

## ESCALAS HIDROLÓGICAS. I: CONCEITOS

**EDUARDO M. MENDIONDO, CARLOS E. M. TUCCI**

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Cx.P. 15029, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS*

### RESUMO

*Os processos hidrológicos apresentam comportamentos distintos de acordo com a escala do sistema. A escala dos processos hidrológicos pode ser discutida através de três elementos contextuais: "Disciplinar, Histórico e Conceitual" (Matriz DHC). Devido à enorme complexidade, os elementos para abordar esses contextos precisam de enfoques tanto de natureza qualitativa como quantitativa. Numa série de três artigos, este trabalho analisa os aspectos qualitativos: discreto, relativista, dominante, de complexidade, sistêmico e transdisciplinar; e oito aspectos quantitativos, que incidem nos problemas práticos de escalas hidrológicas. Quatro aspectos quantitativos são comuns às geociências: escala observacional e escala de flutuação, hierarquias escalares, transição escalar e heterogeneidades. Os outros quatro são específicos ao âmbito da simulação hidrológica: incertezas nas previsões, universalidade nas equações de escoamento, parâmetros constitutivos, e sensibilidade às condições iniciais. Para concluir, é apresentado como estes aspectos retratam a dialética quali e quantitativa, com ênfase no processo de transformação chuva-vazão e os métodos de abordagem na micro, meso e macro-escala hidrológica.*

### ALGUNS DESAFIOS DA HIDROLOGIA ATUAL

Até a década de 30, a Hidrologia era uma ciência mais qualitativa do que quantitativa. Os processos eram descritos na sua essência, mas não se conhecia a magnitude de sua importância em cada sistema hídrico. Os primeiros métodos

quantitativos foram desenvolvidos para representar processos específicos do ciclo hidrológico, por exemplo a equação de Horton para a infiltração e a de Theiss para fluxo de poços.

O investimento econômico no século XX exigiu conhecimentos quantitativos sobre os recursos hídricos para o aproveitamento desses recursos. Os estudos exigiam que o engenheiro quantificasse os processos hidrológicos necessários a projetos como obras para regularização, previsão de enchentes e avaliação do impacto dos despejos de concentrações urbanas sobre os rios. Para isso foram importadas diferentes técnicas matemáticas e estatísticas para Hidrologia, sem a correspondente relação física, química e biológica dos processos envolvidos.

A preocupação ambiental, que iniciou na década de 70, gerou novas questões postas pela sociedade, tais como: qual é o impacto resultante do uso do solo rural e urbano sobre a qualidade e quantidade dos rios?; existe modificação climática devido a ações antrópicas?; quais as ações necessárias para redução desses impactos? Para responder estas questões não é possível continuar representando os processos na bacia de forma empírica e estacionária.

A Ciência Hidrológica se desenvolveu de forma compartimentalizada, onde cada processo era estudado independente dos demais dentro de uma escala muito reduzida. Durante os anos 60 a 80 foram criadas várias bacias experimentais ou representativas para estudar esses processos. No entanto, os resultados eram limitados, principalmente porque a transferência do conhecimento da micro para a meso e macroescala não é direta.

Assim, o engenheiro, para estimar as vazões nos rios com base na precipitação, integrou as diferentes partes do ciclo hidrológico através de funções desenvolvidas na microescala para representar bacias de vários km<sup>2</sup>. Esses modelos que apareceram juntamente com a disponibilidade dos computadores na década de 50, pouco evoluíram em termos qualitativos, mas ainda têm uma grande utilidade na solução de problemas de sistemas estacionários. A tendência atual tem sido de aprimorá-los para usos específicos como previsão em tempo atual ou a redução do número de parâmetros para torná-lo de mais fácil utilização.

Desta maneira, todas as geociências, incluindo Hidrologia, iniciam a década dos noventa com novos desafios disciplinares. Um deles é contribuir para a unificação de conceitos que retratem os processos nas diferentes escalas (NRC, 1991 e Tucci, 1993). O Ciclo Hidrológico atua de forma integrada com outros ciclos de energia e matéria, num intervalo amplo de escalas espaciais e temporais. Assim, alguns dos principais novos desafios são:

- representatividade dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais;
- empirismo de modelos e parâmetros ao representar os processos hidrológicos na bacia hidrográfica;
- a integração de modelos meteorológicos e hidrológicos que atuam em escalas diferentes;

A solução desses desafios permitirá responder com mais segurança as respostas formuladas acima e criar os elementos técnicos e científicos que a sociedade necessita para a tomada de decisões no sentido do aprimoramento do desenvolvimento sustentável.

## “ESCALA” NOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS

Chow (1959) quando definiu a hidrologia como “...a ciência que trata da ocorrência da água na Terra, sua circulação, distribuição, ...”, incluiu todos os processos atuantes, com seus três estados da água e em diferentes escalas de espaço e de tempo. Além disso, destacou a *hierarquia* dos processos no Ciclo Hidrológico planetário.

O ciclo hidrológico deve ser analisado, dentro de seus componentes, de acordo com a dinâmica de sua ocorrência e sobre as características do sistema envolvido. A dinâmica envolve as mudanças das variáveis no tempo e no espaço, enquanto que o espaço incorpora também as características do sistema (solo, cobertura, oceano, etc.), que apresentam poucas variações em períodos curtos de tempo. Esses processos extremamente não-lineares agem diretamente sobre o meio e a vida no planeta. Na Figura 1 são dados exemplos de escalas espaciais e temporais ligadas à hidrologia.

A representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas tem esbarrado nos seguintes aspectos principais:

- a heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos e a incerteza com a qual os parâmetros e processos são medidos em diferentes escalas;
- a dificuldade de representar os processos caracterizados e analisados na microescala para outras escalas da bacia hidrográfica;
- a falta de relação entre os parâmetros de modelos matemáticos com as diferentes configurações espaciais encontradas na natureza.

Assim a comunidade hidrológica enfrenta hoje um problema também comum às outras áreas das geociências: a complexidade dos processos das escalas menores e a relativa simplicidade com a qual eles são integrados nas escalas menores. Por exemplo, são limitados os resultados obtidos

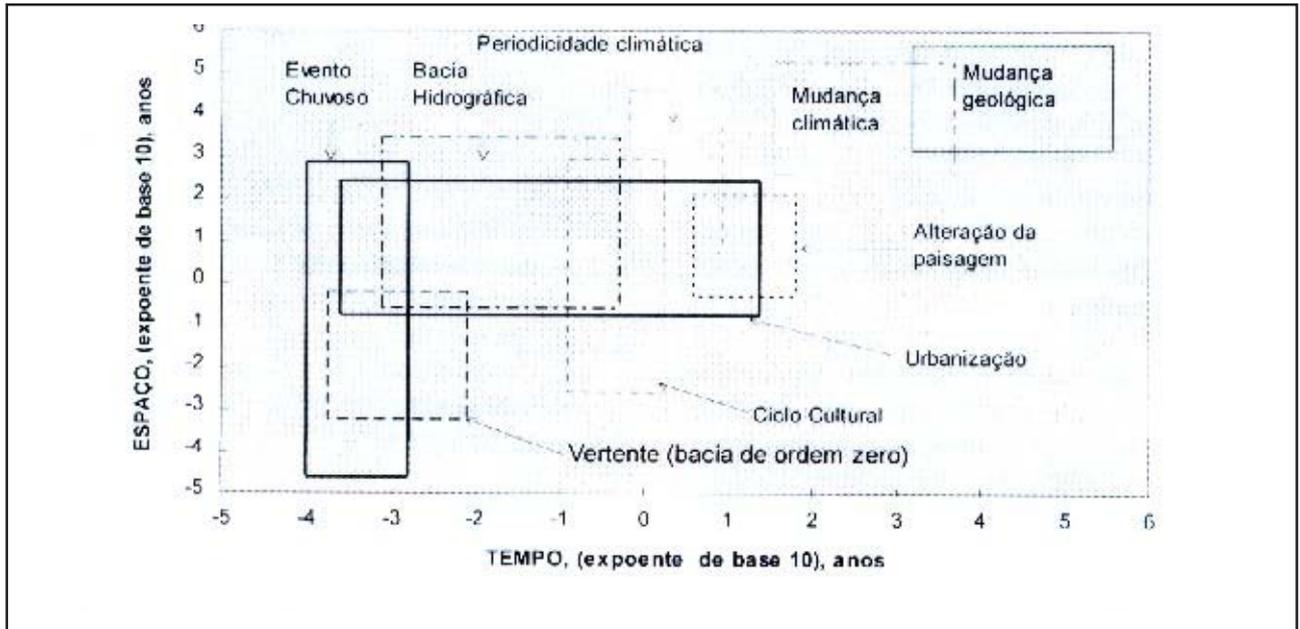


Figura 1. Algumas escalas do espaço/tempo no ciclo hidrológico.

pelos modelos para responder questões como o das ações antrópicas em diferentes escalas da bacia.

Cada vez mais o hidrólogo é forçado a pensar em termos de complexidade e padrões espaciais, mas as ferramentas disponíveis para análise não são adequadas para acomodar de forma conceitual a heterogeneidade. Isto tem levado a uma crise teórica (Dooge, 1986; Beven, 1987) e reformula a física hidrológica (Short et al, 1993). Portanto, existe hoje a necessidade de uma *teoria de escala hidrológica* que trate os problemas da integração espacial e temporal em todas as hierarquias do Ciclo Hidrológico apontado a quatro décadas por Ven Te Chow.

O problema reside em conhecer como variáveis e parâmetros são representados em escalas diferentes e como estabelecer as funções de transferência entre essas escalas. Por exemplo, a equação de infiltração obtida através de um experimento de campo para uma área de poucos cm<sup>2</sup> não tem os mesmos parâmetros, quando utilizada para uma área de muitos m<sup>2</sup> ou km<sup>2</sup>. Como então, medir esse processo para que essa equação ou transformações da mesma possam ser utilizadas nessas escalas? O principal objetivo

nesse contexto, é o de determinar qual é a área representativa apropriada de uma variável hidrológica que identifique a escala do processo natural. Uma vez encontradas as variáveis explicativas numa escala, o passo seguinte é encontrar as funções de transferência para as escalas vizinhas.

Para caracterizar esse desenvolvimento foram criadas algumas nomenclaturas em geociências para ordenar os conhecimentos sobre a escala dos processos naturais (Tabela 1).

Tabela 1. Nomenclatura sobre escala dos processos naturais.

contexto	categorias e objetivos
disciplinar	representatividade, diversidade e transferência de informação dos processos, no espaço e no tempo
conceitual	dialética de aspectos qualitativos e quantitativos
histórico	experiência sobre processos em áreas específicas

O tema é classificado em *Disciplinar*, quando trata da representatividade e a

integração temporal espacial; em *Conceitual* quando trata dos processos dentro das visões qualitativas e quantitativas, e; *Histórico* quando identifica a evolução das teorias e práticas correntes enfrentando o problema disciplinar.

## ELEMENTOS QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS

Para analisar a escala dos processos hidrológicos nesse artigo são discutidos a seguir os aspectos conceituais, que envolvem os elementos qualitativos e quantitativos e as metodologias correspondentes.

### Elementos qualitativos

Normalmente a escala é vista de maneira puramente quantitativa, como a simples redução ou aumento das variáveis espaciais alterada sobre uma faixa ampla e contínua. Isto é uma extrapolação dos vários exemplos da experiência do dia a dia (Klemes, 1983). Como a maioria das extrapolações, este conceito simples de escala não pode ser aplicado em qualquer situação, especialmente em sistemas naturais, onde as escalas dos objetos não são arbitrárias ou escolhidas *a priori*. Elas são função da sua composição física e do balanço de forças atuando sobre o sistema.

Na natureza, não é possível impor escalas, mas deve-se procurar aquelas que existem e tratar de entender suas relações e padrões. Klemes cita uma frase de Popper: *“todos somos estudantes da natureza, das formas não criadas por nós e, portanto, não sujeitas ao nosso controle (...), assim, projetar a razão humana sobre a natureza... não pode ser considerado de ciência.”*

Como os resultados exigidos nos problemas práticos são cada vez mais complexos, é raro ter estimativas quantitativas com um total embasamento conceitual. A confiança em métodos quantitativos (Grayson et al, 1993) tende a ser substituída por um melhor entendimento do tipo qualitativo, ou

seja, como se comporta o padrão natural de cada processo. Os métodos qualitativos podem não ser tão precisos mas são mais simples, modestos e parcimoniosos (Hillel, 1991). A seguir, são analisados os seguintes aspectos qualitativos relevantes às escalas hidrológicas:

- complexidade;
- discreto;
- relativista;
- dominante;
- sistêmico;
- transdisciplinar.

**Complexidade** – segundo Edgard Morin (Pessis-Paternak, 1991), a complexidade é “o grande número de interações e interferências entre várias unidades que desafiam as nossas possibilidades de cálculo; e abrange também indeterminações e fenômenos aleatórios. Ela convive com uma parte da incerteza, seja de nosso conhecimento, seja inscrita nos fenômenos”. A complexidade é representada pelo grau e tipo de heterogeneidades visualizadas no sistema, suscetíveis de quantificar. Isto implica estudar: i) sistemas organizados, ii) interações locais-globais e iii) informação contida na micro e macroescala.

A partir de uma abordagem mecanicista, os sistemas hidrológicos se situam numa região intermediária entre a aleatoriedade pura e mecanismos totalmente simples (Figura 2). Portanto, eles se definem como sistemas de complexidade organizada (Dooge, 1986). A medida que aumenta a escala observacional, também aumenta a dificuldade de conhecer o efeito das escalas menores (Klemes, 1983).

A complexidade é expressa pela dificuldade em medir uma magnitude até um certo detalhe e sua influência sobre os macroprocessos (Uhlenbeck, 1973). Por exemplo, a forma que os grãos porosos de um filme fotográfico impõem a resolução da imagem.

A quantificação de sistemas complexos é feita tanto de modo formal –*mathesis*–, como descritivo –*taxinomia*– (Abbott, 1993). No caso

dos sistemas com complexidade organizada, a abordagem é feita através da taxinomia. No entanto, esta abordagem enfrenta dois fatores: i) o reconhecimento de que esses sistemas são compostos por subsistemas que interagem dinamicamente; e ii) que as suas metodologias oferecem conceituações muito restritas às próprias disciplinas de estudo, e precisam de uma abordagem interdisciplinar.

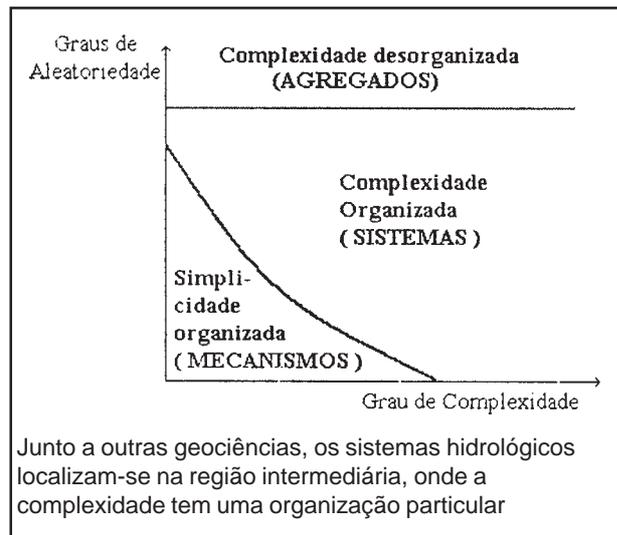


Figura 2. Mecanismos, sistemas e agregados (Dooge, 1986).

A complexidade que envolve os processos numa bacia é própria dos sistemas dinâmicos. Esses sistemas descrevem a evolução temporal de pontos espaciais dentro de um campo vetorial limitado. A teoria destes sistemas centra-se nas propriedades globais dos caminhos preferenciais do fluxo (Sposito, 1994) e não na integração quantitativa. Esta teoria fornece uma informação geral e qualitativa que não depende de forma exclusiva da variabilidade espacial do campo vetorial.

Assim, nos sistemas dinâmicos não-lineares (como os processos hidrológicos que ocorrem na bacia) tem-se dois extremos. Por um lado, existem componentes que interagem localmente e produzem um comportamento divergente, tratados através de equações bem simples, e denominado de complexidade determinista. Por outro, estas propriedades locais fazem surgir uma ordem global, que por

sua vez retroalimenta o comportamento das componentes da qual tem emergido (Lewin, 1993). Assim, nem todas as propriedades macroscópicas da bacia são resultado das propriedades ou dos seus componentes individuais e/ou das suas combinações a nível micro. Isto explica as interações dinâmicas tanto dentro da bacia (exemplo de domínio único) como da relação da bacia com o clima (exemplo de dois domínios diferentes).

Por último, a complexidade é descrita por muitas variáveis envolvidas, havendo entre elas interação, interdependência e mecanismos de retroalimentação. O mecanismo de cada processo pode ser conhecido de forma determinística, mas as interações e retroalimentações, fazem com que as combinações de processos ocorram de maneira aleatória (Cristofolletti, 1980). Assim, a adaptação do sistema ante estímulos leva ao aparecimento de respostas alternativas, todas elas possíveis, embora se possa pensar que as respostas mais comuns se organizem em torno do valor modal.

Desta maneira, parte da *abordagem probabilística* nos sistemas hidrológicos repousa no princípio de distribuição de energia. Essa distribuição tende ao estado mais provável, governando o escoamento e as relações espaciais em qualquer tempo ou estágio. Para Leopold e Langbein (1963) o desenvolvimento da paisagem não envolve somente a energia total disponível, mas a sua distribuição. Em analogia com leis termodinâmicas, essa distribuição pode ser descrita como *entropia*, que é função da distribuição da energia disponível dentro do sistema, e não uma função da energia total. A entropia relaciona-se com a ordem ou a desordem, e portanto é uma medida para quantificar a complexidade e que pode ser descrita em *termos de probabilidade*.

**Discreto** – entre as características naturais, o espectro de escalas comuns tende a se concentrar ao redor de *estados discretos* os quais se diferenciam bem entre si. Esta característica colocada por Klemes (1983) é um axioma de como o ser humano percebe os

diferentes sistemas naturais, nas suas diferentes escalas. Isto tem a ver com nosso tipo de raciocínio, que geralmente intui que um objeto, sistema ou corpo é constituído por *partes* ou componentes separadas, formando *agregados* diferentes (Odum, 1982). Além disso, não temos a capacidade de sintetizar todas essas partes do sistema quando elas interagem em um processo dinâmico. Assim, os estados discretos, quando caracterizados, permitem definir e quantificar hierarquias e transições escalares, responsáveis pela transferência de informação.

**Relativista** – ligado ao conceito de *ordem* no qual o sistema pode ser considerado em equilíbrio. Para René Thom (Pessis-Paternak, 1991) a noção de ordem é antes de mais nada morfológica, e, em último caso, geométrica, relativa. De modo que “*em um sistema qualquer, a desordem perfeita, absoluta na micro-escala de estudo, pode numa escala macroscópica, ser considerada uma ordem perfeita, porque todos os seus pontos têm as mesmas propriedades observáveis*”. Por exemplo, na escala de poro as forças capilares são importantes quando comparadas com as forças da gravidade que atuam nas paredes dos macroporos (Kirkby); mas quando aumentamos a área de estudo de alguns metros quadrados, o perfil do solo é menos sensível à macroestrutura do solo e atua de forma mais uniforme (Figura 3).

**Dominante** - existem diferentes *forças atuantes* que tendem a dominar os processos nos vários níveis de escala, impondo limitações sobre a validade das relações matemáticas com base na evidência empírica observada numa dada escala (Klemes, 1983). Quando é idealizado um sistema particular, a sua *estrutura* é a primeira característica a ser estabelecida. Esta idealização se baseia nas unidades onde se produzem os fluxos ou caminhos preferenciais de energia. A maioria dos modelos definem dois domínios bem característicos, sendo um deles um domínio pouco hierarquizado, onde existe uma predisposição para os fluxos interagir *através*

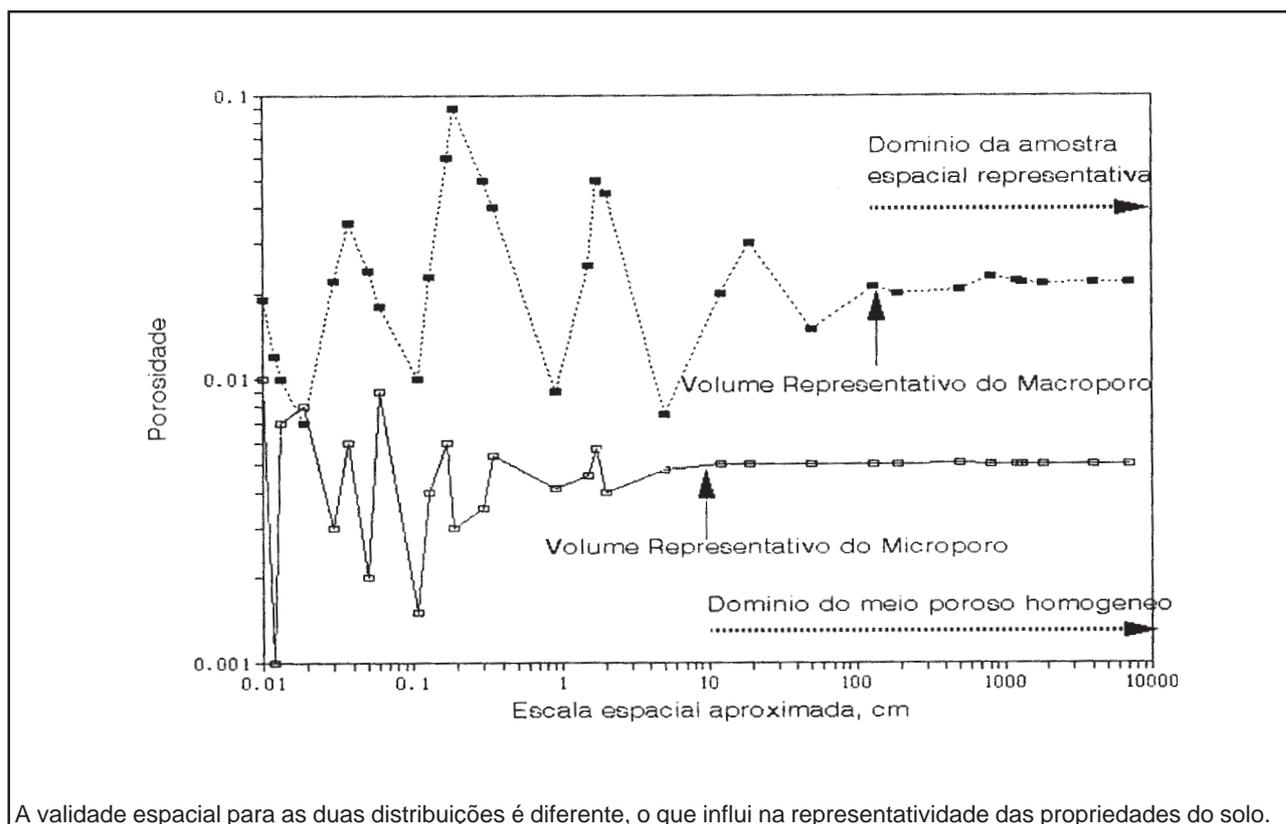
dele, e outro domínio, bem hierarquizado, onde existe uma preferência pela condução dos fluxos *por meio* dele.

Os domínios de um sistema superficial se compõem de fluxos verticais e fluxos horizontais (Becker, 1992; Vörösmarty et al., 1993). Estes últimos são caracterizados por caminhos preferenciais (domínio mais hierarquizado) e por uma estrutura mãe (ou domínio pouco hierarquizado) que geralmente contém o domínio hierarquizado. Fluxos de macroporos e “piping” (ver Mendiondo e Tucci, 1997, b, nesta edição) na microescala hidrológica como a rede de drenagem dentro da bacia hidrográfica dentro da mesoescala representam exemplos simples desta generalização que apresentam os sistemas físicos (Tabela 2).

**Sistêmico** – a relação entre escalas tempo/espço é frequentemente escolhida de forma independente, dificultando o entendimento do fenômeno natural (Klemes, 1983). O conceito de *holismo* (Odum, 1982; Capra, 1982) ressalta que o sistema todo representa *mais* que a simples soma de suas partes. Enfatiza, assim, as interações das componentes, levando a uma noção de natureza multivariada de processos. A vertente hidrológica é um exemplo típico de sistema, já que solo, água, vegetação e atmosfera interagem, definindo entidades geomorfológicas características (Chevallier, 1990). Essa concepção parte da idéia de *diversidade* (IGBP, 1993), quando se refere à natureza de múltiplas variáveis que influem nas respostas dos sistemas naturais.

**Transdisciplinar** – a formação de profissionais é compartimentada, enquanto os processos na micro, meso e macro envolvem diferentes disciplinas do conhecimento (ver Tabela 3).

O desafio de entender interações entre uma grande diversidade de processos e escalas requer que hidrólogos, meteorólogos e ecologistas “*interatuem sem os limites tradicionais*” de suas disciplinas particulares (IGBP, 1993). Até o momento os experimentos



**Figura 3. Domínios de variabilidade espacial adotando dois sistemas de distribuição de poros (adaptado a partir de Bevem e Germann, 1982).**

**Tabela 2. Exemplo da visão hierárquica dos sistemas hidrológicos (a partir de Bevem e Germann, 1982, e Vörösmarty et al., 1993).**

Escala	Componentes	
	Não preferencial (hierarquia baixa)	Preferencial (hierarquia alta)
Coluna de solo	Matriz de solo	Macroporo
Vertente	Matriz do solo	Rede de "piping"
Bacia	Vertente	Rede de Drenagem
Região	Domínio Vertical	Domínio Horizontal

foram conduzidos na microescala, que é onde existe maior falta de comunicação entre os referidos profissionais (Nemec, 1994). A falta de comunicação se deve a dois aspectos: *semântico*, que é o significado diferente que se dá nessas disciplinas ao conceito de escoamento, e *epistemológico*, devido a

tendência natural de cada pesquisador ignorar conhecimentos e métodos adquiridos em outra disciplina. As duas causas limitam a interdisciplinaridade nas geociências e, de forma secundária, atingem à conceituação de multiescala.

### Elementos quantitativos

A abordagem quantitativa envolve os seguintes aspectos: (i) as escalas naturais; (ii) as hierarquias escalares; (iii) as transições escalares e; (iv) heterogeneidades.

**Escalas naturais** - Existem três conceitos relativos ao termo "escala" (Blösch e Sivapalan, 1995):

- *escala de observação;*
- *escala do processo, e*
- *escala de modelação.*

Tabela 3. Definições dos tipos de escalas segundo diferentes disciplinas hidrológicas. Adaptado a partir de IGBP (1993) e Celia et al.(1993).

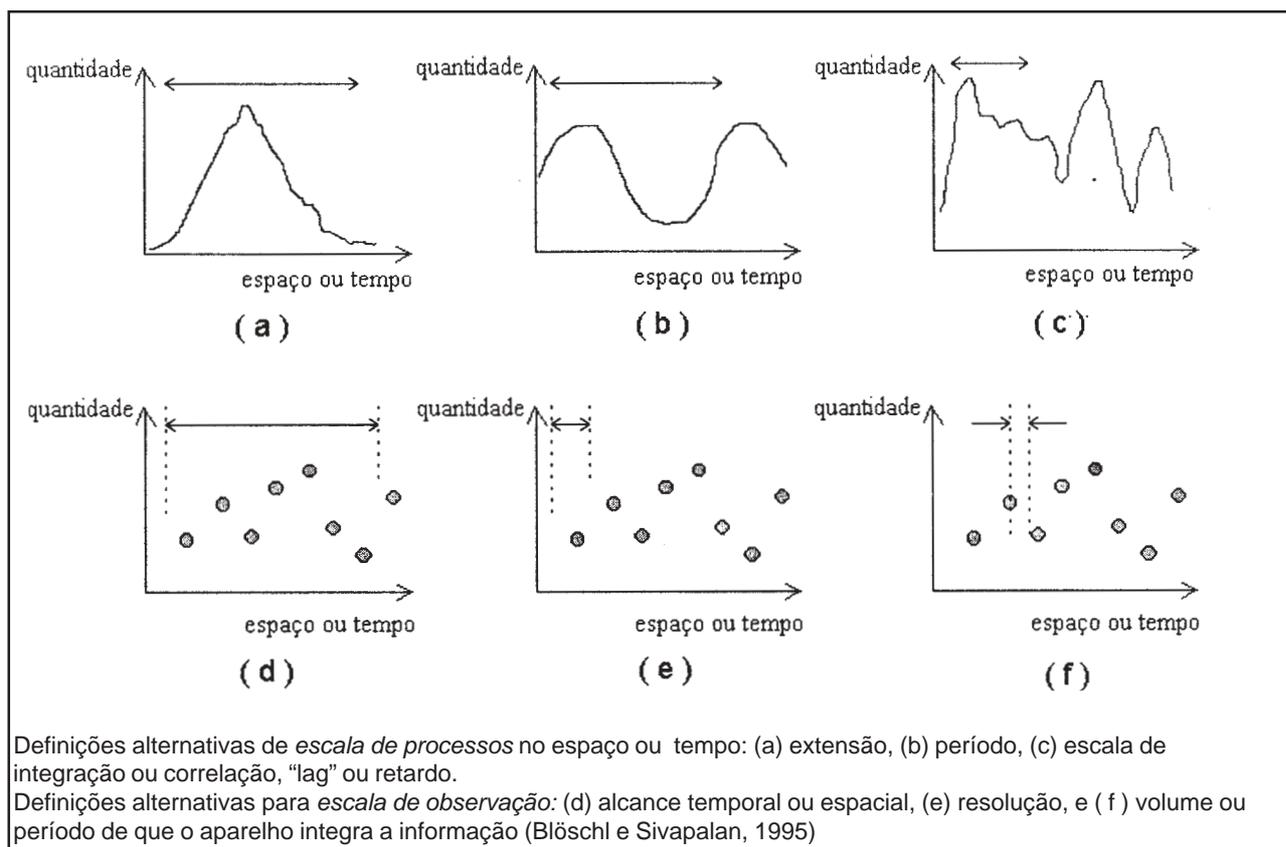
ESCALAS BÁSICAS			Escala Espacial (km)	Áreas e Assuntos	Principais Fontes de Dados
Hidrometeorologia	Hidrologia Superficial	Hidrologia Sub-superficial			
			10 <sup>5</sup>	Escala Global GCMs	Dados de Satélites
			10 <sup>4</sup>	Escala Continental	
			10 <sup>3</sup>	Escala Regional	
			10 <sup>2</sup>	Camada Limite Planetária	Fotografias Aéreas
			10	Bacia Hidrográfica	
			1	Paisagens	
			10 <sup>-1</sup>	Escala de Parcela	Dados de Campo
			10 <sup>-2</sup>		
			10 <sup>-3</sup>	Escala pontual do <i>continuum</i>	
			10 <sup>-4</sup>		
			10 <sup>-5</sup>	Escala de Laboratório	

A escala de observação é a escala registrada pelos diferentes instrumentos de medição que são o tempo e o espaço n-dimensional. Por exemplo, a área de captação é a representação bi-dimensional de uma escala espacial, uma expressão prática para individualizar a abrangência de processos de transformação chuva-vazão numa bacia natural.

A escala espacial (ou temporal) do processo se refere a) a uma extensão (ou duração), b) a um período no espaço (ou no tempo) ou c) relativo a uma escala de correlação (Figura 4). Com relação à escala espacial do

processo ela existe quando: (i) as observações estão baseadas numa dada agregação e distribuídas no espaço; (ii) quando ocorre um certo grau de correlação entre as observações (Cressie, 1991). Essas duas hipóteses de *estruturalidade e aleatoriedade* (Henley, 1980), são aplicadas à Teoria das Variáveis Regionalizadas nas geociências.

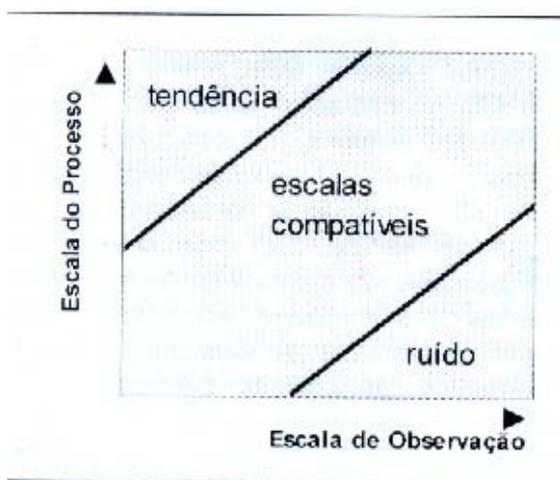
A Figura 5 mostra uma ilustração simples da relação entre a escala de observação e do processo. Os processos que superam o alcance temporal ou espacial aparecem como tendências nas amostras. Por outro lado, os



**Figura 4.** Três definições alternativas de *escala de processos* no espaço ou tempo e *escala de observação*.

processos menores que a resolução de amostragem aparecem como ruído ou aleatoriedade, definindo regiões características.

Por último, a *escala de modelação* é a escala de observação escolhida para avaliar um dado processo, procurando ter compatibilidade entre o processo e a amostragem. A escala de modelação é obtida conforme o objetivo do estudo e fatores físico/econômicos.



**Figura 5.** Escala de processos versus escala de observação (Blöschl e Sivapalan, 1995).

**Hierarquias escalares** - representam o arranjo que os sistemas naturais apresentam para captar, transformar e liberar os fluxos de matéria e energia (Odum, 1982). A hierarquia fica condicionada aos diferentes compartimentos físicos onde a energia que percorre o sistema é transformada. Assim, o *arcabouço natural* dos sistemas onde estas relações ocorrem recebe o nome de *estrutura*. A estrutura por si não pode representar todas as interações entre as unidades do sistema, e é necessário definir quais são as

componentes e as relações entre eles através dos fluxos de energia que definem a *função*.

A *hierarquia estrutural* é a ordem natural que apresentam as unidades físicas do sistema, que podem ser decompostas em sucessivas sub-unidades embutidas (Wheatcraft e Cushman, 1991). Exemplos de hierarquias estruturais são: o arranjo das partículas do solo; as estruturas em blocos de um horizonte pedológico; os armazenamentos hidrológicos num sistema concentrado como a interceptação vegetal, a detenção superficial, etc. A rede de drenagem numa bacia hidrográfica é o exemplo típico de hierarquia estrutural.

Por outro lado, a *hierarquia funcional* está associada à ordem intrínseca existente nos processos transporte, isto é, dos fluxos de energia. Exemplos podem ser vistos nos fluxos entre as partículas do solo, as interações dos fluxos internos numa vertente de cabeceira e fluxos de energia a nível de modelos globais.

As hierarquias funcionais e estruturais estão subdivididas em hierarquias discretas e hierarquias contínuas (Torgersen, 1994). As *hierarquias discretas* formam um conjunto finito de sub-unidades embutidas ou de sub-processos funcionais. Estas hierarquias são representadas pelas quantidades de energia através das variáveis de estado, específicas a um nível de escala, associadas ao sistema no tempo e no espaço. Por exemplo, tomemos uma escala representativa do tamanho de poro, considerada microscópica num enforque hidrológico. Ao mudarmos no sentido das escalas maiores, somente algumas porções da informação são transmitidas para os níveis ou escalas maiores. Essa *perda de informação*, associada nas hierarquias mais altas, manifesta-se na aparição de *novas variáveis constitutivas*, representando a informação dos níveis de partida.

As *hierarquias contínuas* representam o número de sub-unidades e de sub-processos que não apresentam limites finitos e permitem a continuidade das equações dinâmicas. Elas permitem que a informação de cada nível seja comprimida ou expandida

e, de alguma forma, transmitida escalarmente. Em contra partida, a informação não pode ser decomposta como no caso discreto porque as hierarquias contínuas caracterizam-se pela alta correlação entre as escalas.

Os sistemas naturais apresentam esta organização intrínseca e são inerentemente mais complexos porque não podem ser decompostos. Assim, as suas variáveis constitutivas manifestam-se como vetores que dependem do espectro de freqüência espacial onde atuam (Torgersen, 1994; Davis et al., 1994). A vantagem de tratar o sistema contendo uma hierarquia discreta é que assim podemos desacoplar as escalas e estudar a informação propagada às outras escalas.

**Transição escalar** – ao passar de uma escala para outra, as heterogeneidades mudam, mas a continuidade do fenômeno é a mesma. É por isso que se postula a *invariância escalar* como uma simetria estatística que possuem os sistemas naturais e complexos (Davis et al, 1994). Estes métodos tratam de encontrar a *semelhança própria* ou *autosimilaridade* (Voss, 1988) através de previsões cujos resultados são próximos às observações empíricas. Mas pela dinâmica dos sistemas precisa-se de generalizações de multiescala para as situações práticas.

Na transformação chuva-vazão, os processos de multiescala apresentam uma dinâmica não-linear o que não permite a mencionada simetria (NRC, 1991). Assim, quando são encontradas mudanças abruptas nas heterogeneidades e nos valores de referência que adimensionalizam as equações, pode-se estar assistindo a uma transição de escala. Um dos critérios de análise de multiescala é estimar os momentos estatísticos das variáveis envolvidas. Para diferentes escalas de análise, encontram-se os momentos estatísticos de ordem “n”. Obtém-se a declividade entre escala e o momento estatístico específico. A declividade desse tipo de curva é plotada com a ordem dos momentos estimados, obtendo-se um gráfico similar ao da Figura 6. Nesta figura

existe uma reta representando a tendência constante dos processos com a escala, chamada de teórica. Os dados reais apresentam um comportamento não-linear a medida que aumenta a ordem dos momentos estatísticos, indicando o aumento da variabilidade espacial dos processos a medida que diminui a escala.

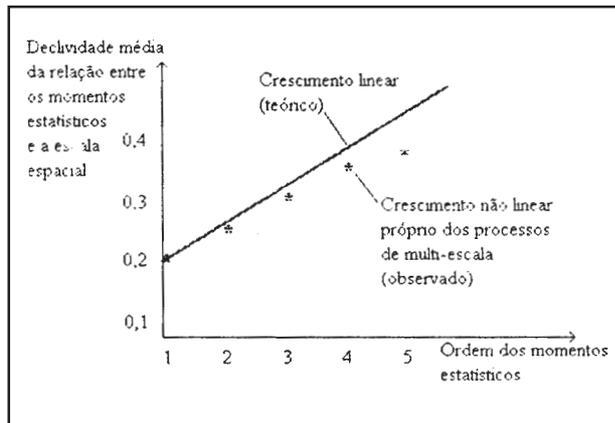


Figura 6. Padrão de semelhança própria e de multiescala (NRC, 1991).

Encontrar os pontos de mudança de tendência, na hipótese de tendência estatística constante, ajudam a: (i) discriminar a mudança no grau e número de heterogeneidades nas dimensões hierárquicas, (ii) as fronteiras das distintas escalas, e; (iii) a integração do processo de uma escala para outra, introduzindo a idéia de *transições escalares* (Bear, 1972; van Wirdum, 1991; Vörösmarty et al., 1993). Esses pontos de inflexão não são iguais para todas as variáveis estudadas; eles dependem de fatores estruturais (como topografia, pedologia e parcelamento do solo) e de fatores funcionais (fluxos de energia e de matéria dos ciclos físicos e bioquímicos). As transições escalares definem a forma da qual é transferida a informação entre vários níveis de escala. Sua importância reside em que os processos dominantes em cada uma das escalas vizinhas podem ter uma ordem de magnitude comparável (Torgersen, 1994).

Na vertente de cabeceira, as fronteiras escalares dos processos podem mudar de um evento para outro, e mesmo durante um

evento, devido aos diferentes padrões espaço-temporais das precipitações e do estado antecedente da bacia. Isto faz com que cada tormenta seja única e diferente das ocorridas na bacia. Assim, as escalas de integração dos processos se acomodam à dinâmica da vertente, não permanecendo constantes no tempo e no espaço (Carling e Beven, 1989). Já numa simples área de estudo os seus limites são fixos, dados pela sua área. Embora nestas sejam aplicáveis os modelos hidrológicos, sua principal restrição sobressai na impossibilidade de distinguir a dimensão hierárquica funcional, quando os dados observados necessitam ser generalizados para várias escalas.

**Heterogeneidades** - quando as heterogeneidades são evidentes, pode-se subdividir grandes bacias e ajustar os parâmetros das sub-bacias conforme os registros históricos. Os métodos de subdivisão são mais empíricos que conceituais e dependem mais da disponibilidade de dados que da física do problema (Song e James, 1992). Os principais aspectos que caracterizam as heterogeneidades de um sistema hídrico são:

- variabilidades;
- descontinuidades;
- processos.

**Variabilidades** - o clima, a topografia, os solos e a geologia variam no espaço e no tempo sobre um *continuum*, assim como o escoamento gerado a partir de uma área é governado por combinações locais desses fatores.

**Descontinuidades** - o impacto hidrológico produzido pelas variabilidades é amplificado pelas fronteiras e/ou limites de cada fator, como: os diferentes tipos de solos, as formações geológicas, diferentes coberturas de solo; que afetam os diversos fluxos internos e externos do sistema.

**Processos** - a heterogeneidade é maior devido aos fatores que afetam processos específicos, tais como as propriedades físicas, químicas e biológicas do sistema a nível de microescala.

As categorias encontradas no campo e parametrizadas nos modelos hidrológicos são (Philip, 1980):

### Heterogeneidade Determinística (hDET)

- as variações no tempo e no espaço das propriedades dos solos podem ser consideradas conhecidas e podem ser modeladas de forma sistemática a partir do seu entendimento e de elementos quantitativos observados. Exemplos de algumas dessas heterogeneidade são: fluxos instáveis, níveis freático próximos à superfície ou um comportamento de histérese.

### Heterogeneidade Estocástica (hEST) - a

variabilidade espacial das propriedades dos solos é considerada irregular, envolvendo várias escalas e não é perfeitamente conhecida. Os elementos estocásticos podem formar parte das condições iniciais do sistema. A forma mais simples de hEST é denominada *homogeneidade não uniforme* (termo aparentemente contraditório) já que suas propriedades estatísticas são consideradas independentes da sua posição espacial e do tempo, mas existem formas complexas de hEST em que a aleatoriedade apresenta uma tendência sistemática.

Como o processo estocástico se baseia nos princípios de estacionariedade e ergodicidade (Wheatcraft e Tyler, 1988), isto implica que a heterogeneidade é vista como um comportamento periódico no espaço e que produz uma escala de correlação finita. Assim, a *visão tradicional* permite que a heterogeneidade seja homogênea para determinado intervalo. A *heterogeneidade fractal* não satisfaz estes princípios porque pressupõe uma semelhança própria. Isto é, exibe um padrão comum num intervalo grande de escalas sem encontrar homogeneidade numa escala determinada (Tabela 4).

**Tabela 4. Visão das heterogeneidades (adaptado a partir de Wheatcraft e Tyler, 1988).**

Tradicional	Fractal
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hipóteses de ergodicidade e estacionariedade.</li> <li>• Escala de correlação finita.</li> <li>• Depende da escala</li> <li>• Abordagem de contínuo através dos valores médios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não requer uma hipótese que implique comportamento homogêneo.</li> <li>• Escala de correlação pode não ser finita.</li> <li>• Não depende da escala analisada.</li> <li>• Problemas no cálculo do valor médio já que o volume ou superfície de controle não é definido deterministicamente</li> </ul>

## ASPECTOS QUANTITATIVOS NA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Na simulação dos sistemas hidrológicos em diferentes escalas, os principais aspectos quantitativos são:

- incertezas,
- sensibilidade às condições iniciais,
- a universalidade das equações; e
- parâmetros constitutivos.

### Incerteza hidrológicas

A diferença entre as estatísticas da população e da amostra é a incerteza da estimativa (Yevjevich, 1972). As incertezas dos modelos hidrológicos em diferentes escalas podem ocorrer devido a: (i) variabilidade dos parâmetros; (ii) formulação do modelo; (iii) as variáveis de entrada.

Quando alguns dos componentes mencionados é estimado de forma inadequada, os outros componentes do modelo são forçados a compensar este problema. Em consequência, os modelos perdem a sua interpretação física. (Beck, 1987; Haan, 1989, Beven e Binley, 1991). Em muitas simulações é comum o erro na avaliação da

distribuição temporal e espacial da precipitação. Em consequência, existe a tendência do usuário do modelo em modificar os parâmetros do modelo para compensar esse erro, distorcendo seus valores, visando buscar um hidrograma calculado próximo do observado. Esse processo é ainda mais sério quando o modelo assim ajustado é utilizado na estimativa de outros eventos.

### **Sensibilidade extrema das condições iniciais**

A aleatoriedade e a resposta caótica de um sistema dinâmico dependem das condições iniciais (Tong, 1990). As condições iniciais sempre são afetadas por certa imprecisão: não somos capazes de distinguir a condição inicial real de outras condições iniciais próximas dela. Por conseguinte, não cabemos qual das previsões possíveis é correta (Ruelle, 1991). Em sistemas aleatórios fortemente não-lineares, a incerteza inicial pode levar erros a longo prazo.

Em sistemas quasi-lineares e de baixa inércia o efeito das condições iniciais é menor e seu erro se dissipa após o tempo de transporte do fluxo através do sistema. Por exemplo, na simulação do processo precipitação-vazão, a tendência é de que o efeito do erro das condições iniciais se dissipe após o tempo de concentração, para o escoamento superficial. Assim, respostas hidrológicas são consideradas *bem comportadas* (Philip, 1992; Graysson et al, 1992). Os hidrogramas são relativamente suaves, não caóticos, já que a saída é resultado da variabilidade pontual integrada sobre uma área.

Nos sistemas naturais fortemente não-lineares uma pequena mudança na condição inicial leva habitualmente a uma mudança tal que as predições a longo prazo se tornam completamente vãs (Ruelle, 1991). Esta demonstração, feita no século XIX por Hadamard, ressuscita a observação de Poincaré que o acaso e o determinismo tornam-se compatíveis mediante a falta de

previsão a longo prazo: “*Uma causa muito pequena, que nos escapa, determina um efeito considerável que não podemos deixar de ver, e então dizemos que esse efeito se deve ao acaso*”.

### **Universalidade das condições físicas de escoamento**

A maioria dos modelos são construídos numa escala de resolução pouco densa e dessa maneira existe uma variabilidade interna, de *sub-pixel*, que não chega a ser resolvida. Assim é importante entender a interação entre a dinâmica não resolvida e a dinâmica explicitamente resolvida pelo modelo através do conceito de universalidade (Beckie et al, 1994). Universalidade é a propriedade de um sistema físico, que permite mudar a sua descrição de uma escala menor para uma escala maior, sem resolver de forma explícita a dinâmica de pequena escala.

A universalidade válida para um modelo pode ser construída se a dinâmica resolvida é suficientemente independente dos detalhes da dinâmica a nível de *sub-pixel*. Neste caso, um modelo é composto por uma estrutura universal e pelos seus parâmetros, sendo que estes representam os efeitos da dinâmica não resolvida do modelo.

Na escala de poro (Tabela 5) a dinâmica universal é aquela que acontece nas escalas moleculares, representada pela viscosidade  $\nu$  e densidade  $\rho$  (Abbott e Basco, 1989). A dinâmica não-universal é afetada por: forças dominantes nas grandes escalas, as condições iniciais e a geometria do domínio. Os parâmetros são insensíveis a estas condições de macroescala, já que para a maioria das moléculas, uma partícula de fluido *não sente* as condições iniciais ou da geometria.

Para processos pontuais e um fluido newtoniano o modelo é universal e se baseia nas equações de Navier-Stokes. Para aplicações práticas estas equações são simplificadas, como no escoamento unidimensional (Dooge, 1986; Abbott e Basco,

1989). No meio poroso, é usada uma linearização apropriada para chegar à Lei de Darcy (de Marsily, 1982)

**Tabela 5. Estruturas universais e não universais (Beckie et al, 1994).**

Escala	Dinâmica Universal: Parâmetros	Dinâmica Não-Universal
Pontual	Nível Molecular ( $\rho, \nu$ )	Escala de Poro
Espacial	Nível de Poro ( $Ks$ )	Escala de Bloco de solo

Os fluídos newtonianos turbulentos possuem uma forte universalidade, onde a dinâmica numa faixa de escalas menores não são independentes e assim são estatisticamente idênticos para todos os sistemas. A forte universalidade dos fluídos turbulentos é usada para desenvolver expressões para a viscosidade turbulenta efetiva, usadas nos modelos de hidráulica computacional com poucos graus de liberdade. É importante notar que para uma dada classe de fluxos (isótropicos e homogêneos) as viscosidades efetivas são independentes do início do problema.

No fluído turbulento pode-se construir um modelo sem medições da viscosidade usando a forte universalidade existente. No fluxo sub-superficial é necessário medir ou caracterizar de alguma forma o tensor da condutividade hidráulica para um sistema particular (Beckie et al, 1994). A universalidade do fluxo sub-superficial é menor que a dos fluídos turbulentos, tanto para uma fase gasosa (atmosfera) como na fase líquida (rios e mares). Essa dificuldade delimita a modelação do escoamento sub-superficial da bacia vertente e do escoamento fluvial (ver Tabela 6).

Essa conclusão simples tem importância fundamental: ela delimita o campo da modelação do i) escoamento sub-superficial (meio de vertente), ii) escoamento da rede de canais (meio fluvial) e iii) o fluxo nas camadas atmosféricas (meio gasoso).

Ante o problema das diversas escalas do Ciclo Hidrológico, a escala desta transição - a vertente hidrográfica - é um dos desafios da *teoria de escala*.

### Parâmetros constitutivos e efetivos

É possível construir um modelo com um comportamento de grande escala sem resolver a sua dinâmica interna. Esta é uma hipótese fundamental da física do contínuo (Hipótese de Universalidade). Haan (1989) indica alguns fatores que dificultam esta parametrização: (i) critérios para selecionar os parâmetros; (ii) correlação existente entre os parâmetros; (iii) número de cálculos envolvidos; (iv) restrições sobre os valores apropriados de alguns parâmetros; (v) a não existência de um único conjunto de parâmetros que satisfazem a função objetivo; (vi) os limites de validade para as funções hidrológicas contidas no modelo; (vii) erros nos dados.

**Tabela 6. Conceituação, domínios e heterogeneidades do escoamento em algumas escalas hidrológicas.**

ESCALAS OU DOMÍNIOS	Heterogeneidades Dominantes	
	Estrutural	Funcional
Meio Poroso	Lei de Darcy; Equação de Richards	Casos especiais: interação rio-aquífero
Vertente Hidrográfica	?	?
Meio Fluvial	Casos especiais: ressalto hidráulico	Equações de Saint Venant

Os sinais de interrogação indicam postulados ainda em desenvolvimento.

Duas abordagens são usadas para chegar a uma estrutura universal. Uma *metodologia reducionista* requer que a estrutura de grande escala seja deduzida a partir de um modelo de pequena escala (Beckie et al, 1994). Uma abordagem *empírica*

observa o sistema numa escala maior e postula relações dimensionalmente consistentes entre as variáveis de estado. Só depois de especificar a estrutura universal podem ser determinados os parâmetros pelos procedimentos inversos, desenvolvidos nas grandes escalas.

Num sistema inteiramente linear as equações para a microescala podem ser integradas espacialmente e, assim, no modelo de macroescala, encontrar uma relação para os valores médios das variáveis dependentes. Os macro-parâmetros são valores médios dos correspondentes micro-parâmetros. Isto não representa uma vantagem, já que as equações lineares podem, facilmente, ser formuladas também na macroescala. Mas a dinâmica natural dos fenômenos em diferentes escalas interage de forma não-linear (NRC,1991; Beckie et al.,1994).

A medida que aumenta a área de estudo, cada vez mais é questionada a suposição que o valor medido de um determinado parâmetro (por exemplo a condutividade hidráulica saturada,  $K_s$ ) é representativo do valor de *todos* os elementos pertencentes a uma dada escala. Isto ocorre porque a variabilidade espacial do parâmetro é demasiado grande para ser representado por um simples valor. Podem-se medir muitos pontos para determinar a distribuição dos parâmetros, mas isto torna-se inviável devido ao custo. Assim, pode-se considerar que os valores dos parâmetros são “valores efetivos” (Grayson et al,1993) que resultam da relação de entrada-saída de um sistema particular, mas que não representam necessariamente o resultado de uma quantidade fisicamente medível.

## MÉTODOS PARA ABORDAR AS ESCALAS HIDROLÓGICAS

Existem quatro abordagens para tratar os processos nas diferentes escalas (Klemes,1983; Dick e Baumert, 1991; Sivapalan,1993):

- integrações;

- degradações;
- modelos embutidos;
- modelos acoplados e paralelos.

**Integrações** – (no sentido ascendente, Processo “ $\Sigma$ ”, ou “up-scaling”). As integrações são feitas nas escalas temporais e com resoluções espaciais determinadas, *das escalas menores para as escalas maiores*, através de parâmetros constitutivos. Através de uma síntese matemática, combina os fatos empíricos e o conhecimento disponível na microescala, com teorias capazes de prever eventos numa escala maior, como por exemplo a nível de caia hidrográfica. As limitações são: (i) exigência de um tratamento matemático para as simplificações e aproximações; (ii) falta de conhecimento total do comportamento de alguns processos no espaço. O modelo hidrológico distribuído é uma tentativa de integração espacial, pois utiliza células (dimensões variadas) que são integradas pela continuidade até a dimensão da bacia hidrográfica de interesse. Em cada célula, no entanto, os processos são tratados de forma uniforme.

**Desagregações** – (no sentido descendente, “ $\partial$ ”, ou “down-scaling”). A informação do modelo macro, numa resolução a nível de pixel, é detalhada a uma resolução de sub-pixel, através de alguma abordagem empírica ou estatística, com relações extraídas de observações e do funcionamento do sistema de uma forma distribuída. A vazão específica média de enchente varia com a área da bacia. Ao regionalizar esse valor com base em dados de várias bacias, pode-se estabelecer uma relação que extrapole para diferentes dimensões. No entanto, quando são utilizadas equações de regressão, existem incertezas fora da faixa de valores utilizados no ajuste, pois podem aparecer heterogeneidades no processo.

**Modelos Embutidos** – As entradas e saídas de um número finito de escalas (por exemplo, bacias) podem ser observadas ou simuladas de forma embutida (uma dentro da outra).

Cada uma destas áreas expressa uma síntese dos processos internos, mostrando como determinados parâmetros físicos mudam o valor médio e a variância na medida que a área aumenta ou diminui. Isto indica a mudança escalar quando se procura transferir a informação. Assim, as relações obtidas podem estabelecer a estrutura de modelos e parâmetros na simulação dos processos.

**Modelos acoplados e paralelos** – Quando deseja-se uma discretização muito detalhada de um sistema dentro de uma área específica e as suas condições de contorno não estão bem definidas, pode-se utilizar da técnica de resolver o problema em duas etapas. Por exemplo, nos Modelos Globais Climáticos (GCMs), quando é desejado conhecer o comportamento detalhado de uma região utiliza-se uma malha grossa para simular todo o globo e estabelecer as condições de contorno da região, que então é simulada com uma malha mais detalhada (Modelos de Mesoescala).

### **Parametrização na microescala hidrológica**

Para agregar micro-processos necessita-se a definição de propriedades da escala do *continuum*. No fluxo não-saturado são agregados os efeitos dos movimentos na interface na escala de poro, devido ao comportamento dos fluídos. Esta quantificação na escala de poros é de difícil avaliação na prática devido a grande variabilidade do solo. Geralmente, define-se uma malha numérica na escala de campo que leve em conta a variabilidade nas propriedades materiais. Como a maioria dos ensaios de laboratório consideram uma escala da ordem dos centímetros e o tamanho mais comum das malhas usadas na escala de campo fica em torno dos 10 metros (Celia et al, 1993), utilizam-se valores médios dentro desta última discretização. Portanto, as propriedades podem ser definidas em escalas superiores onde foram feitas as observações.

Os métodos de cálculo do valor médio podem ser classificados em (Wheatcraft e Cushman,1991):

**Métodos Hidrodinâmicos Generalizados (mHG)** – A vantagem destes métodos hidrodinâmicos é que não necessitam ter uma hierarquia discreta de escala. As teorias baseadas na hidrodinâmica generalizada são válidas em todas as escalas, e podem ser reduzidas com base nas teorias clássicas para os fluxos no meio poroso, em especial quando o meio poroso apresenta padrões de semelhança intrínseca (Wheatcraft e Tyler,1988).

**Métodos de Homogeneização (mH)** – Deduzidos a partir da teoria das perturbações (Bear,1972; Hassanizadeh e Gray,1979; Dooge,1986), o resultado final do processo é igual ao obtido através do valor médio no volume unitário. Se considerarmos o meio com uma micro-estrutura com período " $l$ ", sendo " $L$ " a dimensão característica da macroescala,  $L \gg l$ . Definindo " $\xi = l/L$ ", quando " $\xi \rightarrow 0$ " caracteriza uma "transição escalar" a partir da micro para a macro-escala. Estes métodos são conhecidos pelo nome de REA, *Representative Elementary Area*, (Wood et al., 1988), ou de *Threshold Process* (Grayson et al., 1993). Para Beckie et al (1994), estas abordagens ignoram as interações entre a dinâmica resolvida na escala de discretização do modelo e a variabilidade intrínseca, própria da escala de sub-pixel. Assim, deveriam usar-se para derivar modelos de grandes escalas sempre que a dinâmica possua uma faixa espectral na escala de resolução capaz de ser modelada.

**Métodos Estocásticos (mE)** – Assumem que as equações tradicionais de transporte, desenvolvidas através do cálculo do valor médio, sejam válidas na escala local. O sistema pode ser visto como um conjunto das estruturas, consideradas homogêneas e isotrópicas. O tamanho médio dessas estruturas é função da escala integral que é a escala na qual o meio apresenta-se periódico

no espaço. A heterogeneidade na escala de campo resulta da distribuição estatística dessas estruturas. Por exemplo, no meio subterrâneo a informação perdida na transição de escalas é a informação perdida na transição de escalas é a dispersividade (Wheatcraft e Cushman, 1991), função da média, da variância e covariância da distribuição da condutividade hidráulica, com distribuição espacial anisotrópico. É feita a suposição de que  $K_s$  é uma variável aleatória ergódica e com componente pseudo-estacionário. Isto implica que a macrodispersividade é dependente da escala numa *visão micro* com relação a escala integral, Logo, é quase constante na macroescala que é várias vezes maior que a escala integral.

### Parametrização na mesoescala hidrológica

Song e James (1992) sugerem que a escala ótima numa bacia com variabilidades e descontinuidades é determinada pelo desempenho em conjunto de múltiplos processos que geram o escoamento. A determinação dessa escala dependerá de:

**Modelação Física de Agregação (MfA)** – a partir de células pequenas são aplicadas as equações hidrodinâmicas. Logo são agregados os resultados locais para obter o total para toda a bacia. Como as equações diferenciais usadas discretizam com um valor médio do elemento, é de se esperar melhores resultados a medida que o tamanho da célula diminui, o que nem sempre ocorre devido a anomalia dos dados e da estrutura dos modelos.

**Modelação usando uma Desagregação Determinística (MdD)** – relações empíricas são aplicadas a toda a bacia e depois desagregadas para bacias menores. As equações podem ser representadas como, por exemplo:  $Q = f_1("λ", I)$ , onde  $Q$  é um vetor temporal dos escoamentos simulados;  $I$  é uma entrada da matriz espaço-tempo de precipitação ou dados climáticos, e  $λ$  é o vetor

espacial dos parâmetros dos modelos que permanece constante através do tempo e pode ser representada como  $λ = f_2(P_c)$ , sendo que  $P_c$  representa as características físicas da bacia. Se  $λ$  depende só das características do sistema e estas são espacialmente uniformes, pode-se dizer que  $λ$  é um valor simples. A variabilidade de valores de  $P_c$  resulta em diferentes valores de  $λ$  quando a bacia é modelada por partes.

**Modelação usando uma Desagregação Estocástica (MdE)** – pede-se selecionar a distribuição de probabilidades para cada parâmetro e, assim, utilizar o modelo obtido a partir de valores aleatórios para cada distribuição escolhida. Por exemplo,  $Q = f_3$

$[λ(μ, σ^2), I]$  onde  $μ$  e  $σ^2$  representam as matrizes das médias e variâncias dos parâmetros. Como as médias e as variâncias determinadas através da calibração dependem da escala usada, pode-se comparar os valores de  $Q$  em diferentes escalas com os valores observados para encontrar os resultados que melhor ajustam. Nesta escala ótima o modelo representaria melhor a maioria dos processos, já que os parâmetros estariam melhor correlacionados com as características das bacias. Desta maneira, a variância dos parâmetros é usada para representar a heterogeneidade.

### Parametrização na macroescala hidrológica

Para uma estruturação correta numa macroescala (Klemes, 1983), a transferência dos modelos hidrológicos e aplicações a longo prazo, devem satisfazer : (a) estrutura com fundamento físico, com condições de validação dos seus componentes; (b) os parâmetros devem ser derivados com base em condições físicas e geograficamente transferíveis. Com relação aos modelos hidrológicos de macro escala, que possibilidades existem para que uma estruturação seja adequada, com sentido

físico, tanto no sentido vertical como na horizontal?

Existem três abordagens principais para agregar processos a nível macro (Dick e Baumert, 1991): (i) um *tratamento estatístico das heterogeneidades*, através da formulação de funções de densidade de probabilidade, tanto das medições como dos atributos superficiais em diferentes pontos; (ii) identificação de sub-áreas com *processos hidrológicos dominantes* e configurações de parâmetros característicos (REA); e (c) *uso do sensoriamento remoto*, já que o pixel é um espaço que integra informação em si mesmo.

Por definição, o modelo de Balanço Hídrico é mais aplicável quando os problemas dominantes se referem aos fluxos de energia e de umidade no sentido vertical. O modelo de transporte envolve predominantemente os fluxos no sentido horizontal da superfície terrestre. A modelação vertical é atribuída a qualquer área de interesse (unidades, parcelas, vertentes, etc.), mas os modelos de transporte devem associar-se com sistemas hidrológicos (bacias hidrográficas por exemplo). Becker e Nemeč (1987) sugerem o conceito de modelação de dois níveis:

**Domínio de fluxos verticais** – pode ser aplicada qualquer discretização espacial de igual comportamento hidrológico (com relação às propriedades da superfície terrestre, por exemplo radiação, evaporação, índice foliar, precipitação, etc.). Assim, as variáveis são estimadas ponto a ponto, com uma mínima propagação de efeitos na vizinhança. Nos estudos das bacias hidrográficas, aquelas partes que pertencem a este domínio devem ser acopladas a um *modelo de transporte horizontal*.

**Domínio de fluxos horizontais** – desenvolvida a partir das nascentes das bacias, em especial na modelação regional e continental. Implica uma consideração da dinâmica de fluxos de energia e matéria entre as áreas elementares: propagação de ondas em canais, dinâmica da camada limite

turbulenta, oscilações climáticas regionais (El Niño, La Niña, etc.)

A principal tarefa na modelação dos fluxos verticais (Becker, 1992) é estimar qual esquema de discretização espacial é aplicado para garantir um cálculo com embasamento físico da heterogeneidade espacial e evitar, assim, uma errada concepção do processo. Aplicar malhas regulares, com resolução cada vez maiores, sempre é possível. Entretanto, não significa necessariamente maior eficiência. Dessa maneira, uma abordagem semi-distribuída é uma solução muito útil.

## CONCLUSÃO

A análise apresentada neste primeiro artigo introduz conceitos e nomenclaturas sobre as escalas hidrológicas sem buscar uma proposta única de um tema em desenvolvimento. A linguagem aparentemente hermética é resultado de um grande número de definições. A maioria delas, comuns em várias geociências, salienta um denominador comum: os problemas de escala pertencem ao âmbito da interdisciplinariedade.

No entanto, é difícil interpretar o Ciclo Hidrológico se são menosprezados os contextos e os aspectos quali-quantitativos. Assim, o estudo de *escalas hidrológicas* implica o estudo dos *processos hidrológicos*. Por exemplo, os modelos matemáticos baseiam-se em parâmetros ajustados para condições específicas e as relações entre parâmetros e características físicas são, a maioria das vezes, extremamente frágeis.

A construção da inexistente Teoria de Escala deve ser direcionada para interpretar três pontos básicos:

- representatividade,
- diversidade, e
- transferência dos processos nas áreas elementares do Ciclo Hidrológico.

A Hidrologia dos últimos anos esteve direcionada para o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas matemáticas computacionais para solucionar problemas

específicos na área de engenharia. A pesquisa que envolve a observação e o entendimento do Ciclo Hidrológico na bacia hidrográfica praticamente foi abandonada, pelo custo e tempo necessário para obtenção de resultados publicáveis. Como atualmente necessitamos responder questões tais como a alteração das características das bacias e as escalas dos processos físicos, a desfasagem científica é marcante e deve ser recuperada.

## AGRADECIMENTOS

O trabalho foi financiado pela CAPES através de bolsa de mestrado. A motivação e colaboração recebida dos Professores Robin Clarke, IPH-UFRGS, Fazal Chaudhry, USP São Carlos, e as oportunas sugestões de dois revisores anônimos foram de grande valor na redação deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. 1993. The electronic encapsulation of knowledge in hydraulics, hydrology and water resources. *Adv.in Water Res.*, Amsterdam, v.16, p.21-39.
- ABBOTT, M., BASCO, D. 1989. *Computational fluid dynamics; an introduction for engineers*. London: Longman, and New York: Wiley, 450 p.
- BEAR, J. 1972. *Dynamics of fluid in porous media*. Elsevier: New York, 784 p.
- BECK, M. 1987. Water Quality Modeling: A review of the analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, Washington, V.23,n.8, p.1393-1442, Aug.
- BECKER, A. 1992. Criteria of a hydrologically sound structuring of large scale land surface process models. In: O'Kane (ed.) *Advances in theoretical hydrology: a tribute to James Dooge*. Amsterdam: Elsevier. Ch.7, p.97-111.
- BECKER, A., NEMEC, J. 1987. Macroscale hydrologic models in support to climate research. In: Vancouver International Symposium, 1987. *The influence of climate change and climate variability: proc.*, Wallingford, IAHS n.168, p.431-445.
- BECKIE, R., ALDAMA, A., WOOD, E. 1994. The universal structure of the groundwater flow equations. *Water Resources Research*. Washington, v.30, n.5, p.1407-1419, May.
- BEVEN, K. 1987. Towards a New Paradigm in Hydrology. In: ROME INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1987. *Water for the future: hydrology in perspective: proceedings*. Wallingford: IAHS Publication n.164, p.393-403.
- BEVEN, K., GERMANN, P. 1982. Macropores and Water Flow in Soils. *Water Resources Research*, Washington, V.18, n.5, p.1311-1325, Oct.
- BEVEN, K., BINLEY, A. 1991. The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. In: Beven e Moore (Ed.), *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*. Chichester: John Wiley & Sons, p.227-246.
- BLÖSCHL, G., SIVAPALAN, M. 1995. Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review. *Hydrological Processes*, v.9, p.251-290.
- CAPRA, F. 1982. *O ponto de mutação*. São Paulo: Cultrix, 445p.
- CARLING, P., BEVEN, K. 1989. The hydrological, sedimentological and geomorphological implication of floods: an overview. In: Beven, K., Carling, P.(ed.) *Floods*. New York: John Wiley, p.1-9.
- CELIA, M., RAJARAM, H., FERRAND, L. 1993. A multi-scale computational model for multiphase flow in porous media. *Adv. Water Res.* Amsterdam, V.16, p.81-92, Jan.
- CHEVALLIER, P. 1990. *Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte d'Ivoire)*. Th.Dr. Paris: Orstom, 331p.
- CHOW, V.T. 1959. *Handbook of applied hydrology*. New York: Mc Graw Hill.
- CHRISTOFOLETTI, A. 1980. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgar Blücher. 150p.
- CRESSIE, N. 1991. *Statistics for Spatial Data*. New York: John Wiley & Sons, 898 p.
- DAVIS, A., MARSHAK, A., WISCOMBE, W., CAHALAN, J. 1994. Multifractal Characterizations of Non-stationary and Intermittency in Geophysical Fields: Observed, Retrieved, Simulated. *Jour. G. Res.*, Washington, V.99,n.D4,8055-8072,
- DE MARSILY, G. 1982. Spatial variability of properties in porous media: a stochastic approach. In: J.Bear e M.Y. Corapcioglu (ed.). *Fundamentals of transport phenomena in porous media*. Dordrecht: Martinus Nijhoff,

- p.719-770. (NATO SERIES. E: Applied Sciences, n.82).
- DICK, S., BAUMERT, H. 1991. A Concept for Hydrological Process Studies from Local to Global Scales. In: Vienna Int.Symposium, 1991. *Hydrological Interaction Between Atmosphere, Soil and Vegetation*: proceedings. Wallingford: IAHS Publication n.204, p.31-42.
- DOOGE, J. 1986. Looking for Hydrological Laws. *Water Resources Research*. Washington, V.22, n.5, p.46S-58S, Aug.
- DOOGE, J. 1988. Hydrology in perspective. *Hydrological Sciences Journal*. Wallingford, V.33, n.1, p.61-85, Feb.
- GRAYSON, R.; MOORE, I., McMAHON, T. 1992. Physically Based Hydrologic Modelling: II. Is the Concept Realistic? *Water Resources Research*. Washington, V.26, n.10, p.2659-2666, Oct.
- GRAYSON, R; BLÖSCHL, G; BURLING, R., MOORE, I. 1993. Process, Scale and Constraints to Hydrological Modelling in GIS. In: Vienna International Symposium, 1993. *HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*: proceedings. IAHS Publ. n. 211, p.83- 92.
- HAAN, C. 1989. Parametric Uncertainty in Hydrologic Modelling. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1988. *Modeling Agricultural, Forest and Rangeland Hydrology*, proceedings. American Society of Agricultural Engineers, Chicago, p. 330-346.
- HASSANIZADEH, M., GRAY, W. 1979. General conservation equations for multi-phase system: 1. Averaging procedure. *Advances in Water Resources*. Amsterdam, V. 2, p.131-144, Sep.
- HENLEY, D. 1980. *Non parametric geostatistics*. New York: Springer-Verlag
- HILLEL, D. 1991. Research in soil physics: a review. *Soil Science*. v.151, n.1, 30-34, jan
- IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme). 1993. A study of global change. In: International Council of Scientific Unions, 1993. *Report n. 27*. Stockolm, 54p.
- KIRKBY, M. 1988. Hillslope Runoff Processes and Models. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, V. 100, p.315-339.
- KLEMES, V. 1983. Conceptualization and Scale in Hydrology. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, V.65, p.1-23
- LEOPOLD, L., LANGBEIN, W. 1963. *The concept of entropy in landscape evolution* Washington: U.S. Geol Surv. Prof. Pap., 500 p.
- LEWIN, R. 1993. *Complexity: Life at the Edge of Chaos*. New York: McMillan Publishing Company, 240 p.
- MENDIONDO, E., TUCCI, C. 1997. Escalas Hidrológicas. II: Diversidade de Processos na Bacia Vertente, ABRH – RBRH, (nesta edição).
- NEMEC, J. 1994. Climate variability and water resources: do we communicate in the field? (HAPEX, FIFE, GEWEX, GCIP, and what next? *Hydrological Sciences Journal*. Wallingford, V.39, n.3, p.193-198, Jun.
- NRC (National Research Council). 1991. *Opportunities in Hydrologic Sciences*. Washington: National Academy, 348 p. Comitee on Water Science and Technology Board; Comission on Geoscience, Environment and Resources.
- ODUM, H. 1982. *Systems Ecology*. New York: John Wiley, 644p.
- PESSIS-PASTERNAK, G. 1991. *Du chaos à l'intelligence artificielle: quand les scientifiques s'interrogent*. Paris: La Découverte, 259 p.
- PHILIP, J. 1980. Field Heterogeneity: Some Basic Issues. *Water Resources Research*, Washington, V.16, n.2, p.443-448, Apr.
- PHILIP, J. 1992. Hydrology and the Real World. In: O'Kane, P.(ed.). *Advances in Theoretical Hydrology: a tribute to James Dooge*. Amsterdam: Elsevier. Ch.13, p.201-207. (European Geophysical Series on Hydrological Sciences, 1).
- RUELLE, D. 1991. *Hassard et Chaos*. Paris: Odile Jacob, 224 p.
- SHORT, D., CRAPPER, P., KALMA, J. 1993. Moving between scales in surface hydrology: the need to reformulate physics. In: YOKOHAMA INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1993. *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales*: proceedings. Wallingford: IAHS Publ. n.212, p.503-511.
- SIVAPALAN, M. 1993. Linking Hydrologic Parametrizations Across a Range of Scales: Hillslopes to Catchment to Region. In: YOKOHAMA INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1993. *Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales*: proceedings. IAHS Publications, n.212, p.115-123.
- SONG, Z., JAMES, D. 1992. An Objective Test for Hydrologic Scale. *Water Resources Bulletin*, AWRA. Bethesda, V.28, n.5, p.833-843, Oct.

- SPOSITO, M. 1994. Steady groundwater flow as a dynamical system. *Water Resources Research*, Washington, v.30, n.8, p.2395-2401, Aug.
- TONG, H. 1990. *Non linear time series: a dynamical system approach*. Oxford University Press, 554p. (Oxford Statistical Science Series, 6).
- TORGERSEN, T. 1994. Modeling and testing coupled hydrological processes. *EOS. Trans. of America Geophysical Union*. Washington, V.75, n.7, p.73-76, Feb.
- TUCCI, C.E.M. 1993 Hidrologia: Ciência e Aplicação. In: C.Tucci (org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Edit.Universidade, Cap.1, p.25-34.
- UHLENBECK, G. 1973. Problems of statistical physics. In: J. Mehra (ed.) *The physicist's conception of nature*. Dordrecht-Holland: Reidel, p.501-513
- VAN WIRDUM, G. 1991. Interface theory and the base state of fen mires. In: VIENNA INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1991. *Hydrological Basis of Ecologically Sound Management of soil and groundwater: proceedings*. Wallingford: IAHS Publ.202, p.173-186.
- VÖRÖSMARTY, C., GUTOWSKI, W., PERSON, M., CHEN, T., CASE, D. 1993. Linked atmosphere-hydrology models at the macroscale. In: YOKOHAMA INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1993. *Macroscale Modelling of the Hydrosphere: proceedings*. Wallingford: IAHS Publication n.214, p.3-27.
- VOSS, R. 1988. Fractals in nature: from characterization to simulation. In: O. Peitgen, D.Saupe (ed.). *The science of fractal images* New York: Springer-Verlag, p.21-70
- WHEATCRAFT, S., TYLER, S. 1988. An explanation of scale-dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry. *Water Resources Research*, Washington, V.24, n.4, p.566-578., Apr.
- WHEATCRAFT, S., CUSHMAN, A. 1991. Hierarchical approaches to transport in heterogeneous porous media. *Review of Geophysics Supplement*, Washington, p.263-269.
- WOOD, E., SIVAPALAN, M., BEVEN, K., BAND, L. 1988. Effects of Spatial Variability and Scale with Implications to Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, V. 102, p.29-47.
- YEVYEVICH, V. 1972. *Probability and Statistics in Hydrology*. Water Res. Publ., Fort Collins, CO

## **Hydrological Scales. I: Concepts**

### **ABSTRACT**

*Hydrologic processes have a different behavior depending on the system scale. The scale of the hydrologic processes can be analysed based in the following contexts: "Disciplinar-Historical-Conceptual" (DHC matrix). Due to the system complexity some elements have to be approached in both qualitative and quantitative manner. In a sequence of three papers, the first presents some qualitative elements: discrete, relativist, dominant, complexity, systemic and transdisciplinary. Also, it is outlined eight quantitative aspects. Four of them are common to several geosciences: observational scale and fluctuation scale, scale hierarchies, scale transition and heterogeneities. The other four are more specific to hydrological modelling: prediction uncertainties, universality of flow equations, constitutive parameters and high sensibility to initial condition. It is outlined how these aspects depict the qualitative-quantitative dialectic above, with emphasis on rainfall-runoff processes as well as the micro-meso- and macro-scale methods.*