

Estratigrafia de Seqüências Aplicada à Caracterização de Aquíferos: um Estudo de Caso na Área de Candiota, Rio Grande Do Sul

MICHAEL HOLZ¹; JULIANO KUCHLE²; ALAN PATRICK BISCHOFF³;
PAULA DARIVA DOS REIS⁴; & RUY PAULO PHILIPP¹

1. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001, CEP 91540-000, Porto Alegre, Brasil
2. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, CEP 91509-900.
3. Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
4. Curso de Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001, CEP 91540-000, Porto Alegre, Brasil.

(Recebido em 05/05. Aceito para publicação em 06/06)

Abstract- Detailed stratigraphic analysis of the Early Permian (Artinskian/Kungurian) succession of the intracratonic Paraná Basin in southernmost Brazil has been applied focusing stratigraphic characterization of potential aquifers. In the study area, the counties of Candiota and Hulha Negra, in the southwestern region of Rio Grande do Sul state, the sedimentary succession (Itararé, Rio Bonito and Palermo units) is interpreted to have been formed in a shallow, wave-dominated sea, originated mainly in a mixed (tide and wave) influenced estuary setting. Four main depositional systems have been recognized: alluvial fan, fluvial-dominated delta, lagoonal estuary and barrier/shoreface.

The regional correlation of the lithofacies within the different depositional systems has led to a high-resolution stratigraphic framework, with three third-order depositional sequences (i.e., unconformity-bounded depositional packages formed during a complete cycle of falling and rising base level). The main sandbodies occur within sequence 2 which is formed by seven fourth-order parasequences, and at the base of the third sequence. Under the viewpoint of groundwater prospecting, the best sandbodies occur within parasequences 1, 2, 4 and 7. Based upon the stratigraphic characterization, optimal borehole locations are given, as well as estimatives on productive depths and water volume.

Keywords- Permian, Paraná basin, sequence stratigraphy, aquifers, groundwater.

INTRODUÇÃO

A estratigrafia de seqüências moderna tem sua origem nos estudos de Sloss *et al.* (1949) e de Vail e colegas (Payton, 1977), e se tornou ferramenta de aplicação universal – independente de escala – a partir dos trabalhos de Posamentier, Van Wagoner e outros (Wilgus *et al.*, 1988). Nestes trabalhos foram apresentados modelos dinâmicos que avançaram significativamente na análise de bacias sedimentares se comparada com a análise litoestratigráfica predominantemente usada até então, o que teve profundo reflexo positivo na prospecção de reservatórios de hidrocarbonetos e na sua caracterização geológica.

Inúmeros estudos a partir do final da década de oitenta demonstraram para a indústria do petróleo as vantagens da aplicação da estratigrafia de seqüências na análise de reservatórios, não apenas na fase de exploração, mas também na de exploração,

porque é possível sanar os problemas quanto à produtividade e potencialidade de poços, bem como reativar reservatórios antes considerados exauridos (*e.g.*, Posamentier & Chamberlin, 1993).

A metodologia da estratigrafia de seqüências, que trouxe avanços inestimáveis para a análise estratigráfica de reservatórios de hidrocarbonetos, pode significar igual revolução para a caracterização de aquíferos. O conhecimento da estratigrafia de uma região sempre foi a base para uma adequada avaliação dos recursos hídricos subterrâneos. Contudo, no Brasil, o enfoque no estudo da água subterrânea continua eminentemente litoestratigráfico. Com a aplicação das novas ferramentas de análise estratigráfica no estudo de aquíferos, os mesmos benefícios que a exploração/exploração de hidrocarbonetos experimentou, podem ser estendidos para a atividade ligada aos aquíferos.

É o que trata o presente trabalho: realizar um estudo-de-caso para mostrar até que ponto a estrati-

dos até arenitos com estratificação cruzada *hummocky* e lamitos. A descrição e interpretação desta faciologia são apresentados na tabela 1.

As associações naturais destas litofácies, obtidas a partir de dados em testemunhos e afloramentos e pela correlação estratigráfica, indicam que quatro principais sistemas deposicionais foram responsáveis pela sedimentação:

- (1) Um sistema de leques aluviais (subordinado);
- (2) Um sistema deltaico dominado pelo aporte, com camadas de carvão originadas nas planícies deltaicas;
- (3) Um sistema estuarino-lagunar (*lagoonal estuary system*), com uma ampla baía central e complexos de *bay head deltas*;
- (4) Um sistema de ilhas de barreira (*fore-shore/shoreface*) com *tidal inlets*.

A figura a seguir (Fig.2) ilustra a sucessão acima descrita em uma sondagem na porção sul da área de estudo. No perfil apresentado estão também ilustrados os dois potenciais aquíferos da região, a serem discutidos adiante no texto. Trata-se da sucessão arenosa do topo do sistema deltaico (fácies Gc e St), e o arenito de *shoreface* do sistema barreira-laguna (fácies Ss e St).

Estratigrafia de Seqüências

O intervalo estudado - compreendendo as unidades unidades litoestratigráficas Itararé, Rio Bonito e Palermo - comporta três seqüências deposicionais de terceira ordem (Fig. 3), inserida na seqüência deposicional de segunda ordem denominada Gondwana I por Milani (2000).

O limite de seqüências 1 (SB-1) é uma discordância regional marcada pelo contato entre a sucessão permiana e as rochas cristalinas proterozóicas do embasamento (ou localmente pelas rochas eopaleozóicas da Bacia do Camaquã), representando um hiato de até 300 milhões de anos.

O limite de seqüências 2 (SB-2) é marcado pelo contato entre lamitos e arenitos marinhos na base e arenitos flúvio-deltaicos no topo. Esse deslocamento de fácies marca uma discordância do tipo 1 de Van Wagoner *et al.* (1991), e é reconhecido na margem da bacia em todo Rio Grande do Sul e sul de Santa Catarina.

O limite de seqüências 3 (SB-3), no terço superior do intervalo estudado, é marcado pela ingressão de arenitos flúvio-deltaicos sobre arenitos finos marinhos.

A figura 3 resume a estratigrafia de seqüências da região estudada, mostrando as superfícies estratigráficas fundamentais, os equivalentes litoestratigráficos e a composição sistêmica das três seqüências deposicionais. Os potenciais aquíferos são os da seqüência 2 e na base da seqüência 3, razão pela qual estes intervalos estratigráficos foram mais detalhados.

Sete parasseqüências foram reconhecidas e mapeadas para a seqüência deposicional S-2 (Fig. 4). Como será visto adiante nesse trabalho, algumas parasseqüências são mais favoráveis do ponto de vista de sua potencialidade para formar aquíferos porque contêm fácies de reservatório em maior espessura e extensão areal; são elas as parasseqüências PS1, PS2, PS4 e PS7.

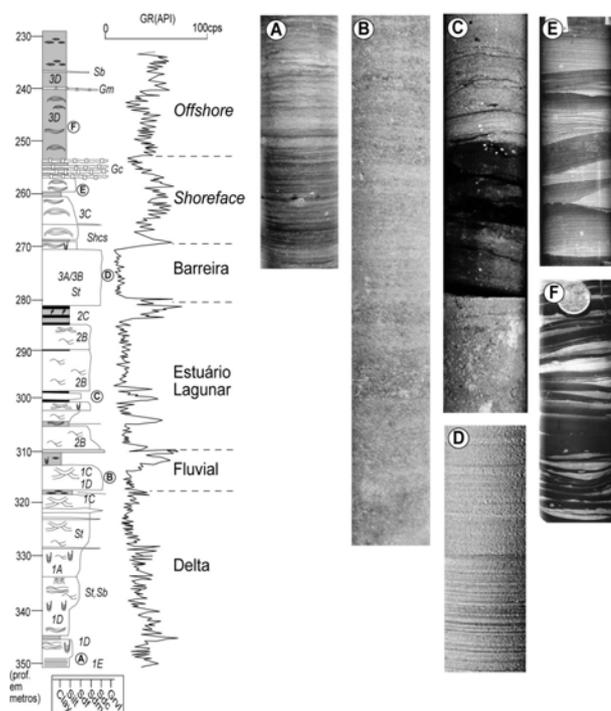


Figura 2– Exemplo da sucessão estratigráfica em uma sondagem na área de estudo. O sistema de leque não ocorre, mas os principais sistemas deposicionais estão bem representados.

Legenda do perfil litológico: G = gravel (matrix e clast-supported), S = sandstone, CC = coal, c = clast-supported, m = matrix-supported, t = trough cross bedding, w = wavy bedding, f = flaser bedding; 1 = lenticular bedding, s = swash cross stratification, hcs = hummocky cross bedding, b = bioturbado). Para detalhamento das fácies vide tabela 1.

1A, 1B, 2 A etc. representam os códigos dos sistemas e subsistemas deposicionais, vide tabela 2.

Legenda das fotografias de fácies: A – ritmos de prodelta, B – arenitos laminados de canal fluvial, C – carvão capeado por arenito lagunar, D – arenito quartzoso com laminação *swash* de *foreshore*, E – arenito de granulação fina com laminação *hummocky*, F – arenito de granulação muito fina e lamitos com laminação *wavy* por geradas por ondas, da zona de transição *shoreface inferior/offshore*.

Tabela 1 – Litofácies da sucessão analisada, fornecendo para cada fácies uma sucinta descrição e a respectiva interpretação do processo sedimentar gerador.

Sigla	litologia/textura	Estruturas sedimentares	Interpretação
Gm	Conglomerado matriz-suportado	None	Fluxo de detritos
Gc	Conglomerado clasto-suportado	Gradação normal, estratificação cruzada festonada	Migração de dunas subaquosas sob influência de regime de fluxo superior
Gi	Conglomerado com clastos intrabacinais		Retrabalhamento de sedimentos intrabacinais com moderada litificação
Sb	Arenito muito fino	bioturbação (<i>Diplocraterion</i> - ?)	Migração de <i>ripples</i> e dunas subaquosas sob regime de fluxo inferior Baixa taxa de sedimentação
St	Arenito fino a grosso	Estratificação cruzada festonada e planar	Migração de <i>ripples</i> e dunas subaquosas sob regime de fluxo superior
Sf	Arenito fino a médio, algumas vezes grosso	Estruturas <i>flaser</i> , algumas vezes com ocorrência de <i>drapes</i> de lama duplos	Alternância entre migração de <i>ripples</i> e decantação de sedimentos em suspensão
Sw	Arenito médio a fino	Acamamento gerado por fluxo combinado – oscilação e corrente – <i>wavy bedding</i> (incluindo HCS de pequena escala), alguns <i>planolites</i> e <i>skolithos</i>	Alternância no regime de fluxo sob influência de ondas
Ss	Arenito fino a médio	Estratificação cruzada de baixo ângulo (<i>swash</i>)	Deposição sob condições de alta energia (regime de fluxo superior)
Shcs	Arenito fino	Estratificação cruzada <i>hummocky</i> e <i>swaley</i> , algumas vezes fortemente sideritizadas	Decantação de sedimentos em suspensão, sob influência de ondas
SMhcs	Arenito muito fino com intercalação de pelito	Estratificação cruzada <i>hummocky</i>	Decantação de sedimentos em suspensão, sob influência de ondas
R	Ritmitos siltico-argilosos	Estratificação plano-paralela milimétrica, planos com estratificação irregular, freqüentes <i>slumpings</i>	Decantação de sedimentos em suspensão alternados com fluxos de baixa energia
MS	Arenito fino e pelito	Estrutura lenticular, algumas <i>climbing ripples</i> , freqüentes <i>slumpings</i>	Migração de <i>ripples</i> sob condições de baixa energia alternadas com a decantação de sedimentos em suspensão
Mb	Arenito muito fino e pelito	bioturbação (<i>Cruziana</i> - <i>Thalassinoides</i> e <i>Teichnicus</i>), alguma estrutura lenticular	Decantação de sedimentos em suspensão
MI	Pelito com arenito muito fino a fino	estrutura lenticular	Decantação de sedimentos em suspensão alternados com a migração de <i>ripples</i> sob condições de baixa energia
CC	Carvões e siltitos carbonosos	Marcas de raízes	Acumulação de restos vegetais e sedimentos finos

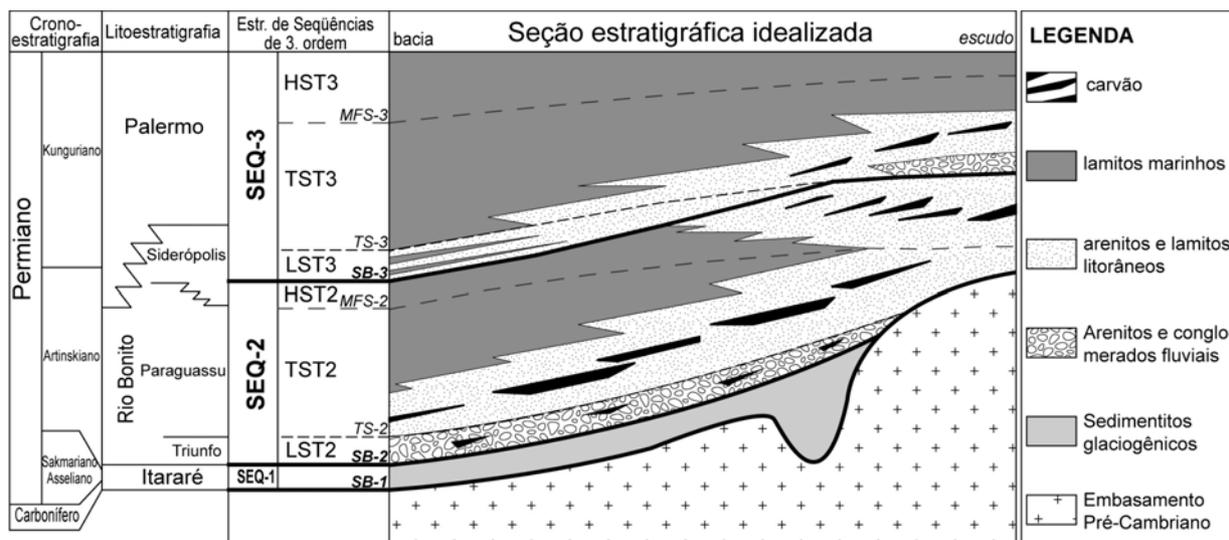


Figura 3– Litoestratigrafia e estratigrafia de seqüências da sucessão estudada, detalhando as três seqüências deposicionais e os respectivos sistemas deposicionais, conforme discutido no texto.

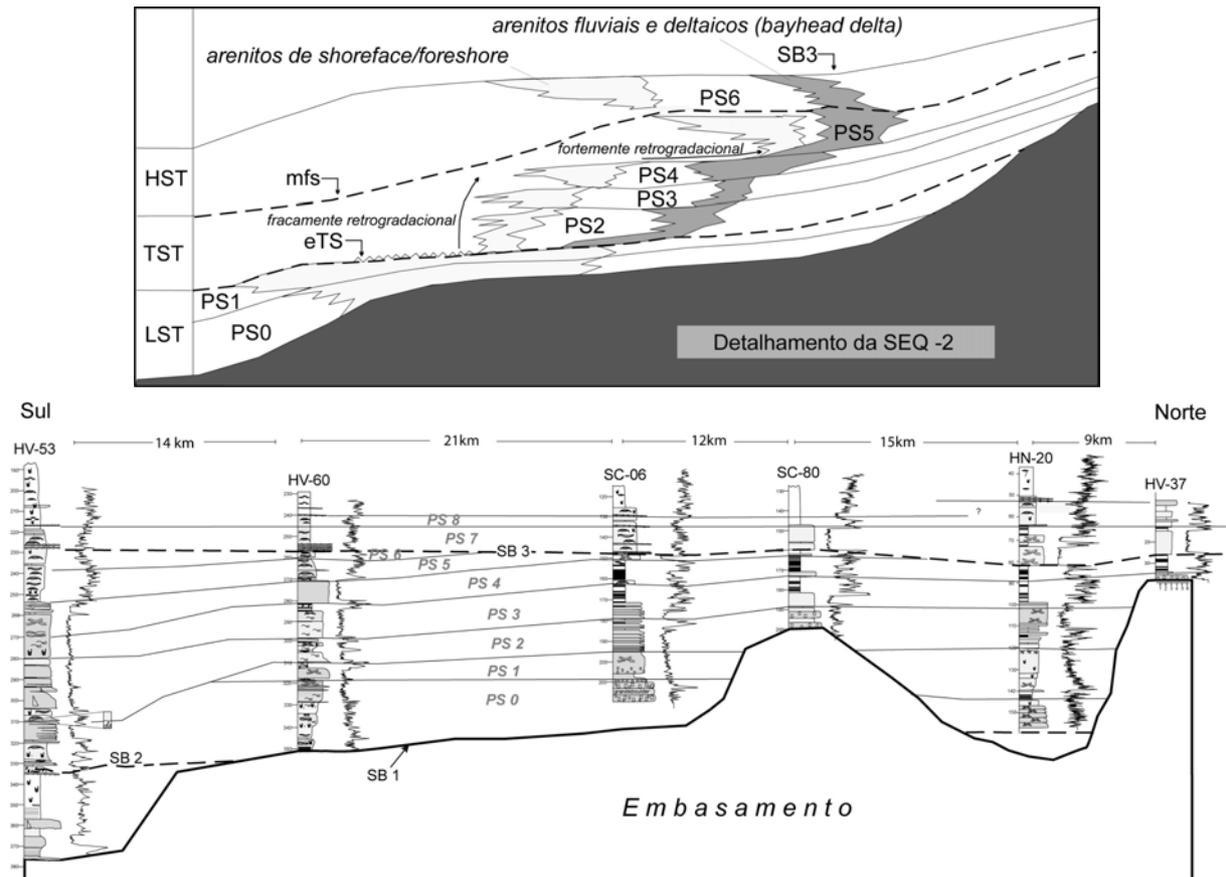


Figura 4 – Parassequências mapeadas para o principal intervalo estudado – a sequência deposicional SEQ-2 (em cima) e seção de correlação estratigráfica mostrando o posicionamento destas parassequências na área de estudo (embaixo) (modificado de Holz, 2003). Os melhores aquíferos são os corpos arenosos deltaicos das parassequências PS1 e PS2, e os arenitos de *shoreface* das parassequências PS4 e PS7.

ARCABOUÇO TECTONO-ESTRUTURAL

Para a confecção do arcabouço estrutural da área de estudo foi necessário realizar uma análise estrutural multi-escalar, em duas escalas de observação. As grandes estruturas da área foram reconhecidas em imagens de satélite e denominadas de *estruturas em megaescala*. Depois, estas estruturas foram analisadas em campo e denominadas de *estruturas em escala de campo*.

A metodologia de análise estrutural seguiu três etapas bem definidas, conforme apresentado abaixo:

- 1) **Primeira etapa:** análise dos elementos morfo-estruturais a partir da interpretação de imagens de satélite, cartas topográficas, fotografias aéreas e mapas geológicos da área de estudo. Esta análise visou reconhecer e dimensionar os lineamentos da área permitindo a geração de mapas temáticos e diagramas de rosetas para a região;
- 2) **Segunda etapa:** reconhecimento de falhas e fraturas em campo. Esta análise permite o reconhecimento dos aspectos geométricos das falhas e fraturas, quanto á sua direção e

mergulho;

- 3) **Terceira etapa:** construção e comparação de seções estratigráficas com *datum* estabelecido e seções geológicas que apresentem a configuração atual dos estratos. O reconhecimento das estruturas em sub-superfície torna-se bastante dificultado quando não existem seções sísmicas na área. Uma maneira de reconhecer falhas em sub-superfície consiste em comparar *datums* estratigráficos de superfícies cronoestratigráficas que correspondam a ambientes cuja paleobatimetria seja aproximadamente horizontal (como uma superfície de inundação máxima, ou uma parassequência portadora de camadas de carvão, por exemplo) com perfis geológicos que demonstrem a configuração espacial das litologias no tempo presente. Uma vez que se tem um arcabouço alinhado por uma superfície que corresponda a um determinado tempo geológico e esta superfície não mais se apresente contínua lateralmente nas seções geológicas, podemos sugerir a presença de falhas deslocando as litologias existentes, quando o estilo estrutural da região for predominantemente rúptil.

Estruturas em Megaescala

A partir do georeferenciamento e interpretação das fotografias aéreas da área, bem como de diferentes composições coloridas obtidas em imagens de satélite e mapas geológicos, foi confeccionado o mapa de lineamentos da área de estudo (Fig.5).

Este mapa evidencia a presença de uma grande estrutura de direção NE/SW com cerca de 35km de extensão no limite leste da área de estudo. Estruturas de menor porte (na ordem de 1 a 5km) ocorrem com frequência com distribuição regular, com *trends* preferenciais de direção NW/SE e NE/SW, conforme pode ser observado na figura 6, correspondente ao diagrama de rosetas de todos os lineamentos ocorrentes na área de estudo. Também é comum a ocorrência de estruturas de menor porte, com menos de 1km de extensão e *trends* concordantes com as estruturas maiores, distribuídas prefe-

rencialmente na zona correspondente ao embasamento da bacia aflorante e no centro da área em questão.

Estruturas em Escala de Campo

A análise das estruturas em escala de campo permitiu reconhecer o estilo geométrico das falhas que afetam a área de estudo, bem como a direção e mergulho predominante das fraturas ocorrentes e o basculamento das camadas sedimentares.

Para esta análise foram gerados diferentes estereogramas para cada tipo de estrutura, conforme apresentado na figura 7.

Analisando os resultados obtidos nos este estereogramas, podemos concluir que as principais estruturas, em escala de campo, apresentam direção preferencial NE/SW e NW/SE subordinada, ambas com alto ângulo de mergulho, correspondentes ao fraturamento sofrido pelas rochas da área de estudo.

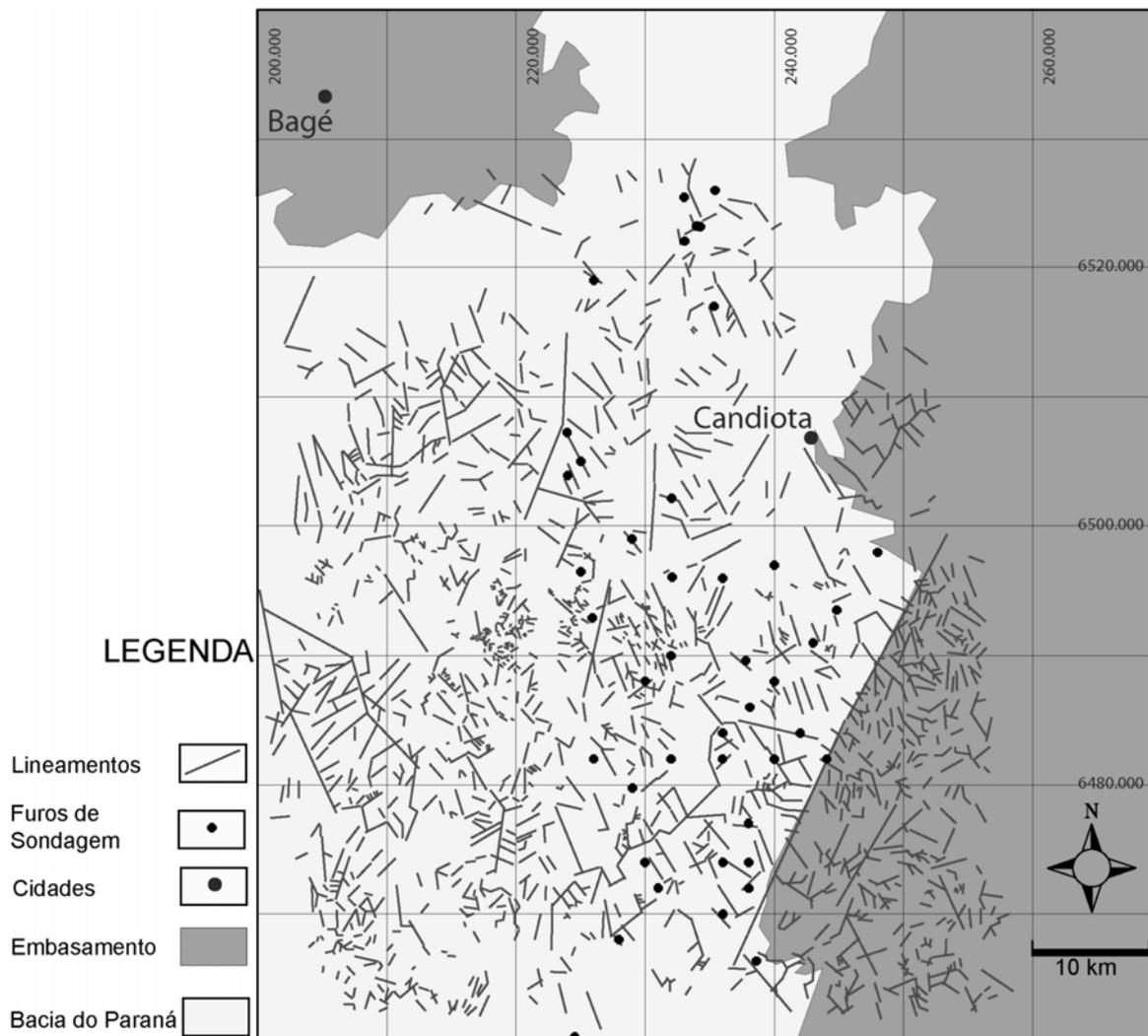


Figura 5– Mapa de lineamentos obtido a partir da compilação de imagens de satélite, fotografias aéreas e mapas geológicos da região de estudo.

Os indicadores cinemáticos foram analisados em dois pontos, em estrias de falhas normais. No primeiro ponto, as estrias mergulham aproximadamente para W, com cerca de 30 graus de inclinação, o que sugere que a direção de maior deformação encontra-se (pelo menos neste ponto) orientada em sentido E-W. Já no outro ponto analisado conseguiu-se apenas uma estria medida, esta mergulhando exatamente para SE, com 35 graus de inclinação, sugerindo que a direção de maior deformação neste ponto está orientada atualmente no sentido NW-SE.

Quanto ao basculamento das camadas sedimentares, em todos os pontos analisados verificou-se que as mesmas geralmente dispõem-se sub-horizontalmente. Quando esta regra é quebrada, o basculamento não ultrapassa mais do que 10 graus, não obedecendo a uma direção preferencial. Conclui-se, portanto, que o basculamento provavelmente seja oriundo de uma pequena rotação das camadas no próprio eixo da falha.

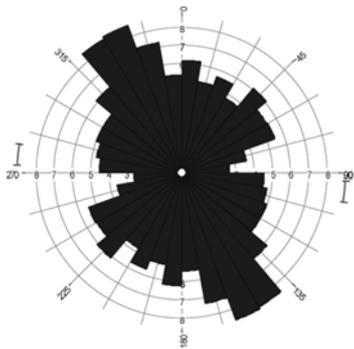


Figura 6– Diagrama de rosetas demonstrando a direção de todas as fraturas reconhecidas na região de estudo. Notar a forte tendência NW-SE. Diagrama confeccionado a partir do mapa de lineamentos da área, intervalo de classe 10°, tipo de dado: bidirecional.

Falhas em Sub-Superfície

Para análise das estruturas em sub-superfície, foram elaboradas seções *dip* e *strike* na área de estudo. A figura 8 mostra a locação de duas destas linhas.

Estas seções foram elaboradas utilizando-se dois tipos distintos de *datums* referenciais: um *datum* estratigráfico (correspondente a uma parassequência portadora de camadas de carvão) para a seção estratigráfica (*i.e.*, que mostra a configuração no Eo-Permiano), e um *datum* topográfico (tendo como referência a cota da boca das sondagens) para demonstrar a configuração espacial atual das litologias (Figs. 9 e 10). A comparação destas seções permite inferir falhas na área de estudo com rejeitos de até 130m, como pode ser visualizado nas referidas figuras.

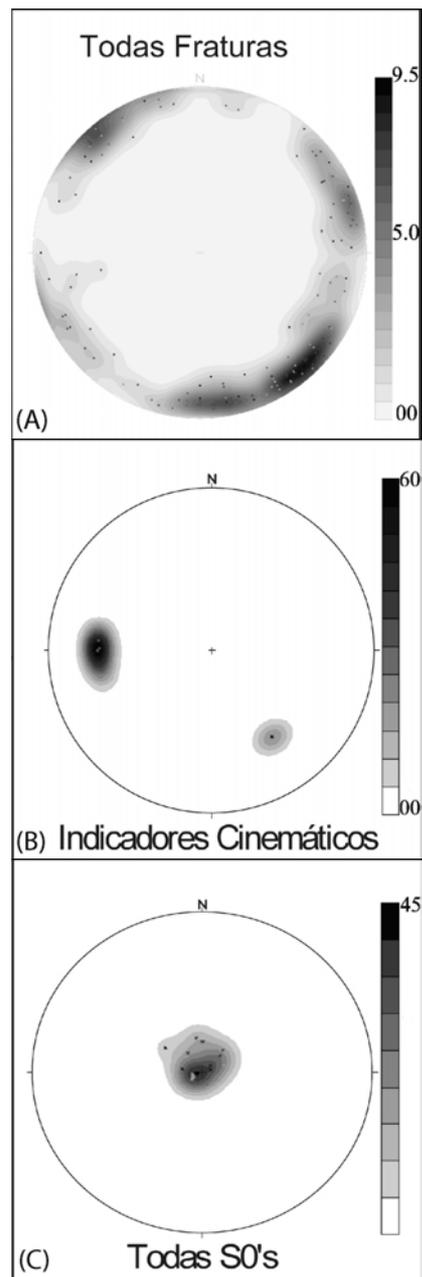


Figura 7– A - Estereograma demonstrando o padrão de fraturamento observado em campo. B - Estereograma demonstrando a direção dos indicadores cinemáticos observados em campo. C - Estereograma demonstrando o padrão de basculamento das camadas sedimentares observadas em campo. Projeções: Schmidt, número de pontos de B e C: 22.

Estilo Estrutural

A integração das interpretações em mega-escala, escala de campo e de sub-superfície permitem inferir as seguintes conclusões quanto ao estilo estrutural da área:

- *trends* NE/SW e NW/SE (subordinadas) descrevem a direção das estruturas da área de estudo;
- as fraturas apresentam-se concordantes aos *trends* principais sempre em alto ângulo de

mergulho;

- *trends* NE/SW e NW/SE (subordinadas) descrevem a direção das estruturas da área de estudo;
- as falhas são predominantemente de geometria normal;
- o basculamento das camadas é bastante suave, não alterando significativamente a estratigrafia original do intervalo de estudo;
- do Eopermiano ao recente algumas falhas se moveram com rejeito vertical de até 130m.

O bloco diagrama esquemático da área (Fig.11) demonstra que as estruturas condicionaram uma movimentação intensa em sentido *dip* da bacia desde o momento da sedimentação permiana até o presente. Este controle provavelmente já era ativo na época da sedimentação uma vez que é reconhecido que as primeiras unidades depositadas encontram-se confinadas em calhas estruturais, estas concordantes com o *trend* principal e com a direção das unidades litotectônicas mais antigas.

Em suma, a geologia estrutural da região estudada é bastante complexa. Os lineamentos principais NE e subordinados NW, reativados durante o paleozóico e em épocas posteriores, geraram um mosaico de blocos altos e baixos controlados também pelo tipo de litologia formadora do substrato da bacia.

Assim, a delimitação de blocos favoráveis à exploração de água nas parassequências com maior potencial para formar aquíferos deve levar esses dois fatores em consideração, já que as parassequências serão seccionadas pelos múltiplos planos de falha, conforme acima discutido. Assim, um detalhamento dos blocos é necessário para visualizar a compartimentação dos aquíferos pela tectônica superimposta.

Mapa de Relevo

Essa parte do trabalho visa identificar estruturas que podem servir de zona de recarga para o sistema de água subterrânea da região estudada.

Para a compreensão espacial das unidades geológicas aflorantes, juntamente com a observação de estruturas de relevo existentes na área de estudo, foi elaborado um Modelo Numérico de Terreno (MNT). A utilização de dados planialtimétricos tridimensionais é fundamental quando se trata de análises geológicas baseadas em dados de superfície e sub-superfície integrados.

O Modelo Numérico de Terreno foi gerado a partir da base de dados do projeto SRTM/NASA-

NIMA, processado pelo EROS DataCenter Lab e regulado pela USGS, imageados por interferometria de radar, com *3-arc second* de resolução (um ponto a cada 90 metros), fornecendo assim o dado bruto. Os modelos numéricos de terreno foram gerados em Surfer 8.0 por interpolação com o método *kriging* anisotrópico, mantendo o intervalo de dados de 90 metros. Os rios, drenagens, estradas, cidades e toponímia foram obtidos a partir da digitalização da carta Bagé (SH.21-Z-D) em escala 1:250000 do IBGE (1983) e georeferenciados em base AutoCAD.

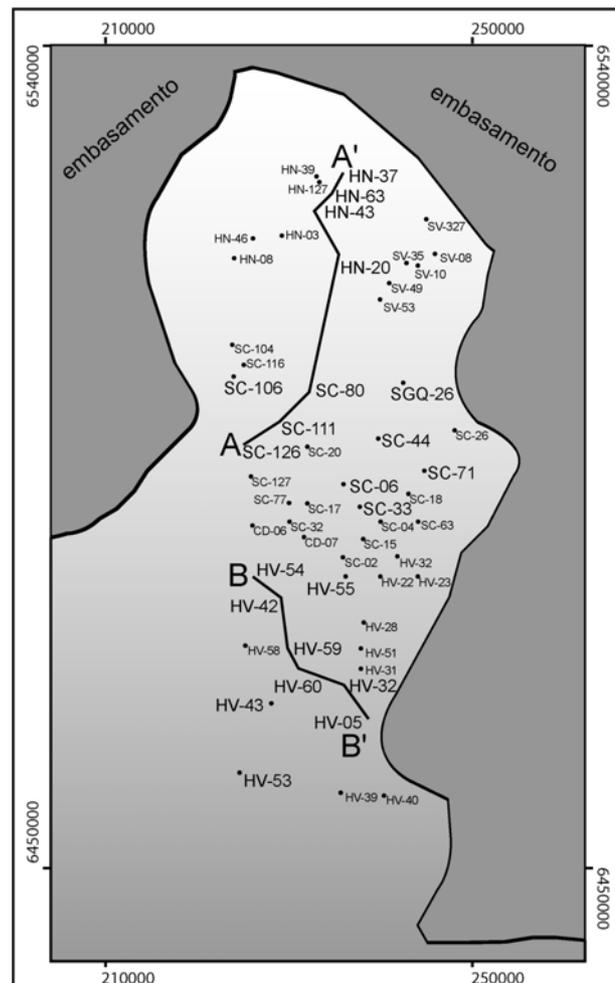


Figura 8– Localização de dois perfis de correlação (A-A'- *dip*, B-B'- *strike*) elaborados para a paleobaía de Candiota. A cor cinza-clara representa terras altas do embasamento onde não ocorreu deposição eopermiana. A linha A-A' é mostrada na figura 9, a B-B' na figura 10.

A figura 12 apresenta uma visão lateral do MNT elaborado para a área de estudo. A estruturação com um padrão NE é notável, com diferença de cotas da ordem de 60 metros no relevo, principalmente na região leste da área de estudo, onde ocorre o sistema de falha mais proeminente. Esta área constitui teoricamente a principal zona de recarga do sistema de água subterrânea da região. Cabe ressaltar que é precisamente dentro da teórica

zona de recarga que fica uma das maiores minas de carvão do país, a Mina de Candiota, minerada pela CRM (Cia. Riograndense de Mineração) para suprir a Usina Termoeletrica Presidente Médici, no mesmo município.

Mapas de Isópacas

Os mapas de isópacas foram elaborados a partir das espessuras das parasequências coletadas nos furos de sondagem descritos. As linhas de isoespessura foram obtidas a partir da interpolação dos dados de poço utilizando o algoritmo *kriging* anisotrópico com uso de todo o dado (*full data set*), sem filtragem ou *boundary search*. A malha dos *grids* gerados é de 500 X 500 metros, obedecendo a distribuição espacial dos dados de furos de sondagem. Nos mapas de isópacas, foi sobreposto o con-

torno do embasamento aflorante, coletado a partir dos mapas geológicos da área de estudo.

Conforme o arcabouço estratigráfico estabelecido no capítulo 4, foram elaborados um mapa de isópacas da SEQ-1 (Gr. Itararé – intervalo inferior não-abordado) e os mapas de isópacas das parasequências PS0 a PS7, mostrados na figura 13 e a seguir brevemente discutidos.

No mapa de isópacas da sequência S1 (sistema pro-glacial), observa-se a restrita ocorrência desta sequência deposicional e seu conseqüente baixo potencial para constituir aquífero. A sequência fez parte da análise estratigráfica por uma questão de completude do levantamento geológico realizado, mas não foi detalhada no presente estudo devido a extensão areal restrita e a relativa ausência de fácies com adequada permo-porosidade, i.e., fácies de reservatórios são ausentes naquela sequência.

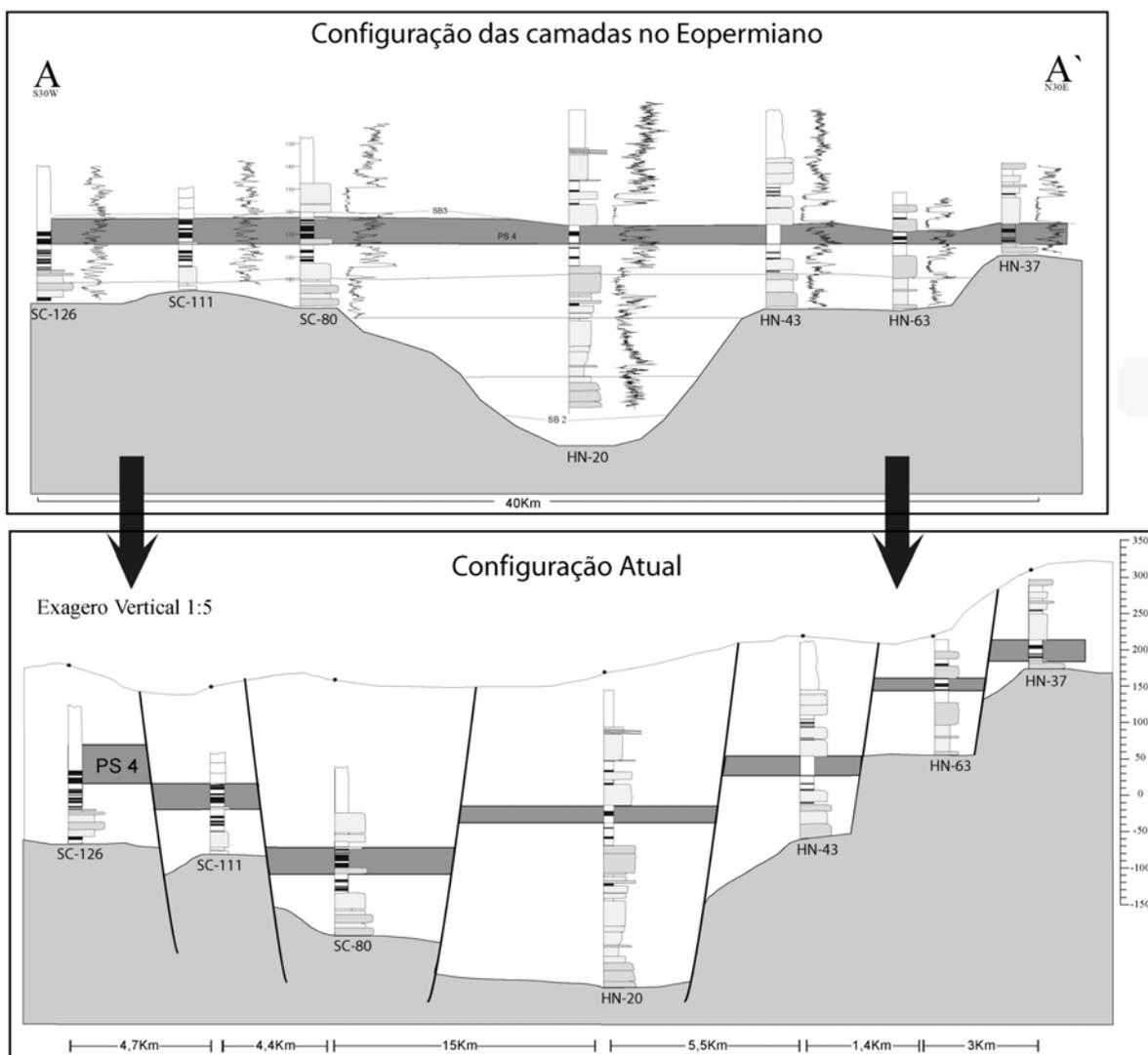


Figura 9– A linha de correlação A-A' (sentido *dip*), com dois tipos de *datum*: em cima, a correlação estratigráfica, tendo como *datum* um limite de parasequência; embaixo, a mesma linha tendo como *datum* a topografia atual. A comparação evidencia a movimentação das falhas da época de deposição no Eo-Permiano até o presente, com rejeitos da ordem de 100m. Notar que a paleotopografia e a configuração atual são geometricamente semelhantes, com uma calha central que já existia no Eo-Permiano e cujos limites foram reativados pela tectônica pós-deposicional.

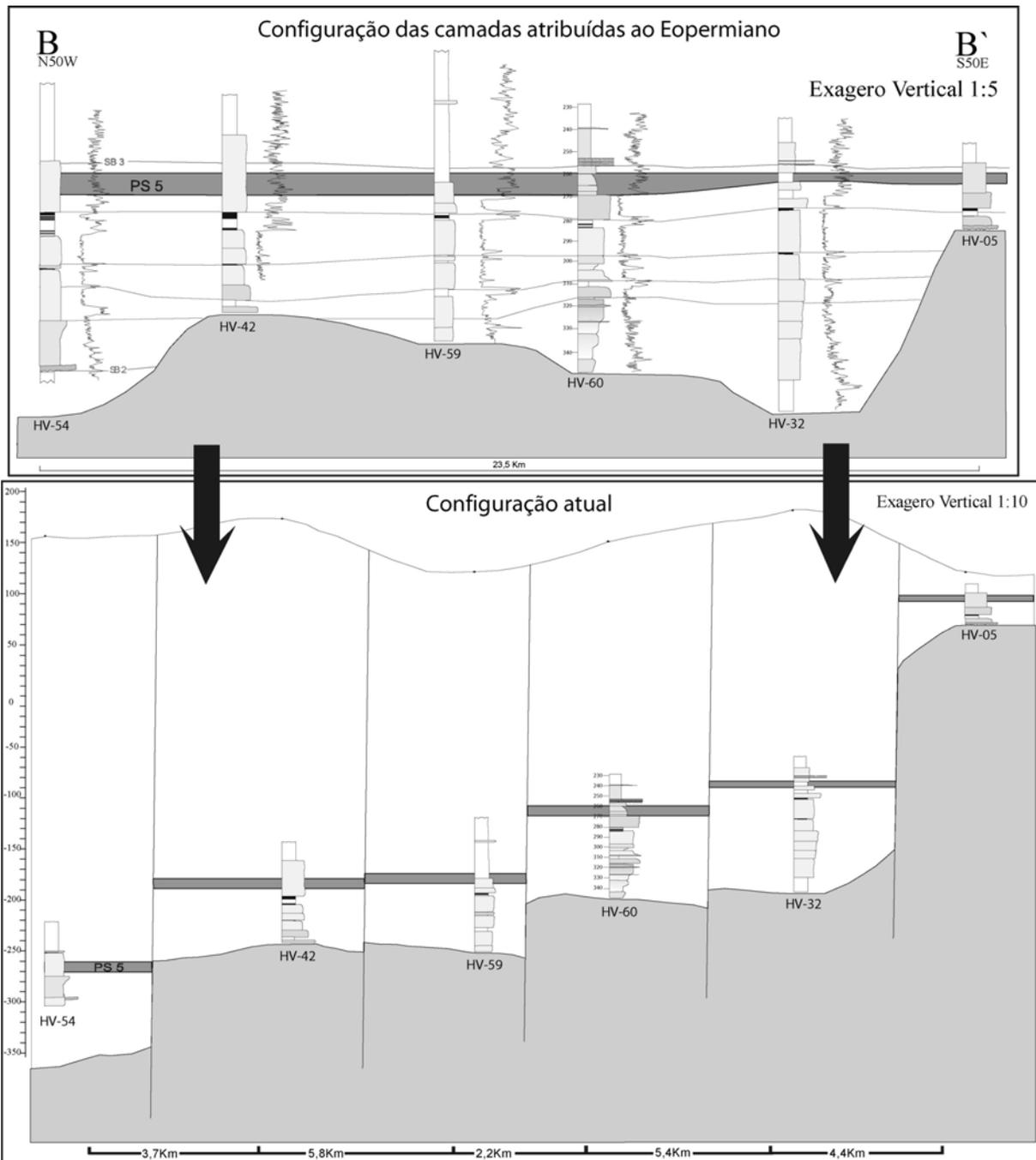


Figura 10– A linha de correlação B-B' (sentido *strike*), com dois tipos de *datum*: em cima, a correlação estratigráfica, tendo como *datum* um limite de parasseqüência; embaixo, a mesma linha tendo como *datum* a topografia atual. Notar que a calha paleotopográfica (a leste) desapareceu com a reativação tectônica pós-deposicional.

No mapa de isópacas da parasseqüência PS0 (sistema deltaico), observa-se que a mesma apresenta pouca continuidade lateral. Embora contenha alguns arenitos com potencial para constituir aquífero, essa parasseqüência, devido a baixa continuidade lateral de seus corpos arenosos, não foi considerado alvo em potencial.

Já o mapa de isópacas da parasseqüência PS1 (sistema estuarino) revela para essa unidade uma espessura entre 12 e 15 metros e uma extensão

da ordem de 50 km no sentido NNE-SSW, com presença de arenitos com bom potencial para constituir aquífero.

Igualmente, o mapa de isópacas da parasseqüência PS2 (sistema estuarino), indica um bom potencial para constituir aquífero. A parasseqüência tem uma espessura bastante constante, da ordem de 15 metros e uma extensão da ordem de 50 km no sentido NNE-SSW.

O mapa de isópacas da parasseqüência PS3

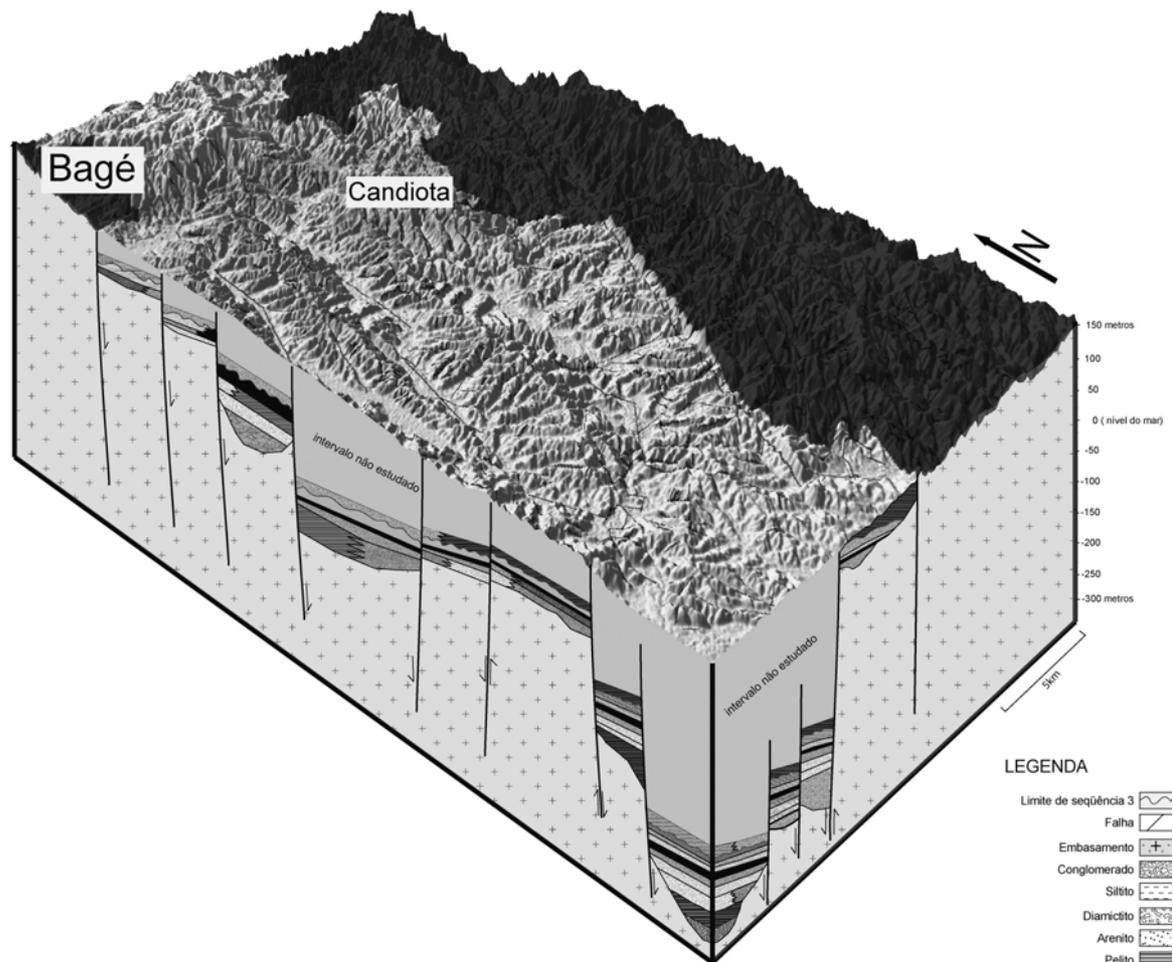


Figura 11 – Bloco diagrama esquemático da área de estudo demonstrando a relação das parassequências com os planos de falhas, demonstrando que as estruturas condicionaram uma movimentação intensa em sentido *dip* da bacia desde o momento da sedimentação permiana até o presente.

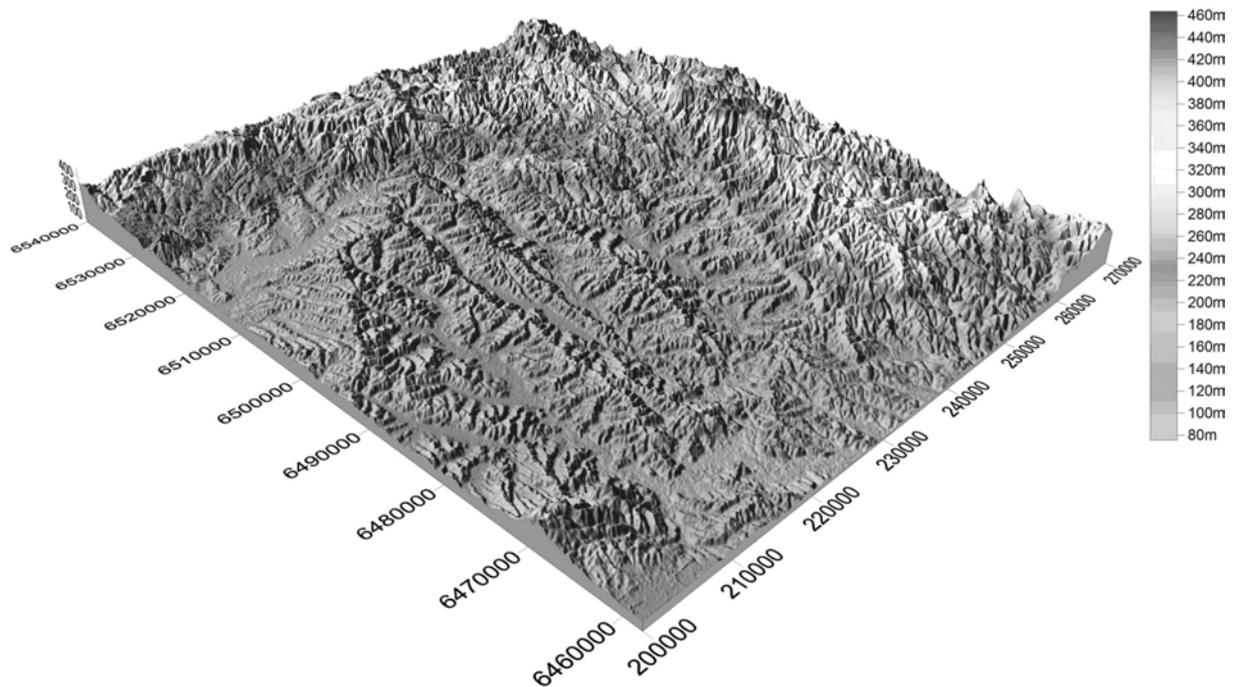


Figura 12 – Modelo Numérico de Terreno gerado com uso da base de dados do projeto SRTM/NASA-NIMA. O modelo evidencia a principal estruturação da área (lineamentos NE), com diferença de cotas da ordem de 60 metros junto aos falhamentos. Esses falhamentos, em especial o mais a leste, controlam o sistema de recarga dos aquíferos da região.

(sistema estuarino) mostra continuidade areal excelente e espessuras de até vinte e cinco metros. Contudo, essa parasseqüência possui um baixo potencial para constituir aquífero devido à ausência relativa de fácies de reservatório, sendo constituída principalmente de pelitos e arenitos finos de planície estuarina, e de muitas camadas de carvão.

O mapa de isópacas da parasseqüência PS4 (sistema estuarino) revela um bom potencial para constituir aquífero na sua parte sul, onde domina a faixa de espessura de 20 metros e onde a faciologia é caracterizada por arenitos de *foreshore* e *shoreface* superior, considerados excelentes fácies de reservatórios. A parte arenosa da parasseqüência tem uma espessura entre 9 e 10 metros e uma extensão da ordem de 25 km no sentido NNE-SSW.

O mapa de isópacas da parasseqüência PS5 (sistema estuarino próximo da *mfs3*) mostra uma unidade com restrito potencial para constituir aquífero, porque as fácies de reservatório são muito descontínuas e territorialmente restritas à porção sul da área de estudo. Isso ocorre porque no norte da área a parasseqüência sofreu remoção devido ao evento de formação do limite de seqüências SB3.

O mesmo ocorre com a parasseqüência PS6 (sistema estuarino, após a *mfs*). Os arenitos apresentam restrito potencial para constituir aquífero, porque as fácies de reservatório são muito descontínuas e restritas a porção sul da área de estudo, porque a parasseqüência foi erodido pelo evento de formação do limite de seqüências SB3 na região norte da área.

Já o mapa de isópacas da parasseqüência PS7 (sistema deltaico e de *shoreface*, após a formação do limite de seqüências SB3) mostra uma distribuição areal bastante extensa. Arenitos com bom potencial para constituir aquífero ocorrem apenas na parte norte da área de estudo, onde domina uma faciologia caracterizada por arenitos de *foreshore* e *shoreface* superior, considerados excelentes fácies de reservatórios. A parte arenosa da parasseqüência tem uma espessura da ordem de 10 metros e uma extensão da ordem de 10 km no sentido NNE-SSW.

CARACTERIZAÇÃO ESTRATIGRÁFICA DOS AQUÍFEROS EM POTENCIAL

A caracterização estratigráfica de reservatórios sob a óptica da estratigrafia de seqüências é uma prática comum na indústria do petróleo, mas é praticamente ignorado na hidrogeologia, onde mais comumente trata-se os arenitos aquíferos como entidades homogêneas e de continuidade lateral visuali-

zada pela correlação litoestratigráfica, como foi discutido no primeiro capítulo do presente estudo. Neste estudo-de-caso, a prática da estratigrafia de seqüências permitiu uma série de avanços em comparação com a prática litoestratigráfica corriqueiramente desenvolvida na hidrogeologia:

- determinou-se as principais fácies reservatórios e as fácies de aquícludes e aquítardes, através da análise acurada de fácies a partir da descrição dos testemunhos de sondagem;
- determinou-se e delimitou-se os principais corpos que constituem os potenciais aquíferos da região. Para isso, o tratamento dos dados estratigráficos em ambiente 3D foi fundamental para a correta compreensão da distribuição e cubagem volumétrica destes aquíferos.

Fácies de Reservatórios

Uma fácies de reservatório é um corpo de rocha que pelas suas qualidades intrínsecas possui porosidade e permeabilidade suficientes para armazenar e permitir a circulação de fluidos.

Para apontar as fácies de reservatórios na área da pesquisa, estabeleceu-se uma classificação de qualidade de reservatório (variando de 1 - permo-porosidade excelente a 4 - baixíssima permo-porosidade) para os diferentes sistemas e subsistemas deposicionais dentro de cada parasseqüência mapeada na área. Esse resultado é mostrado na tabela 2.

No presente estudo-de-caso, não foram abordados os aspectos micropetrográficos e testes de porosidade, considerados fundamentais para uma futura análise de detalhe.

As fácies de código 1 são potenciais aquíferos, as de código 2 são aquícludes, e as de código 3 e 4 são aquítardes. A fácies de carvão (CC) foi classificada como 4, embora apresente propriedades permo-porosas intrínsecas. O problema do carvão é reconhecidamente de ordem geoquímica – a fácies é potencialmente poluidora e a água explotada nela será sempre de baixa qualidade. Essa é uma das razões porque a parasseqüência 3 não constitui potencial aquífero, pois nela as camadas de carvão são extensas.

Caracterização Espacial e Localização dos Principais Aquíferos em Potencial

Para determinar quais os aquíferos em potencial, foram mapeadas as parasseqüências que contêm fácies reservatório em maior extensão areal e maior espessura na área de estudo. Conforme esse

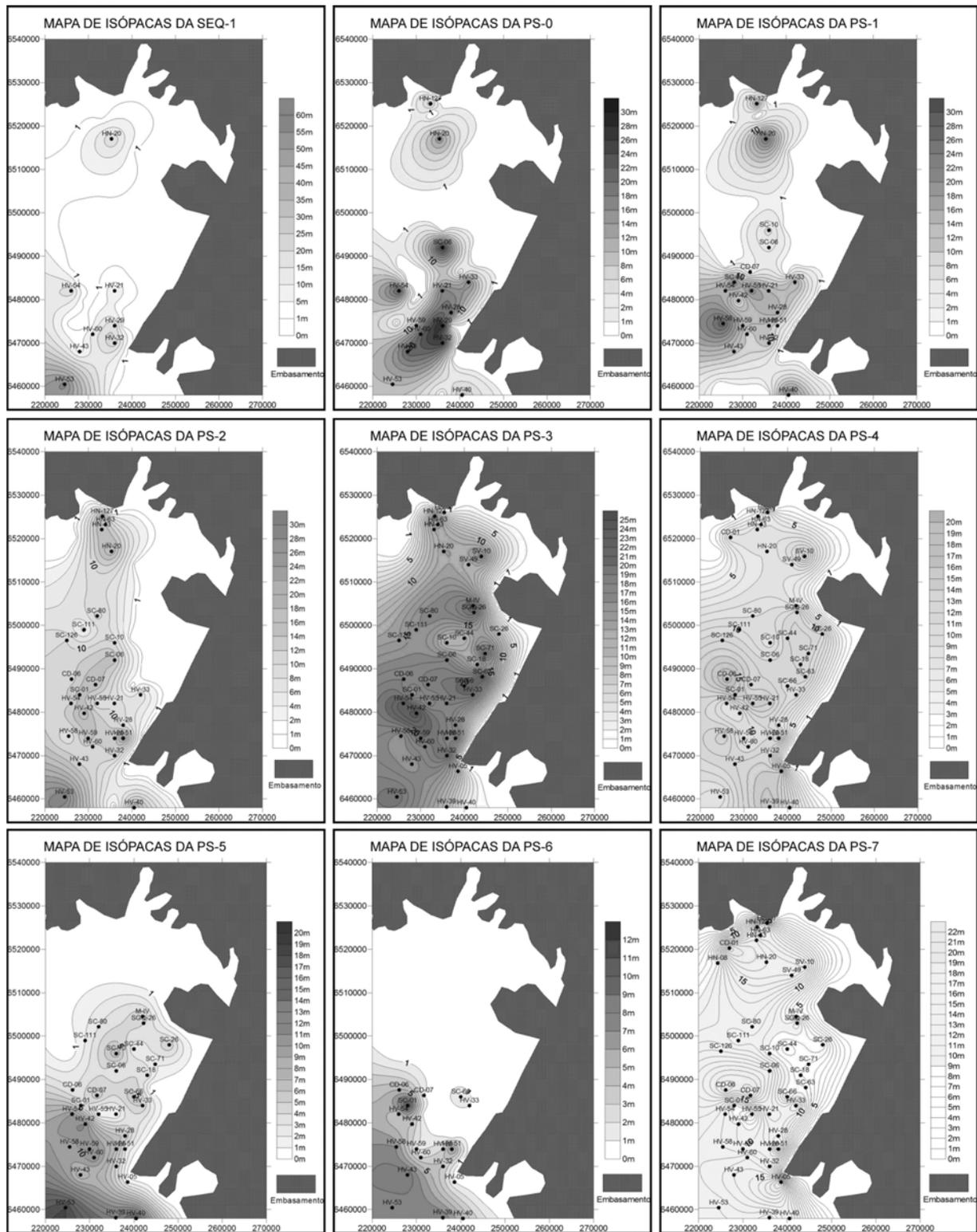


Figura 13 – Mapas de isópacas das seqüências e parasseqüências analisadas no presente estudo-de-caso. O mapeamento das espessuras é fundamental para determinar a extensão dos possíveis reservatórios e para determinar locações (vide discussão no texto).

Tabela 2 – Codificação dos sistemas e subsistemas deposicionais, e caracterização das fácies em termos de distribuição nas diferentes parasseqüências modeladas e de potencial aquífero (*código de qualidade de reservatório*).

Sigla	Sistema Depositional	Subsistema	Parasseqüências	Código de qualidade de reservatório	Principais Litofácies
0	Leques Aluvias	Não detalhado	PS 0 & PS 1	3	Gm, Gc
1	Deltaico	1A – Canal distributário	PS 0 & PS 1	1	St fino a médio
		1B – Baía interdistributária	PS 0 & PS 1	3	MS; CC,SB
		1C – Boca de barra distributária proximal	PS 0 & PS 1	2	St médio a grosso; Gc
		1D – Boca de barra distributária distal			St médio
		1E – Pro-delta	PS 0 & PS 1	4	R
2	Estuário Lagunar	2A – <i>Bay-head</i> delta proximal	PS 2 a PS 6	2	St grosso, Gc
		2B – <i>Bay-head</i> delta distal			St fino; ML;
		2C – Barras arenosas de maré / deltas de maré	PS 2 a PS 6	2	Sf, St
		2D – Planícies de maré arenosas e pelíticas	PS 2 a PS 6 (principalmente PS 4)	3	MS, Ml, Sf, Sw,
		2E – Manguezais e pântanos			CC
		2 F – Leques de sobrelevagem	Pouco expressivo	-----	Gi, Gm, St
3	Barreira	3A – <i>foreshore</i>	PS 5 to PS 6	1	Ss
		3B – <i>shoreface</i> superior			St
		3C – <i>shoreface</i> intermediário	PS 5 to PS 6	3	Shcs; SMhcs; Sw
		3D – <i>shoreface</i> inferior a <i>offshore</i>	PS 7	4	Mb, algum SMhcs

critério, as parasseqüências mais favoráveis são a PS1, PS2, PS4 e PS7. Como foi apresentado previamente, essas parasseqüências não são contíguas no registro, mas pertencem a tratos de sistemas diferentes. A espessura, a extensão areal e o volume aproximado foram obtidos pelo tratamento estatístico (através do *software Surfer8*) e a modelagem 3D (através do *software RockWorks*). Os resultados dessa caracterização são mostrados na tabela 3.

Um critério importante é o posicionamento do aquífero em termos de sua interconectividade com outros potenciais aquíferos controlado pelo posicionamento estratigráfico (pela proximidade estratigráfica de um limite de parasseqüência ou de seqüência deposicional, que podem ser barreiras de fluxo).

Esse é o caso das parasseqüências PS 1 e PS 2, que são estratigraficamente sobrepostas, mas divididas por um limite formado por uma superfície de inundação, com deposição de pelitos. Esse contato pode estar formando uma barreira de fluxo vertical entre os dois aquíferos, possivelmente realçado pela ação da diagênese. Portanto, para produzir água nos aquíferos formados pelas parasseqüências PS 1 e PS 2 seria necessário perfurar ambas na sua totalidade.

No caso da área de estudo, um critério estratigráfico adicional é a presença de camadas de carvão no trato transgressivo da SEQ-2, que podem contaminar a água de aquíferos próximos ou a eles conectados, como já foi comentado anteriormente. Por essa razão, exclui-se do estudo dos potenciais aquíferos a parasseqüência PS 3.

A área estudada tem um volume total de cerca de 20 km³ de potenciais aquíferos. Admitindo-se uma porosidade da ordem de 15% para a faciológia que os compõem, pode-se estimar o volume de água contido em 3 km³, ou seja, um volume da ordem de 3 x 10⁹ metros cúbicos ou 3 x 10¹² litros.

Áreas mais Favoráveis a Exploração

O estudo aqui desenvolvido centrou na ferramenta da estratigrafia de seqüências como metodologia fundamental na busca por água subterrânea, e a caracterização e delimitação dos quatro corpos aquíferos em potencial foi baseado nesse critério. Isso acarreta em limitações ou *constraints* quanto ao resultado, porque sabidamente uma caracterização completa de aquífero deve ser feito com base não apenas no estudo estratigráfico, mas complementado com estudos adicionais como petrofísica, influência diagenética e geologia estrutural.

Os autores do presente estudo-de-caso estão cientes desse fato, e a assertativa acima é importante para ressaltar a qualidade do resultado final apresentado.

Esse resultado, como não poderia de ser diferente, é formular a resposta para a óbvia pergunta que aflora depois de toda a caracterização dos aquíferos aqui desenvolvida: *onde se deve furar para achar água?*

A resposta para essa pergunta seria: com base no critério puramente estratigráfico, existem alguns lugares mais favoráveis para a exploração de água em abundância na região estudada. Esses lo-

Tabela 3 – Parasseqüências com potencial para constituírem aquíferos, seu respectivo posicionamento estratigráfico e dimensionamento aproximado. TSNB = trato de sistemas de nível baixo, TST = trato de sistemas transgressivo.

Parasseqüência	Trato de sistema	Espessura	Extensão areal	Volume
PS 1	TSNB da S1	10 a 15 m	600 km ²	8.10 km ³
PS 2	TSNB da S1	15 m	480 km ²	7.20 km ³
PS 4	TST da S1	10 m	370 km ²	3.70 km ³
PS 7	TSNB da S2	10 m	100 km ²	1.00 km ³
Volume total				20.00 km ³

Tabela 4 – Locais mais favoráveis para locação de sondagens exploratórias.

Parasseqüência	Locação para perfuração (em UTM)	Local alternativo mais adequado	Profundidade final do aquífero
P S 1	6470000 / 230000	65150000 / 235000	320 m / 120 m
P S 2	6490000 / 230000	65150000 / 235000	190 m / 110 m
P S 4	6470000 / 233000	-----	280 m
P S 7	6520000 / 235000	-----	80m

cais, assim como sua profundidade adequada para atravessar o respectivo aquífero em sua totalidade e produzir água é dada na tabela acima (tabela 4). As coordenadas indicadas representam pontos centrais das áreas mais favoráveis de ocorrência de aquíferos em potencial nas quatro parasseqüências, conforme detalhadas no item anterior. A profundidade final indicada representa a metragem total a ser perfurada para que a sondagem atravessasse o potencial aquífero em toda sua extensão vertical.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia da estratigrafia de seqüências mostrou-se plenamente aplicável para a proposta do trabalho, que era de realizar um estudo-de-caso para testar a ferramenta na caracterização estratigráfica de potenciais aquíferos. Isso foi alcançado com sucesso, através da aplicação de técnicas analíticas integradas e com auxílio de *softwares* específicos. Com isso, espera-se ter contribuído para a questão formulada inicialmente: a metodologia da estratigrafia de seqüências, que trouxe avanços inestimáveis para a análise estratigráfica de reservatórios de hidrocarbonetos, pode significar igual revolução para a caracterização de aquíferos.

Se o conhecimento da estratigrafia de uma região é a base para uma adequada avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, o enfoque eminentemente litoestratigráfico – correlacionar arenitos similares e locar poços baseado em poucos critérios – deve ser abandonado em favor de um procedimento mais adequado, que é a análise sob a óptica da estratigrafia de seqüências. Espera-se ter demonstrado que com a aplicação das novas ferramentas de análise estratigráfica no estudo de aquíferos, os mesmos benefícios que a exploração e exploração de hidrocarbonetos experimentaram, possam ser estendidos para a atividade ligada à prospecção de aquíferos.

Conforme comentado anteriormente, é claro que a análise do potencial de aquíferos na região não se esgota com o presente estudo. Ensaio petrofísicos, estudos diagenéticos, análises geoquímicas das águas e testes de formação e modelagens de fluxo devem ser empreendidos para efetivamente caracterizar os aquíferos sob ponto de vista hidrológico. Mas a base fundamental, o *start* na busca de água subterrânea deve ser a estratigrafia – no campo conceitual-metodológico, essa é a principal conclusão do projeto.

Já no campo técnico, pode-se concluir pela presença, na área de estudo, de quatro potenciais aquíferos, que somam um total da ordem de 20 quilômetros cúbicos de rocha permo-porosa, em profundidades entre 80 e 320 metros. Os aquíferos são contidos e delimitados por parasseqüências, sendo, portanto, prováveis entidades hidraulicamente isoladas, além de serem seccionadas por falhas que condicionam o fluxo de água subterrânea.

Como recomendação para trabalhos futuros, inclui-se a necessidade de realizar ensaios petrofísicos e análises de qualidade de água, haja visto a presença massiva de camadas de carvão no subsolo da região. Quanto à geologia estrutural, o estudo deve ter continuidade através de uma modelagem mais detalhada, para delimitar com precisão os diferentes blocos tectônicos locais que compartimentam as parasseqüências.

Agradecimentos- O presente trabalho relata os resultados de um projeto fomentado pelo Edital Universal de 2004 do CNPq, e a equipe agradece a essa agência de fomento pela concessão de auxílio a pesquisa, e ao Serviço Geológico Nacional (CPRM de Porto Alegre) na pessoa de seu então superintendente regional, Geól. Ireneu Capeletti, pela concessão dos perfis de sondagens e pelo acesso a litoteca em Caçapava do Sul (RS) para descrição de testemunhos de sondagens, sem o qual o desenvolvimento da pesquisa não seria possível. Os professores Michael Holz e Ruy Paulo Philipp agradecem ao CNPq por bolsas de produtividade em pesquisa (PQ, nível 1C e 2, respectivamente), a acadêmica do curso de geologia da UFRGS

Paula Dariva dos Reis agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica, Juliano Kuchle é bolsista do programa UFRGS-ANP-PRH12 e agradece a Agência Nacional do Petróleo pela concessão de bolsa de estudo. O geólogo Alan Bischoff é ex-bolsista do CNPq.

REFERÊNCIAS

- Borghetti, N.R.B.; Borhetti, J.R. & Rosa, E.F. 2004. O Aquífero Guarani. Guia de Informações.
Disponível em:
http://www.oaquiferoguarani.com.br/index_02.htm.
Acesso em 20/04/2006.
- Holz, M.; Vieira, P.E. & Kalkreuth, W. 2000. The Early Permian coal-bearing succession of the Paraná Basin in southernmost Brazil: depositional model and sequence stratigraphy. **Revista Brasileira de Geociências**, **30(3)**: 420-422.
- Holz, M. & Carlucci, R. 2000. Litoestratigrafia, estratigrafia de seqüências e evolução paleofisiográfica da zona de borda da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul durante o Eo-Permiano. In: Holz, M.; De Ros, L.F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, CIGO-UFRGS, p.303-322.
- Milani, E.J.; França, A.B. & Schneider, R.L. 1994. Bacia do Paraná. In: Feijó, F.J. (Ed.), Cartas estratigráficas das bacias sedimentares brasileiras. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, **8(1)**:69-82.
- Payton, C.P. (Ed.). 1977. **Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration**. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26. Tulsa, Oklahoma. 516p.
- Posamentier, H.W.; Allen, J.P. & Gives, D.P. 1992. High resolution sequence stratigraphy - The coast Coulee delta, Alberta. **Journal of Sedimentary Petrology**, **62**:310-317.
- Posamentier, H.W. & Chamberlin, C.J. 1993. Sequence-stratigraphic analysis of the Viking Formation lowstand beach deposits at Joarcam Field, Alberta, Canada. In: Posamentier, H.W.; Sommenhayen, C.P.; Haq, B.U. & Allen, G.P. (Eds.) 1993. **Sequence stratigraphy and facies associations**. International Association of Sedimentologists Special Publications, **18**:469-485.
- Sloss, L.L.; Krumbein, W.C. & Dapples, E.C. 1949. Integrated facies analysis. In: Longwell, C.R. (Ed.). 1949. Sedimentary facies in geologic history. **Geological Society of America Memoir**, **39**:91-124.
- Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; Kendall, C.G. St C.; Posamentier, H.W.; Ross, C.A. & Van Wagoner, J.C. (Ed.) 1988. **Sea-level changes: an integrated approach**. Tulsa, Okla., SEPM Geology. 407p (SEPM Special Publication, n.42).