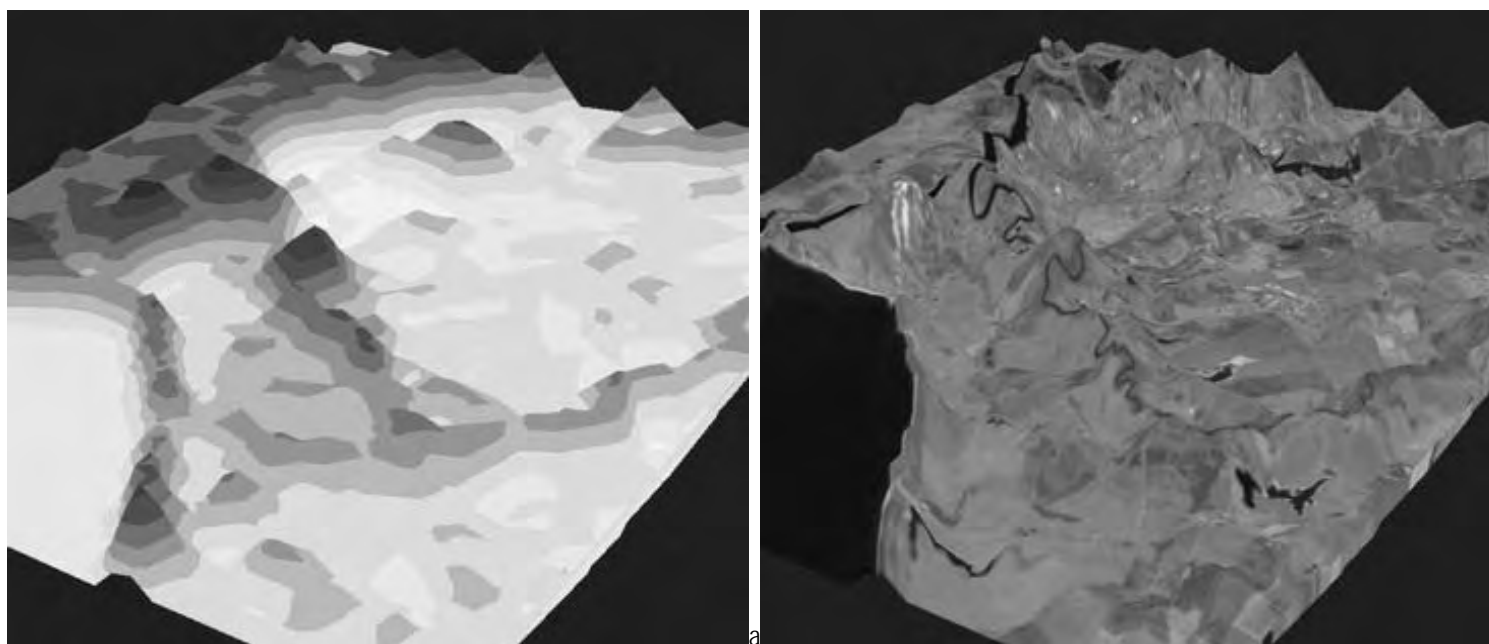


Figura 8.20: alternativas de visualização para resultados das simulações de crescimento urbano; a) output para ResistE, em 3D, em escala vertical de 5.000 vezes; b) mesmo caso anterior, utilizando como base uma imagem de satélite Landsat 7 ETM+, com resolução de 15 metros.

### 8.5 Simulação avançada em Pelotas, RS

Uma vez expostos os recursos do SACI, simulações avançadas podem ser realizadas, explorando as possibilidades mostradas nos subtítulos anteriores. Uma dessas possibilidades é explorar cenários de futuro, ajustando o modelo para que o crescimento urbano seja direcionado em função de conceitos ou de modos de modificar a realidade, construindo representações espaciais alcançáveis no futuro, com e sem os direcionamentos impostos às simulações. Nesse caminho, um dos cenários que pode ser explorado é o da cidade sustentável (Echenique, 1999).

Relações entre forma da cidade e sustentabilidade têm sido procuradas recentemente, tanto em função dos avanços no campo da morfologia urbana (Yeh e Li, 2001), como em função do relativo aumento de interesse pela questão ambiental, como marcou a ECO 92 – Conferência Internacional das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. A questão da sustentabilidade, no campo da morfologia urbana, combina-se com a da modelagem urbana, uma vez que discuti-la depende da antecipação de cenários de futuro e é exatamente a isso que modelos de simulação são dedicados (Krafta, 1995). Embora seja sabido que o(s) conceito(s) de sustentabilidade esteja em desenvolvimento e que permita abordagem compósita (Acselrad, 1999; Silva, 1999), isso não impede estudos sobre possíveis relações com morfologia urbana.

Na discussão entre forma urbana e sustentabilidade, duas hipóteses recorrem: a) cidades mais compactas são mais sustentáveis do que as menos compactas; b) cidades mais fragmentadas são menos sustentáveis do que as menos fragmentadas. A idéia de compactidade como algo positivo para a cidade é reforçada especialmente pelos estudos de circulação urbana (Barret, 1996), ao que se somam estudos de evolução urbana de cidades européias (Costa, 1999). A noção de fragmentação como algo negativo para a cidade encontra sustentação tanto em trabalhos específicos de morfologia urbana (Chin, 2002), quanto em argumentos gerais de sociologia e geografia urbana (Souza, 1995; Pereira e Ultramari, 1999; Santos, 2000). Todavia, é possível contrariar essas duas hipóteses, assumindo que, do ponto de vista da morfologia urbana, descompactar e fragmentar podem ser, ao invés de perversidades, estados construtores de sustentabilidade, uma vez considerado o processo de crescimento urbano como dinâmico, integrado com o ambiente não urbanizado, fora-de-equilíbrio, auto-organizável e complexo, como vem sendo mostrado neste trabalho. Em direção semelhante, embora sem tecer relações com sustentabilidade, está o argumento de Batty e Longley (1994), ao estudar dimensões fractais da cidade e sua variação ao longo do tempo, assim como a investigação de Benguigui et al. (2000), que acrescenta a variação dessas medidas em função dos limites urbanos que forem adotados. Mas como testar qual a forma urbana que corresponde com mais eficácia às idéias de sustentabilidade ?

Para testar relações de correspondência entre forma urbana e sustentabilidade, está retomado o caso com o crescimento urbano de Pelotas, RS, no horizonte de 45 anos, com duas alternativas: a) um cenário para representar crescimento urbano com sustentabilidade; b) outro cenário para representar crescimento urbano convencional. Esses cenários serão perseguidos pela diferenciação do crescimento urbano através de quesitos tradicionalmente associados à sustentabilidade urbana (adaptados de: Alva, 1997; Naredo e Rueda, 1998; Echenique, 1999; Carvalho e Romero, 1999; Bezerra e Fernandes, 2000; Franco, 2001;

CCE, 2004), a saber: a) imputação de limites ao crescimento urbano; b) mitigação de problemas ambientais intra-urbanos; c) diminuição na formação de periferias; d) desestímulo à formação de vazios urbanos; e) conservação de áreas portadoras de atributos naturais; f) diminuição do uso de recursos naturais escassos; g) implementação de política ambiental, por valorização dos remanescentes naturais; h) preservação do patrimônio construído, por combate à obsolescência; i) qualificação do sistema de circulação urbana. Nesse caminho, estão propostos os cenários denominados “crescimento sustentável” (cenário 1) e “crescimento convencional” (cenário 2), para os quais são consideradas as seguintes condições de diferenciação na simulação:

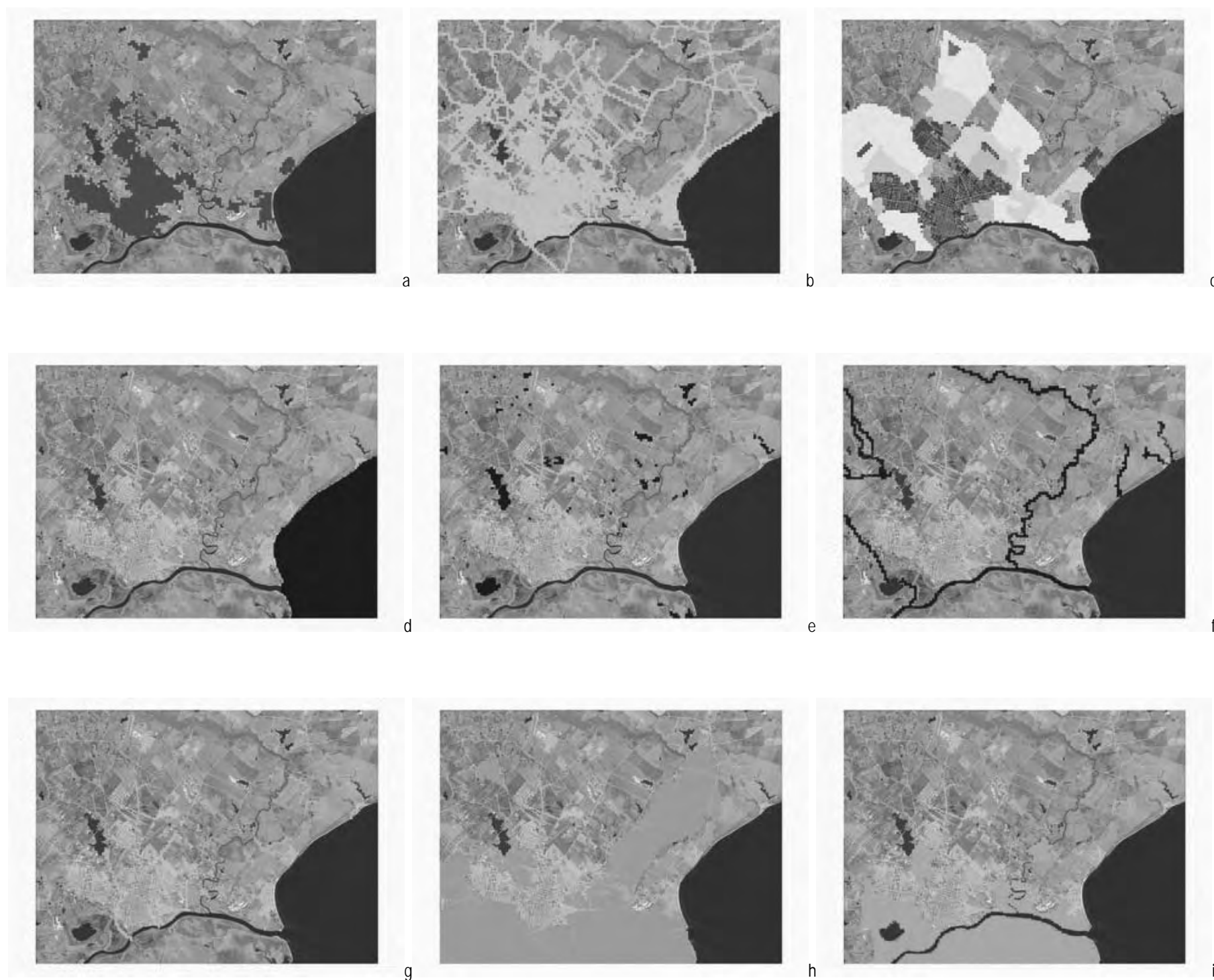
- a) limites de crescimento: no cenário 1 está admitido que o crescimento urbano mantém um limite máximo de crescimento, em função da capacidade de suporte do território e da provisão de infra-estrutura, sendo para isso utilizada a regra de potencial com limiar (*Threshold Potential*, no modelo); no cenário 2 não é mantido limite para o crescimento urbano, para o que está utilizada a regra de potencial livre (*Free Potential*, no modelo);
- b) problemas ambientais: no cenário 1 está considerado que os problemas ambientais intra-urbanos registrados por superação de limiares poderão ser corrigidos pelo potencial de crescimento celular, ficando impedido crescimento maior que o limiar, o que é implementado através da regra de potencial com limiar (*Threshold Potential*, no modelo); no cenário 2 os problemas ambientais intra-urbanos não são registrados, conseqüentemente não são corrigidos, o que é implementado através da regra de potencial livre (*Free Potential*, no modelo);
- c) formação de periferias: no cenário 1 a formação de periferias está diminuída em 50% do padrão do modelo, mediante a diminuição das distribuições de tensões difusas, utilizando 30, 20, 30, 10 e 10 % (para as distribuições de tensões axiais, axiais de *buffer*, polares, difusas 1 e difusas 2, respectivamente); no caso do cenário 2, essa regulagem está mantida no padrão de 20% para todas as tensões;
- d) formação de vazios urbanos: no cenário 1 está usada a regulagem padrão do modelo, na qual a formação de vazios não é induzida, com o valor 0,00 no parâmetro  $\psi$  (lambda); no caso do cenário 2, a formação de vazios urbanos está induzida, com o valor 0,30 no parâmetro  $\psi$  (lambda), o que implica na não realização dos potenciais iguais ou menores que esse valor;
- e) conservação natural: no cenário 1 estão com urbanização impedida os subsistemas de águas (rios, arroios, canais, laguna, lagoas e barragens), matas, dunas, praias e banhados, enquanto que no cenário 2 somente a laguna e os rios estão com urbanização impedida;
- f) utilização de recursos naturais: no cenário 1 está utilizado o recurso de autoponderação para os atributos naturais (águas, banhados, matas, dunas e praias), os quais são valorizados acima dos demais por recebem pesos inversamente proporcionais a sua escassez; no cenário 2 todos os atributos têm o mesmo peso;
- g) política ambiental: no cenário 1 está implementada uma valorização dos remanescentes naturais, o que é conseguido pela utilização do valor 0,99 para o parâmetro  $\alpha$  (alfa); no cenário 2 esse parâmetro não influencia a simulação, sendo mantido no valor padrão do modelo, igual a 1,00;

- h) preservação do patrimônio construído: no cenário 1 os estoques construídos estão sujeitos à conservação permanente, ficando sujeitos à obsolescência com tendência a zero, através da regulagem do parâmetro  $\mu$  ( $\mu_i$ ) com o valor 0,999; no caso do cenário 2, ocorre obsolescência igual a 1% ao ano, com o valor  $\mu$  ( $\mu_i$ ) igual a 0,990;
- i) circulação urbana: no cenário 1 está considerada boa eficácia no sistema de circulação urbana, utilizando o parâmetro K ( $k_a$ ) igual a 1,00, o que implica em distribuição de tensões de crescimento de modo indiferente da distância entre os carregamentos; no caso 2 está implementado um fator diminuição de eficácia no sistema de circulação urbana, com o parâmetro K ( $k_a$ ) com o valor 2, o que implica num decaimento exponencial da intensidade das tensões de crescimento, em função do aumento da distância entre carregamentos.

Em ambos os casos aparecem as seguintes demais condições iniciais para as simulações:

- a) fatores intervenientes: nos dois cenários estão utilizados os mesmos atributos, o que inclui sua classificação como urbano, natural ou institucional e a capacidade funcionar como carregamento ou resistência;
- b) crescimento interno e externo: em ambos os cenários ocorre crescimento interno e externo simultâneos, com os coeficientes  $\rho_{int}$  e  $\rho_{ext}$  (ro interno e externo) com valor igual a 1,00;
- c) taxa de crescimento: o crescimento urbano médio, aplicado à conversão de território não urbanizado em urbanizado, é semelhante ao vigente na década de 90 do Século XX (1,50 % ao ano), em ambos os cenários; isso é conseguido através da regulagem do parâmetro  $\lambda_{ext}$  (lambda externo) igual a 0,90 no caso 1 e 1,00 no caso 2;
- d) raios de interação e de vizinhança: nos dois casos os raios estão mantidos em seus valores mínimos (iguais a 1), caracterizando um padrão de vizinhança do tipo Moore (8 células ao redor de uma célula central);
- e) dinâmica ambiental: em ambos os casos, todos os subsistemas naturais que perduram no estado anterior evoluem no estado atual em seus sítios originais, a uma taxa de 1% ao ano, sem acréscimo área ocupada; isso é alcançado através do uso do valor 1,01 para o parâmetro  $\theta$  (teta), bem como desativando a regra de crescimento por percolação;
- f) restrições a conexões celulares: nos dois casos a impedância está calculada pelo somatório das resistências, a cada iteração;
- g) áreas de abrangência: no dois casos, a área de abrangência do sistema viário está regulada em 400 metros, sendo que a área máxima das funções urbanas está regulada em 800 metros,
- h) crescimento difuso: a quantidade de células a ser sorteada para o crescimento difuso segue o mesmo padrão em ambos os casos, sendo definida a cada iteração como uma percentagem das células com fenótipo urbano na iteração anterior, utilizando a percentagem da distribuição das tensões difusas.

Os dados gráficos de entrada estão mostrados a seguir (figuras 8.21 e 8.22), aparecendo depois os resultados e suas interpretações.



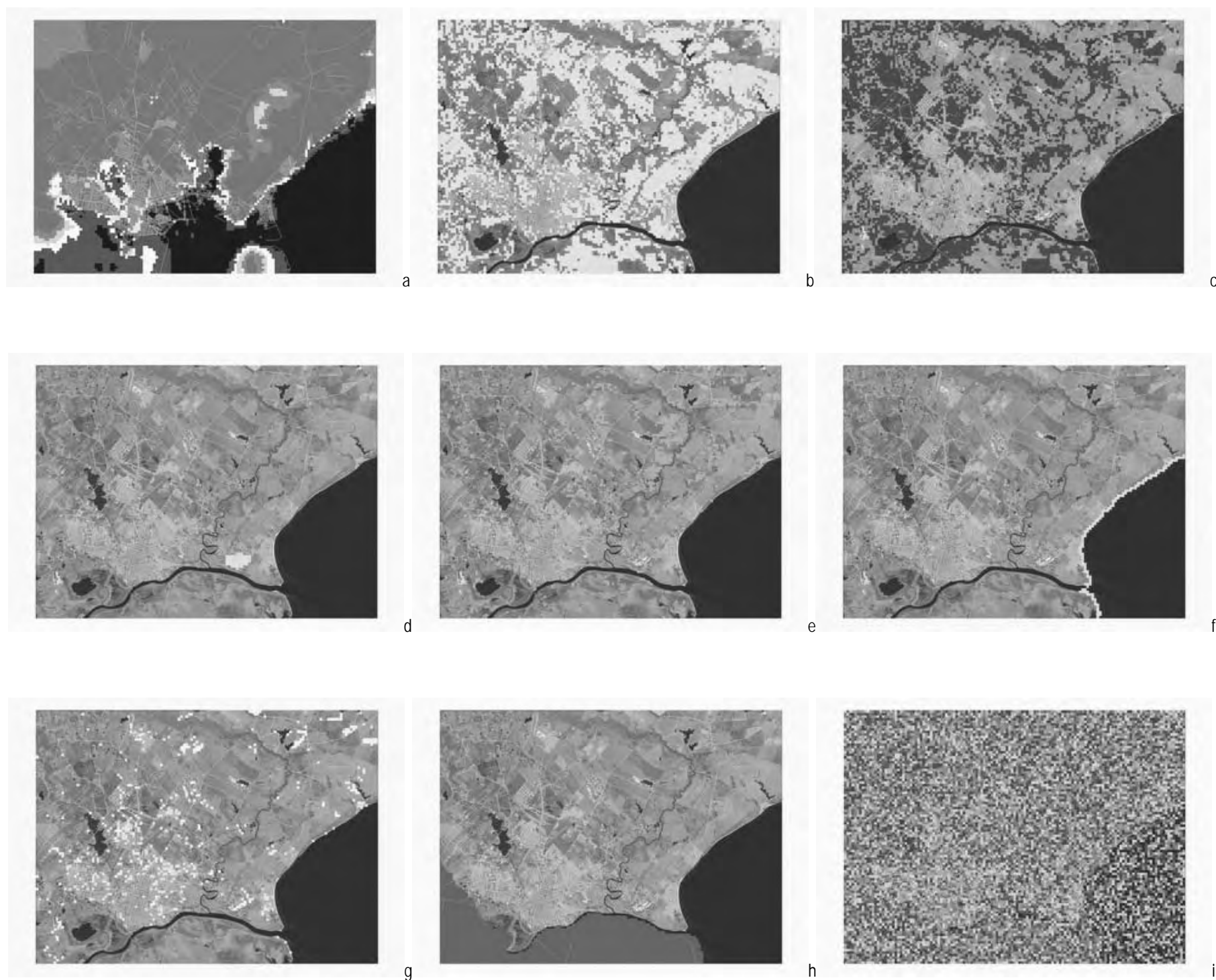


Figura 8.22: temas de entrada (input) na simulação avançada de crescimento em Pelotas, RS, sobre imagem de satélite Landsat 7 ETM+, de fevereiro de 2000; a) altitudes; b) campos e vegetação de pequeno porte; c) matas e vegetação de grande porte; d) dunas; e) solo agriculturado; f) praias; g) solo descoberto; h) área pertencente aos municípios de Capão do Leão e Rio Grande; i) grid aleatório.



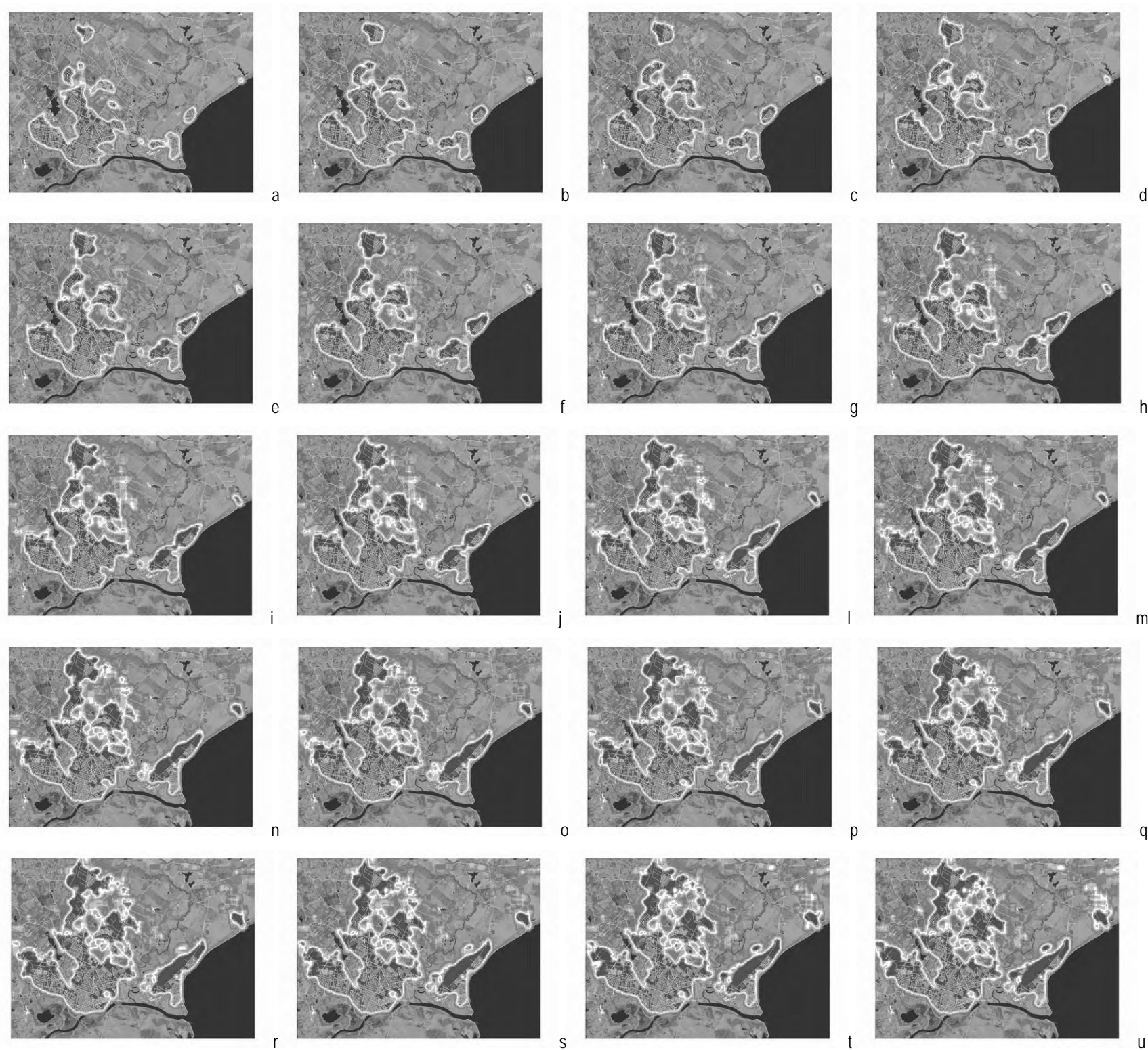


Figura 8.23: vinte estados da simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 1, denominado de “crescimento sustentável”, com 45 iterações (equivalentes ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo).

[ver animação em C:\Animacoes\_Tese\Cenarios: gif ou ppt]

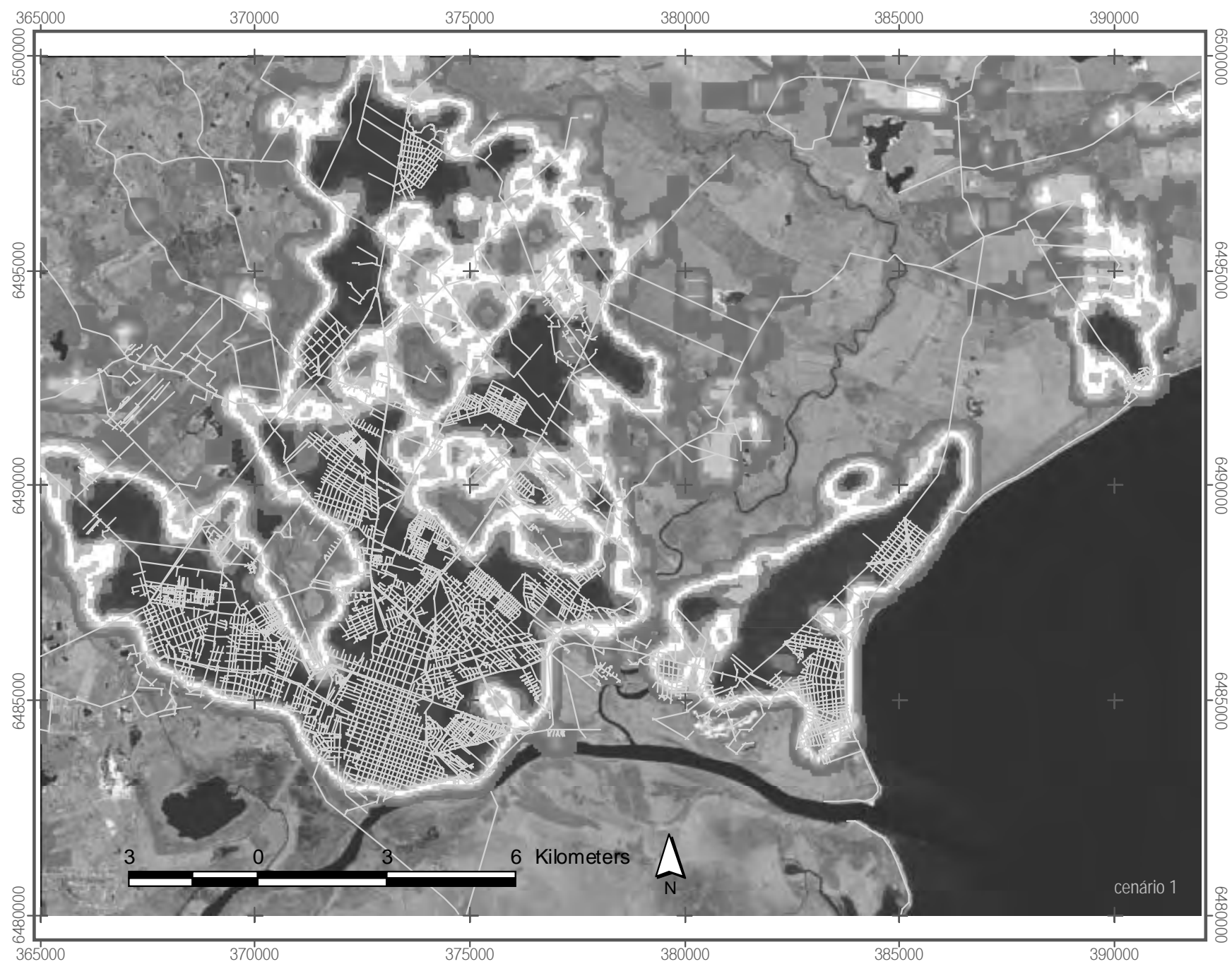


Figura 8.24: ampliação da iteração 45, na simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 1, denominado de “crescimento sustentável”, (equivalente ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo).

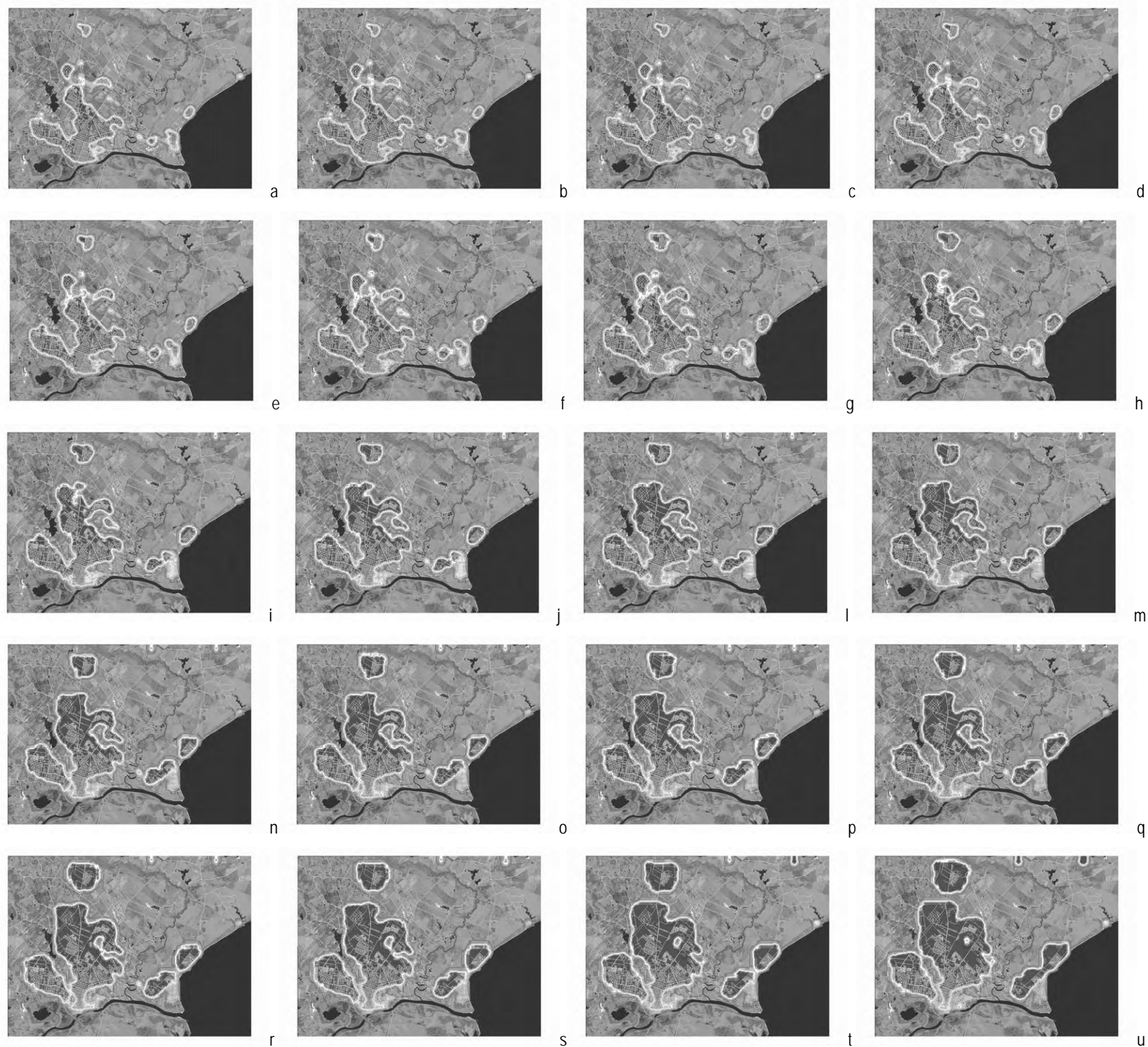


Figura 8.25: vinte estados da simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 2, denominado de “crescimento convencional”, com 45 iterações (equivalentes ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo).

[ver animação em C:\Animacoes\_Tesel\Cenarios: gif ou ppt]

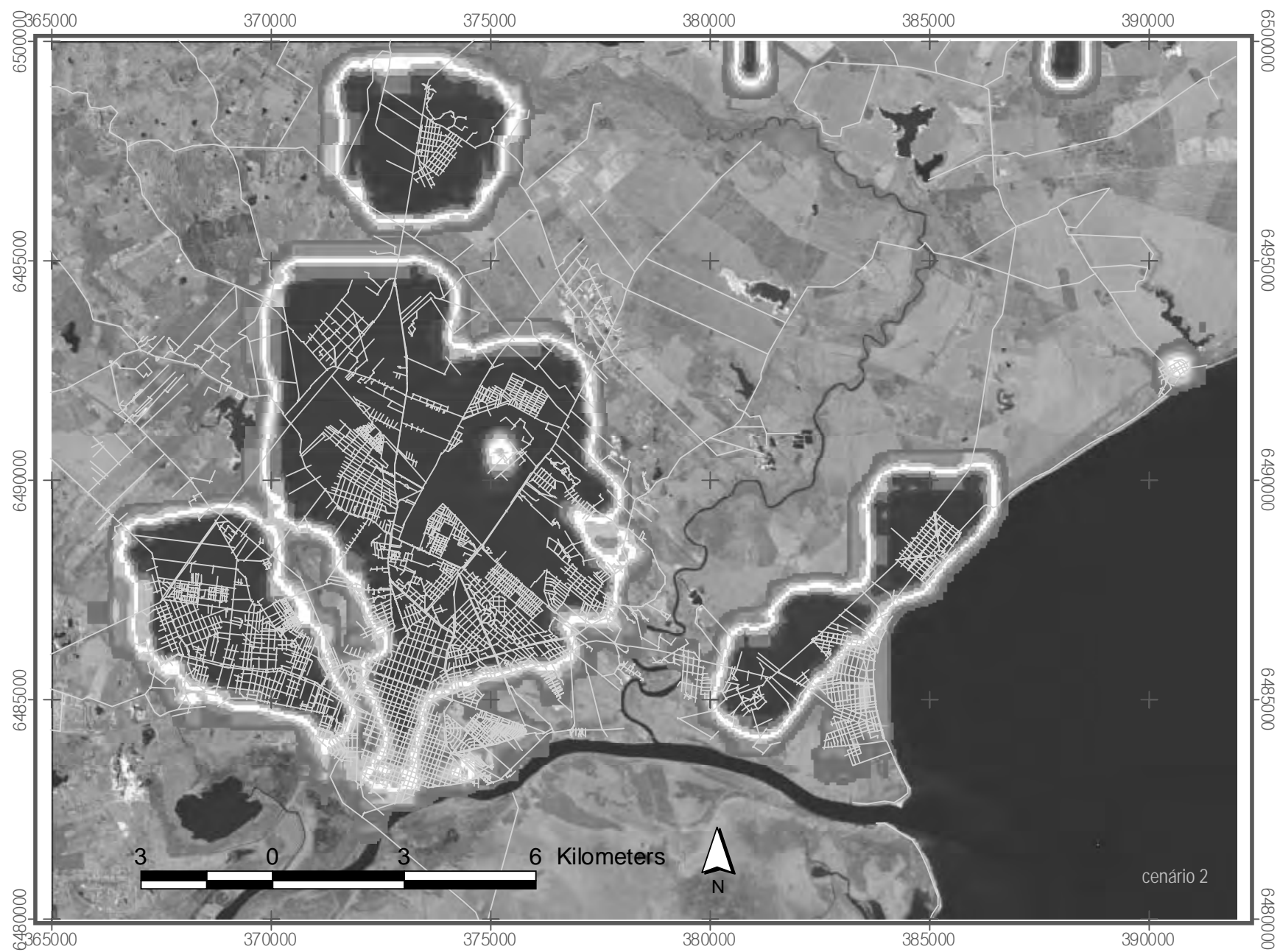


Figura 8.26: ampliação da iteração 45, na simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, no caso do cenário 2, denominado de “crescimento convencional”, (equivalente ao ano 2045, com taxa de crescimento média de 1,50% aa), mostrando as células com processo de urbanização completo (cores em escala de vermelho), incompleto ou degradado (cores em escala de cinza) e não iniciado (transparente, com a imagem de satélite ao fundo).

O processamento foi realizado com apoio da técnica de compressão de dados desenvolvida no SACI (*Cluster*, no modelo), através da qual é possível trabalhar com desagregações espaciais diferentes para *input*, processamento e *output*, permitindo aumentar o número de células do sistema, o que por sua vez possibilita utilizar células menores. No caso deste experimento, foi possível realizar as simulações com um *grid* de 13.500 células de 200 metros no *input*, sendo que o processamento trabalhou com 1.485 células, em função do *Cluster* igual a 1 (a figura 8.27, abaixo, mostra o efeito da compressão)<sup>30</sup>; já o *output* apresentado está com células de 50 metros (cada célula original foi fracionada em quatro), sendo os resultados alcançados por análise de vizinhança com raio de 12 células, utilizando a média de uma vizinhança com área quadrada como descritor.

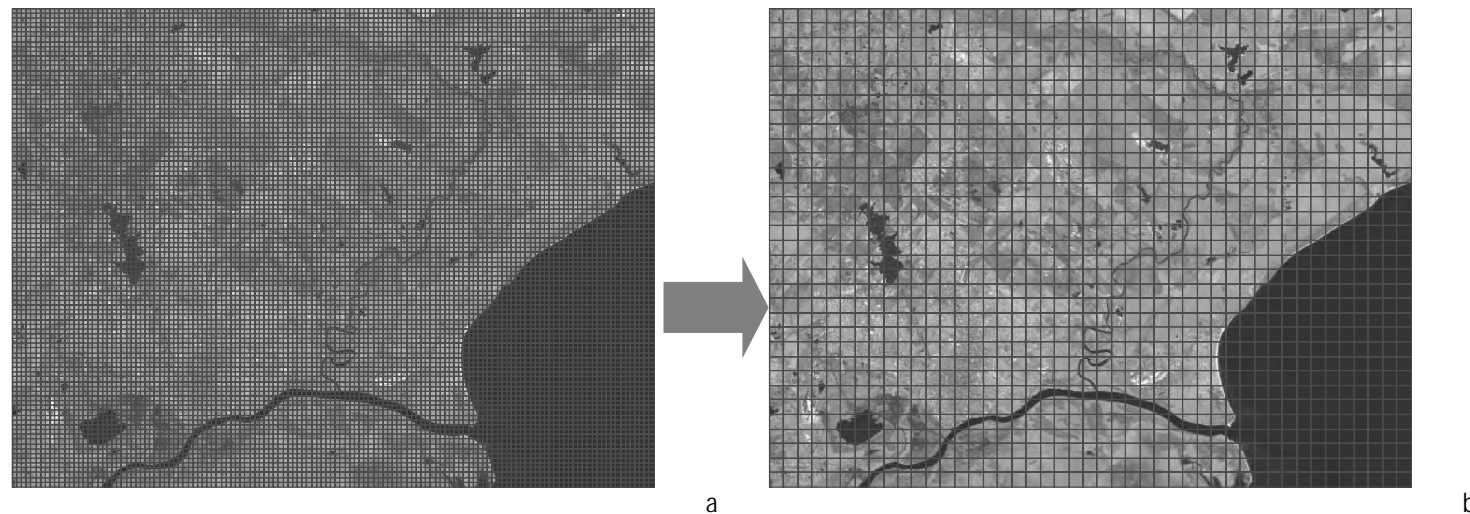


Figura 8.27: efeito da compressão de dados através do recurso de *Cluster* igual a 1 (nove células agrupadas e representadas por uma célula central); a) desagregação espacial de *input* e *output*, com 13.500 células de 200 metros; b) desagregação espacial utilizada no processamento, com 1.485 células de 600 metros.

Os resultados alcançados para os cenários 1 e 2, denominados de “crescimento sustentável” e de “crescimento convencional” (figuras 8.23, 8.24, 8.25 e 8.26, anteriormente) podem ser transcritos e interpretados pelos seguintes itens:

- a) a quantidade de células convertida para o fenótipo urbano (*CellType*, no modelo) é semelhante, sendo essa uma condição imposta às simulações, de modo a facilitar a análise comparativa; deste modo, o cenário 1 começou com 1.519 e chegou com 2.968 células urbanas, em 45 iterações (que podem ser entendidas como 45 anos), com uma taxa de crescimento médio igual a 1,50% por iteração; o cenário 2 começou com 1.159 e chegou com 2.265 células urbanas, em 45 iterações e com a mesma taxa de crescimento (ver o gráfico 8.13a, adiante, com a evolução do crescimento urbano nos dois cenários); a diferença na quantidade de células iniciais com fenótipo urbano se deve aos diferentes pesos imputados aos fatores naturais;
- b) a localização das células convertidas para o fenótipo urbano (*CellType*, no modelo) é diferente nos dois cenários, sendo que no cenário 1 as novas células foram plotadas de modo mais espalhado que no cenário 2; essa diferença de localização resulta por influência composta dos fatores de diferenciação elencados anteriormente, sendo que os principais são: b.1) a preser-

<sup>30</sup> Correlações das simulações sem e com compressão registraram valores médios de 6,72 , 8,43 e 8,78 para *CellType*, *LoadU* e *CentR1*, respectivamente.

vação ambiental, que no cenário 1 impede a urbanização em áreas mais próximas das preexistentes; b.2) da política de preservação ambiental implementada no cenário 1, que valoriza os remanescentes naturais; b.3) a maior eficácia do sistema de circulação urbana vigente no cenário 1, que facilita localizações remotas; uma deficiência do experimento pode estar na ausência de influência de núcleos rurais fora da área de estudo, o que poderia aumentar a urbanização à noroeste;

c) a distribuição dos estoques construídos (*LoadU*, no modelo) segue padrões decididamente diferentes, sendo notavelmente mais fragmentada e intercalada por altos e baixos no cenário 1 do que no cenário 2 (ver figuras 8.28a e 8.28b, adiante); esse resultado sugere que a alocação de edificações contínua e homogênea não é indicador seguro de sustentabilidade urbana, como é comum constar em exemplos de boas práticas para a sustentabilidade urbana (Jenks, Burton e Willians, 1998);

d) conforme delineamento deste experimento, a simulação com o cenário 1 registra e corrige os problemas ambientais intra-urbanos gerados por superação de limiares de crescimento, enquanto que a simulação com o cenário 2 não considera limiares, não registra problemas ambientais e conseqüentemente nada corrige (ver figuras 8.28c e 8.28d, adiante); como já foi verificado em experimentos anteriores, o crescimento urbano que não considera limiares implica em maior concentração, o que o pode ser visualizado nos estoques construídos, representados nas figuras 8.28a e 8.28b, adiante;

e) em função da degradação dos estoques construídos e da infra-estrutura instalada, associada à fraca incidência de potencial para crescimento, o cenário 2 apresenta três áreas de obsolescência notável, como pode ser observado nas células destacadas pela paleta de cores cinza, nas representações do cenário 2 (ver figuras 8.25 e 8.26, anteriormente; as áreas são conhecidas localmente como “braço morto do Arroio Santa Bárbara”, “Zona da Várzea” e “Balneário Laranja”); esse resultado identifica áreas que demandam investimentos permanentes para não entrarem em degradação, dependendo de recursos externos; no caso do cenário 1 esse processo de obsolescência não ocorre, em função da manutenção simulada e do combate aos problemas ambientais intra-urbanos (ver figuras 8.23 e 8.24, anteriormente; também 8.28c e 8.28d, adiante);

f) ambos os casos apresentam formação de periferias (que podem ser visualizadas nas figuras 8.23, 8.24, 8.25 e 8.26, em paleta de cores cinza, e também pelas figuras 8.89a e 8.89b, mais adiante, em paleta de cores azul), porém com morfologias diferentes: f.1) no cenário 1 as periferias aparecem com tendência ao norte da cidade, formando núcleos sem contigüidade; f.2) no cenário 2 as periferias também aparecem com tendência ao norte, porém formando uma borda contínua ao redor da cidade, bem como contornando os núcleos remotos, com maior quantidade de células do que no cenário 1; esse resultado indica que o crescimento sustentável não elimina a formação de periferias urbanas, porém pode evitar formação de áreas contínuas ao redor da cidade e bem incidir na sua quantidade ;

g) vazios urbanos ocorrem nos dois cenários simulados (ver as figuras 8.23 a 8.26, anteriormente; também as figuras 8.28 e 8.29, adiante), porém com diferenças de tamanho, quantidade e localização: g.1) no cenário 1 formam-se vazios de tamanho menor, quantidade maior e com localização entremeada com as áreas densificadas; g.2) no cenário 2 os vazios são de tamanho maior, em quantidade menor e com localização não entremeada com as áreas urbanizadas; essa configuração dos vazios urbanos está associada aos dois tipos de tecidos urbanos constituídos no processo de crescimento, sendo esse tecido mais frag-

mentado no cenário 1 (com diversos cheios e vazios intercalados e com tendência de formação de corredores) e mais compacto no cenário 2 (com grandes vazios isolando áreas remotas); o resultado demonstra que o crescimento sustentável não implica necessariamente em eliminação de vazios urbanos, os quais podem estar representando uma paisagem compósita, com co-presença de atributos urbanos e naturais;

h) como era esperado, o cenário 1 chega ao final da simulação com presença maior de atributos naturais do que o cenário 2 (figura 8.28e e 8.28f, adiante), em decorrência das funções de preservação utilizadas nas simulações; todavia, é notável no experimento que essa maior presença de atributos naturais é acompanhada por maior conversão de território não urbanizado para urbanizado ou, noutras palavras, de maior crescimento urbano (ver gráfico 8.3a, abaixo); esse resultado sugere que a conservação de áreas naturais na cidade não implica em restrição ao crescimento urbano, sendo seus efeitos mais qualitativos (tipo de tecido e localização de áreas urbanizadas) do que quantitativos (quantidade de área urbanizada);

i) a evolução urbana dos cenários 1 e 2, revelada pelo andamento da conversão de território não urbanizado em urbanizado (ver as figuras 8.23 a 8.26, anteriormente; também o gráfico 8.3a, abaixo), embora ocorra a taxas de crescimento idênticas, mostra evidentes diferenças quanto à fragmentação e compacidade; o cenário 1, que representa o crescimento sustentável, demonstra estabilidade na medida de fragmentação, enquanto que o cenário 2, que representa a cidade tradicional, tem a fragmentação diminuída com o crescimento urbano (ver gráfico 8.3b, abaixo); o cenário 1 mostra também tendência de diminuição de compacidade, enquanto que o cenário 2 apresenta tendência de compacidade crescente (ver gráfico 8.3c, abaixo); esse resultado confirma a hipótese levantada neste trabalho, que aponta para a possibilidade de fragmentação e descompactação funcionarem como um recurso para o crescimento sustentável da cidade, ao invés do contrário.

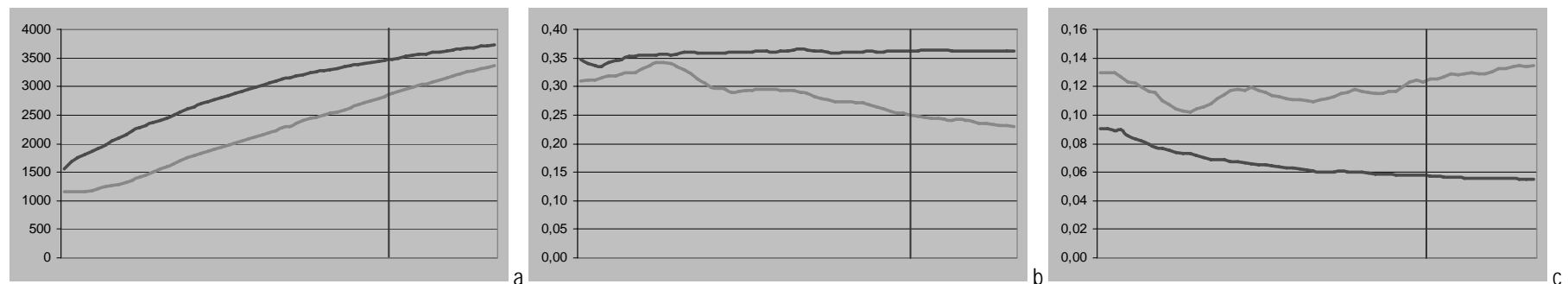


Gráfico 8.3: comparação dos resultados da simulação no caso denominado “crescimento sustentável” (linha verde) com o “crescimento convencional” (linha laranja), em 64 iterações, com destaque para a iteração 45: a) conversão de células para o fenótipo urbano (CellType, no modelo); b) fragmentação relativa; c) compacidade relativa.

A seguir estão as figuras 8.28 e 8.29, comparando resultados gráficos do cenário 1 com o cenário 2, mostrando: figura 8.28a; b; c; d; e; f) para a iteração 45, os carregamentos urbanos, os problemas ambientais intra-urbanos acumulados e os fatores naturais; figura 8.29a; 8.29.b) para todas as iterações, a evolução das células durante o processo de urbanização. Ao final estão duas vistas aéreas (figura 8.30a; 8.30b), usando como escala vertical as representações bidimensionais da figura 8.28a, referida ao cenário denominado “crescimento sustentável”, com o resultado formando um relevo em função do cenário urbano e não urbano simulado para o futuro (em relevo alto a baixo, respectivamente).

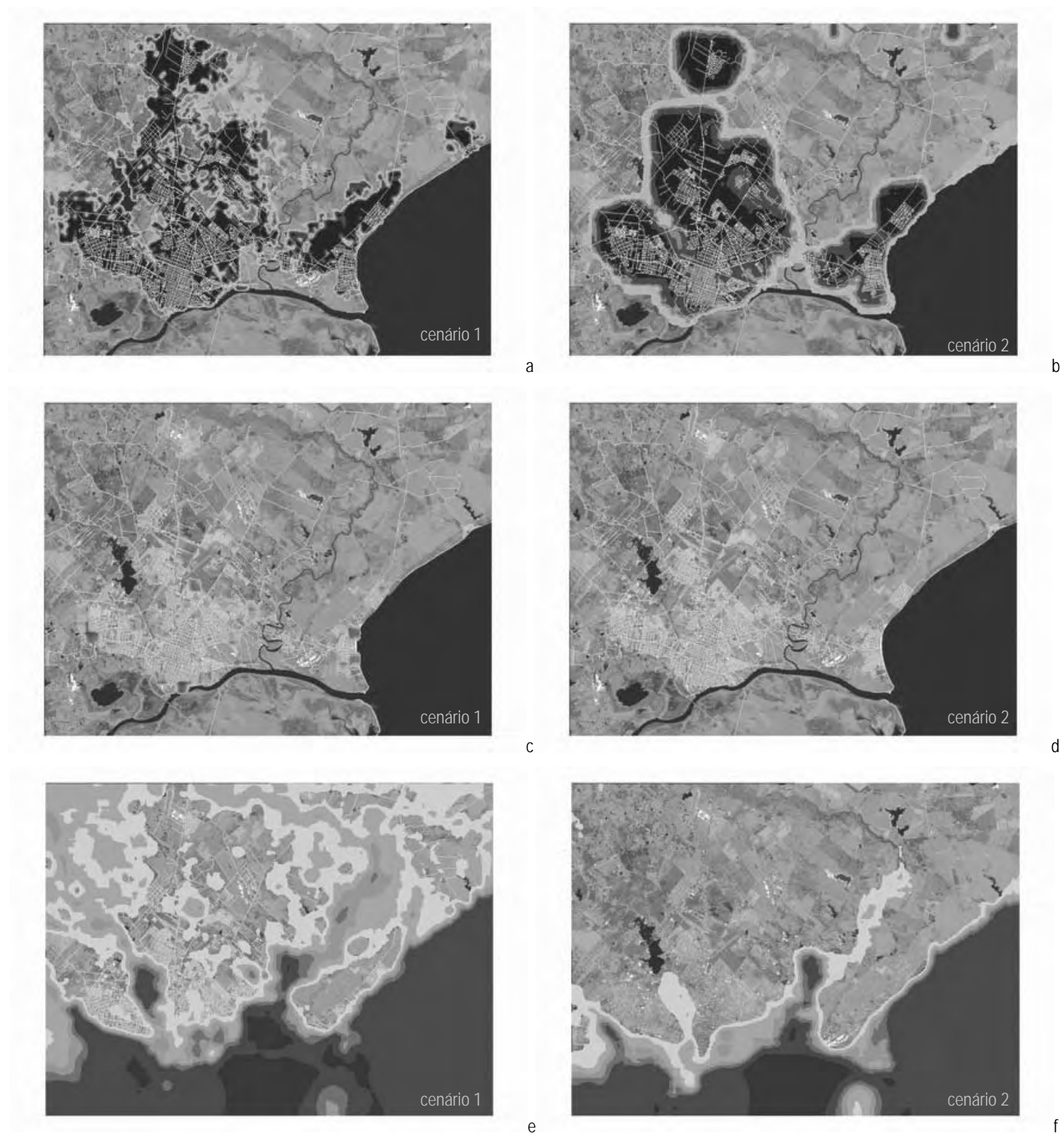


Figura 8.28: simulação avançada de crescimento urbano em Pelotas, RS, comparando resultados para o caso 1 e caso 2, na iteração 45; a) carregamentos urbanos para o caso 1; b) carregamentos para o caso 2; c) problemas ambientais intra-urbanos para o caso 1; d) problemas ambientais intra-urbanos para o caso 2 (conjunto vazio); e) fatores naturais no caso 1; f) fatores naturais no caso 2.



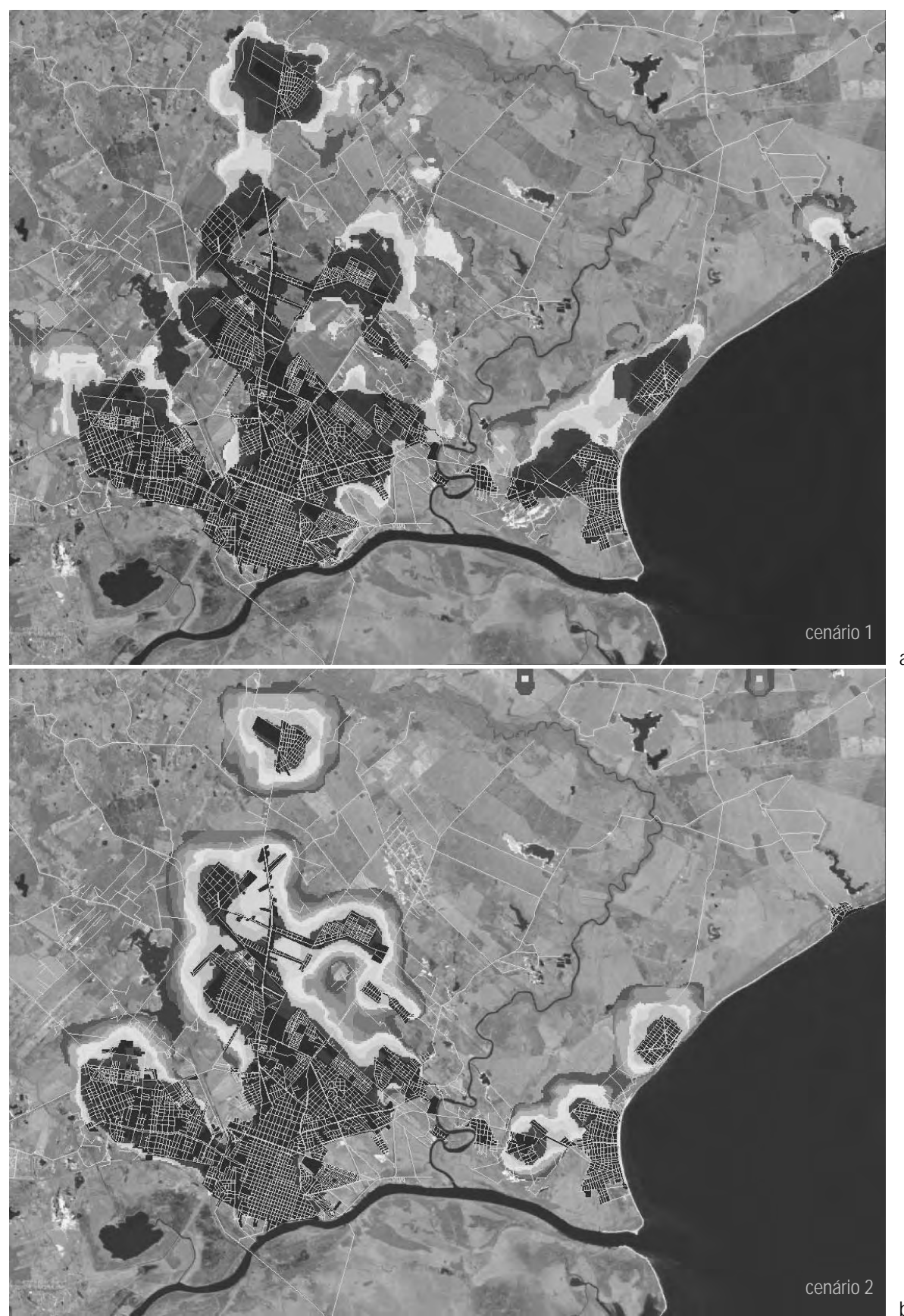


Figura 8.29: sinopse da simulação de crescimento urbano de Pelotas, RS, mostrando células com processo de urbanização completo (com a área urbanizada no ano 2000 em primeiro plano), em 45 iterações, equivalentes a 45 anos, de 5 em 5 anos, em paleta de cores do vermelho ao azul; a) cenário 1, que representa o “crescimento sustentável”; b) cenário 2, que representa o “crescimento convencional”.

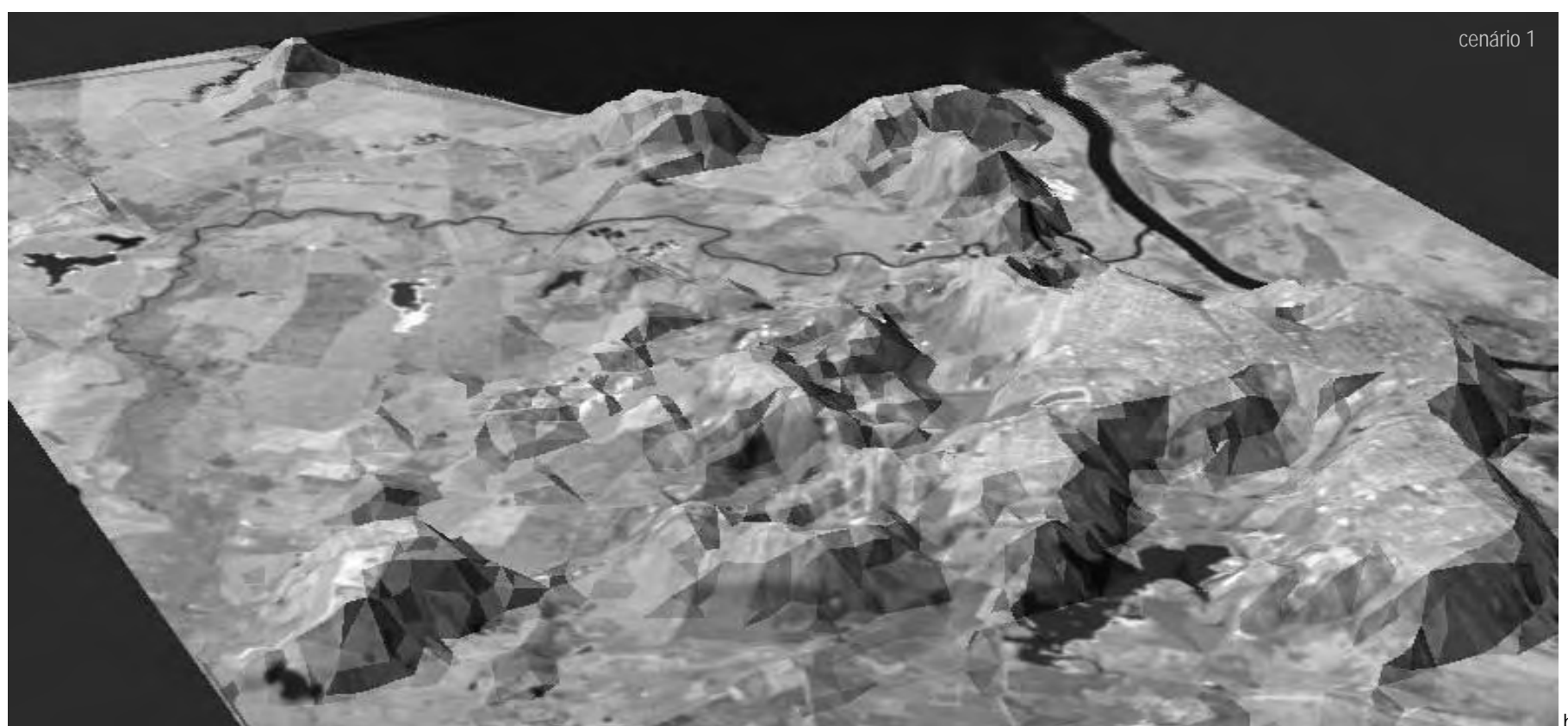
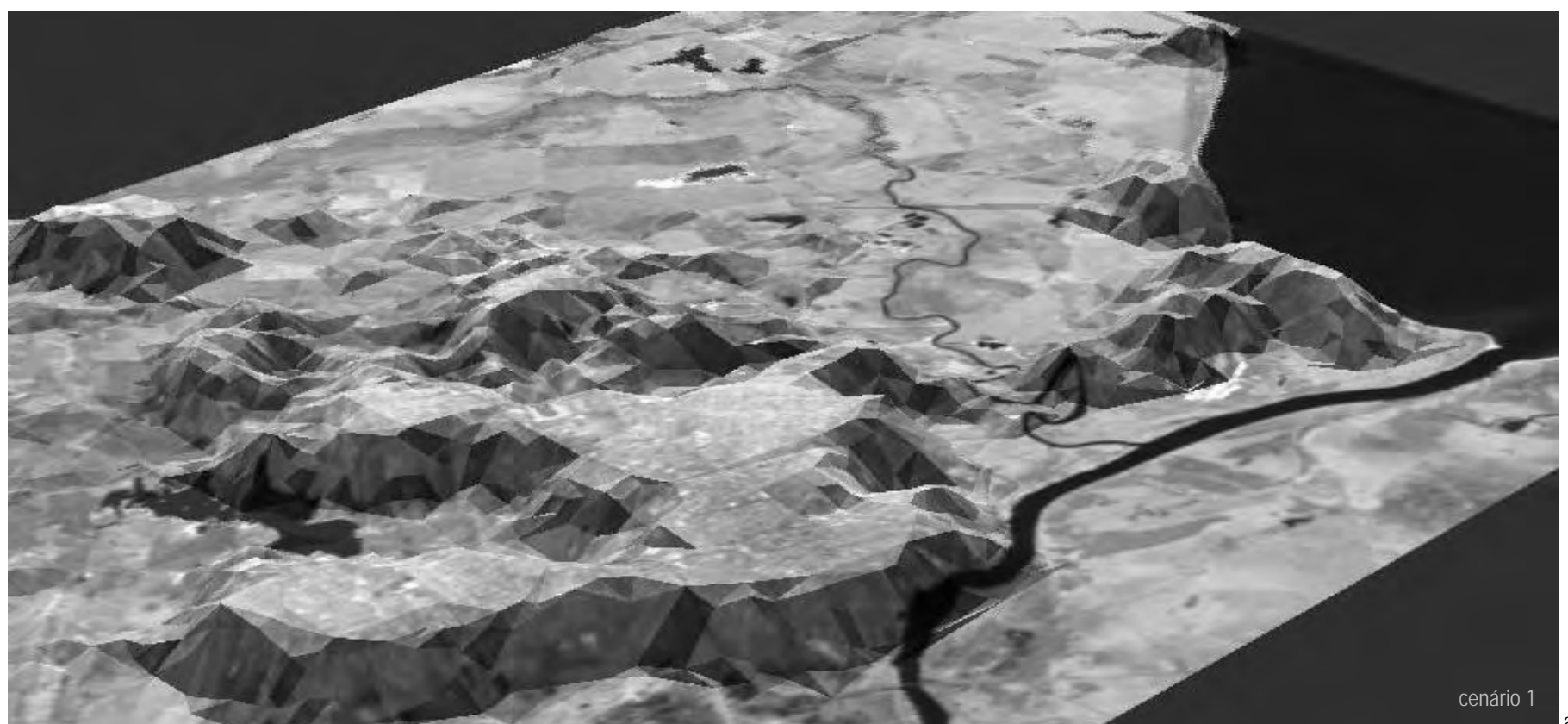


Figura 8.30: relevo diferenciando o cenário urbano e não urbano (em relevo alto e baixo, respectivamente) simulado para Pelotas, RS, no ano 2045, para o caso denominado de “crescimento sustentável”, utilizando como base uma imagem de satélite Landsat 7 ETM+, com resolução de 15 metros, em escala vertical de 1.000 vezes; a) vista sudoeste; b) vista noroeste. [ver animação em C:\Animacoes\_Tese\Cenarios\EPNS0006b.mov]

## 8.6 Conclusões da simulação avançada com o caso de Pelotas, RS

Os experimentos realizados neste capítulo podem ter suas conclusões resumidas nos seguintes itens:

- a) como ficou demonstrado nas simulações que comparam os efeitos das regras de crescimento com e sem o uso de limiares (*Threshold Potential* e *Free Potential*, no modelo), a utilização de limites para o crescimento urbano implica em resultados com menor diferenciação espacial, aproximando os valores máximos e mínimos dos carregamentos urbanos e das centralidades, pois acima dos limiares entra em funcionamento um processo de *feedback* negativo, exercendo função de auto-regulação; ao contrário, a não consideração de limites para o crescimento urbano implica em maior diferenciação espacial, tornando permanente o processo de *feedback* positivo que atua no crescimento urbano; esse resultado confirma a noção de que o crescimento ilimitado acirra as diferenças entre padrões máximos e mínimos de urbanização, o que pode ser interpretado como um mecanismo de concentração;
- b) a simulação com crescimento por percolação aplicado às células que incluem atributos naturais que podem apresentar esse comportamento (como é o caso dos campos e das matas nativas) mostra notável efeito de contenção da urbanização, demonstrando a importância da regeneração na permanência dos atributos naturais na paisagem urbana; como efeito associado está a delimitação de fronteiras mais nítidas entre o espaço urbanizado e o não urbanizado, a qual pode ter aumentada a pressão por urbanização em função do aumento de potencial de crescimento; esse resultado reforça a noção de que a conservação de fatores naturais integrados ao processo de urbanização ocorre de modo mais eficaz quando os processos dinâmicos de produção e reprodução daqueles fatores estão ativos, sendo a estagnação das áreas naturais concorrente com seu desaparecimento;
- c) o uso de técnicas de compressão de dados traz melhoras e pioras para o desempenho do SACI, oferecendo a possibilidade de realizar simulações com quantidade de células significativamente maior do que sem compressão, permitindo deste modo observar fenômenos que só aparecem quando o espaço é desagregado em células menores; todavia, essa compressão provoca perdas de exatidão na localização, demandando permanente confirmação dos resultados e tendo sua aplicação indicada apenas para casos em que a exatidão da localização geográfica não é fundamental;
- d) técnicas de visualização são importante instrumento no trabalho de simulação, participando do *input*, processamento e *output*; no *input* interessa particularmente o uso de imagens *raster* (como as imagens de satélite, que são fundamentais fontes para as descrições do ambiente natural), que se integram às possibilidades das representações vetoriais (pontos, linhas e áreas, que são fundamental fonte das descrições urbanas) e das representações em forma de *grid* (que são o meio de operacionalização do SACI); no processamento a visualização é utilizada como primeira etapa do processo de calibração, permitindo verificar e compreender a reação do modelo, testar hipóteses iniciais ou exploratórias, adotando ou descartando possibilidades; no *output*, como foi mostrado neste capítulo, a visualização auxilia na construção e na explicitação dos resultados, podendo os dados brutos do modelo ser melhorados por pós-processamento;

e) o caso de simulação avançada realizado para Pelotas, RS, mostra a possibilidade de utilização dos recursos de modelagem de modo integrado, facilitando a aproximação das simulações a cenários de futuro; particularmente está demonstrado que crescimentos urbanos mais fragmentados e menos compactos não são indicadores de sustentabilidade, como sugerem diversos trabalhos anteriores; ao contrário, os experimentos indicaram que o crescimento urbano mais fragmentado e menos compacto consumiu seletivamente os recursos naturais, permitiu a co-presença de zonas urbanizadas com os atributos naturais, integrou-se com unidades de conservação, gerou menos periferias urbanas pobres e com maior diversidade, desconcentrou carregamentos urbanos e centralidades, chegando ao final da simulação com maior potencial de crescimento, isto é, com maiores chances de continuar crescendo; esse resultado, que contrasta com o argumento convencional sobre sustentabilidade urbana, é o esperado neste trabalho e reforça as argumentações do autor.

### **8.7 Epílogo do capítulo 8**

Neste capítulo mostrei inicialmente a possibilidade de utilizar diferentes regras de crescimento, o recurso de compressão de dados e as alternativas de visualização; uma vez conhecidos essas possibilidades, realizei um experimento utilizando em conjunto os recursos do modelo desenvolvidos ao longo do trabalho, de modo a construir dois cenários alternativos para o futuro de Pelotas, RS. Desse conjunto de simulações extraí conclusões gerais, como estão relatadas no subtítulo anterior.



No capítulo seguinte estarei concluindo esta investigação, para o que enfocarei a verificação das hipóteses traçadas inicialmente e as construções teóricas centrais que demandaram das observações dos experimentos realizados com o SACI. Ao cabo elencarei as principais possibilidades e limitações do modelo construído, indicando por fim a continuidade dos trabalhos.

## 9 Conclusões

Nos capítulos anteriores tratei de levantar a necessidade de integração entre as ciências sociais e ambientais, de construir um modelo de simulação de crescimento urbano que integra fatores naturais, urbanos e institucionais e de realizar experimentos com o modelo produzido; cada capítulo tem suas próprias conclusões, as quais serão resgatadas e agrupadas adiante. Neste capítulo apresento as conclusões finais da investigação, organizadas em três grupos: a) conclusões que recuperam as hipóteses iniciais levantadas na investigação (subtítulo 9.1); b) observações que retomam e sistematizam os resultados obtidos ao longo do trabalho, referentes aos *outputs* do modelo, ao estudo de caso e à simulação avançada (subtítulo 9.2); c) principais possibilidades, limitações e indicações de continuidade nos trabalhos (subtítulo 9.3).

### 9.1 Validade das hipóteses e alcance dos objetivos

No primeiro capítulo foram enunciadas hipóteses iniciais, que funcionam como respostas provisórias para as três perguntas que nortearam este trabalho. As perguntas foram as seguintes: a) como a cidade cresce, considerando integradamente fatores urbanos e naturais ? b) como simular crescimento espacial da cidade, interno e externo simultaneamente, integrando fatores urbanos e naturais ? c) como aproximar as simulações de crescimento do que de fato ocorre numa cidade e numa paisagem reais ? Realizada a investigação, que esteve dedicada a construir e experimentar um modelo de simulação de crescimento urbano, as hipóteses podem ser retomadas à luz dos resultados alcançados e ter sua validade verificada.

A hipótese que responde à primeira pergunta, de ordem mais teórica, foi escrita em três partes, conforme o seguinte: a) forças de atração e de resistência ocorrem nas cidades, que geram tensões de crescimento e resistem a elas, simultaneamente; b) tensões de crescimento são distribuídas no território de modo axial, polar e difuso; c) localizações são decididas em função da busca de vantagens locais, representadas por fatores urbanos e naturais. A hipótese que responde à segunda pergunta, de ordem mais instrumental, dizia o seguinte: crescimento espacial da cidade integrando variáveis urbanas e naturais pode ser simulado através da reedição dos modelos de centralidade e potencial de Krafta, produzindo um modelo novo em ambiente digital, integrando recursos de grafos, autômato celular e geotecnologias. A terceira hipótese dizia que três condições teriam que ser cumpridas: d) uso de parâmetros que permitam a regulação do modelo, de modo quantitativo e qualitativo; e) realização de simulações prospectivas, de modo a simular o presente a partir de condições do passado; f) obtenção de calibragem do modelo, com a melhor aproximação entre simulação e realidade, obtida por correlações espaciais e aproximações sucessivas.

Essas hipóteses são justamente os fundamentos do modelo construído, representando respectivamente: a) as simplificações da realidade que se pretende simular e dos processos que ocorrem no crescimento urbano, os quais geram mudanças na cidade e no ambiente que integra (atrações e resistências, tensões e vantagens locais); b) o caminho de construção de um modelo de simulação fundado em grafos, CAs – autômatos celulares e geotecnologias, de modo a representar a dinâmica espacial urbana pelos quesitos anteriores; c) o processo de regulação e validação do modelo, através de parametrização, testes e calibração. Sendo assim, a verificação de sua validade reside no sucesso ou no insucesso do funcionamento do modelo que foi construído, na capacidade de gerar entendimentos sobre a cidade e sua dinâmica e no grau de aproximação com a realidade; como se vê, a hipótese não é testada por um descritor ou resultado isolado, mas sim pelo desempenho geral do modelo. Deste modo, considerando que o modelo foi de fato construído e que funciona, que foi calibrado com sucesso, que permitiu a geração de cenários de futuro coerentes em diversos casos e que representou satisfatoriamente variadas características do crescimento urbano atual (estes foram os assuntos dos capítulos anteriores), podem as hipóteses ser aceitas como válidas, o que implica na possibilidade de representar crescimento urbano por forças de atração e resistência, geradoras de tensões axiais, polares e difusas, com as localizações das funções urbanas decididas por vantagens locais, o que pode ser alcançado com o uso integrado de técnicas de grafos, CAs e geotecnologias.

É notável como foi possível representar o conjunto de fenômenos que apareceram no Capítulo 7 – Avançando na modelagem do crescimento urbano, cujas simulações assumiram importância superior nesta investigação, pelo que terão suas conclusões detalhas no subtítulo 9.2.2, logo adiante; particularmente se destaca a questão do crescimento difuso e suas relações com a ideia de sustentabilidade, tendo a investigação questionado a ideia corrente de que a fragmentação do tecido urbano seja um problema a combater e que a cidade compacta seja um objetivo a perseguir.

Os objetivos principais traçados no primeiro capítulo foram os seguintes: a) construir um modelo de simulação de crescimento urbano que integre fatores urbanos e naturais, b) aplicar o modelo de simulação de crescimento a um caso de cidade e de paisagem reais, o que permite verificar empiricamente a validade do modelo; c) utilizar o modelo para construir entendimentos teóricos sobre crescimento urbano e suas relações com a paisagem. Os dois primeiros objetivos foram atingidos nos capítulos anteriores, sendo que o terceiro está recolhido das conclusões parciais e sistematizado a seguir.

## **9.2 Observações registradas na investigação**

A realização desta investigação permitiu construir um conjunto de observações que não foram previamente programadas, as quais se formaram frente às demandas de construção do modelo de simulação de crescimento urbano e, principalmente, revelaram-se ao realizar as simulações, as quais podem ser assumidas como conclusões. Essas conclusões, que representam entendimentos teóricos sobre crescimento urbano e suas relações com a paisagem, estão organizadas em três grupos: a) quanto aos componentes de *output* do modelo; b) quanto aos estudos de caso em Pelotas, RS; c) quanto aos resultados da simulação avançada.

### 9.2.1 Quanto aos componentes de *output* do modelo

As simulações mostraram resultados recorrentes nos experimentos realizados nesta investigação, com relação aos *outputs* emitidos pelo modelo, que podem ser assumidos como padrões espaciais emergentes na cidade atual (Johnson, 2003), podendo auxiliar na compreensão de sua dinâmica e configuração espacial. Retomando as conclusões do Capítulo 6, seis observações principais estão a seguir, referindo-se ao crescimento urbano externo à cidade preexistente, ao crescimento interno, à formação de centralidades, ao potencial de crescimento, à questão dos limites de crescimento e à influência dos fatores naturais, respectivamente:

- a) falhas espaciais e vazios urbanos: o crescimento urbano através da conversão de solo não urbanizado em urbanizado demonstra que a cidade cresce através de forças centrífugas, porém experimenta falhas na conversão de território, o que ocasiona o aparecimento de vazios urbanos; esse resultado sugere reconhecer os vazios urbanos como componentes estruturais da cidade (Clichevsky, 2001), ao invés de simplesmente distúrbios ou mal-formações (Moreira Neto, 2003);
- b) instabilidades espaciais e velocidade de crescimento: no processo de crescimento urbano, os estoques construídos se distribuem mediante a combinação de forças centrípetas e centrífugas, com instabilidades permanentes, o que é típico dos sistemas fora do equilíbrio, como podem ser consideradas as cidades (Pessis-Partesnak, 1991; Prigogine, 1996); enquanto que as forças centrípetas são reinantes quando o crescimento é lento, as centrífugas são quando o crescimento é rápido, particularmente na borda em expansão; esse comportamento indica manejar com os estoques construídos através de instrumentos não prescritivos, mais adequados para sua difícil predição;
- c) centralidades flutuantes e auto-organizadas: a distribuição de centralidades, que está associada de modo diretamente proporcional ao valor do solo, alocação de infra-estrutura, dotação de equipamentos urbanos e disponibilidade de facilidades urbanas, mantém um comportamento flutuante em curto prazo, porém tende a diferenciar centros majoritários com o avançar da dinâmica urbana; esse modo de distribuição das centralidades permite seu entendimento como fruto de um processo de auto-organização, particularmente evidente no longo prazo;
- d) potencial de crescimento e efeito de borda: o potencial de crescimento se concentra nas interfaces do urbano com o não-urbano e do mais urbanizado com o menos urbanizado; essa concentração tende a demarcar frentes de expansão em forma de linha, determinando uma borda com comportamento diferenciado do resto do sistema; o aparecimento desse efeito de borda no tecido urbano tem papel de vitalização do processo de crescimento, o que pode ser assumido como uma semelhança morfológica ao que ocorre em sistemas naturais em expansão;
- e) feedback composto e limites de crescimento: os experimentos demonstram que ocorre no crescimento urbano um mecanismo de *feedback* positivo, através do qual se diferenciam crescentemente os espaços; todavia, encontrado um limiar urbano, natural ou institucional, entra em ação um mecanismo de *feedback* negativo, num ciclo de crescimento, aparecimento de pro-

blemas ambientais intra-urbanos e superação desses problemas, produzindo assim uma auto-regulação do sistema; sendo deste modo, esse comportamento indica que a dinâmica urbana não é plenamente explicada nem por *feedback* positivo nem negativo isoladamente, mas pela composição entre eles;

f) atributos naturais e campo de irregularidades: a paisagem natural e os seus atributos representam o ambiente antecessor da cidade, funcionando como um campo de irregularidades que influencia o crescimento urbano em curto e longo prazos, em função da intensidade com que resistem à urbanização; enquanto que no curto prazo as baixas resistências naturais atraem o crescimento urbano, esse processo faz aumentar o potencial de crescimento das resistências maiores, aumentando a pressão de urbanização no longo prazo; isso implica em admitir que o crescimento urbano não é mediado somente pelos condicionantes sociais, históricos, econômicos, tecnológicos e culturais, mas também pelos fatores naturais e suas transformações ao longo do tempo.

### 9.2.2 Quanto aos casos simulados em Pelotas, RS

Três grupos de simulações foram realizados com o caso de Pelotas, RS: 1) casos que demonstraram o processo de calibração do modelo (Capítulo 5); 2) casos dedicados à especulação de possibilidades de futuro (Capítulo 6); 3) casos de simulação avançada, nos quais foi particularmente levantada a questão da sustentabilidade e da forma urbana. Essas simulações, tomadas em conjunto, permitem extrair conclusões gerais sobre: a) velocidade de crescimento; b) formação de centralidades; c) tamanho de cidade; d) borda e interfaces; e) influência de grandes pólos de atração; f) zoneamento para a preservação cultural; g) zoneamento para a conservação natural; h) crescimento induzido institucionalmente; i) relações entre sustentabilidade e forma urbana, conforme vêm nos parágrafos a seguir.

Variações na velocidade de crescimento mostraram diferentes resultados no crescimento urbano, sendo os principais os seguintes: a) o crescimento lento facilitou a consolidação de núcleos remotos, a compacidade e a monocentralidade; a interface com o ambiente natural aparece através de baixos carregamentos, porém com tendência de eliminação integral dos remanescentes naturais; b) o crescimento rápido produziu a anexação dos núcleos remotos à estrutura urbana, o que foi feito mediante aumento de fragmentação e produção de policentralidade; nesse caso, a interface com o ambiente natural é contrastada por carregamentos urbanos mais elevados do que no crescimento lento, porém o tecido resultante tem maior chance de manter remanescentes do ambiente natural. Esse resultado questiona a idéia corrente de que o crescimento urbano rápido é um causador da degradação ambiental, sendo que o consumo seletivo de território (constituindo unidades de conservação, por exemplo) poderia alcançar bons resultados de integração entre cidade e natureza justamente frente ao crescimento rápido. Dito noutras palavras, observando a conversão de território não urbanizado para urbanizado, a degradação do ambiente natural pela cidade parece



não ser um problema de velocidade do crescimento urbano, mas sim uma questão de escolha de território e dos processos de produção e consumo interligados<sup>31</sup>.

A formação de centralidades está na base do modelo proposto neste trabalho, sendo que o crescimento ocorre em lugares onde há diferença entre a medida de centralidade de uma célula e a das células vizinhas, conforme a intensidade dessa diferença, o que é denominado potencial de crescimento celular; trata-se de uma variável quantitativa, que pode ser agrupada em classes e observada como manchas que constituem diferentes níveis de centralidade; nesse caminho, os experimentos realizados nesta investigação sugerem a formação de um mínimo de três níveis, representados pelo(s) centro(s), transição(s) e periferia(s), cujas localizações e morfologias podem ser variados; nuances dessas três classes aparecem em função de estruturas mais e menos concentradoras, bem como em função da ocorrência de policentralidade, que provoca encontro de estruturas parciais e aumenta a variedade do conjunto. De modo a fornecer pistas para o futuro da cidade, os experimentos realizados nesta investigação sugerem que estruturas concentradoras ocorrem mais facilmente quando o crescimento é lento e quando o ambiente natural é homogêneo, para as mesmas condições iniciais de carregamento urbano; já o crescimento rápido e a presença de ambiente natural heterogêneo produzem resultados menos concentradores, com maior suficiência das partes em relação ao conjunto. Esse resultado pode auxiliar na compreensão das diferenças entre as estruturas urbanas em diversas escalas, desde a formação de bairros com maior independência, até a formação de regiões metropolitanas. Observando conjuntamente a formação de centralidades e a velocidade de crescimento, como tratada no parágrafo anterior, pode ser assumido que a polinucleação e o crescimento rápido concorrem para a desconcentração e para a diversificação da estrutura urbana; como causas para a formação de policentralidade, podem ser indicadas a presença de pólos de atração remotos, a localização estratégica de fatores naturais, o crescimento rápido e o tamanho da cidade.

O tamanho da cidade mostrou importância no resultado das simulações, por duas questões principais: a) pelo número de entidades que participam do sistema; b) pelas relações que se formam na dinâmica urbana. A necessidade de um mínimo de entidades espaciais para se que se formem relações complexas e para que padrões possam emergir é conhecida nas teorias de complexidade e de auto-organização (Johnson, 2003), sendo que essa quantidade varia com as características do sistema e das relações que são consideradas (no caso do SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>, as simulações realizadas permitem indicar um mínimo de 500 células). As relações que se formam na dinâmica urbana podem variar com o tamanho da cidade, sendo que os experimentos permitem esperar que as cidades maiores formem múltiplos centros e núcleos remotos com maior probabilidade, bem como tendam a crescer com velocidade maior.

---

<sup>31</sup> Estudos sobre a produção da cidade e consumo de recursos naturais sem conversão para o uso urbano excedem a especificidade deste trabalho, podendo ser particularmente encontrados nas abordagens conhecidas como “pegada ecológica” (*ecological footprint*, como está em Rees e Wackernagel, 1996).

O aparecimento de bordas e interfaces diferenciadas foi recorrente nos experimentos, particularmente representadas pelo encontro de células urbanizadas com não urbanizadas, o que ocorreu em função de três motivos principais: a) crescimento urbano rápido; b) concentração de resistências ao crescimento urbano; c) presença de zonas de urbanização impedida. Como foi destacado anteriormente, o crescimento rápido apresenta a propriedade de promover a fragmentação do tecido urbano e de alocar mais carregamentos urbanos na periferia, o que resulta em bordas mais extensas e mais contrastadas com a vizinhança. A concentração de resistências, como ficou demonstrado em diversos experimentos, atrai potencial de crescimento e provoca o aparecimento de borda, efeito que aumenta sua nitidez com o desaparecimento das resistências menores e com o avançar da simulação. No caso de zonas com urbanização impedida (onde ocorrem atributos *freezing*, no modelo), o efeito anterior se exacerba e tende a aumentar iterativamente, o que implica em aumento de potencial na interface com as demais zonas, no longo prazo; considerando que essas zonas freqüentemente ocorrem como áreas ou linhas (como é o caso dos corpos de água), as bordas se apresentam com a forma de linhas. Essas bordas tendem a delimitar locais de maior vulnerabilidade, onde se formaram frentes de pressão por expansão urbana, movidas por forças centrífugas e com elevada probabilidade de acumulação de problemas ambientais e de formação de periferias.

Grandes pólos de atração promovem efeitos diferenciados na dinâmica urbana, sendo os principais os seguintes: a) aumento de carregamento urbano no entorno imediato; b) formação de zona de rarefação de carregamento no entorno mediato; c) incremento de conversão de território remotamente, com baixos carregamentos urbanos. O aumento de urbanização no entorno imediato atende ao esperado, se considerados os casos de grandes funções urbanas como hipermercados, *shopping centers* e congêneres, como pode ser observado na maioria das capitais brasileiras; todavia, os experimentos demonstraram que logo após um *buffer* de contato com o pólo de atração, há forte tendência de rarefação dos carregamentos, podendo inclusive formarem-se vazios urbanos. O aumento de conversão de território distante e com baixo carregamento urbano, por sua vez, parece responder às alocações de formas construídas que não ocorreram na zona de rarefação, completando um conjunto articulado. Todavia, a presença dos grandes pólos de atração influencia o sistema mais no curto do que no longo prazo, no qual seus efeitos tendem a ser absorvidos pela estrutura urbana. Esse modo de influenciar o crescimento, conjugando simultaneamente atração e repulsa, pode auxiliar na compreensão do tecido urbano fraturado que se forma em função de grandes pólos de atração desconectados do tecido urbano preexistente (como foi o caso de muitos conjuntos habitacionais construídos no Brasil, à época do BNH – Banco Nacional da Habitação), que permaneceram longo tempo isolados, até que o crescimento urbano tradicional e centrífugo, proveniente do núcleo preexistente, envolvesse o pólo de atração.

Grandes pólos de atração naturais também são capazes de promover importantes mudanças na estrutura urbana, como ficou demonstrado neste trabalho; a principal diferença com relação aos pólos de atração urbanos é que os fatores naturais podem ocasionar pólos de centralidade sem acumular formas construídas, o que ocorre particularmente no curto prazo, havendo condições favoráveis de acessibilidade; no longo prazo, sendo permitida a urbanização sem restrições, a tendência é de se formarem

pólos de elevada atração, compostos por fatores naturais e urbanos combinados. Esse modo de crescimento urbano pode auxiliar a compreender a urbanização das cidades litorâneas e balneários, comuns no caso brasileiro.

Finalmente, é notável como o processo de urbanização estimulado por grandes pólos de atração tende a ocorrer “dos fundos para a frente”, pois uma vez apropriadas as glebas e começada a urbanização, o aumento do carregamento se dá no sentido das células mais distantes para as mais próximas do pólo de atração.

Zoneamento para a preservação cultural normalmente implica na delimitação de uma área preexistente, na qual aparecem prédios, lugares ou conjuntos de importância, podendo sobre essa área incidirem restrições à potencialidade de construir (Cunha, 2004). Os experimentos realizados neste trabalho, implantando uma zona de preservação no centro histórico de Pelotas, RS, considerando a permanência dessa zona no seu estado atual e desimpedindo mudanças no restante da cidade, mostrou três efeitos principais: a) permanência estrutural da cidade; b) continuidade geral no crescimento; c) incremento de conversão de território em áreas remotas. A permanência estrutural da cidade foi percebida pelo tipo de diferenças entre as situações simuladas sem e com a presença da zona de preservação cultural, restando os carregamentos urbanos, distribuições de centralidades e potenciais com o mesmo padrão de localização, embora com maior espalhamento pela área urbanizada; a continuidade no crescimento pôde ser observada ao longo do tempo da simulação, não havendo diminuição nem no curto nem no longo prazo; pelo contrário, apareceu aumento geral do crescimento urbano, particularmente revelado no aumento da conversão de território, desde o tempo inicial até o tempo final. Esses resultados sugerem que as mudanças provocadas pela zona de preservação cultural não mantêm contradição com o crescimento urbano, o qual não diminui em função das restrições impostas à zona preservada; todavia, o efeito de desconcentração que apareceu no estudo de caso (no qual a zona preservada coincide com o centro principal da cidade) provocou aumento na conversão de território na borda da cidade, o que pode estar indicando uma associação entre impedimento exógeno do crescimento de áreas centrais e expansão de periferias.

Zoneamento para a conservação natural foi experimentado através do impedimento de urbanização dos subsistemas de águas e matas nativas, unificando trechos fragmentados por análise de vizinhança, para o caso de Pelotas, RS. Também foram realizadas simulações com zonas de fragilidade ambiental, através do rebaixamento do limiar dessas zonas, em função de condições de drenagem e geomorfologia. Com a implantação de unidades de conservação, os efeitos principais foram os seguintes: a) segmentação dos núcleos urbanos; b) aumento do potencial nas interfaces; c) continuidade da quantidade de crescimento; d) urbanização remota. A segmentação dos núcleos urbanos ocorreu como consequência da manutenção das áreas naturais, cuja permanência tornou-se determinante das áreas urbanizáveis; como foi destacado no estudo de caso, no Capítulo 6, anteriormente, os experimentos demonstram que à continuidade do ambiente natural corresponde o aumento da fragmentação do conjunto de células urbanas, podendo ser assumido que a continuidade de um subsistema corresponde à descontinuidade do outro. O aumento de potencial nas interfaces do espaço urbanizado com as zonas de conservação foi uma constante nas simu-

lações, o que pode ser considerado como um problema nativo da co-presença de áreas urbanas com naturais, pois a ocorrência da área conservada é autogeradora de potencial para transformação. Contrariando o discurso anti-conservacionista, os experimentos demonstram também que o crescimento urbano não diminui em função da delimitação de unidades de conservação entremeadas na cidade, sendo que o que ficou registrado foi um padrão estável de crescimento, cuja diminuição no curto prazo é compensada e superada por aumento a médio e longo prazos. Todavia, como ficou demonstrado em diversos experimentos (inclusive no Capítulo 8, no qual a questão da sustentabilidade foi incluída nos testes), áreas com potencial que são impedidas de se urbanizarem, além de terem seu potencial inflacionado, podem provocar urbanização remota, isto é, podem estimular a urbanização de zonas distantes, que seriam mantidas desocupadas noutras condições iniciais. Deste modo, os resultados anteriores demonstram que a presença de áreas de conservação natural integradas à cidade não funciona como freio do crescimento urbano; pelo contrário o aumento de potencial nas interfaces, o aumento da borda da área urbanizada e da área convertida para o fenótipo urbano indica que o esperado é uma vitalização do crescimento urbano, importando direcionar para essa questão os planos e os instrumentos de manejo.

Adicionalmente foi percebida uma relação entre velocidade de crescimento e conservação natural, sendo que o crescimento lento consumiu menos território, porém com eliminação dos remanescentes naturais nas áreas urbanizadas, enquanto que o crescimento rápido consumiu mais território, porém sem eliminação dos representantes naturais; esse resultado reforça a hipótese de que o tipo de tecido resultante da dinâmica urbana, com relação à co-presença de atributos urbanos e naturais, depende menos da velocidade de crescimento do que da eleição dos lugares que serão mantidos ou modificados no processo de urbanização.

Embora a tônica do modelo de simulação de crescimento não esteja na avaliação de eficácia de planos e projetos institucionais, efeitos de indutores de uso do solo foram testados, com resultados em relação ao crescimento externo e interno à cidade preexistente. Com relação ao crescimento externo, o uso de vantagens institucionais para zonas ainda não ocupadas (como facilidades de uso e ocupação do solo) trouxe diferenças quase nulas na ocupação dessas áreas; já no caso do crescimento intraurbano, a diferenciação de limiares edílios (como se fossem os tradicionais coeficientes de aproveitamento do solo) trouxe dois efeitos combinados: a) concentração nas áreas com limiares menos restritivos (maiores coeficientes de aproveitamento); b) aumento da conversão de território nas áreas com limiares mais restritivos (menores coeficientes de aproveitamento). Esses resultados indicam que pode haver fortes dificuldades para induzir crescimento urbano externo para determinada direção oferecendo vantagens institucionais, pois a tendência é de a expansão ser comandada pelos fatores urbanos e naturais; todavia, uma vez alcançada a conversão de território para o fenótipo urbano, diferentes regimes urbanos podem trazer notáveis mudanças, com simultaneidade de concentração edilícia e espalhamento da área ocupada pela cidade.

Como foi argumentado desde o início deste trabalho e particularmente no Capítulo 8, relações entre sustentabilidade e forma urbana tradicionalmente indicam a cidade compacta como mais sustentável, sendo a fragmentação do tecido urbano considerada um indicador de fragilidade ou mal-formação, à semelhança do que é argumentado para o tecido social (Santos, 1992) e para o ambiente natural (Forman, 1995; Primack e Rodrigues, 2001). Todavia, como ficou comprovado nos experimentos realizados, crescimento urbano com atendimento a requisitos aceitos como indicadores de sustentabilidade<sup>32</sup> pode resultar em áreas urbanas menos compactas e mais fragmentadas do que as que experimentaram o modo de crescimento convencional, como ocorreu no estudo de caso em Pelotas, RS.

### 9.2.3 Quanto aos experimentos com a simulação avançada

Os experimentos com a simulação avançada, além de demonstrarem a capacidade de o modelo capturar e de reproduzirem diversos e complexos processos que ocorrem no crescimento urbano, permitem construir conclusões sobre os seguintes assuntos: a) crescimento interno e externo integrados; b) distribuição dos estoques construídos; c) formação de vazios urbanos; d) formação de periferias urbanas; e) obsolescência e revitalização no crescimento urbano; f) raios de interação e raios de vizinhança; g) abrangência das funções urbanas. h) influência da distância; i) variação da impedância; j) renaturalização e preservação ambiental; l) limites de crescimento e problemas ambientais intra-urbanos; m) ponderação de atributos; n) crescimento difuso; o) regras de crescimento; p) compressão de dados; q) importância da visualização; r) crescimento sustentável e crescimento convencional. Essas conclusões estão resumidas nos parágrafos adiante.

Os experimentos demonstraram que crescimento externo e interno integrados é a modalidade que mais provoca crescimento, comparativamente ao interno e externo exclusivos, nas mesmas condições iniciais; mostraram também que essa quantidade maior de crescimento produz menos problemas ambientais, com os potenciais distribuídos com mais equidade (subtítulo 7.2). Esse resultado em parte reforça e em parte contraria idéias correntes sobre a dinâmica urbana, a saber: a) reforça a idéia de *feedback* positivo levantada anteriormente, desta vez incidindo sobre relações entre expansão territorial urbana (crescimento externo) e aumento das formas construídas (crescimento interno); b) contraria a noção de que a diminuição de crescimento interno provocaria maior conversão de território, fazendo a cidade estender-se horizontalmente, pois as simulações mostraram que restrições à dinâmica interna tendem a abrandar o crescimento geral; c) contraria a idéia de que restrições ao crescimento externo colaboram para a menor incidência de problemas ambientais intra-urbanos, evitando o crescimento extensivo sobre o território ainda não urbanizado, pois nesses casos as simulações registraram o aumento dos problemas ambientais por superação de limiares.

---

<sup>32</sup> Como apareceu no Capítulo 8, os indicadores de sustentabilidade urbana foram os seguintes: observação de limites para o crescimento urbano, mitigação de problemas ambientais, diminuição na formação de periferias, desestímulo à formação de vazios urbanos, conservação de áreas portadoras de atributos naturais, diminuição do uso de recursos naturais escassos, implementação de política ambiental com valorização dos remanescentes naturais, preservação do patrimônio construído e qualificação do sistema de circulação.

A questão da distribuição dos estoques construídos aparece em quase todas as simulações deste trabalho, posto que o crescimento externo e interno integrados foi o padrão utilizado; todavia, os carregamentos iniciais foram fortemente simplificados, de modo a facilitar as interpretações com os casos imaginários e em função das informações disponíveis nos casos reais, o que implicou em diferenciação espacial resultante também simplificada. Além disso, com o uso da centralidade celular medida com transformação vetorial entre variáveis, através de normalização pelo total (*CentR1*, no modelo, a qual é mais sensível a diferenciações em classes inferiores, que normalmente não se localizam nos centros preexistentes) e também com o uso de células de grandes dimensões, pode ser assumido que a agudeza do modelo e dos experimentos não se destaca na questão da distribuição dos estoques construídos (ver os experimentos no subtítulo 7.3). Dentro desse quadro, as principais conclusões são de caráter geral, a saber: a) preditibilidade limitada; b) comportamento emergente. A possibilidade de antecipar a localização e intensidade dos estoques construídos está considerada limitada em função das múltiplas possibilidades de a mesma estrutura urbana ser atingida, o que vai ao encontro do argumento de Batty e Torrens (2001), ao alertar sobre os limites da predição em sistemas complexos; sendo assim, se por um lado foi possível antecipar tendências para a atividade edilícia, por outro foi difícil precisar onde e como isso vai acontecer. O comportamento dessa variável pode ser considerado emergente em função de que sua dinâmica depende de ações individuais, normalmente pautadas em informações parciais, assumindo feições que não foram prescritas de modo centralizado, mas sim que emergem a partir da base, o que vai ao encontro da idéia de que a cidade pode ser considerada, ao menos parcialmente, como um fenômeno auto-organizável (Portugali, 2000; Johnson, 2003).

Como foi argumentado no subtítulo 7.4, vazios podem ser considerados como componentes estruturais do tecido urbano, cabendo destacar as seguintes características principais: a) descontinuidade e temporabilidade; b) vinculação com urbanização remota, fragmentação, fatores naturais e retenção fundiária; c) atratividade indireta e efeito de borda. Descontinuidades podem ser consideradas como uma característica original dos vazios urbanos, pois é em função delas que ocorrem os vazios; todavia, como essas descontinuidades variam com a evolução urbana, o entendimento desse fenômeno depende do tempo em que for observado; exemplo disso são os vazios em áreas centrais, que podem num tempo  $t$  ser considerados como problemas (por subutilização de infra-estrutura, por exemplo), enquanto que num tempo  $t+1$  podem-se transformar em solução para a instalação de atividades fundamentais para a qualidade dessas áreas, particularmente em processos de revitalização. A vinculação com urbanização remota e com processos de fragmentação é mais evidente nas expansões periféricas, pois uma área desocupada pode vir a torna-se um vazio urbano passivamente, em função do aparecimento de um novo e descontínuo núcleo urbano, bem como de uma expansão urbana atomizada; fatores naturais podem ser também a causa dos vazios urbanos, tanto por oferecerem resistência à urbanização (como no caso de áreas alagadiças, por exemplo), como por serem intencionalmente reservadas

(como em áreas de interesse para a conservação biológica, por exemplo); a vinculação com retenção fundiária associa os vazios a interesses econômicos, indicando a possibilidade de aumentar a renda da terra retardando a comercialização do solo.

Em todos os casos, pode ser admitido o aparecimento de um efeito de atratividade indireta, pois a área tem o potencial de crescimento aumentado em função do crescimento de outras áreas, o que é particularmente concentrado na interface do vazio com as áreas contíguas, gerando um efeito de borda urbano, como vem sendo mostrado neste trabalho.

A formação de periferias, caracterizadas neste trabalho como áreas urbanas distantes do centro tradicional, com algum carregamento urbano e com baixa centralidade, pode ser observada no modelo de simulação de crescimento, particularmente através das distribuições de tensões difusas, com as seguintes conclusões principais (subtítulo 7.5): a) morfologia de desigualdades; b) facilidade de conversão e dificuldade de qualificação; c) tamanho, tempo, evolução urbana e natureza. A noção de morfologia de desigualdades aparece em função da lógica geométrica da cidade, cuja apropriação bidimensional facilita a concentração no centro e a desconcentração na borda, o que se aplica às pessoas e aos benefícios da fábrica urbana; sendo assim, se não são tomadas contramedidas, o esperado é a formação de bordas com rarefação qualitativa, o que juntado à lógica social de concentração de renda e de exclusão das vantagens da urbanização (Maricato, 2000), aumenta a previsibilidade locacional da formação de periferias de baixa renda nos países de terceiro mundo, como é o caso do Brasil; ademais, como foi anotado no subtítulo anterior, o território funciona como um campo de irregularidades no processo de urbanização, que nesse caso inclui a periferização, auxiliando a compreender a localização de favelas e congêneres em áreas não periféricas. Os experimentos demonstraram também que o entorno aderente à cidade preexistente é facilmente convertido para o fenótipo urbano, porém dificilmente apresenta altos índices na dotação de infra-estrutura, equipamentos e outras facilidades urbanas, o que pode ser observado pela medida de centralidade; esse resultado indica que, embora a concentração de potencial de transformação na interface na cidade com o ambiente natural, esse potencial tende a se aplicar e a se esgotar na conversão de território, o que reforça a possibilidade de formação de periferias. Finalmente, juntando à dinâmica urbana o papel exercido pelos atributos naturais, o esperado é que no curto prazo a cidade ocupe os lugares mais próximos dos preexistentes e com resistências menores e que depois sejam ocupadas as áreas mais distantes e com maior resistência, as quais têm o potencial aumentado pela urbanização anterior; observada a evolução urbana deste modo e assumindo que essa interação entre urbanização e natureza ocorre desde as origens da cidade e que se reproduz constantemente em tempos e escalas diferentes, a associação entre a formação de periferias e a presença de fatores naturais acrescenta elementos para compreender a tradicional ocupação de áreas de interesse ambiental pela cidade, tanto por populações de renda elevada como de renda baixa. Enfim, vale explicitar que, de modo diferente de impor fundamentos ecológicos à apropriação social do espaço, trata-se de compreender como a sociedade se apropria do espaço e manipula as relações ecológicas; noutras palavras, de modo oposto a uma “ecologização” de processos sociais, os experimentos sugerem uma apropriação social de processos ecológicos.

Ao mesmo tempo em que a cidade cresce externamente e se densifica internamente, processos de obsolescência podem ser observados e ter seus efeitos estudados; na esteira, uma vez caracterizadas áreas obsoletas, ações para a revitalização podem ser empreendidas, revertendo em todo ou em parte o processo anterior. Como foi mostrado no subtítulo 7.6, anteriormente, esses processos podem ser simulados através da introdução de um parâmetro de depreciação iterativa dos estoques construídos, como uma função geométrica direta que pode aumentá-los ou diminuí-los iterativamente, emulando deste modo obsolescência e revitalização. Com relação aos experimentos com obsolescência, o principal efeito foi a homogeneização do sistema, observado numa espécie de alisamento na distribuição dos benefícios da urbanização, assumida a medida de centralidade como indicadora; no caso da revitalização o resultado foi invertido, o que ficou demonstrado na concentração de centralidades e de estoques construídos; sendo deste modo e contrariando o discurso dominante, obsolescência mostrou-se favorável à igualdade, enquanto que revitalização mostrou-se contrária, o que sugere a hipótese de que a caducidade e equidade urbanas podem estar associadas.

Testes realizados com diferentes raios de interação (usados para calcular a centralidade celular) e com diferentes raios de vizinhança (usados para calcular o potencial de crescimento celular) mostraram que maiores raios de interação e menores raios de vizinhança favorecem a monocentralidade e a concentração, enquanto que menores raios de interação e maiores raios de vizinhança favorecem a policentralidade e a desconcentração (subtítulo 7.7). Sendo assim, o que as simulações sugerem é que essas configurações correspondem a determinadas lógicas sócio-espaciais, sendo que o grau de autonomia relativa das partes (representado pelos raios de interação), bem como o grau de conhecimento do conjunto (representado por raios de vizinhança maiores) operam como indutores de mono ou policentralidade.

Raios de abrangência têm sido usados para medir o porte de atividades urbanas, podendo auxiliar em taxonomias funcionais e na elaboração de normas para a localização; nos experimentos realizados neste trabalho, mudanças nos raios de abrangência das funções urbanas revelaram que raios maiores concorrem para o espalhamento das células urbanas, dos carregamentos, da centralidade e do potencial de crescimento celular, enquanto que os raios menores concorrem no sentido oposto (subtítulo 7.8). Esse resultado sugere que atividades de grande abrangência não são causadoras de concentração espacial, mas sim de homogeneização e desconcentração, contrariando deste modo os argumentos usualmente aceitos, que sugerem que atividades de grande abrangência promovem concentração de pessoas, de bens e de serviços (Bezerra e Fernandes, 2000; Garaitagoita, 2001).



Distância tem sido considerada como influente na estrutura urbana, desde os modelos gravitacionais iniciais até aos atuais métodos para mensurar a estrutura urbana (Torrens e Alberti, 2000), particularmente em modelos de interação espacial, como um componente de medidas de acessibilidade (Weber, 2003). Nas simulações realizadas neste trabalho, a influência da distância que separa as células que geram tensões de crescimento pode ser regulada através de um coeficiente exponencial, emulando a qualidade geral do sistema de circulação na cidade, como foi mostrado no subtítulo 7.9, anteriormente. Os experimentos demonstraram que o aumento da influência da distância é diretamente proporcional à formação de centralidades locais, decorrente do maior isolamento das partes, ao mesmo tempo que concorre para o aumento da fragmentação do conjunto e das bordas das áreas periféricas, onde cada parte tende a crescer de forma mais autônoma e a reproduzir o efeito de borda de uma cidade completa. As simulações mostraram também que a diminuição da influência da distância (que corresponde a um sistema de circulação urbana mais eficaz) contribui com a monocentralidade e com a compactação da cidade, indicando que, junto com a esperada melhora de qualidade de vida urbana que tem sido associada à eficácia do sistema de circulação (Vasconcelos, 2000), a concentração nas áreas centrais pode aumentar, bem como a compactação pode induzir a superação de limiares e a consequente geração de problemas ambientais.

A regulação da impedância permite informar o grau de facilidade com que cada célula realiza a conexão com as vizinhas, o que interfere na distribuição de tensões axiais e axiais difusas, pois áreas com maior impedância tendem a ser excluídas do roteiro de caminho preferencial (subtítulo 7.10). O principal efeito é o amortecimento do crescimento nas áreas com maior impedância, com aumento simultâneo do potencial na interface de áreas com impedância diferente. No caso de áreas com menor impedância, o resultado reforça a ideia de *feedback* positivo, posto que melhorias nas conexões com a vizinhança podem trazer mais crescimento, o qual por sua vez pode diminuir a impedância, até que um limiar seja encontrado.

Para simular conservação ambiental, duas simulações dedicadas foram realizadas (subtítulo 7.11): a) com introdução de uma área de conservação com urbanização impedida (através de células *freezing*, no modelo); b) com aumento da importância natural dessa área (através do aumento do peso do atributo; *weight*, no modelo). Em ambos os casos a conservação foi alcançada, porém as áreas tiveram o potencial de crescimento em suas bordas fortemente aumentado, o que sugere dificuldades em manter a conservação por longo prazo; o caso do aumento de peso atenuou a formação dessa borda pressionada pela urbanização, porém a área de interesse ambiental teve a borda progressivamente consumida pela ocupação urbana.

Para simular renaturalização foi introduzido um dispositivo que provoca incremento iterativo na intensidade de atributos naturais no interior das células (subtítulo 7.11), sem suspender a dinâmica de urbanização; os resultados mostraram eficácia na permanência da área natural, porém acompanhada de diminuição geral no crescimento urbano e concentração de estoques construídos e de centralidade, o que pode ser associado tanto à preservação quanto ao aparecimento de áreas inóspitas. O experimen-

to que simula a implementação de políticas de valorização ambiental (também no subtítulo 7.11), demonstrou resultados finais semelhantes ao alcançado com renaturalização, porém com a diferença de que os potenciais de crescimento são mais difusos no curto e médio prazos e mais nítidos no longo prazo.

De um modo geral, os resultados alcançados com conservação, renaturalização ambiental e implementação de políticas de valorização, além de demonstrarem as possibilidades de simulação do modelo, indicam que a co-presença de áreas naturais e urbanas na cidade traz aumento do potencial de crescimento na interface, com aumento iterativo da pressão por urbanização; sendo assim, fica registrado um dilema da conservação natural na cidade, pois a ação de conservar tende a gerar sua própria oposição, de modo diretamente proporcional à intensidade da preservação. Uma possibilidade a considerar em trabalhos futuros é o efeito de zonas de transição ou amortecimento, idealmente utilizando células com pequenas dimensões.

Considerar limites para o crescimento urbano e assumir que carregamentos acima desse valor são considerados problemas ambientais intra-urbanos, os quais podem ser corrigidos pelo mesmo potencial que os gerou, é uma contribuição específica do modelo desenvolvido neste trabalho, sendo seus efeitos uma novidade a ser observada sistematicamente. Os experimentos realizados (subtítulo 7.12 e 8.2) permitem concluir que o uso de limiares tende a diminuir a concentração de carregamentos urbanos e de centralidade, implicando em pouco acréscimo de área convertida para o fenótipo urbano; ao mesmo tempo, problemas ambientais tendem a se concentrar nas áreas de menor limiar, tendo seu efeito cumulativo aumentado na interface entre áreas de limiares diferentes. Esse resultado sugere que as diferenças nos valores dos limiares afetam mais a dinâmica intra-urbana do que o crescimento externo à cidade preexistente, o qual depende menos de quanto o território suporta de urbanização e mais das resistências à conversão urbana que oferece.

Os experimentos para testar os efeitos da ponderação de atributos foram realizados com diferentes pesos para diferentes áreas de resistência ao crescimento urbano (subtítulo 7.13), indicando que áreas com resistências maiores têm o crescimento retardado em curto prazo, porém têm o potencial aumentado em longo prazo, enquanto que áreas com resistências menores têm o crescimento acelerado no curto prazo, porém têm o potencial diminuído no longo prazo. Adicionalmente pode ser assumido, observando em conjunto esses testes com os de preservação cultural e conservação natural (subtítulos 6.4 e 7.11), que o aumento de peso das resistências traz menos efeitos contrários do que o impedimento de urbanização, embora seja menos literal no alcance de seus objetivos; esse resultado sugere que medidas de condução do processo de crescimento urbano (Del Rio, 1990) tem maior efeito no curto prazo, mas trazem maiores dificuldades para serem mantidas ao longo do tempo, enquanto que medidas de indução (ibidem) são menos eficazes imediatamente, porém exigem menos esforços para sua manutenção em longo prazo.

Simulações com crescimento mais e menos difuso foram realizadas e tiveram seus resultados comparados (subtítulo 7.14), demonstrando que o crescimento difuso aumenta a conversão de território no curto prazo, o que ocorre com intensidade decrescente no tempo e com menor acúmulo de problemas ambientais intra-urbanos, a qualquer tempo de sua evolução. Esse resultado, que é medido no modelo pela fragmentação relativa e pelos problemas acumulados por superação de limiares, mostra para as áreas urbanas conteúdo invertido com o que mostraria para as áreas naturais, pois nas segundas a fragmentação é normalmente assumida como fragilidade ou distúrbio (Forman, 1995), porém nas primeiras apareceu como vitalidade ou recurso de apropriação do território.

Tal como foi concebido, o SACI é um modelo que permite a inclusão de regras com aproveitamento da estrutura de *software*, particularmente dos dados de *input* e dos tipos de *outputs* gráficos e tabulares. Neste trabalho foram apresentados testes com três regras de crescimento, sendo as duas primeiras aplicáveis ao crescimento urbano e a terceira ao crescimento do ambiente natural (respectivamente *Threshold Potential*, *Free Potential* e *Percolation*, no modelo), as quais podem ser usadas independentemente ou seqüencialmente (ver subtítulos 7.12 e 8.2). O uso da primeira regra, de Potencial com Limiar, implica no registro e na possibilidade de mitigação de problemas ambientais intra-urbanos, produzidos por superação de limiares; o uso da segunda regra, de Potencial Livre, difere da primeira por não usar os limiares, permite o aumento dos carregamentos urbanos sem limites e, conseqüentemente, não registra nem corrige problemas ambientais intra-urbanos; o uso da terceira regra, de Percolação, permite a passagem intercelular de atributos naturais, emulando uma dinâmica simplificada. Para o caso das regras de crescimento urbano, como já foi dito anteriormente, a principal conclusão é que as restrições ao aumento de carregamento induzem uma desconcentração geral no sistema, o que é especialmente percebido nos valores máximos de carregamento urbano e de centralidade; para o caso da regra de Percolação, embora tenham sido realizados poucos experimentos, o resultado indica aumento de complexidade dos resultados, com maior permanência dos atributos naturais no sistema e maior diferenciação entre os tecidos urbanos e naturais.

Adicionalmente, duas conclusões gerais podem ser extraídas dos experimentos com as regras de crescimento: a) irreversibilidade endógena da conversão de território; b) natureza cíclica dos problemas ambientais intra-urbanos. A questão da irreversibilidade (Pereira Júnior, 1997) aparece na impossibilidade temporal de as células urbanas serem revertidas endogenamente para os estados naturais antecessores, não podendo a equação da urbanização ser revertida para uma de renaturalização, mantida a grandeza do tempo; a questão dos ciclos dos problemas ambientais é percebida nos experimentos com a regra de Potencial com Limiar, pois à superação dos problemas segue-se mais crescimento, depois problemas, depois nova superação, depois mais crescimento, superação e assim por diante.

A técnica de compressão da base de dados desenvolvida no SACI (*cluster*, no modelo) pretendeu minimizar o problema de tempo de processamento (subtítulo 8.3), que se converteu em restrição para os trabalhos práticos e para as possibilidades de especulação teórica. Os resultados alcançados são suficientes para a questão de tempo de processamento<sup>33</sup>, porém apresentam problemas de perdas de informação (na compressão) e aparecimento de ruídos (informações indesejadas introduzidas na descompressão), o que demanda legitimação em cada caso, por comparação com os resultados sem compressão. Essa necessidade de legitimação implica em reposição parcial das dificuldades com o tempo de processamento, diminuindo as vantagens originais.

O uso de técnicas de visualização, embora restritas ao *software* de SIG utilizado e à montagem de animações a partir de slides individuais, melhorou as possibilidades de interpretação e de comunicação visual de resultados (subtítulos 8.4 e 8.5), o que é particularmente importante ao tratar de exercícios de simulação que assumem a visualização como etapa inicial da calibração. Todavia, considerando que os recursos de visualização apresentados neste trabalho são escassos, fica registrada a necessidade de avanço nesse campo, o que poderá ser feito em colaboração com outros projetos.

Os experimentos finais utilizaram integradamente os diversos recursos do SACI e foram realizados para o caso de Pelotas, RS, tendo sido dedicados à construção de cenários denominados de “crescimento sustentável” e de “crescimento convencional” (subtítulo 8.5), com especial interesse nas questões de fragmentação e compacidade do tecido urbano. Como foi sustentado desde o início deste trabalho, observado no estudo de caso real e testado abstratamente (respectivamente nos capítulos 2, 6 e 8) e conclusivamente retomado no subtítulo 9.2.2, anteriormente, foi refutada a hipótese de que a maior fragmentação e a menor compacidade são indicadores de insustentabilidade urbana, tendo sido demonstrado que crescimento urbano mais sustentável pode ocorrer mediante configurações com tecido mais fragmentado e com compacidade menor.



---

<sup>33</sup> Os experimentos indicam que a diminuição de tempo de processamento pode ser estimada como uma função exponencial do inverso do *cluster* utilizado mais 1 (um); como exemplo, um processamento que utiliza 24 horas para terminar com cluster igual a zero, utiliza cerca de 5 horas com cluster igual a 1 e 3 horas com cluster igual a 2.

### 9.3 Possibilidades, limitações e continuidade

O modelo apresenta possibilidades de enfrentar importantes questões sobre a cidade e seu ambiente, as quais podem ser recuperadas deste argumento e resumidas pelos seguintes itens:

- a) formato dinâmico: interessado em desvendar crescimento urbano, o modelo assume formato dinâmico, o que aproxima seus resultados das transformações experimentadas na cidade, permitindo observá-las ao longo de um processo de mudança;
- b) integração urbano-ambiental: o modelo trata integradamente aspectos urbanos e naturais, o que pode melhorar na compreensão da cidade, das transformações que ocorrem no espaço interagente e nas relações entre os subsistemas urbano e natural;
- c) integração institucional: ações e interesses institucionais, como os constantes em planos e projetos, podem ser testados e ter seus efeitos simulados, permitindo avançar da construção das propostas para o planejamento urbano e ambiental, auxiliando na tomada de decisão;
- d) crescimento interno e externo simultâneos: o crescimento urbano externo (expansão territorial ou novos loteamentos) é tratado de modo conjunto com o crescimento interno (densificação de áreas já urbanizadas, melhorias infra-estruturais e novas edificações), de modo independente de especificações exógenas e com possibilidade de regulagens independentes;
- e) integração de relações globais e locais: o modelo apresenta recursos para trabalhar simultaneamente relações globais e locais, capturando processos e implementando rotinas apoiadas em teoria de grafos (capazes de reproduzir relações globais) e em CA – autômato celular (fundados em relações de vizinhança);
- f) livre delineamento de experimentos e de inclusão de variáveis: o modo aberto como o modelo foi concebido permite que o usuário conceba e delineie os experimentos livremente, aplicando a qualquer cidade ou região; sendo assim, a área de estudo, a resolução espacial e as variáveis são definidas pelo usuário, em função dos objetivos da simulação e das informações disponíveis, permitindo pleno controle dos dados gráficos e do banco de dados; essas características alargam as possibilidades de uso do modelo em casos independentes desta investigação, objetivo perseguido pelo autor desde a origem dos trabalhos;
- g) possibilidade de ponderação de atributos: o grau de importância de cada atributo pode ser regulado pelo usuário, que pode testar hipóteses, associar os atributos valores temáticos ou ainda juntar juízos de valor; o modelo permite ainda a possibilidade de autoponderação, em função da escassez (subtítulo 7.13);
- h) ambientação em SIG – sistema de informações geográficas e recursos de geocomputação: o modelo se associa às vantagens dos SIGs atuais, facilitando o ingresso de informações, processamentos nativos e visualização de resultados, enquanto que a concepção do projeto nos paradigmas de geocomputação direciona o trabalho para a necessidade da investigação científica;
- i) calibração: os diversos parâmetros do modelo oferecem possibilidade de calibragem para diferentes interesses ou realidades, regulando o modelo e informando sobre o grau de aproximação dos resultados com casos reais;

- j) disponibilidade teórica: o modelo permite a realização de estudos teóricos, especulações, descoberta de padrões e emergências sobre a forma da cidade, podendo auxiliar em trabalhos de urbanismo e de ecologia, podendo inclusive instrumentar idéias para a sustentabilidade urbana;
- k) disponibilidade prática: o modelo permite também estudos práticos para o planejamento urbano e para a ecologia urbana, podendo estar ativo como auxiliar em sistemas de suporte à decisão.

Diversas limitações foram detectadas durante a concepção, desenvolvimento e aplicação do SACI, estando as principais resumidas a seguir:

- a) invariabilidade dinâmica nas regras de crescimento: embora o modelo ofereça três regras de crescimento (*threshold potential*, *free potential* e *percolation*), uma vez imputada uma ou mais regras e seus respectivos parâmetros, esse quadro se mantém estável durante toda a simulação, cujos resultados não interagem com as regras, modificando-as ou alterando seus parâmetros; noutras palavras, há uma relação unívoca entre regras e resultados, sendo que a variabilidade dos segundos não afeta dinâmica e endogenamente a variabilidade das primeiras, as quais demandam alteração exógena nos experimentos;
- b) equilíbrio *input-output*: uma limitação presente desde a concepção do modelo é que informações de *input* não aparecem com o mesmo detalhe no *output*, é o caso dos atributos naturais, urbanos e institucionais, que são informados ao início e podem ser acrescidos a qualquer tempo, porém não integram de modo desagregado as respostas geradas no interior do modelo, que apenas modifica o total de atributos, sem incidir sobre cada um deles separadamente, tal como podem ser descritos pelo usuário do modelo;
- c) insuficiência na produção endógena de resistências: o modelo de simulação de crescimento é limitado à produção de células que realizam o papel de carregamentos no sistema, não havendo mecanismos dedicados para a produção de fatores que repelem o crescimento (embora ocorram processos de fortalecimento e percolação, ambos dependem de preexistências); o recurso de produção endógeno apresenta-se limitado à superação de limiares (quando carregamentos são de fato convertidos em resistências), vinculando a aparição de novas resistências aos picos de urbanização, o que não atende à produção de fatores de repulsa em lugares com fraca modificação de seu estado natural ou com baixa densidade; uma hipótese que tende a suavizar essa limitação é a de que esses fatores primeiramente operam como carregamentos, dependendo do aumento de urbanização do entorno para efetivamente transformarem-se em fatores de repulsa, sendo deste modo que o modelo realiza a simulação; essa questão, todavia, não está investigada suficientemente;
- d) variabilidade de abrangências: a existência de raios de abrangência diferentes para circunstâncias diferentes, ao lado da necessidade de padronizar os raios (os modelos sempre exigem alguma simplificação) é uma limitação a ser enfrentada; a construção de funções endógenas para a variação dinâmica dessas abrangências ou *buffers* encontrou limites práticos e teóricos que não foram superados nesta investigação;

- e) dinâmica ambiental: essa representação aparece demasiadamente empírica no modelo, que concentra seus esforços na clarificação da representação da dinâmica urbana; o processo de percolação concebido, embora tenha utilidade prática nos trabalhos de simulação, não avança na complexidade das questões de dinâmicas que envolvem a biota;
- f) temporalidade: aspectos de tempo não estão explorados com maior profundidade, sendo a dimensão temporal mais resultado da iteratividade propriamente dita do que construtora mais direta de alternativas; além disso, todos os subsistemas representados no modelo estão submetidos a uma só temporalidade (ou tempo sincrônico), sendo que a questão de tempos diferentes para variáveis diferentes (ou tempo assíncrono) não está enfrentada no projeto;
- g) auto-organização: aspectos de *self modifying*, que poderiam auxiliar na melhor distribuição dos tipos de crescimento urbano, não foram desenvolvidos neste trabalho; esse recurso seria particularmente importante na calibragem do modelo e na reprodução de diferentes períodos da história da cidade, capturando ciclos de evolução e seus correspondentes tipos de crescimento;
- h) dimensão estocástica: técnicas de tipo Monte Carlo poderiam trazer aperfeiçoamento das simulações, especialmente quando dedicadas a explorar os efeitos de distribuições difusas das tensões geradas no modelo, bem como poderiam trazer avanços no processo de calibração;
- i) escala e padrão celular: questões de escala aparecem limitadas ao tamanho da célula adotada, sendo provável ou esperado que determinados atributos tornem-se invisíveis e que determinados processos não sejam incorporados ao modelo; por sua vez, a forma de célula adotada (quadrada), embora adequada para determinados procedimentos exploratórios, condiciona aspectos descritivos e pode determinar, por modulação, cenários a gerar com o modelo;
- j) abstração do parcelamento do solo: considerando que o modelo abstrai a realidade urbana e ambiental do território da cidade, componentes tradicionais do tecido urbano, referidos ao parcelamento do solo, tais quais glebas e lotes, só podem aparecer de modo indireto, através de mapas temáticos de diferenciação por zonas, vinculando a essas zonas o atributo do parcelamento; essa limitação está associada ao ambiente *raster* de descrição de atributos espaciais adotado pelo modelo, sendo parcelas de território mais bem representadas por suas características vetoriais;
- k) abstração do traçado viário: a representação do sistema viário através de células dificulta a participação dessa variável, especialmente quando as células são de grandes dimensões; uma possibilidade de melhorar a representação do sistema viário sem comprometer todo o sistema seria a sua representação por células menores que as demais, porém a estrutura do modelo permite apenas um padrão de desagregação para todas as variáveis, a cada simulação;
- l) dificuldade de calibração: a aproximação do modelo de representações de realidades urbanas depende de dedicado trabalho de manipulação do modelo, capacitando o usuário a compreender suas reações frente a mudanças de *input* e de parâmetros para o processamento; ademais, o algoritmo alcançado nesta fase do trabalho não oferece automação no processo de calibração, que deve ser feito manualmente, o que pode tornar o trabalho excessivamente exaustivo; adicionalmente e dependendo do caso, parâmetros podem ter efeitos sinérgicos e dificultar a escolha de seus ajustes;

- m) duas ou três dimensões: a realidade espacial, tanto na cidade como fora dela, está representada em duas dimensões, sendo que representações em três dimensões poderiam ajudar em entrada e saída de dados, interferindo na concepção celular que rege o modelo e aproximando dos princípios de ecologia de paisagem;
- n) recursos de visualização: a visualização da cidade e de seu crescimento limita-se a representações na forma de *grids* e de representações derivadas, sem criar imagens mais realistas dos estados atingidos pelas cidades;
- o) SIG e modelagem dinâmica: de um modo geral, os recursos de SIG disponíveis são dedicados a estudos espaciais estáticos e a análises de estado, o que dificulta a implementação do SACI, que pretende estudar aspectos de dinâmica espacial; embora essa dificuldade tenha sido enfrentada no modelo, a restrição original permanece;
- p) tempo de processamento: os experimentos realizados nesta investigação revelaram elevado consumo de tempo de processamento, cuja causa principal é trabalho com as informações organizadas através de grafos, que se realizam via processamento seqüencial; essa restrição pode afetar a decisão do usuário sobre o tamanho da célula, com prejuízo da definição para conseguir vantagens de tempo e de abrangência territorial; por sua vez, o recurso de compressão de dados desenvolvido (*cluster*, no modelo, como foi mostrado no Capítulo 8), embora efetivamente reduza o tempo de processamento, produz ruído nos resultados e precisa ser testado em cada caso;
- q) hierarquia nos grafos: o grafo utilizado no modelo tem uma estrutura não hierárquica, com todas as células conectadas de mesmo modo com as oito células vizinhas; diferentemente disso, um grafo hierárquico poderia ser usado, considerando as tradicionais divisões das cidades em setores (a exemplo do IBGE, 2003) e bairros, o que provavelmente aceleraria o processamento e contribuiria com os resultados;
- r) influências externas: do modo como foi concebido, o modelo opera como um sistema limitado ao recorte territorial da área de estudo, não dispondo de dispositivo dedicado a incluir influências externas; o modo de realizar essa inclusão é aumentando a área da simulação, o por sua vez implica em aumento do número de células e de tempo de processamento (ou de diminuição do tamanho das células), o que pode inviabilizar a simulação;
- s) avanço tecnológico: *software*, *hardware*, SIG e tempo de processamento são rigorosas limitações tecnológicas embutidas no modelo; fazendo uma analogia, o SACI pode ser considerado uma espécie de Atari<sup>34</sup> na época do Playstations II<sup>1</sup>, havendo um longo caminho de desenvolvimento de tecnologia para chegar a simulações mais atraentes;
- t) superposição da investigação, da construção do modelo de simulação de crescimento e da elaboração do *software*: os trabalhos foram realizados mediante constante superposição das tarefas de definir e executar uma pesquisa científica, de conceber e dar operacionalidade a um modelo de simulação de crescimento e de elaborar um *software* novo; nesse caminho, os re-

---

<sup>34</sup> Atari é considerado o primeiro videogame caseiro, criado pela Atari Incorporated, em 1972; uma história do produto pode ser encontrada em <http://www.atarimuseum.com/>. PlayStation é um videogame caseiro e marca registrada da Sony; um panorama do produto pode ser acessado em <http://www.playstation.com/> (endereços disponíveis em 30 de novembro de 2004).



sultados de uma tarefa implicaram na mudança parcial ou total dos resultados já alcançados noutra tarefa, exigindo fazer e refazer tudo diversas vezes;

u) software e hardware: decisões sobre *software* implicam em limitações bem visíveis; optando por um *software* comercial preexistente, há as dificuldades de custo e de ferramentas oferecidas; além disso, opções mais baratas e mais simples podem limitar demais as possibilidades; desenvolver um *software* independente de outros preexistentes, embora minimize outros custos, exige grandes esforços para resolver funções já implementadas em programas comerciais; sistemas operacionais mais populares nem sempre são os mais poderosos, porém facilitam o uso futuro do modelo; recursos sofisticados de sistema podem limitar demais os possíveis usuários; limites de *hardware* também incidem, implicando em custos de aquisição, manutenção e atualização, induzindo simplificações e selecionando os usuários possíveis.

Como continuidade do trabalho estão indicadas as seguintes possibilidades:

a) uso continuado do modelo: as aplicações do SACI apresentadas neste trabalho acompanharam a produção do modelo, cumprindo com o triplo papel de instruir o processo criativo, exemplificar a aplicação numa cidade real e oferecer possibilidades de especulação teórica; sendo assim, o uso continuado pode auxiliar no seu aperfeiçoamento, na extração de nexos mais consistentes sobre as cidades onde for aplicado e no avanço de produção teórica sobre a dinâmica urbana;

b) auto-regulação do modelo: essa possibilidade pode auxiliar particularmente com relação às regulagens qualitativas e quantitativas utilizadas na calibração (percentagens de distribuição de tensões e intensidade do potencial), permitindo melhor aproximação com tipologias de tecido urbano e melhorando as condições de calibração;

c) utilização de grafos hierárquicos: a organização da rede de conexões em agrupamento hierárquico (células formando grupos e depois os grupos formando outros grupos e assim por diante) pode agilizar o processamento, permitir simulações com maior número de células e aportar novas possibilidades de modelagem;

d) processamento exclusivo em CA: a modelagem sem recursos de grafos, aplicando exclusivamente técnicas de CA – autômato celular, pode diminuir o tempo de processamento, permitindo modelar com células menores e em maior quantidade; embora aparentemente simples, essa possibilidade envolve elevada dificuldade e esforços de desenvolvimento, posto que a medida de centralidade calculada com a técnica de grafos vem sendo concebida e testada há mais de dez anos; [em andamento]

e) parametrização em parcelas espaciais: a possibilidade de aplicação dos parâmetros associados à regra em parcelas restritas de células, através de um *grid* de incidência para cada parâmetro, pode aumentar as alternativas de especulação de cenários de futuro; [em andamento]

f) células irregulares: o uso de células de tamanho e forma irregulares pode aproximar os resultados do modelo da situação real na cidade, abrindo caminho para a inclusão, com melhor qualidade, de informações associadas à estrutura viária e fundiária, por exemplo;

- g) melhoria na função de compressão: a função de compressão de dados (*cluster*, no modelo) pode ser melhorada, diminuindo a perda de informações e a geração de ruído; uma alternativa é a análise de vizinhança como função nativa do modelo, ao invés de apenas por pós-processamento;
- h) calibragem automática: o desenvolvimento de mecanismos de calibragem automática pode economizar esforços do usuário e melhorar a acuidade dos resultados;
- i) desenvolvimento de submodelos: as questões econômicas, demográficas e ambientais podem ser desenvolvidas através de submodelos, informando e produzindo dados com mais detalhe e diversidade, bem como incluindo seus aspectos dinâmicos;
- j) medidas complementares: a inclusão da extração de medidas complementares às atuais através de recursos do próprio modelo, como é caso da entropia, dimensão fractal, acessibilidade e quantidade de vazios, pode auxiliar nas interpretações dos resultados e nas elaborações teóricas decorrentes;
- k) visualização: o desenvolvimento de possibilidades de visualização mais realísticas, estimulando a imaginação dos observadores e oferecendo melhores condições para a tomada de decisão, pode trazer importantes qualidades para os trabalhos de modelagem;
- l) uso de supercomputadores: a utilização de computadores com maior capacidade de processamento é indicada para as demandas do modelo, como é o caso dos disponíveis no Centro Nacional de Supercomputação, na UFRGS;
- m) desenvolvimento de software: novas possibilidades de *software* podem ser desenvolvidas (como apareceu no subtítulo 4.6, anteriormente), tanto sobre plataformas comerciais atualizadas, como utilizando programas gratuitos e atuais, bem como produzindo um programa independente, idealmente como um *software* livre.

#### 9.4 Epílogo do capítulo 9

Neste capítulo apresentei as conclusões finais da investigação, recuperando as hipóteses iniciais, sistematizando as observações da pesquisa e os resultados alcançados ao longo do trabalho, o que foi feito com atenção às respostas do modelo, ao estudo de caso e aos experimentos denominados de simulação avançada; ao cabo listei as principais possibilidades e limitações do modelo desenvolvido, terminando com indicações de continuidade no trabalho.



Concluída esta investigação, mostrarei a seguir a bibliografia de referência e juntarei como anexo o *software* que implementa o SACI – Simulador do Ambiente da Cidade<sup>®</sup>, em mídia digital.

## 10 Bibliografia e recursos catalogados

No capítulo anterior mostrei as principais conclusões da pesquisa, ao que juntei as mais destacadas possibilidades e limitações do modelo de simulação de crescimento produzido, terminando com indicações de continuidade do trabalho. Neste capítulo listo a bibliografia utilizada, restrita aos títulos que foram citados no corpo do texto; ao final junto os periódicos de consulta e os *softwares* utilizados, como termos finais.

### 10.1 Referências bibliográficas

- ABRAMO, Pedro (2001a). *Cidades em transformação – Entre o plano e o mercado*. Tradução de Maria Kuhner, Fernanda Furtado e Eluá Jacobina. Rio de Janeiro: O Autor. 272 p.
- ABRAMO, Pedro (2001b). *Mercado e ordem urbana: do caos à teoria da localização residencial*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, FAPERJ. 224 p.
- ACIOLY, Cláudio; DAVIDSON, Forbes (1998). *Densidade urbana: um instrumento de planejamento e gestão urbana*. São Paulo: Mauad. 104 p.
- ACSELRAD, Henri (1999). *Discursos da sustentabilidade urbana*. In: Anais do VIII ENANPUR. Porto Alegre: ANPUR – PROPUR, UFRGS. [mídia nem CD]
- \_\_\_\_\_. (2001a). Introdução. In: *A duração das cidades: sustentabilidade e risco nas políticas públicas*. Rio de Janeiro: Dp&A. p. 21-25.
- \_\_\_\_\_. (2001b). Sentidos da sustentabilidade urbana. In: *A duração das cidades: sustentabilidade e risco nas políticas públicas*. Rio de Janeiro: Dp&A. p. 27-55.
- ACSELRAD, Henri (Org.) (2001c). *A duração das cidades: sustentabilidade e risco nas políticas públicas*. Rio de Janeiro: Dp&A. 240 p.
- ALBERTI, Marina (1999). *Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework*. In: Environment and Planning B – Planning and Design v. 26. London: Pion. p. 605-630.
- ALBERTI, Marina; WADDELL, Paul (2000). *An integrated urban development and ecological simulation model – Part I: rationale for a synthesis*. Venice: Capum. 20p.
- ALEXANDER, Christopher (1964). *Notes on the synthesis of form*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- \_\_\_\_\_. (1988). A City is Not a Tree. In: Thackara, John (Ed.). *Design After Modernism*. London: Thames and Hudson, pages. 67-84]
- \_\_\_\_\_. (1998) *The Nature of Order*. New York: Oxford University Press.
- ALLEN, Peter (1997). *Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 275 p.
- ALMEIDA, Claudia Maria (2002). *Empiricism and stochastics in cellular automaton modeling of urban land use dynamics*. London: Casa, UCL. 38 p. [disponível em 03 de fevereiro de 2003 em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper42.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper42.pdf) ]
- ALMEIDA, Cláudia Maria et al. (2002). *Modelos espaço-temporais em planejamento urbano: desafios para a nova geração de SIG*. Gis Brasil 2002. 10 p. [disponível em 26 de novembro de 2004 em [www.gisbrasil.com.br](http://www.gisbrasil.com.br) ]
- AL-SABHAN, W.; MULLIGAN, M.; BLACKBURN, G.A. (2003). *A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW*. Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 27, p. 9-32. [ disponível em 20 de dezembro de 2002 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- ALVA, E. N. (1997). *Metrópoles (in) sustentáveis*. Rio de Janeiro: Relume Dumará. 149 p.
- ALVES, Rubens (2003). *Entre a ciência e a sapiência: o dilema da educação*. São Paulo. Edições Loyola. 148 p.
- ANDRADE, Thompson Almeida; SERRA, Rodrigo valente (1997). *O recente desempenho das cidades médias no crescimento populacional Urbano Brasileiro*. Rio de Janeiro: IP-PUR, IPEA, NEMESIS. 27 p.

- ANDREN, H. (1994). **Neutral models in landscape ecology: percolation theory**. [ disponível em 20 de agosto de 2003 em <http://botit.botany.wisc.edu/courses/460/labs/Landperc.html> ]
- ARAI, Takeshi; AKIYAMA Tetsuya (2004). **Empirical analysis for estimating land use transition potential functions—case in the Tokyo metropolitan region**. Computers, Environment and Urban Systems v. 28. p. 65-84. [ disponível em 02 de dezembro de 2003 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- ARCEBISPO, L. (2002). **Simulação de fogo florestal no parque do Rola Moça**. Dissertação em Geografia. Belo Horizonte: UFMG.
- ARGAN, Giulio Carlo (1991). **O Espaço Visual da Cidade**. In: Espaço e Debates nº33. Tradução de Silvana Zioni. São Paulo: NERU. p. 18-26.
- AXELROD, Robert (1997a). **Advancing the art of simulation in the social sciences**. International Conference on Computer Simulation and the Social Sciences. Cortona, Italy. 12 p. [disponível em 03 de março de 2002 em [www.santafe.edu](http://www.santafe.edu) ]
- \_\_\_\_\_(1997b). **The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration**. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. 231 p.
- BARRET, George (1996). The transport dimension. In: JENKS, Mike; BURTON, Elizabeth; WILLIAMS, Katie (Ed.). **The compact city: a sustainable urban form ?** New York: E & FN Spon. p 171-180.
- BARRIOS, Sônia (1986). A Produção do Espaço. In: SANTOS, Milton e SOUZA, Maria Adélia (Org.) : **A Construção do Espaço**. São Paulo: Nobel. p. 1-24.
- BATTY, M.; XIE, Y.; SUN, Z. (1999). **Modeling Urban Dynamics Through GIS-Based Cellular Automata**. Computers, Environments, and Urban Systems, Vol. 23. p. 205-233.
- BATTY, M.; COUCLELIS, EICHEN, M. (1997). **Urban system as cellular automata**. Environment and Planning B: Planning and Design 24(2). London: Pion. p. 159-164.
- BATTY, M.; XIE Y. (1994). **From cells to cities**. Environment and Planning B, Vol. 21, p. s31-s48.
- BATTY, Michael (1976). **Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions**. Cambridge: Cambridge University Press, UK. 369 p.
- \_\_\_\_\_(1998). Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata. Environment and Planning A, v. 30. p. 1943-1967.
- \_\_\_\_\_(2001). **Polynucleated urban landscape**. London. Casa, UCL. 31 p. [disponível em 17 de junho de 2002 em <http://www.casa.ucl.ac.uk> ]
- \_\_\_\_\_(2002). **Megacities - What the Future Holds and the Implications for Energy Use**. London: Casa. 21 slides. [ disponível em 23 de setembro de 2002 em <http://www.casa.ucl.ac.uk/> ]
- BATTY, Michael et al. (2000). **Visualizing the city: communicating urban design to planners and decision-makers**. London: Casa, UCL. 62 p. [disponível em 15 de setembro de 2001 em <http://www.casa.ucl.ac.uk/visualcities.pdf> ]
- BATTY, Michael; BIN, Jiang; THURSTAIN-GOODWIN, Mark (1998). **Local movement: agent-based models of pedestrian flow**. London: Casa, UCL. 19 p. [disponível em 2 de setembro de 2002 em <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper4.pdf> ]
- BATTY, Michael; DODGE, Martin; JIANG, Bin; SMITH, Andy. (1998). **Gis and urban design**. London: Casa, UCL. 28 p. [disponível em 2 de setembro de 2001 em <http://www.casa.ucl.ac.uk/urbandesfinal.pdf> ]
- BATTY, Michael; DOYLE, Simon (1998). **Virtual regeneration**. London: Casa, UCL. 11 p. [disponível em 14 de abril de 2002 em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper6.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper6.pdf) ]
- BATTY, Michael; LONGLEY, Paul (1994). **Fractal cities – A geometry of form and function**. San Diego: Academic Press. 394 p.
- BATTY, Michael; STEADMAN, Philip; XIE, Yichun (2004). **Visualization in spatial modeling**. Casa, UCL. 29 p. [ disponível em 01 de junho de 2004 em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper79.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper79.pdf) ]
- BATTY, Michael; TORRENS, Paul M. (2001): **Modeling complexity: the limits to prediction**. London: Casa, UCL. 36 p. paper 36 [disponível em 8 de dezembro de 2001 em <http://casa.ucl.ac.uk> ]
- BATTY, Michael; XIE, Yichun; SUN, Zhanli (1999). **The dynamics of urban sprawl**. London: Casa, UCL. 36 p. [disponível em 14 de dezembro de 2001 em <http://casa.ucl.ac.uk/sprawl.pdf> ]
- BAYLEI, Peter D. (1997). **IEA: a new methodology for environmental policy ?** Environmental Impact Assessment Review, Vol. 17, p. 221-226.
- BAYÓN, Damián; GASPARINI, Paolo (1977). **Panorámica de la Arquitectura Latino-Americana**. Barcelona: Blume-Unesco. 215 p.

- BAZANT, Jan (2001). **Lineamientos para el ordenamiento territorial de las periferias urbanas de la ciudad de México**. Papeles de POBLACIÓN Vol. 27. p. 223-239. [ disponível em 15 de outubro de 2004 em <http://papelesdepoblacion.uaemex.mx/rev27/pdf/bazant27.pdf> ]
- BELL, Susan; MCCOY, Earl; MUSHINSKY, Henry (1991). **Habitat structure**. London: Chapman and Hall. 438 p.
- BENENSON, Itzhak; TORRENS, Paul (2004). **Geosimulation: automata-based modeling of urban phenomena**. New York: John Wiley and Sons Ltd. 312 p.
- BENENSON, Itzhak; TORRENS, Paul (2004). **Geosimulation: object-based modeling of urban phenomena**. Computers, Environment and Urban Systems 28. p. 1-8.
- BENGUIGUI, Lucien et al. (2000). **When and where is the city fractal ?**. Environment and Planning B: Planning and Design 27. London: Pion. p. 507-519.
- BEZERRA, Maria do Carmo; FERNANDES, Marlene Allan (coordenação geral) (2000). **Cidades sustentáveis: subsídeos à elaboração da agenda 21 brasileira**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 155 p.
- BIAN, Ling (2004). **GIS for environmental modeling: an introduction**. Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 28, p. 171-173. [ disponível em 22 de junho de 2004 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- BOGAERTS, T.; ZEVENBERGEN, J. (2001). **Cadastral systems – alternatives**. Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 25, p. 325-337. [ disponível em 5 de janeiro de 2003 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- BOGOMOLNY, Alexander (2002). **Graphs**. [disponível em 12 de janeiro de 2003 em [http://www.cut-the-knot.org/do\\_you\\_know/graphs.shtml](http://www.cut-the-knot.org/do_you_know/graphs.shtml) ]
- BOIDO, Ghillermo (1999). Comentários acerca de la obra. In: BUZAI, Gustavo. **Geografía global: el paradigma geotecnológico y el espacio interdisciplinario en la interpretación del mundo del siglo XXI**. Buenos Aires: Lugar Editorial. pp. 13-14.
- BOYDEN, S. et al. (1981). **The ecology of a city and his people: the case of Hong Kong**. Canberra: Australian National University Press.
- BRANDALIZE, Amauri et al. (1996): **Geoprocessamento: Introdução**. Gis Brasil 96. São Paulo: Ed. Sagres.
- BRASIL (2000). **Lei Federal 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília: Presidência da República. 60 artigos.
- BREHENY, M. (1992). The Contradictions of the compact city: a review. In M. BREHENY, M. (Ed.). **Sustainable Development and Urban Form**. London: Pion. 333 p.
- BURROUGH, Peter A. (1998). **Geocomputation: a primer**. London: John Wiley & Sons Ltd. 30p.
- BURTON, Elizabeth; WILLIAMS, Katie; JENKS, Mike (1998). The compact city and urban sustainability: conflicts and complexities. In: JENKS, Mike; BURTON, Elizabeth; WILLIAMS, Katie (Ed.). **The compact city: a sustainable urban form ?** New York: E & FN Spon. p. 231-247.
- BUZAI, Gustavo D. (1999). **Geografía global: el paradigma geotecnológico y el espacio interdisciplinario en la interpretación del mundo del siglo XXI**. Buenos Aires: Lugar Editorial. 216 p.
- CÂMARA, Gilberto (2001). **Análise espacial de dados geográficos: uma visão introdutória**. São José dos Campos: Inpe. 47p. [disponível em 15 de junho de 2002 em <http://dpi.inpe.br/gilberto> ]
- CÂMARA, Gilberto et al. (1996): **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica: Geoprocessamento. Introdução**. Campinas: Instituto de Computação - Unicamp.
- CAMINOS, Horacio; GOETHERT, Reinhard (1978). **Elementos de Urbanizacion**. Versão castelhana por Luiz Calvet. Barcelona: GG, 1984. 313 p.
- CAMPBELL, S. (1996). **Green cities, growing cities, just cities? – urban planning and the contradictions of sustainable development**. Journal of the American Planning Association, v. 62, n. 3. p. 296-312.
- CAMPOS FILHO, Cândido Malta (1989). **Cidades brasileiras: seu controle ou o caos**. São Paulo: Nobel. 143 p.
- CANDAU, Jeannette (2000). **Calibrating a cellular automaton model of urban growth in a timely manner**. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4). Alberta, Canadá. [disponível em 18 de maio de 2003 em <http://www.geog.ucsb.edu/~kclarke/ucime/pubs-direct.htm> ]
- CANIGGIA, Gianfranco; MAFFEI, Gian Luigi (1979). **Composizione architettonica e tipologia edilizia: 1. lettura dell'edilizia di base**. 3ª Edição . Venezia: Marsilio Editori, 1981. 245 p.

- CAPRA, Fritjof (1986). **A teia da vida**. Tradução de Roberval Eicheberg. São Paulo: Cultrix. p. 33-55.
- \_\_\_\_\_ (2002). **As conexões ocultas**. São Paulo: Ed. Pensamento – Cultrix Ltda. 296 p.
- CARVALHO, Eliani; ROMERO, Marta (1999). **A insustentabilidade do desenvolvimento urbano das capitais brasileiras**. In: Anais do VIII ENANPUR. Porto Alegre: ANPUR – PROPUR, UFRGS. [mídia nem CD]
- CCE – Comissão das Comunidades Européias (2004). **Para uma estratégia temática sobre ambiente urbano**. Bruxelas: COM (2004) 60 final. 58 p. [ disponível em 16 de setembro de 2004 em [www.europa.eu.int/comm/environment/urban/thematic\\_strategy.htm](http://www.europa.eu.int/comm/environment/urban/thematic_strategy.htm) ]
- CERDÁN, Nelly (1999). Prólogo. In: BUZAI, Gustavo. **Geografía global: el paradigma geotecnológico y el espacio interdisciplinario en la interpretación del mundo del siglo XXI**. Buenos Aires: Lugar Editorial. pp. 17-19.
- CHIN, Nancy (2002). **Unearthing the roots of urban sprawl: a critical analysis of form, function and methodology**. London: Casa, UCL. 23 p. [disponível em 3 de dezembro de 2002 em <http://www.casa.ucl.ac.uk/workingpapers/paper47.pdf> ]
- CHRISTOFOLETTI, Antonio (1999). **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 236 p.
- CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. (1997). **A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in San Francisco Bay area**. Environment and Planning B: Planning and Design 24. London: Pion. p. 247-262.
- CLICHEVSKY, Nora (2001). **Estado del arte sobre tierra vacante en América Latina**. Lincoln Institute Research Report. 70 p. [ disponível em 20 de abril de 2003 em <http://www.lincolninst.edu/pubs/> ]
- COLE, Sam; MASINI, Eleonora (2001). **Limits beyond the millennium: a retrospective on the limits to growth**. Futures 33. Pergamon. p. 1-5.b
- COSTA, Heloísa S. M. (1999). **Desenvolvimento urbano sustentável: uma contradição de termos?** In: Anais do VIII ENANPUR. Porto Alegre: ANPUR – PROPUR, UFRGS. [mídia nem CD]
- COSTA, Sandra; MONTOVANI, Angélica; NOVAES, Rene (2000). **Estudo da compatibilidade entre crescimento urbano e aptidão física utilizando geotecnologias - um estudo de caso**. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba - I.P.& D. 15 p. [disponível em 2 de setembro de 2003 em [http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/ARQUIVO/Cobrac\\_2000/092/092.htm](http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/ARQUIVO/Cobrac_2000/092/092.htm) ]
- COUCLELIS, H. (1997). **From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation**. Environment and Planning B: Planning and Design 24. London: Pion. p. 165-174.
- CRUZ, Carla; RIBEIRO, Uriá (2003). **Metodologia científica: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil. 218 p.
- CUE - Center of Urban Ecology (2001). **The Center of Urban Ecology**. Washington. [disponível em <http://www.nps.gov/cue/cueintro.html> ]
- CUNHA, Danilo Sampaio (2004). **Patrimônio cultural: proteção legal e constituição**. Rio de Janeiro: Editora Letra Legal. 167 p.
- CYMBALISTA, Renato (2003). **Estudo de impacto de vizinhança**. São Paulo: Polis. [disponível em 5 de setembro de 2003 em <http://www.polis.org.br/publicacoes/dicas/181349.html> ]
- DEL RIO, Vicente (1990). **Introdução ao Desenho Urbano no Processo de Planejamento**. São Paulo: Pini. 198 p.
- DESYLLAS, Jake et al. (2003). **Pedestrian demand modelling of large cities: na applied example from London**. London: Casa, UCL. 62 p. [disponível em 5 de dezembro de 2002 em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper62.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper62.pdf) ]
- DIESTEL, Reinhard (2000). **Graph Theory**. Electronic Edition 2000. New York: Springer-Verlag. 322 p. [ disponível em 3 de novembro de 2002 em [www.math.uni-hamburg.de/home/diestel/books/graphs.theory/](http://www.math.uni-hamburg.de/home/diestel/books/graphs.theory/) ]
- DILLION JR., John A. (1983). **Foundations of general systems theory**. Louisville: Intersystems Publications. p. 1-13 e p. 133-152.
- DOUGLAS, I. (1983). **The Urban Environment**. Baltimore: Edward Arnold.
- DUPLAY, Claire et Michel (1985): **Méthode Illustrée de Création Architecturale**. Paris: Moniteur. 284 p.

- ECHENIQUE, Marcial (1999). **SPARTACUS – System for Planning and Research in Townsand Cities for Urban Sustainability**. [ disponível em 2 de maio de 2002 em <http://fpiv.meap.co.uk/fpiv/spartacu.htm> ]
- ECK, David J. (2004). **Cellular automata and the edge of chaos**. Hobart and William Smith Colleges [ disponível em 15 d outubro de 2004 em <http://math.hws.edu/xJava/CA/> ]
- EHLEN, Judy; CALDWELL, Douglas; HARDING, Stephem (2002). **GeoComputation: what is it ?** Computers, Environment and Urban Systems v.26. p. 257-265. [ disponível em 5 de dezembro de 2002 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- ENGELEN, Guy; WHITE, Roger; ULJEE, Inge (1997). Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and police-making. In: TIMMERMANS, Harry (Ed). **Decision support systems in urban planning**. London: E & FN Spon. p. 123-155.
- ENQUIST, Brian J.; EARSOM, Stephen D. (1996). **Scale/scaling in ecology**. Ecological Complexity Seminar: University of New Mexico. 5 p. [disponível em 14 de agosto de 2003 em <http://sevilleta.unm.edu/~ehdecker/complexity/96fall/scale.htm> ]
- FERNANDES, Edesio (1997). **Access to urban land and housing in Brazil: three degrees of illegality**. Lincoln Institute of Land Policy. 33 p. [ disponível em 21 de abril de 2003, em <http://www.lincolnst.edu/pubs/workingpapers.asp> ]
- FERREIRA, Buarque de Holanda (1999). **Dicionário Aurélio eletrônico – Século XXI**. Versão 3.0. São Paulo: Nova Fronteira. [mídia digital]
- FLORENZANO, Teresa Gallotti (2002). **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos. 97p.
- FONSECA NETO, João (1999). **Compressão sem perdas de imagens digitais**. Aracaju: Universidade Tiradentes. 8 p. [disponível em 2 de setembro de 2004 em <http://www.infonet.com.br/users/jfonseca/semperdas.htm> ]
- FORMAN, Richard (1995). **Land mosaics: the ecology of landscape and regions**. Cambridge: Cambridge University Press. 632 p.
- FORMAN, Richard ; GODROM (1986). **Landscape Ecology**. New York: John Wiley & Sons. 619 p.
- FOX, G. Douglas (2002). **Overview of Vegetation Dynamics Modeling**. CIRA - Colorado State University [disponível em 7 de setembro de 2004 em <http://www.cira.colostate.edu/smoke/smokemodelshome.htm> ]
- FRANCO, Maria de Assunção Ribeiro (2001). **Planejamento ambiental para a cidade sustentável**. São Paulo: Annablume: FAPESP. 296 p.
- FRANK, Nancy (2000). **Exploring sprawl: findings of a comprehensive review of the literature related to “sprawl” or what do we really know ?** Association of Collegiate Schools of Planning, Atlanta, Georgia. [ disponível em 9 de setembro de 2003 em <http://www.wisconsinplanners.org/SmartGrowth/index.htm> ]
- FREEMAN, L.C. (1979). **Centrality in social networks: conceptual clarification**. Social Networks n. 1, p. 215–239.
- FREEMAN, L.C.; BORGATTI, S.P., WHITE, D.R. (1991). **Centrality in valued graphs: a measure of betweenness based on network flow**. Social Networks n.13, p. 141–154.
- FREY, Tim; DECKER, Ethan (1998). **Percolation theory**. Ecological Complexity Seminar: Fall 1996 Department of Biology University of New Mexico [disponível em 10 de agosto de 2003 em <http://sevilleta.unm.edu/~ehdecker/complexity/96fall/percol.html>]
- FRIEDRICH, Anne; KAUFMAN, Sanda; KAUFMAN, Miron (1994). **Urban property values, percolation theory and fractal geometry**. Fractals Vol. 2, No. 3. World Scientific Publishing Company. p. 469-471.
- GARAITAGOITA, Xabier Eizaguirre (2001). **La construcción del territorio disperso**. Barcelona: Edicions UPC. 227 p.
- GIORDANO, Paolo (Org.) (2004). **The dynamics of complex urban system: an interdisciplinary approach**. Workshop The dynamics of complex urban system. Ticino, Switzerland: EXYSTENCE – Complex Systems Network of Excellence. [ disponível em 2 de novembro de 2004 em <http://www.complexityscience.org> ]
- GONÇALVES, Marcos Flávio (1989). **Município no Brasil**. Rio de Janeiro: IBAM.
- GORDON, P; RICHARDSON, H. (1997). **Are Compact Cities a Desirable Planning Goal ?**. In : Journal of the American Planning Association 63 (1). p. 95-106.
- GRECO, Alessandro (2002). **A nova ciência de Stephem Wolfran**. Folha de São Paulo Mais! de 30 de junho de 2002. p. 20-22.
- GREEN, David (1995). **Syntactic modelling and simulation**. [disponível em 11 de agosto de 2003 em <http://physics.hallym.ac.kr/education/chaos/green/complex.htm> ]

- \_\_\_\_\_ (1993a). **Cellular automata**. Charles Sturt University. [disponível em 12 de dezembro de 2000 em <http://life.csu.edu.au/complex/tutorials/tutorial1.html> ]
- \_\_\_\_\_ (1993b). **Connectivity and complexity in landscapes and ecosystems**. [disponível em 25 de agosto de 2003 em <http://physics.hallym.ac.kr/education/chaos/green/complex.html>]
- GUAPYASSSÚ, Maísa dos Santos; HARDT, Leticia (1998). **Avaliação de fragilidade ambiental: uma nova abordagem metodológica para unidades de conservação de uso indireto em áreas urbanas**. *Floresta e Ambiente*, Vol. 5 (1). pp 55-67.
- HAGGETT, P. (1965). **Lacational analysis in human geography**. London: Edward Arnold.
- HAGGETT, P.; CHORLEY, R.J. (Ed.) (1967). **Models in geography**. London: Methuen.
- HALLS, P. J. et al. (2001). **Dirichlet neighbours: revisiting Dirichlet tessellation for neighbourhood analysis**. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 25, p. 115-117. [ disponível em 02 de janeiro de 2003 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- HARVEY, David (1975). **Social justice and the city**. London: Edward Arnold.
- \_\_\_\_\_ (1985). **The urbanization of capital**. Oxford: Blackwells.
- \_\_\_\_\_ (1989). **Condição pós-moderna**. Tradução de Adail Sobral e Maria Gonçalves. São Paulo: Loyola, 1993. 349 p.
- HILFER, R. (1996). **Transport and relaxation phenomena in porous media**. Institute of Physics, University os Oslo. [disponível em 4 de agosto de 2003 <http://www.ica1.uni-stuttgart.de/local/WWW/papers/acp/acp.html> ]
- HILL, P.; COQUILLARD, J. (1997). **Discrete Event Simulation of Alga Expansion**. *Simulation* Vol. 68(5), p. 269-277. [disponível em 10 de setembro de 2004 em <http://www.isima.fr/ecosim/bib.html> ]
- HILLIER, Bill (1998). **The common language of space: a way of looking at the social, economic and environmental functioning of cities on a common basis**. London: UCL/Bartlett School of Graduate Studies. 23 p. [ disponível em 24 de junho de 2002 em <http://spacessyntax.com/publications/commonlang.html> ]
- HILLIER, Bill; HANSON, Juliene (1984). **The social logic of space**. Cambridge: Cambridge University Press. 367 p.
- HOLLAND, Jonh (1998). **Emergence: from chaos to order**. Redwood City, California: Addison-Wesley.
- HOUAISS, Antônio (2001). **Dicionário eletrônico da língua portuguesa**. Versão 1.0. Instituto Antônio Houaiss: Editora Objetiva Ltda. [mídia digital]
- HOUNG, Michael (1998). **Natutaleza y ciudad: planificación urbana y procesos ecológicos** Título original (1995): *Cities and natural process*. Versão castelhana por Susana Alemparte. Barcelona, GG. 315 p.
- HUANG, S. (1998). **Ecological energetics, and urban form: a system modelling approach to the evolution of urban zonation**. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 25. p. 391-410.
- IBGE (2000). **Resultados do Censo do ano 2000**. [mídia digital]
- IBGE (2003). **IBGE Cidades@**. [disponível em 02 de setembro de 2003 em <http://www1.ibge.gov.br/download/arquivos/>]
- INGRAM, D. R. (1971). **The concept of accessibility: a search for an operational form**. *Regional Studies*, Vol. 5. Pergamon Press. p. 101-107.
- JENKS, Mike; BURTON, Elizabeth; WILLIAMS, Katie (1998) (Ed.). **The compact city: a sustainable urban form ?** New York: E & FN Spon. 350 p.
- JOHNSON, Steven (2003). **Emergência: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades, softwares**. Tradução de Maria C. P. Dias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed. 231 p.
- KALOGIROU, S. (2002). **Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation**. *Computers, Environment and Urban Systems* v. 26. p. 89-112. [ disponível em 10 de março de 2003 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- KOHLSDORF, Maria Elaine (1985). Breve histórico do urbanismo como campo disciplinar. In FARRET, Ricardo (Org.): **O espaço da cidade: uma contribuição à análise urbana**. São Paulo: Projeto. p.15-72.
- \_\_\_\_\_ (1986). **Manual de técnicas de apreensão do espaço urbano**. Brasília: UnB.



- KRAFTA, Romulo (1991). **A study of intra-urban configurational development in Porto Alegre – Brasil** (unpublished PhD thesis). Cambridge: The Martin Centre for Architectural and Urban Studies, University of Cambridge.
- \_\_\_\_\_ (1994). **Modelling Intraurban configurational development**. Environment and Planning B: Planning and Design, v. 21. London: Pion. p. 67-82.
- \_\_\_\_\_ (1995). **Simulador de cidades: horizontes e problemas**. In: FARRET, Ricardo L. Anais do VI Encontro Nacional da ANPUR. Brasília: ANPUR.. p. 137-147.
- \_\_\_\_\_ (1999). **Spatial self-organization and the production of the city**. Urbana 24. Caracas: IFA/LUZ. p. 49-62.
- KRÜGER, Mário J. T. (1996). **Definição de morfologia urbana**. Coimbra: Universidade de Coimbra., Departamento de Arquitetura. 12 p.
- KULKARNI, R. G.; STOUGH, R. R.; HAYNES, K. E. (2000). **Towards a percolation model of accessibility: an exploratory step**. Computers, Environment and Urban Systems 24 (5). p. 421-434.
- LAGO, Luciana Corrêa (2000). **Estado del arte en los estudios de segregacion residencial urbana**. Rio de Janeiro: IPPUR. 9 p.
- LAKE, P. S. (2001). **On the maturing of restoration: linking ecological research and restoration**. Ecological Management and Restoration, Vol. 2, n. 2. p. 110-115.
- LAMAS, José M. Ressano Garcia (1993). **Morfologia urbana e desenho da cidade**. Lisboa: Dinalivro. 563 p.
- LAWRENCE Environmental (2000). **Planning theories and environmental impact assessment**. Environmental Impact Assessment Review, Vol. 20, p. 607-625.
- LEÃO, Simone (2002). **Spatial-temporal model for demand and allocation of landfills in growing urban regions**. Thesis of PhD. Melbourne: The University of Melbourne. 217 p.
- LEMONS, Carlos A.C. (1981). **O que é Patrimônio Histórico ?**. São Paulo: Brasiliense.
- LI, Xia; YEH; Anthony Gar-On (2000). **Modelling sustainable urban development by integration of constrained cellular automata and GIS**. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 14(2). p. 131-152.
- LIU, XiaoHang; ANDERSSON, Claes. (2004). **Assessing the impact of temporal dynamics onland-use change modeling**. Computers, Environment and Urban Systems v. 28. p. 107-124. [ disponível em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) , em 02 de dezembro de 2003 ]
- LONGLEY, Paul . A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. (2001). **Geographic information systems and science**. Chicester r: John Wiley and Sons.
- LONGLEY, Paul A.; BATTY, Michael (2003). **Advanced spatial analysis: the CASA Book of GIS**. Cambridge: CASA / Esri Press. 464 p. [ disponível em 01 de novembro de 2004 em <http://qis.esri.com/esripress> ]
- LOVETT, A.; BATEMAN, I. (2001). **Economic analysis of environmental preferences: progress and prospects**. Computers, Environment and Urban Systems v. 25. p. 131-139. [disponível em 05 de janeiro de 2003, em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- LUCAS, Chris (1999a). **Complexity philosophy as a computing paradigm**. Manchester, U.K.: CALResCo.Group. [disponível em 11 de dezembro de 2001 em <http://calresco.org/lucas/compute.htm> ]
- \_\_\_\_\_ (1999b). **The spirit of complexity**. Manchester, U.K.: CALResCo.Group. [disponível em 11 de dezembro de 2001 em <http://calresco.org/lucas/spirit.htm> ]
- \_\_\_\_\_ (2000). **Complexity and artificial life: what are they ?** Manchester, U.K.: CALResCo.Group. [disponível em 11 de dezembro de 2001 em <http://calresco.org/cal.htm> ]
- LYNCH, Kevin (1981). **La Buena Forma de La Ciudad**. Versão castelhana por Eduard Mira. Barcelona: GG, 1985. 364 p.
- MACHADO, Antônio (1964). **Obras, poesías y prosa**. Buenos Aires: Losada.
- MADDOX, John (1983). **Simulating the Replication of Life**. Nature n. 305. [disponível em 17 de julho de 2002 [www.StephenWolfram.com](http://www.StephenWolfram.com) ]
- MAKSE, Herta'n; ANDRADE JR., José; BATTY, Michael; HAVLIN, Shlomo; STANLEY, Eugene (1998). **Modeling urban growth patterns with correlated percolation**. Physical Review Vol. 58 Number 6. The American Physical Society. p. 7054-7062.
- MARIANI, Antonio Carlos (2001). **Teoria dos Grafos**. UFSC/CTC/INE. [ disponível em 15 dezembro de 2002 em [www.inf.ufsc.br/grafos/livro.html](http://www.inf.ufsc.br/grafos/livro.html) ]
- MARICATO, Erminia (2000). **As idéias fora do lugar e o lugar fora das idéias**. In: ARANTES, Otília; VAINER, Carlos; MARICATO, Erminia: **A cidade do pensamento único – desmanchando consensos**. Rio de Janeiro: Vozes. p. 121-192.

- MARICATO, Erminia (2001). **Brasil, cidades: alternativas para a crise urbana**. Petrópolis: Vozes. 204 p.
- MARICATO, Erminia et al. (1979). **A Produção Capitalista da Casa e da Cidade no Brasil Industrial**. São Paulo: Alfa-Ômega.
- MARINHO, Simão Pedro P. (1995). **O Brasil na conferência. Versão preliminar do relatório brasileiro sobre os assentamentos humanos**. [disponível em 4 de setembro de 1999 em <http://gcsnet.com.br/oamis/civitas/ci150000.html> ]
- MARTIN, L.; MARCH, L.; ECHENIQUE, M. (1972). **La Estructura del Espacio Urbano**. Traducción de Francisco Molina. Barcelona: Ed. Gustavo Gilli, 1975. 376 p.
- MASCARÓ, Juan Luis (1994). **Manual de loteamentos e urbanizações**. Porto Alegre: Sagra – D.C. Luzzatto. 235 p.
- MCCANN Barbara A; EWING, Reid (2003). **Measuring the health effects of sprawl**. Smart Growth America - Surface Transportation Policy Project. [disponível em em 9 de setembro de 2003 em <http://www.smartgrowthamerica.org/healthreport.html> ]
- MEADOWS, D. H. et al. (1972). **The limits of growth**. New York: Universe Books.
- MILLER, Eric et al. (2004). **Microsimulating urban systems**. Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 28, p. 9-44. [ disponível em 28 de novembro de 2003 em [www.elsevier.com/locate/compenvurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenvurbsys) ]
- MOREIRA, Antonio Claudio (2003). **Mega projetos e ambiente urbano – Uma metodologia para elaboração de relatórios de impacto de vizinhança**. São Paulo: FAU – USP. [disponível em em 05 de setembro de 2003 em [http://www.usp.br/fau/docentes/deprojeto/a\\_moreira/produção/doutord.htm](http://www.usp.br/fau/docentes/deprojeto/a_moreira/produção/doutord.htm) ]
- MOREIRA, Morvan de Mello (1995). Evolução e perspectivas da dinâmica demográfica brasileira: concentração populacional e migração. In: GONÇALVES, Flora Maria (org.). **O novo Brasil urbano: impasses, dilemas, perspectivas**. Porto Alegre: Mercado Aberto. p. 133-162.
- MOREIRA NETO, Diogo de Figueiredo (2003). **Guia do Estatuto da Cidade**. Brasília: Caixa Econômica Federal / Câmara dos Deputados. [disponível em 06 de dezembro de 2004 em <http://www.estatutodacidade.org.br/kitdascidades/texto-guia.shtml#>
- MÜLLER, Daniel Nehme (2004). **Compressão de dados**. Faculdade de Informática da Universidade Luterana do Brasil. 27 p. [disponível em 2 de setembro de 2004 em <http://www.ulbra.tche.br/~danielnm/ed/E/polE.html> ]
- MUNFORD, Lewis (1961). **A Cidade na história**. Tradução de Neil Silva. Itatiaia: Belo Horizonte, 1982. 741 p.
- N.F.S. (2001). **Evolution of urban systems**. [disponível em <http://www.rehearsal.uiuc.edu/NFS/report/Ssummary.html> , em dezembro de 2002]
- NAREDO, José Manuel (1998a). **Sostenibilidad, diversidad y movilidad horizontal en los modelos de uso del territorio**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 18 §. [ disponível em 21 de dezembro de 2001 em <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2> ]
- \_\_\_\_\_ (1998b). **Sobre el origen. el uso y el contenido del término sostenible**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Madrid. 21 §. [ disponível em 18 de setembro de 2001 em <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2/a004.html> ]
- \_\_\_\_\_ (1998c). **Sobre la insustentabilidad de las actuales conurbaciones y el modo de paliarla**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 42 §. [ disponível em 21 de dezembro de 2001 <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2> ]
- NAREDO, José Manuel; RUEDA, Salvador (1998). **La “ciudad sostenible”: resumen y conclusiones**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 27 §.[ disponível em em 21 de dezembro de 2001 <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2> ]
- NAVEH, Zev; LIEBERMAN, Arthur (1994). **Landscape Ecology – Theory and Application**. 2nd ed. New York: Springer-Verlag. 360 p.
- NBR 6505 (1980). **Índices urbanísticos: terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT. 4p.
- O’SULLIVAN, David (1999). **Exploring the structure of space: towards geo-computational theory**. Fourth International Conference on Geocomputation. Fredericksburg: Mary Washington College. 18 p.
- \_\_\_\_\_ (2000a). **Agent based models and individualism: is the world agent based ?** Environment and Planning A, v. 32. London: Pion. p. 1409-1425.
- \_\_\_\_\_ (2001a). **Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model**. Environment and Planning B: Planning and Design 28. London: Pion. p. 687-705.

- \_\_\_\_\_ (2001b). **Complex spatial systems: the modelling foundations of urban and regional analysis**. Environment and Planning B: Planning and Design 2001, Vol. 28. London: Pion. p. 475-478.
- O'SULLIVAN, David; TORRENS, Paul M. (2000). **Cellular models of urban systems**. London: Casa, UCL. 11 p. [disponível em 7 de dezembro de 2001 em <http://casa.ucl.ac.uk> ]
- ODUM, E. P. (1963). **Ecology**. New York. Rinehart and Winston.
- OLIVEIRA, Isabel et al. (2001). **Para compreender o Estatuto da Cidade**. Rio de Janeiro: IBAM / DUMA. 63 p.
- ORTEGA, M. (2001). **Curso de H. T. Odum sobre ecossistemas e políticas públicas**. [disponível em 24 de julho de 2001 em <http://www.unicamp.br/fea/ortega/homepage.htm> ]
- PALANG, Hannes; MANDER, Ülo; NAVEH, Zev (2000). **Holistic landscape ecology in action**. Landscape and urban planning v. 50. p. 1-6. [ disponível em 26 de dezembro de 2001 em [www.elsevier.com/locate/landurbplan](http://www.elsevier.com/locate/landurbplan) ]
- PARTON, W. J. (1996). **The Century Model**. In: Evaluation of the Soil Organic Matter Models using Existing Long-term Datasets. Berlin: Springer. pp. 283-296.
- PEDROSA, Bianca; CÂMARA, Gilberto (2002). Modelagem dinâmica. In: DRUCK, Susana et al. (Ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. São José dos Campos: Inpe. 39 p. [ disponível em 12 de novembro de 2004 em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/> ]
- PENA-VEJA, Alfredo (2003). **O despertar ecológico: Edgar Morin e a ecologia complexa**. Tradução de Renato do Nascimento e Elimar do Nascimento. Rio de Janeiro: Garamond. 104 p.
- PEREIRA JUNIOR., Alfredo (1997). **Irreversibilidade física e ordem temporal na tradição boltzmanniana**. São Paulo: Editora Unesp. 179 p.
- PEREIRA, Gislene F.; ULTRAMARI, Clóvis (1999). **As práticas sociais e o desenvolvimento sustentável no meio urbano**. In: Anais do VIII ENANPUR. Porto Alegre: ANPUR – PRO-PUR, UFRGS. [mídia nem CD]
- PESCI, Ruben (1999). **La ciudad de la urbanidad**. La Plata: Cepa. 139 p.
- PESSIS-PASTERNAK, Guitta (1991). **Do caos à inteligência artificial: quando os cientistas se interrogam**. Tradução de Luiz Paulo Rouanet. São Paulo: Ed. da Universidade Estadual Paulista, 1993. 259 p.
- PILLAR, Valério DePatta (2000). **MULTIV – Multivariate exploratory analysis, randomization testing and bootstrap resampling – User's guide v. 2.0**. Porto Alegre: UFRGS. 38 p. [mídia digital disponível em <http://ecoqua.ecologia.ufrgs>]
- PIQUET, R.; RIBEIRO, A.C.T. (Org.) (1991). **Brasil, território da desigualdade: descaminhos da modernização**. Rio de Janeiro: Zahar.
- POLIDORI, Maurício Couto (2002). **Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade**. Projeto de doutorado em Ecologia. Porto Alegre: UFRGS – PPGECO. 92 p.
- \_\_\_\_\_ (2003a). **Crescimento urbano e ambiente : o SACI – Simulador do Ambiente da Cidade® e o caso de Barra do Ribeiro e de Pelotas, no RS**. [apresentação em ambiente digital]. Porto Alegre: Propur – Ufrgs. 117 slides.
- \_\_\_\_\_ (2003b). **Digitalização e mosaico de aerofotos da área urbana de Pelotas, RS, 1965**. A partir do cadastro de Sudesul Cartografia – SGC – Tombo 30206, disponível na Agência da Lagoa Mirim. Pelotas: UFPel. 9 fotos em escala 1/60.000.
- \_\_\_\_\_ (2003c). **Digitalização e mosaico de aerofotos da área urbana de Pelotas, RS, 1953**. A partir do cadastro de Sudesul Cartografia – SGC – Tombo 30200, disponível na Agência da Lagoa Mirim. Pelotas: UFPel. 14 fotos em escala 1:40.000.
- \_\_\_\_\_ (2003d). **Simulação do Ambiente da Cidade**. Belo Horizonte: ANPUR. 20 p.
- \_\_\_\_\_ (2004a). **Modelando crescimento com o SACI - Simulador do Ambiente da Cidade: o caso de Barra do Ribeiro, RS**. Trabalho de Qualificação para o Doutorado em Ecologia. Porto Alegre: PPGECO. 147p.
- \_\_\_\_\_ (2004b). **Crescimento urbano em Pelotas, RS - Simulações com o SACI - Simulador do Ambiente da Cidade** [em andamento]. Porto Alegre: PPGECO.
- POLIDORI, Maurício Couto e GRANERO, Juliano (2003). **SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®**. Software Versão 1.0.02 [inédito]. Porto Alegre: UFRGS – PPGECO.

- POLIDORI, Maurício Couto; KRAFTA, Romulo (2003). **Crescimento Urbano - Fragmentação e Sustentabilidade**. Belo Horizonte: ANPUR. 14 p.
- POLIDORI, Maurício Couto; KRAFTA, Romulo (2004). **Simulação de crescimento da cidade integrando fatores urbanos e naturais**. Seminário "A questão ambiental urbana: experiências e perspectivas". Brasília: UnB – NEUR, CEAM. 17 p.
- POLIDORI, Maurício Couto e KRATZ, Luiz Gustavo (1995). **Avaliação de Impacto Morfológico®**. Software Versão 1.0. Porto Alegre: UFRGS – Propur.
- POLIDORI, Maurício Couto; KRAFTA, Romulo e GRANERO, Juliano (2001). **Medidas Urbanas®**. Software Versão 1.15. Pelotas: Laboratório de Geoprocessamento da UFPel.
- PORTUGALI, Juval (1997). **Self-organizing cities**. Futures, v. 29 nº 4/5. Great Britain: Elsevier Science. p. 353-380.
- \_\_\_\_\_(2000). **Self-organization and the city**. Berlin: Springer. 352 p.
- Prefeitura Municipal de Pelotas (2003). **Mapa de bairros**. Pelotas: PMP.
- PRIGOGINE, Ilya (1996). **Fim das certezas, o tempo, caos e as leis da natureza**. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp. 199 p.
- PRIMACK, Richard; RODRIGUES, Efraim (2001). **Biologia da conservação**. Londrina: E. Rodrigues. 328 p.
- PRINS, Dieter (1984). **Urbanismo II – Configuração urbana**. Lisboa: Editorial Presença Ltda. 149 p.
- RANA, Sanjay; DYKES, Jasón (2002). **Techniques for augmenting the visualisation of dynamic raster surfaces**. London: Casa, UCL. 31 p. [ disponível em 01 de dezembro de 2002 em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers/paper59.pdf](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper59.pdf) ]
- RAPOPORT, Amos (1977). **Aspectos Humanos de la Forma Urbana**. Versão castelhana de Muntañola i Thornberg. Barcelona: GG, 1978. 381 p.
- REES, Willian; WACKERNAGEL, Mathis (1996). **Urban ecological footprint: why cities cannot be sustainable – and why they are a the key of sustaibability**. Environmental Impact Assessment Review, Vol. 16, p. 223-248.
- REIF, Benjamin (1973). **Modelos en la Planificación de Ciudades y Regiones**. Versão castelhana por Alfredo Carda y Santiago Tellez . Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local, 1978. 422 p.
- RIBEIRO, Luiz Cesar de Queiroz (1996). Incorporação imobiliária: dinâmioica e impasses. In: RIBEIRO, Luiz Cesar de Queiroz; AZEVEDO, Sérgio: **A crise da moradia nas grandes cidades: da questão da habitação à reforma urbana**. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ. p. 105-118.
- RIETKERK, Max et al. (2002). **The ecology of scale**. Ecological Modelling 149. p. 1-4. [ disponível em 13 de março de 2003 em [www.elsevier.com/locate/ecomodel](http://www.elsevier.com/locate/ecomodel) ]
- RIGOTTI, G. (1955): **Urbanismo: la técnica**. Versão castelhana de Francisco Folguera. Barcelona: Labor. 796 p.
- ROSA, Mário (1985). **A geografia de Pelotas**. Pelotas: Editora da UFPel. 333 p.
- ROYAL Town Planning Institute (2000). **Cambridge futures – Winners of the Royal Town Planning Institute award for innovation in planning 2000**. Cambridge: Crown. [disponível em <http://www.arct.cam.ac.uk/cambfut/default.htm>, em dezembro de 2000]
- RUANO, Miguel (1999). **Ecourbanismo: entornos urbanos sostenibles - 60 proyectos**. Tradução de Carlos de Valicourt. Barcelona: GG. 213 p.
- RUEDA, Salvador (1998a). **La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 92 §.
- \_\_\_\_\_(1998b). **Metabolismo y complejidad del sistema urbano a la luz de la ecología**. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. 95 §. [ disponível em 5 de dezembro de 2001 em <http://habitat.aq.upm.es/cs/p2> ]
- SALINGAROS, Nikos (1998). **Mathematical theory of the urban web**. San Antonio, Texas: The University of Texas at San Antonio. [disponível em 22 de dezembro de 2001 em <http://www2.rudi.net/rudiments/urbanweb/urbanweb.htm> ]
- SAMPFORD, Charles (2002). **Environmental governance for biodiversity**. Environmental Science & Policy 5. p. 79-90 [disponível em 25 de janeiro de 2003 em [www.elsevier.com/locate/envsci](http://www.elsevier.com/locate/envsci) ]
- SÁNCHEZ, Darío C. (1998). Teoría de grafos aplicada a redes naturales y antrópicas. In: MATTEUCCI, Silvia Diana e BUZAI, Gustavo D. (Ed.). **Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial**. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires. p. 321-345.

- SANTORO, Paula; NUNES, Jeferson (2003). **Avaliar o impacto de grandes empreendimentos**. São Paulo: Polis. [disponível em 05 de setembro de 2003 em <http://www.polis.org.br/publicacoes/dicas/261624.html> ]
- SANTOS, Carlos Nélon (1988). **A Cidade Como um Jogo de Cartas**. São Paulo: Projeto. 192 p.
- SANTOS, Milton (1992). **Metrópole corporativa fragmentada**. São Paulo: Hucitec.
- \_\_\_\_\_. (2000). **Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Record. 174p.
- SANTOS, Rosely Ferreira (2004). **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos. 184 p.
- SAULE JR. Nelson e SILVA, Ana Amélia (1993). **A cidade faz a sua constituição - A construção da cidade**. Revista Pólis nº 10. São Paulo: Pólis. p. 23-47.
- SCHUSCHNY, Andrés R. (1998). Estudio del medio ambiente desde las ciencias de la complejidad. In: MATTEUCCI, Silvia Diana e BUZAI, Gustavo D. (Ed.). **Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial**. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires. p. 33-55.
- SILVA, Alexandre Marco (2004). **Ecologia de paisagem – Fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Editora Papel Virtual. 157 p.
- SILVA, José Daniel (1999). **O paradigma transdisciplinar: uma perspectiva metodológica para a pesquisa ambiental**. Workshop sobre interdisciplinaridade. São José dos Campos: INPE. 18 p.
- SKLAR, Fred; COSTANZA, Robert (1991). The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis. In: TURNER, Monica; GARDNER, Robert (Ed.). **Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity**. New York: Springer. p. 239-288.
- SMITH, Andy; DODGE, Martin; DOYLE, Simon (1998). **Visual communication in urban planning and urban design**. London: Casa, UCL. 50 p. [disponível em 27 de setembro de 2001 em <http://www.casa.ucl.ac.uk/urbanplan.pdf> ]
- SMITH, Neil (1984). **Desenvolvimento Desigual**. Tradução de Eduardo Navarro. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1988. 250 p.
- SOARES, Sebastião Roberto (2003). **Aula 5 - Análise multicritério como instrumento de gestão ambiental**. Florianópolis: Centro Tecnológico. 21 p. [ disponível em 9 de setembro de 2004 em [www.ens.ufsc.br/~soares](http://www.ens.ufsc.br/~soares) ]
- SOJA, Edward W. (1985). The spatiality of social life: towards a transformative retheorisation. In: D. GREGORY; HURRY, J.: **Social relation and spatial structures**. London: Mac-Millan Publishers. p. 90-127.
- \_\_\_\_\_. (1989). **Geografias pós-modernas**. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Zahar, 1993. 324 p.
- SOUZA, Marcelo Lopes (2003). **Mudar a cidade: uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 560 p.
- SOUZA, Maria Adélia Aparecida (1995). O novo Brasil urbano: integração ou fragmentação ? In: GONÇALVES, Flora Maria (org.). **O novo Brasil urbano: impasses, dilemas, perspectivas**. Porto Alegre: Mercado Aberto. p. 65-71.
- SPELLERBERG, Ian F. (1994). **Evaluation and assessment for conservation**. New York: Chapman and Hall Inc. 259 p.
- STEADMAN, J. P.(1983). **Architetural Morphology**. London: Pion. 276 p.
- STEVENS, Garry (1990). **The reasoning architect – Mathematics and science in design**. Singapore: McGraw-Hill. 362 p.
- STOVER, Mary et al. (1994). **Overcoming exclusion in rural communities: NIMBY studies case**. Housing Assistance Council [ disponível em 18 de novembro de 2004 em <http://www.ruralhome.org/pubs/development/nimby/contents.htm> ]
- TEKLEMBURG, Jan; TIMMERMANS, Harry; BORGES, Aloys (1997): Design tools in a integrated CAD-GIS environment: space syntax as an example. In: TIMMERMANS, Harry (Ed). **Decision support systems in urban planning**. London: E & FN Spon. p. 261-276.
- TERRADAS, Jaume (2001). **Ecologia urbana**. Barcelona: Rubes Editorial S. L. 128 p.
- THOMAS, R. M.; HUGGETT, R. J. (1980). **Modelling in Geography: a mathematical approach**. Totowa, N.J.: Barnes & Noble Books.

- THOMPSON, Ian H. (2002). **Ecology, community and delight: a trivalent approach to landscape education**. *Landscape and Urban Planning* 60. p. 81–93. [ disponível em 7 de Janeiro de 2003 em [www.elsevier.com/locate/landurbplan](http://www.elsevier.com/locate/landurbplan) ]
- TIMMERMANS, Harry (Ed.) (1997). **Decision support systems in urban planning**. London: E & FN Spon. 326 p.
- TOBÓN, Carolina (2001). **Visual and interactive exploration of point data**. London: Casa, UCL. 22 p. [disponível em 7 de março de 2002 em <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper31.pdf> ]
- TORRENS, Paul (2000a). **How land-use-transportation models work..** London: Casa, UCL. 75 p. [disponível em 19 de abril de 2002 em [http://www.casa.ucl.ac.uk/working\\_papers.htm](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm) ]
- \_\_\_\_\_ (2000b). **How cellular models of urban systems work**. London: Casa, UCL. 68 p. [disponível em 8 de dezembro de 2001 em [http://casa.ucl.ac.uk/working\\_papers.htm](http://casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm) ]
- TORRENS, Paul; ALBERTI, Marina (2000). **Measuring Sprawl**. London: Casa, UCL. 43 p. [disponível em 9 de dezembro de 2001 em [http://casa.ucl.ac.uk/working\\_papers.htm](http://casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm) ]
- TORRENS, Paul; O'SULLIVAN, David (2001a). **Cellular automata and urban simulation: were do we go from here ?** *Environment and Planning B: Planning and Design* 2001, Vol. 28. London: Pion. p. 163-168.
- TORRENS, Paul; O'SULLIVAN, David (2001b). **Cities, cells and complexity: developing a research agenda for urban geocomputation**. London: Casa, UCL. . [disponível em 12 de março de 2002 em <http://casa.ucl.ac.uk> ]
- VAINER, Carlos B. e SMOLKA, Martin O. (1991). Em tempos de liberalismo: tendências e desafios do planejamento urbano no Brasil. In: PIQUET, R. e RIBEIRO, A.C.T. (Org.). **Brasil, território da desigualdade: descaminhos da modernização**. Rio de Janeiro: Zahar. p. 19-23.
- VAN DER GAAST, J.W.J.; KROES, J.G. (1999). **A spatial solution to calculate optimum surface water target levels using a water management decision support system**. *Geocomputation 99 Conference*. [ disponível em 07 de setembro de 2004 em <http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99> ]
- VANCE, James (1994). **The continuing city: urban morphology in western civilization**. Baltimore: Johns Hopkins University. 534 p.
- VASCONCELOS, Eduardo (2000). **Transporte urbano nos países em desenvolvimento**. São Paulo: Annablume. 284 p.
- WADDELL, P. A. ; ALBERTI, M. (1998). **Integration of an urban simulation model and an urban ecosystems model**. In: *Proceedings of International Conference on Modeling Geographical and Environmental Systems with GIS*.
- WADDELL, P. et al. (2001). **Review of the literature and operational models: final report to the puget sound**. *Regional Council on Land Use and Travel Demand Forecasting Models*. Seattle: Puget Sound Regional Council. [disponível em 12 de maio de 2003 em [www.psrc.org/datapubs/pubs/model\\_review.pdf](http://www.psrc.org/datapubs/pubs/model_review.pdf) ]
- WADDELL, Paul (2003). **Introduction to urban simulation: design and development of operational models**. Seattle: University of Washington. [disponível em 28 de janeiro de 2004 em [www.urbansim.org](http://www.urbansim.org) ]
- WARD, D.P.; MURRAY, A.T.; PHINN, S.R. (2000). **A stochastically constrained cellular model of urban growth**. *Computers, Environment and Urban Systems* v. 24. p. 539-558. [disponível em 15 de junho de 2002 em [www.elsevier.com/locate/compenurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenurbsys) ]
- WEBER, Christiane (2003). **Interaction model application for urban planning**. *Landscape and Urban Planning* Vol. 63, p. 49–60 [disponível em 01 de outubro de 2004, em [www.elsevier.com/locate/landurbplan](http://www.elsevier.com/locate/landurbplan) ]
- WEGENER, Michael (1994). **Operational urban models: state of art**. In: *Journal of the American Planning Association (APA Journal)*, v. 60, nº1, Winter 1994. Chicago: American Planning Association. p.17-30.
- WEGENER, Michael (1995). **Current and future land use models**. In: *Land Use Modeling Conference Proceedings*. Washington: G. A. Shunk. p. 13-40.
- WEIMAR, Jörg R. (1996). **Simulation with cellular automata - Lecture notes**. [ disponível em 8 de setembro de 2003 em <http://www.tu-bs.de/institute/WiR/weimar/ZAscript/> ]
- WHITE, R, et al. (1999). **Developing an urban land use simulator for european cities**. Memorial University of Newfoundland, Department of Geography. 8 p. [ disponível em 1 de novembro de 2004 em <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/referencias/> ]
- WHITE, R.; ENGELEN, G (1997). **Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling**. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24. p. 165-174.

- WHITE, R; ENGELEN, G. (2000). **High-resolution integrated of the spatial dynamics of urban and regional systems**. Computers, Environment and Urban Systems v. 24. p. 383-400. [disponível em 14 de dezembro de 2002 em [www.elsevier.com/locate/compenurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenurbsys) ]
- WILSON. A.J. (1985). **Mathematical methods in human geography and planning**. Great Britain: John Wiley & Publishers. 404 p.
- WOLFF, Wilfried F.; FISHWICK, Paul A. (2003). **Wading bird simulation modeling and integration into ATLSS landscape and fish models**. USGS, Center for Coastal Geology. [disponível em 10 de setembro de 2004 em [http://sofia.usgs.gov/projects/atlss/wading\\_birds/wadingbirdab1.html](http://sofia.usgs.gov/projects/atlss/wading_birds/wadingbirdab1.html) ]
- WOLFRAN, Stephen (1983). **The statistical mechanics of cellular automata**. Review of Modern Physics, 55:601-643. [ disponível em 03 de novembro de 2003 em <http://www.stephenwolfran.com/publications/articles/ca/> ]
- \_\_\_\_\_(1985). **Two-dimensional cellular automata**. London: Stephen Wolfran Publications. [disponível em 15 de agosto de 2002 em <http://www.StephenWolfran.com/publications/articles/ca/85-two>]
- \_\_\_\_\_(1994). **Cellular automata and complexity: collected papers**. London: Stephen Wolfran Publications. 596 p. [ disponível em 17 de setembro de 2002 em <http://www.StephenWolfran.com/publications/books/> ]
- \_\_\_\_\_(2002). **A new kind of science**. London: Stephen Wolfran Publications. 1197 p. [ disponível em 22 de outubro de 2002 em <http://www.StephenWolfran.com/publications/books/> ]
- WU, Fulong (1996). **A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growin region**. Computers, Environment and Urban Systems Vol. 20(6). p. 367-387. [ disponível em em 05 de setembro de 2003 em [www.elsevier.com/locate/compenurbsys](http://www.elsevier.com/locate/compenurbsys) ]
- \_\_\_\_\_(1998). **SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrate GIS and CA whit AHP – derived transitions rules**. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 12(1). p. 63-82.
- \_\_\_\_\_(2002). Geo-referencing social spatial data and intra-urban property price modeling in a data-poor context: the case study of Shanghai property data. In: **Socio-economic applications of geographic information science**. Edited by KIDNER, David; HIGGS, Gary; WHITE, Sean (Ed.). London: Taylor & Francis. p. 163-178.
- XIE, Yichum. (1996). **A Generalized Model for Cellular Urban Dynamics**. Geographical Analysis, Vol. 28, p. 350-373.
- XIE, Yichum; SUN, Zhanli (2000). **Dynamic Urban Evolution Model Based on Cellular Automata**. Ypsilanti: Igre. [ disponível em 24 de janeiro de 2003 em <http://ceita.emich.edu> ]
- YEH, Anthony Gar-On; LI, Xia (2001). **A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS**. Environment and Planning B: Planning and Design 28. London: Pion. p. 733-753.
- YU, Kongjian (1996). **Security patterns and surface model in landscape ecological planning**. Landscape and urban planning, v. 36. Great Britain: Elsevier Science. p. 1-17.
- ZANCHETI, Sílvio Mendes (1998). **Os processos recentes de degradação e revitalização no Brasil**. 11 p. [disponível em 15 de junho de 2004 em <http://www.urbanconservation.org/textos/lisboa98.htm> ]

## 10.2 Periódicos de consulta

**Ambiente**. Fundación CEPA. Trimestral.

**CEUS – Computers, Environment and Urban Systems**. 6 issues per year. [ disponível em <http://www.elsevier.com/inca/publications/store/3/0/4/304.pub.htm> , em agosto de 2003]

**Ciência & Ambiente**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria: Editora da UFSM. Semestral.

**Cities**. Pergamon, Elsevier. [disponível em [www.elsevier.com/locate/cities](http://www.elsevier.com/locate/cities) , em dezembro de 2001]

**Complexity International**. Trimestral. [disponível em <http://www.csu.edu.au/ci> , em dezembro de 2001]

**Ecological Modelling**. Elsevier. [ disponível em [www.elsevier.com/locate/ecomodel](http://www.elsevier.com/locate/ecomodel) , em dezembro de 2002]

**Environment and Planning B: Planning and Design**. London: Pion. [ disponível em <http://www.pion.co.uk/ep/> , em dezembro de 200]

- Environmental Impact Assessment Review.** Elsevier Science Inc. [ disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01959255> , em agosto de 2003]
- Environmental Science & Policy.** Elsevier Science Inc. [ disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/journal/14629011>, em agosto de 2003]
- Futures.** Pergamon, Elsevier. [ disponível em [www.elsevier.com/locate/futures](http://www.elsevier.com/locate/futures) , em março de 2001]
- GeoFocus** - Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica International Review of Geographical Information Science and Technology. (2001-2003) [ disponível em [www.geo-focus.org](http://www.geo-focus.org) , em agosto de 2003]
- Growth and Change.** Blackwell Publishers. [ disponível em <http://www.ebsco.com/online/direct.asp?JournalID=100950> , em setembro de 2002]
- Habitat International.** Pergamon, Elsevier. [ disponível em [www.elsevier.com/locate/habitatint](http://www.elsevier.com/locate/habitatint) , em abril de 2003]
- International Journal of Urban and Regional Research.** Oxford: Blackwell Publishers. Trimestral.
- JASS – Journal of Artificial Societies and Social Simulation** [ disponível em <http://jass.soc.surrey.ac.uk> , em março de 2003]
- Landscape and Urban Planning.** Elsevier. [ disponível em [www.elsevier.com/locate/landurpaln](http://www.elsevier.com/locate/landurpaln) , em julho de 2003]
- OnLinePlanning Journal.** Centre for Advanced Spatial Analysis. University College London [ disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk/planning> , em agosto de 2003]
- Progress in Planning.** New Jersey: Pergamon. 6 issues per year in 2 volumes.
- Projectare.** PET – FAUrb – UFPel. Pelotas: Editora da UFPel. Semestral.
- Urbana.** Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Central de Venezuela. Caracas: IFA/LUZ. Semestral.

### 10.3 Softwares utilizados

- Animagic Gif** (2002) [ disponível em <http://www.rtlsoft.com/animagic/> ]
- ArcView 3.2.** ESRI – Environment Systems Research Institute (1992-1999). [ disponível em 23 de agosto de 1999 em [www.esri.com](http://www.esri.com) ]
- ArcView 3.3.** ESRI – Environment Systems Research Institute (1992-1999). [ disponível em 11 de março de 2001 em [www.esri.com](http://www.esri.com) ]
- ArcView ImageAnalysis 1.0.** ESRI – Environment Systems Research Institute (1997-2000). [ disponível disponível em 11 de março de 2001 em [www.esri.com](http://www.esri.com) ]
- ArcView SpatialAnalyst 2.0.** ESRI – Environment Systems Research Institute (1998-2000). [ disponível em 11 de março de 2001 em [www.esri.com](http://www.esri.com) ]
- AutoCAD Map 2000 (4).** Autodesk (1982-1999). [ disponível em 12 de abril de 2001 em <http://www.autodesk.com> ]
- AutoCAD Overlay 2.0.** Autodesk (1998-2000). [ disponível em 12 de abril de 2001 em <http://www.autodesk.com> ]
- Medidas Urbanas 1.15.** Maurício Couto Polidori, Romulo Krafta e Juliano Granero. UFPel. [ disponível 1 de setembro de 2004 em [www.medidasurbanas.cjb.net](http://www.medidasurbanas.cjb.net) ]
- Multiv 2.0.3.** Multivariate Exploratory Analysis, Randomization Testing and Bootstrap Resampling. Valério DePatta Pillar (1996-2000). UFRGS. [ disponível em 13 de março de 2002 em <http://ecoqua/ecologia/ufrgs.br> ]
- SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®** (2003-2004). [software inédito]. Componente da Tese de Doutorado em Ecologia de Maurício Couto Polidori. Porto Alegre: UFRGS – PPGE-CO.





# 11 Anexo: **software SACI – Simulador do Ambiente da Cidade**®

[ em mídia digital ]

