

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

PREVISÃO DE COMPARTIMENTAÇÃO DIAGENÉTICA EM RESERVATÓRIOS PARÁLICOS CONTROLADA PELO ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO

Tiago Agne^{1*}, Michael Holz^{1**}, João Marcelo Ketzer^{1***}

¹ Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

* Mestrando, Bolsista ANP (tiagoagne@yahoo.com)

** Docente no IG/UFRGS, Pesquisador CNPq (michael.holz@ufrgs.br)

*** Pesquisador convidado, PRH-12 ANP (jm@ketzer.com.br)

Resumo – Estudos petrográficos e estratigráficos integrados dos arenitos parállicos da Formação Rio Bonito (Eo-Permiano) na margem sul da Bacia do Paraná, demonstram que a distribuição espacial de alterações diagenéticas e porosidade relativa podem ser previstas dentro do contexto da estratigrafia de seqüências. As alterações diagenéticas ocorrem principalmente próximo à limites de parasseqüências adjacentes a camadas de carvão do trato de sistemas transgressivo. As alterações diagenéticas que podem ser previstas dentro do arcabouço da estratigrafia de seqüências consistem de: (a) cimentação carbonática (calcita e dolomita poiquilótópicas), que ocorrem em arenitos marinho rasos (*shoreface* superior e *foreshore*) e estuarinos (deltas e barras de maré) acima de limites de parasseqüências e da superfície transgressiva com camadas de carvão. Esta cimentação carbonática apresenta um padrão sistemático de altos valores em perfis de eletro-resistividade (≥ 500 ohm-m); (b) concreções de pirita, que ocorrem abaixo de camadas de carvão que capeiam parasseqüências; (c) dissolução de grãos e formação de caulinita abaixo de camadas de carvão, comumente associada à cimentação por pirita, e (d) cimentação por quartzo, ocorrendo principalmente associada à cimentação carbonática acima de limites de parasseqüências. Alterações diagenéticas como a cimentação carbonática, as concreções de pirita, crescimentos de quartzo e a caulinita, podem agir como selos ou defletores para o fluxo de fluidos.

Palavras-Chave: diagênese de arenitos; estratigrafia de seqüências; depósitos parállicos; Eo-Permiano; Bacia do Paraná

Abstract – Integrated petrographic and stratigraphic study of paralic sandstones of the Rio Bonito Formation (Early Permian) in the southern margin of the Paraná Basin revealed that the spatial distribution of diagenetic alterations and related porosity can be predicted within a sequence stratigraphic context. Diagenetic alterations occur mainly in sandstones in the vicinity of parasequence boundaries adjacent to coal seams of the transgressive systems tract. Diagenetic alterations that can be predicted within a sequence stratigraphic framework are: (a) carbonate cementation (poikilotopic calcite and dolomite), which occurs in shallow marine (upper shoreface and foreshore) and estuarine (flood tidal deltas and tidal bars) sandstones above parasequence boundaries and above transgressive surfaces with coal seams. This carbonate cementation shows a systematic pattern of high values in resistivity logs (≥ 500 ohm-m); (b) pyrite concretions, which occurs below coal beds capping parasequences; (c) grain dissolution and formation of kaolinite below coal beds, commonly in association with pyrite cementation; and (d) quartz cementation occurs mainly in association with carbonate cementation above parasequence boundaries. Diagenetic alterations as carbonate cementation, pyrite concretions, quartz overgrowths and formation of kaolinite may act as seals or baffles for fluid flow.

Keywords: sandstone diagenesis, sequence stratigraphy, paralic deposits, early Permian, Parana Basin

1. Introdução

A distribuição de alterações diagenéticas tem influência direta nas características de permo-porosidade em reservatórios, portanto a previsão da distribuição de constituintes diagenéticos tem impacto direto na determinação da qualidade de reservatórios.

Estudos integrando análises estratigráficas de alta resolução e a diagênese de arenitos (McKay *et al.*, 1995; Taylor *et al.*, 1995; Loomis & Crossey, 1996; Morad *et al.*, 2000; Ketzer *et al.*, 2002,2003; Oliveira, 2004) demonstram que as alterações diagenéticas responsáveis pela redução de porosidade em potenciais reservatórios parálicos da Formação Rio Bonito (Eo-Permiano) da Bacia do Paraná (Fig.1), tais como cimentação por calcita, quartzo, pirita e caulinita, podem ser previstas a partir de análises no contexto da estratigrafia de seqüências de alta resolução (*sensu* Van Wagoner *et al.*, 1990).

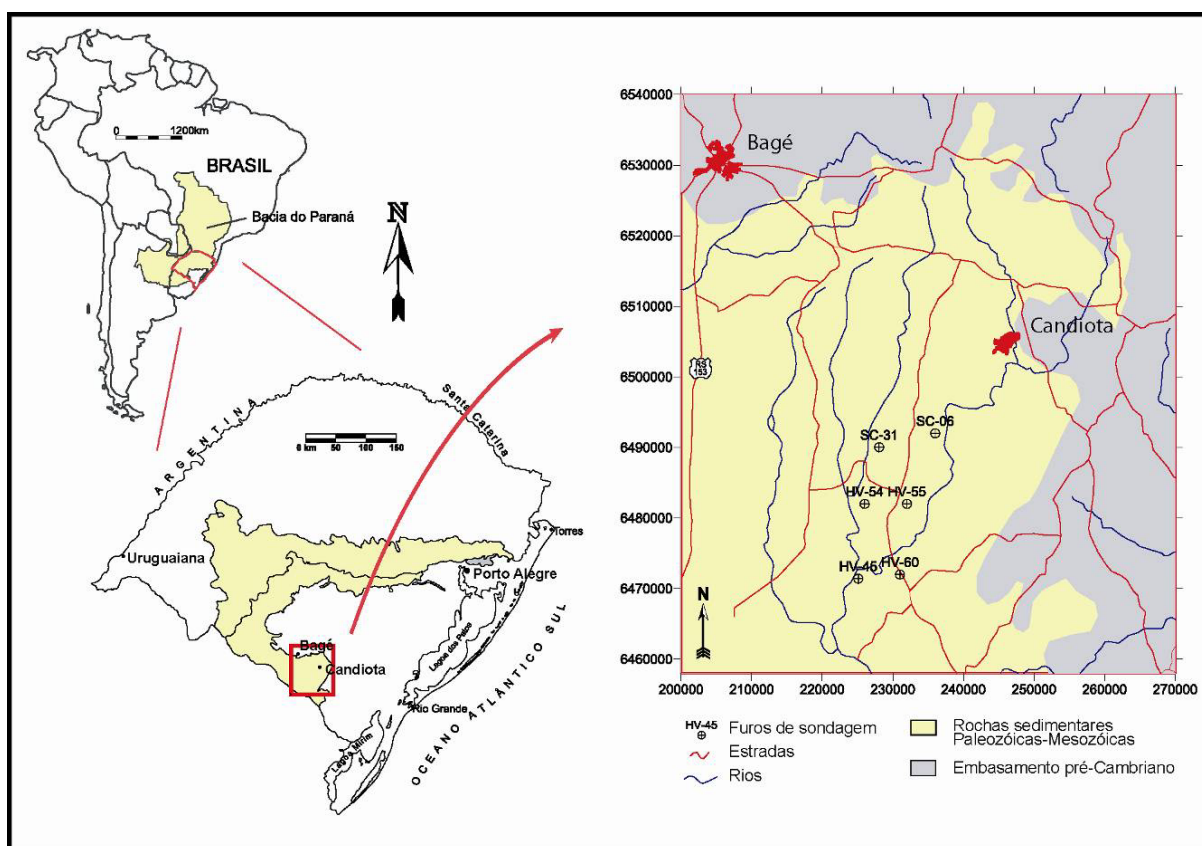


Figura 1. Localização da área de estudos e dos poços estudados.

Alterações diagenéticas responsáveis pela destruição de porosidade em reservatórios parálicos ocorrem principalmente nas adjacências de limites de paraseqüências do trato de sistemas transgressivo associados a camadas de carvão.

Baseando-se nas características de distribuição e volume dos principais cimentos, bem como na porosidade relativa, 3 petrofácies podem ser reconhecidas e previstas em reservatórios parálicos: (1) petrofácies carbonática, (2) petrofácies da pirita e (3) petrofácies porosa.

O reconhecimento da distribuição de alterações diagenéticas no contexto da estratigrafia de seqüências de alta resolução nos permite desenvolver modelos que auxiliam na determinação de selos, defletores de fluxo e potenciais reservatórios, bem como a dimensão dos mesmos.

2. Contexto Estratigráfico

Segundo Holz (2003), o Eo-Permiano da Bacia do Paraná compreende 3 seqüências deposicionais de 3ª ordem (Fig.2).

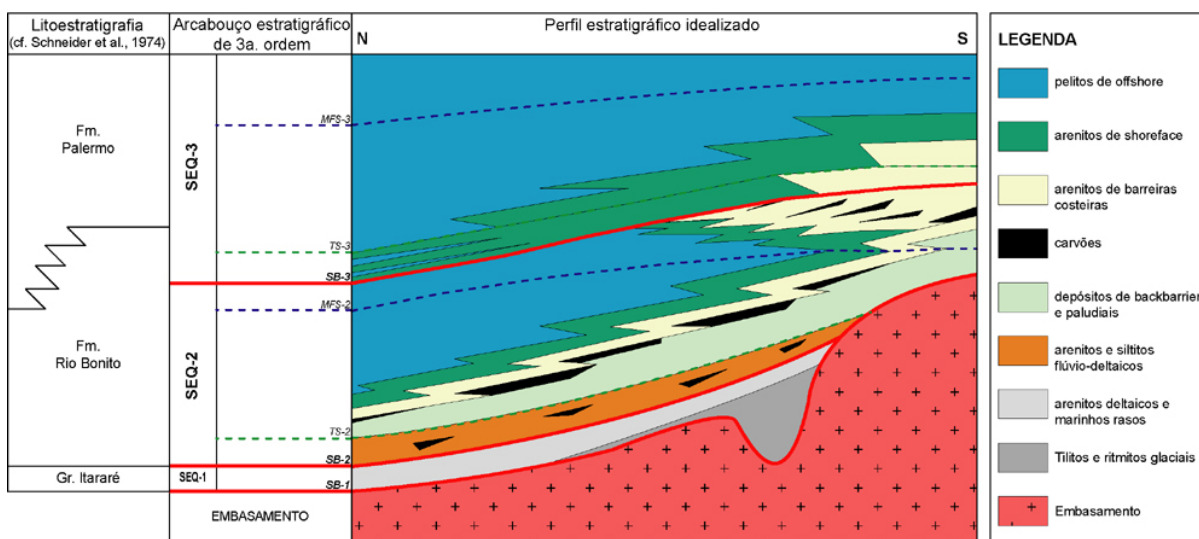


Figura 2. Estratigrafia de seqüências regional para a área de estudos (Holz, 2003; modificado).

O presente estudo focou-se nas superfícies estratigráficas da seqüência 2 (SEQ-2) proposta por Holz (2003) (Fig.3), que compreende 7 parasseqüências (PS) com espessura média de 12 metros cada. As parasseqüências PS0 e PS1 compreendem depósitos flúvio-deltaicos num contexto prográdante correspondendo ao trato de sistemas de nível baixo (LST). As parasseqüências PS2 a PS5 correspondem a depósitos estuarinos e lagunares associados a depósitos marinhos rasos (*shoreface* superior e *foreshore*), apresentam um padrão retrogradante e representam o trato de sistemas transgressivo (TST). A base da PS2 tem caráter erosivo e marca a superfície transgressiva (TS) onde há a ocorrência do icnofóssil *Glossifungites*. O topo da PS5 marca a superfície de máxima inundação (MFS), no contexto eustático da SEQ-2, podendo ser reconhecido um padrão de alta radioatividade (raios-gama) em perfis geofísicos. A PS6 compreende depósitos essencialmente marinho rasos (*shoreface* superior e médio) e é interpretada como pertencente ao trato de sistemas de nível alto (HST).

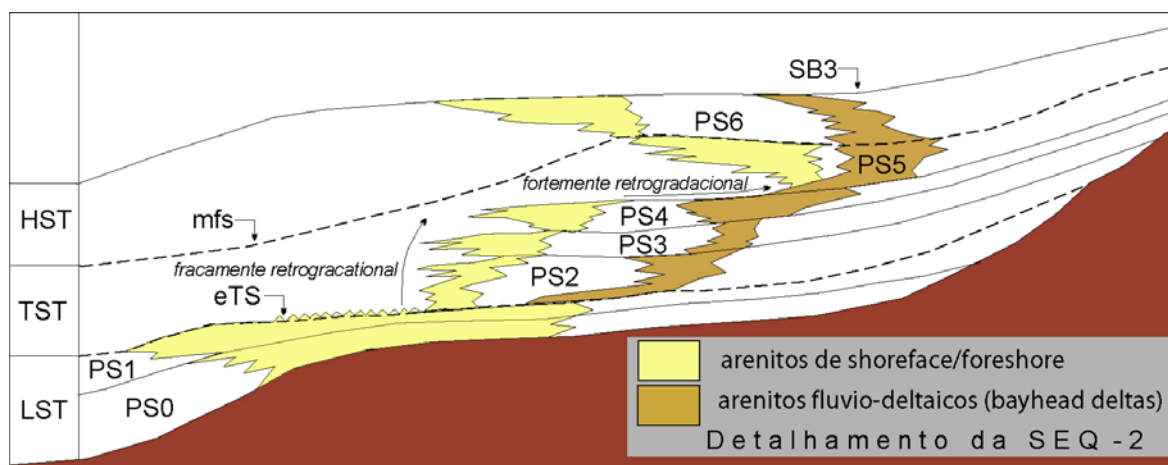


Figura 3. Detalhamento da estratigrafia regional da seqüência deposicional 2, alvo do presente estudo (cf. Holz, 2003).

3. Distribuição Espacial das Alterações Diagenéticas

Para se determinar a distribuição espacial das alterações diagenéticas foram quantificadas 35 lâminas delgadas a partir da contagem modal de 300 pontos por lâmina sob microscopia de luz polarizada. Os constituintes detríticos, diagenéticos e tipos de poros foram registrados em planilhas MS-Excel, assim como a textura. A partir das características de distribuição e volume dos principais cimentos, bem como da porosidade relativa, 3 petrofácies podem ser reconhecidas e previstas a partir de análises estratigráficas de alta resolução em reservatórios parálícos: (1) petrofácies carbonática, (2) petrofácies da pirita e (3) petrofácies porosa.

3.1. Petrofácies Carbonática

É caracterizada por arenitos com cimentação carbonática (med = 13%; max = 28,7%), de calcita (med = 11,8%; max = 28,7%) e/ou dolomita (med = 0,8%; max = 6,3%) poiquilotópica pervasiva em níveis completamente cimentados (*stratabound*) gradando para concreções centimétricas a milimétricas de calcita e/ou dolomita e com volume de porosidade intergranular variando entre 0 e 11% (med = 5,9%; desv = 4,2%) (Fig.4).

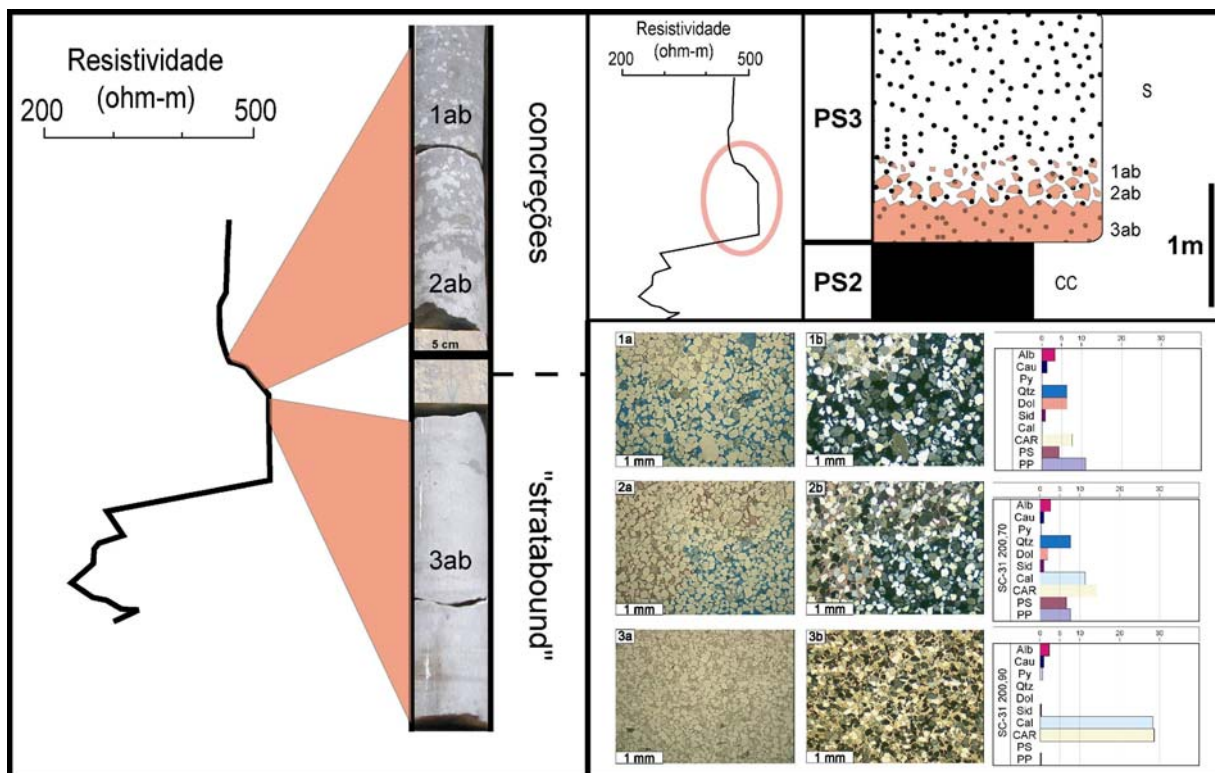


Figura 4. Aspecto macroscópico da cimentação carbonática e sua relação com o perfil de eletro-resistividade: (1ab) mostram concreções milimétricas de dolomita poiquilotópica; (2ab) mostram concreções centimétricas de calcita poiquilotópica; (3ab) mostram nível de cimentação "stratabound" por calcita poiquilotópica. Legenda: (a) e (b) para as fotomicrografias, luz natural e luz polarizada, respectivamente; Alb - albita, Cau - caulinita; Py - pirita; Qtz - crescimentos de quartzo; Dol - dolomita; Sid - siderita; Cal - calcita; CAR - cimentação carbonática; PS - porosidade secundária; PP - porosidade primária. PS3 - parassequência; S - arenito; CC - carvão.

A petrofácies carbonática ocorre em arenitos marinhos rasos (*shoreface* superior e *foreshore*) e estuarinos (deltas e barras de maré) exclusivamente acima de limites de parassequências do TST, ou da superfície transgressiva (ST), associados a depósitos lagunares laterais (formadores de carvão). A distribuição da petrofácies carbonática se dá geralmente na forma de horizontes com cimentação por calcita pervasiva na base (*stratabound*), que gradualmente, em direção ao topo, formam concreções dessimétricas – milimétricas de calcita e/ou dolomita poiquilotópica, sendo muito comum uma anomalia elétrica (≈ 500 ohm-m) no perfil de eletro-resistividade marcar a zona de cimentação da petrofácies carbonática (Fig.4). A espessura média de ocorrência da petrofácies carbonática é entre 0,5 e 1 m, mas localmente pode alcançar espessuras de mais de 5 metros.

A petrofácies carbonática gradualmente passa à petrofácies porosa, sendo que em dois dos casos estudados não há ocorrência da petrofácies carbonática na base dos arenitos em limites de parassequências, havendo a ocorrência então da petrofácies porosa diretamente acima do carvão. Não está claro o porquê da não ocorrência da petrofácies carbonática nestes casos. A falta de cimentos carbonáticos nestes casos ocorre em arenitos com *drapes* de lama (Sd) comumente substituídos por pirita, ou sobrepostos a siltitos pouco carbonosos, e não a carvões.

3.2. Petrofácies da Pirita

É caracterizada por arenitos com cimentação por pirita (med = 27,1%; max = 42,3%) que ocorre comumente com textura blocosa, formando concreções (1-10cm). A cimentação por pirita é extremamente pervasiva e apresenta altos valores de substituição de grãos (med = 17%; max = 19,3%). A ocorrência de pseudomatriz é comum (med = 8%; max = 16,7%), esta se encontra caulinizada e intensamente substituída por pirita blocosa.

A distribuição espacial da petrofácies da pirita se dá em arenitos marinhos rasos (*shoreface* superior e *foreshore*) e estuarinos (deltas e barras de maré) comumente abaixo de limites de parasequências do TST, ou da superfície transgressiva (ST). A petrofácies da pirita forma concreções irregulares de pirita (0,5 – 10 cm) em horizontes com espessuras entre 10 e 30 cm, geralmente associadas a grandes volumes de pseudomatriz (comumente caulinizada). A petrofácies da pirita grada, em direção à base das camadas, à petrofácies porosa.

3.3. Petrofácies Porosa

Caracterizada por arenitos porosos (med > 10%), comumente cimentados por quartzo (med = 3,6%; max = 6,3%) e caulinita (med = 7,5%; max = 10,3%). Localmente ocorre cimentação por siderita fina (med = 0,7%; max = 2,7%) e níveis de pseudomatriz (med = 1,6%; max = 4,3%) substituída por pirita (med = 0,8%; max = 4,7%).

A petrofácies porosa ocorre em arenitos marinhos rasos (*shoreface* superior e *foreshore*) e estuarinos (deltas e barras de maré) do TST, comumente limitada pelas petrofácies carbonática e da pirita e apresenta valores de eletro-resistividade entre de 300 - 400 ohm-m. É comum nas zonas de transição entre petrofácies a interdigitação das mesmas (Fig.5). A espessura da petrofácies porosa pode variar de submétrica (0,2 – 0,7 m) a vários metros (> 5 m), dependendo da espessura das camadas e das espessuras das petrofácies carbonática e da pirita. A ocorrência de crescimentos de quartzo e caulinita são comuns em todo o intervalo da petrofácies porosa, porém maiores volumes de caulinita tendem a ocorrer na zona de transição entre a petrofácies porosa e a petrofácies da pirita (Fig.5). Por outro lado, a cimentação por crescimentos de quartzo tende a apresentar maiores volumes nas adjacências da petrofácies carbonática (Fig.5). A petrofácies porosa pode, em alguns casos, ocorrer acima de limites de parasequências no caso de não haver ocorrência da petrofácies carbonática na base dos arenitos (Fig.5), e é comum a ocorrência de siderita microcristalina nestes casos.

4. Modelo Preditivo Simplificado

A petrofácies carbonática tem sua distribuição espacial fortemente controlada pela estratigrafia de seqüências, ocorrendo em arenitos acima de limites de parasequências em contato com carvão, podendo alcançar uma distribuição areal superior a 100 km², podendo formar localmente selos e defletores para o fluxo de fluidos. A petrofácies carbonática reduz consideravelmente o volume de porosidade em potenciais reservatórios, portanto no caso de cubagem de reservatórios, é importante a quantificação da perda de volume por cimentação.

A petrofácies da pirita, assim como a petrofácies carbonática, pode ter sua distribuição espacial prevista a partir da estratigrafia de seqüências. As concreções de pirita podem reduzir significativamente a porosidade original dos arenitos. Ainda, há grande degradação na permeabilidade dos arenitos, nas adjacências da petrofácies da pirita, devido ao grande volume de caulinita que ocorre associada a esta.

A petrofácies porosa constitui a zona com maior volume de porosidade, representando os potenciais reservatórios (Fig.5). Sua espessura varia em relação às espessuras das petrofácies carbonática e da pirita, podendo alcançar de 1 até 10 metros. Geralmente os níveis intermediários da petrofácies porosa são os que apresentam os maiores volumes de porosidade, reduzindo em direção a base e topo dos arenitos, comumente gradando às petrofácies carbonática e da pirita, respectivamente.

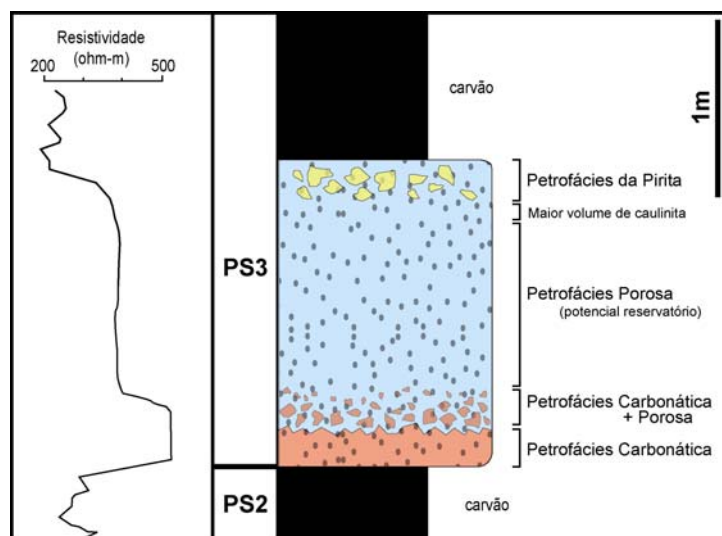


Figura 5. Modelo simplificado para previsão de porosidade e distribuição de alterações diagenéticas para os arenitos parálicos estudados.

5. Conclusões

A estratigrafia de seqüências demonstra que as principais alterações diagenéticas em reservatórios parálicos são fortemente controladas pelas variações relativas do nível do mar, podendo ser previstas a partir de análises estratigráficas e perfis geofísicos. A integração de análises estratigráficas e o estudo da diagênese de arenitos nos permitem construir modelos para a previsão de porosidade, bem como quantificar com maior segurança o volume de porosidade efetiva de um reservatório, que às vezes pode corresponder a menos de 2/3 do volume quantificado por análises estratigráficas convencionais.

Análises integradas nos permitiram prever que a redução de porosidade se dá basicamente em limites faciológicos específicos (e.g., *shoreface*/carvão), normalmente próximos e/ou concomitantes à superfícies estratigráficas (e.g., limites de parasseqüências).

Análises integradas entre a estratigrafia de seqüências e a diagênese de arenitos nos permitiram:

- Reconhecer os controles que as variações eustáticas têm sobre a distribuição espacial de alterações diagenéticas;
- Determinar o volume e as dimensões das alterações diagenéticas, reconhecendo selos e defletores de fluxo, assim como as vias preferenciais para fluxo;
- Executar com maior precisão a cubagem de potenciais reservatórios levando em consideração a destruição de porosidade por alterações diagenéticas;

Em síntese, a avaliação da distribuição espacial de alterações diagenéticas dentro de um arcabouço estratigráfico seqüencial permite maior acuracidade na caracterização de reservatórios, reduzindo os riscos exploratórios.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Agencia Nacional de Petróleo – ANP-PRH12 e ao CNPq por auxílio à pesquisa. T.A. agradece a Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela bolsa de mestrado. M.H. agradece ao CNPq pela renovação de bolsa de produtividade em pesquisa (PQ 302999/04-4). J.M.K. agradece a Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela bolsa de pesquisa. Os autores agradecem ainda aos revisores anônimos indicados pela Comissão Editorial do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás pelas sugestões neste artigo.

7. Referências

- HOLZ, M. (2003) Sequence stratigraphy of a lagoonal estuary system – an example from the lower Permian Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 162, 305-331.
- KETZER, J. M., M. Holz, S. Morad, and I.S. Al-Aasm (2003). Sequence stratigraphic controls on the origin and distribution of diagenetic alterations in paralic sandstones: evidence from the Rio Bonito Formation (early Permian), Southern Brazil. *Sedimentology*, 50, p. 855 – 877.
- KETZER, J. M., S. Morad, R. Evans and I. S. Al-Aasm. (2002) Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland. *Journal of Sedimentary Research*, 72, 6, p 760 - 774.
- LOOMIS, J. L., and Crossey, L. J. (1996) Diagenesis in a cyclic, regressive siliciclastic sequence: the Point Lookout Sandstone, San Juan Basin, Colorado. In: *Siliciclastic diagenesis and fluid flow: concepts and applications* (Eds Crossey, L. J., Loucks, R., and Totten, M. W.) *SEPM Society for Sedimentary Geology Special Publication*, 55, 23-36.
- MCKAY, J. L., Longstaffe, F. J., and Plint, A. G. (1995) Early diagenesis and its relationship to depositional environment and relative sea-level fluctuations (Upper Cretaceous Marshybank Formation, Alberta and British Columbia). *Sedimentology*, 42, 853-874.
- MORAD, S., Ketzer, J. M., and De Ros, L. F. (2000) Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, 47, Supplement 1, 95-120.
- OLIVEIRA, T. A. (2004) Modelo para previsão de compartimentação diagenética controlada pelo arcabouço estratigráfico em arenitos parálicos – evidência da formação Rio Bonito (eo-permiano), Bacia do Paraná. Monografia de conclusão do curso de geologia. Porto Alegre, Biblioteca Geociências, UFRGS, p. 97.
- TAYLOR, K. G., Gawthorpe, R. L., and Van Wagoner, J. C. (1995) Stratigraphic control on laterally persistent cementation, Book Cliffs, Utah – Colorado. *Journal of Sedimentary Research*, 69, 225-228.
- VAN WAGONER, J.C.; MITCHUM, R.M.; CAMPION, K.M. & RAHMANIAN, V.D. (1990) Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high resolution correlation of time and facies. *American Association of Petroleum Geologists Methods in Exploration Series*, N° 7.