

APLICAÇÃO DA ESTRATIGRAFIA DE SEQÜÊNCIAS PARA CARACTERIZAÇÃO MULTIESCALAR DE RESERVATÓRIOS PARÁLICOS – UM EXEMPLO NO GRUPO GUATÁ (EO-PERMIANO) DA BACIA DO PARANÁ NO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

Juliano Küchle¹, Michael Holz²

¹ bolsista CPGGEO-UFRGS (Curso de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul), convênio ANP-UFRGS, PRH N.12, Avenida Bento Gonçalves 9500, prédio 43127, sala 110, Porto Alegre, RS. E-mail: juk666@zipmail.com.br

² docente no IG/UFRGS, pesquisador do CNPq, Avenida Bento Gonçalves 9500, prédio 43127, sala 110, Porto Alegre, RS. E-mail: michael.holz@ufrgs.br

Resumo – Análises estratigráficas de detalhe nas Formações Rio Bonito e Palermo (Eopermiano) da Bacia do Paraná, na região de São Gabriel (Rio Grande do Sul), foram utilizadas como base para estudos e caracterizações de arenitos parállicos como reservatórios. Dois sistemas deposicionais foram reconhecidos: um sistema deltaico dominado por rios, e um sistema de ilhas-barreiras dominadas por ondas. A sucessão é compartimentada em duas seqüências deposicionais de terceira ordem, e um total de treze parasseqüências, representando registros de quarta ordem. Este arcabouço estratigráfico de alta resolução serviu de base para uma caracterização multiescalar dos corpos areníticos como reservatórios. As heterogeneidades são discutidas iniciando na escala de seqüências deposicionais (heterogeneidades de nível 1), sucedida por análises na escala de tratos de sistemas (heterogeneidade de nível 2) e finalizando com análises na hierarquia de parasseqüências (heterogeneidades de nível 3). Os principais controles de heterogeneidades de nível 1 são variações do nível de base, geradoras de discordâncias, e o tipo e influxo de sedimentos. Heterogeneidades de nível 2 são controladas por variações de sistemas deposicionais dentro dos tratos de sistemas. Heterogeneidades de nível 3 controlam continuidades e conectividades entre os reservatórios. Este estudo é útil como uma ferramenta preditiva para situações similares em campos produtores.

Palavras-Chave: Reservatórios, Formação Rio Bonito, Estratigrafia de Seqüências, Modelos Multiescalares

Abstract – Detailed stratigraphic analysis of the Early Permian Rio Bonito and Palermo Formations of the Paraná Basin in the region of São Gabriel County has been used for a study on reservoir characterization of paralic sandstones. Two main depositional systems were recognized, a fluvial-dominated delta system and a wave-dominated barrier island system. The succession is divided in two third-order depositional sequences, enclosing thirteen fourth-order parasequences. This high-resolution stratigraphic framework was the base for a multiscale approach on reservoir characterization of the sandstone bodies. Reservoir heterogeneities are discussed, starting from the scale of depositional sequence (heterogeneity level 1), passing down to heterogeneity at the scale of systems tracts (heterogeneity level 2) and finalizing with an approach at parasequence scale (heterogeneity level 3). Main control on heterogeneity at the first level is base-level variation as generating mechanism for unconformities and the sediment type and rate. At the second level, the reservoir heterogeneity is controlled by the lateral and vertical variations in thickness of particular systems within the different systems tracts, and at the third level, the heterogeneity occurs controlling reservoir continuity and connectivities between reservoirs. The study supplies a model which is useful as a predictive tool for similar geologic settings in producing oil fields.

Keywords: Reservoir, Rio Bonito Formation, Sequence Stratigraphy, Multiscale Models

1. Introdução

A caracterização de reservatórios é um dos principais objetivos de um projeto de exploração. A caracterização de um corpo reservatório se dá através de uma classificação do mesmo segundo determinados parâmetros, tais como: litologia, geometria, volume, litologias adjacentes, heterogeneidades internas, conectividades, propriedades físicas e descontinuidades (Barwis *et al.*, 1990). O presente estudo apresenta um modelo de caracterização de reservatórios em arenitos parálicos, a partir de uma classificação de escalas propostas, onde analisa-se heterogeneidades entre seqüências deposicionais (Nível 1), tratos de sistemas (nível 2), parasseqüências (nível 3), fácies (nível 4) e análises microscópicas (nível 5).

A área escolhida para este estudo foi a região de São Gabriel, centro-oeste do Rio Grande do Sul, borda sudeste da Bacia do Paraná (figura 01), uma bacia intracratônica de idade Ordoviciano a Cretácica, com área de cerca de 1.500.000 quilômetros quadrados (Milani, 1997). A área de estudo é constituída por rochas sedimentares do Grupo Guatá (Formações Rio Bonito e Palermo), de idade eopermiana (Schneider *et al.*, 1974).

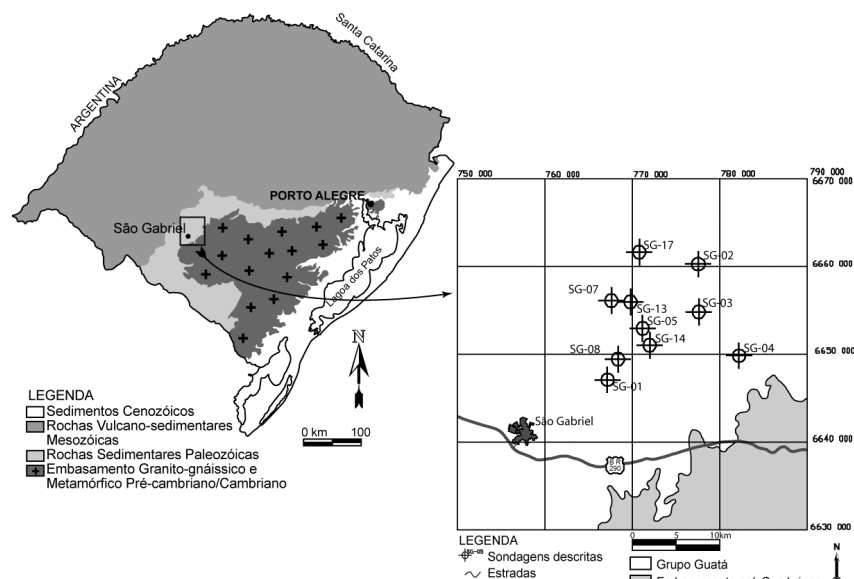


Figura 01: Localização da área de estudo e dos furos de sondagem utilizados.

2. Objetivos e Métodos

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma caracterização dos corpos areníticos parálicos para servir de modelo para reservatórios de óleo, gás ou água, fornecendo assim conceitos teóricos e modelos práticos para caracterização de reservatórios em análises multiescalares. Para a realização deste trabalho, foram descritos 10 furos de sondagem com testemunhagem total, realizados e cedidos para análise pela CPRM-RS e DNPM; a localização dos furos pode ser observada na figura 01.

Os furos de sondagem foram descritos relevando-se a identificação de fácies, agrupadas em sucessões de fácies e interpretadas a partir de modelos de fácies e classificadas como componentes de sistemas deposicionais. A estratigrafia de seqüências foi aplicada para o estabelecimento do arcabouço estratigráfico, dentro do qual foram identificados os principais corpos reservatórios.

3. Resultados Obtidos

3.1. Sistemas Depositionais

As associações faciológicas descritas foram interpretadas como o registro de dois sistemas deposicionais: sistema deposicional deltaico dominado por rios (Galloway & Hobday, 1998), e sistema deposicional marinho raso dominado por ondas.

O sistema deposicional deltaico foi reconhecido pela sucessão de arenitos predominantemente grossos, que gradam lateralmente para siltitos, com abundantes estruturas sedimentares trativas; e siltitos com raízes e marcas de folhas associados a níveis de carvão.

O sistema deposicional marinho raso dominado por ondas foi reconhecido pelos seus arenitos com estruturas sedimentares do tipo *hummocky*, cruzadas festonadas, cruzadas planares e laminações plano-paralelas, caracterizando subsistema de *shoreface* superior a médio; e argilitos com estruturas do tipo *wavy* e *linsen*, caracterizando subsistema de *shoreface* inferior a *offshore*.

3.2. Estratigrafia de Seqüências

A partir do reconhecimento e delimitação dos padrões de empilhamento, e reconhecimento das superfícies cronoestratigráficas nos furos de sondagem, foram identificadas duas seqüências deposicionais de terceira ordem (*c.f.*

Vail *et al.*, 1991), e um total de treze parasequências representando variações de ordem maior, sendo este arcabouço proposto apresentado esquematicamente na figura 02. Foram elaborados seções de correlação estratigráfica utilizando como *datum* o limite de parasequências 7, de marcante ocorrência em toda a área. Uma dessas seções elaboradas é apresentada na figura 03, para ilustrar a variação lateral dos sistemas deposicionais no gradiente proximal-distal.

Seqüências Depositionais	Tratos de Sistemas	Parasequências	Reservatórios de nível 3 (espess. média)	Sistemas Depositionais	Litoestratigrafia	
SEQ2	TST2	PS12	EPSILON 5,5m	SHOREFACE INF.	Fm. Palermo	
		PS11		SHOREFACE MED./INF.		
	TSMB2	PS10	DELTA 14,5m	SHOREFACE SUP./MED.	Fm. Rio Bonito	
		PS9		SHOREFACE INF./ OFFSHORE		
	TST1	PS8	GAMA 11m	SHOREFACE SUP./MED.		
		PS7 <i>datum</i>		BETA 17,5m		DELTAICO/ SHOREFACE
		PS6		ALPHA 9m		DELTAICO
	TSMB1	PS5	EMBASAMENTO			
		PS4				
		PS3				
		PS2				
		PS1				
	PS0					

Figura 02: Arcabouço cronoestratigráfico proposto neste trabalho para a região de São Gabriel – RS.

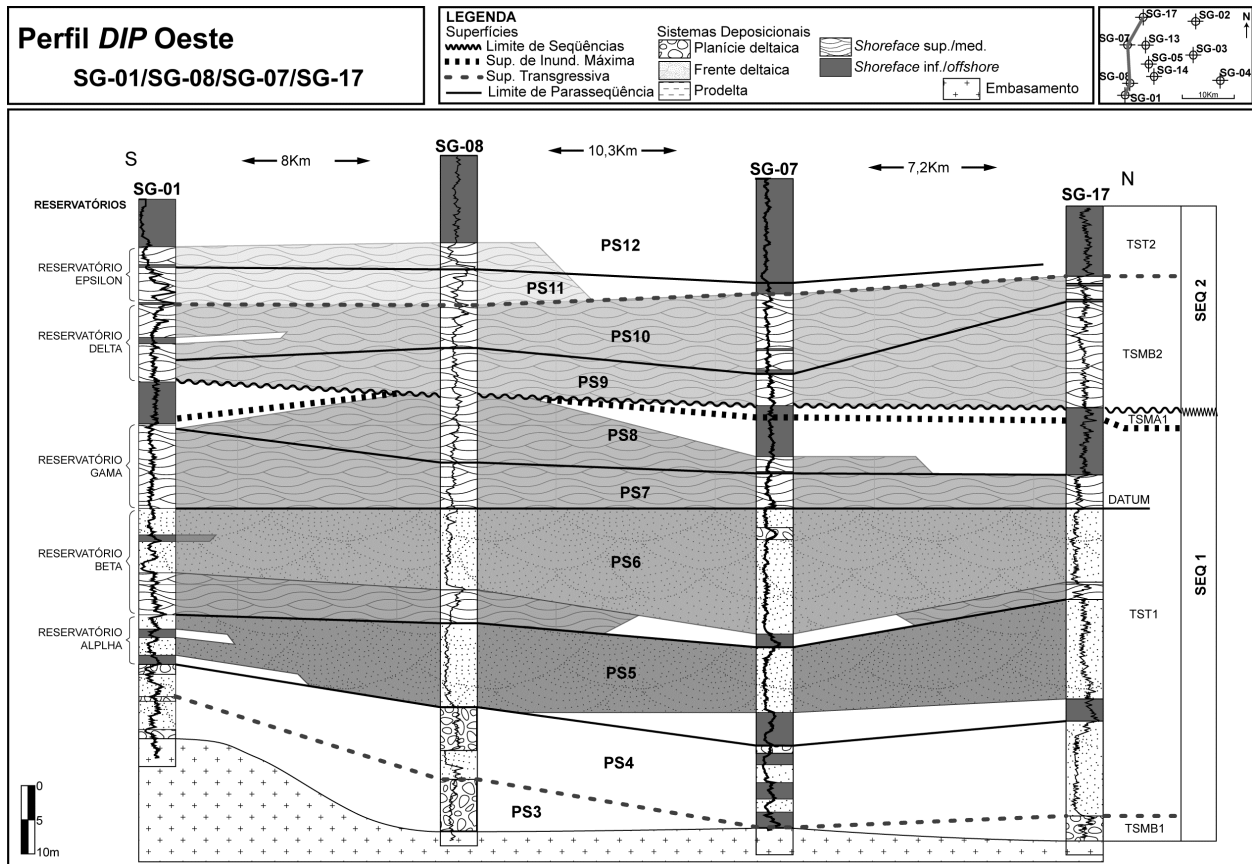


Figura 03: Perfil estratigráfico de orientação *dip*, com correlação dos corpos reservatórios e arcabouço cronoestratigráfico.

A Seqüência Depositional 1 possui um sistema deltaico como registro basal, interpretado como trato de sistemas de mar baixo, os quais são sucedidos por sistema deltaico retrabalhado por onda (caracterizando sistema de *shoreface*), desaparecendo em direção ao topo, onde domina sistema de *shoreface* inferior e *offshore*. Este

desaparecimento gradual do sistema deltaico é interpretado como um trato de sistemas transgressivos, e a ocorrência singular de sistemas de *shoreface* inferior e *offshore* como trato de sistemas de mar alto.

Sotoposta ao trato de sistemas de mar alto da Seqüência 1, ocorre a Seqüência 2, e o limite entre as seqüências é uma discordância de ocorrência característica e marcante em toda a área de estudo, retratada pela mudança abrupta de fácies, colocando arenitos de *shoreface* superior sobre pelitos de *shoreface* inferior a *offshore*. Desta forma, a Seqüência 2 inicia sua deposição com o trato de sistemas de mar baixo, representado por este pacote arenítico de *shoreface* superior, o qual é logo sucedido por um sistema de *shoreface* médio a inferior, com sucessiva diminuição da quantidade de camadas de areia e aumento das camadas de pelitos, terminando no topo do intervalo de estudo com total dominância de pelitos de *shoreface* inferior, sendo este pacote interpretado como o trato de sistemas transgressivo da Seqüência 2.

Em termos litoestratigráficos, a Formação Rio Bonito compreende desde os pacotes deltaicos basais até as últimas ocorrências de arenitos do trato de sistemas transgressivo da Seqüência 2 (conforme descrito acima e representado na figura 02), e a Formação Palermo inicia com a ocorrência dominante dos pelitos sotopostos aos arenitos (c.f. Schneider *et al.*, 1974). Portanto, o contato litológico entre as formações não corresponde diretamente a alguma superfície cronoestratigraficamente representativa, pois o desaparecimento das areias na área de estudo não é síncrono, e varia nas parasseqüências, dependendo da posição geográfica dentro da área de estudo.

3.3. Caracterização dos Reservatórios

A análise de heterogeneidades possui um campo de dimensões muito grande, podendo variar desde observações micrométricas de cimentações diagenéticas até mapeamentos em centenas de quilômetros de seqüências deposicionais. Desta forma, o melhor método de análise é utilizando o conceito de multiescala, onde cada nível de observação fornece um tipo de dado, e onde a integração e intercorrelação destes dados obtidos em diferentes escalas estabelece uma completa análise do reservatório e suas propriedades.

Dentro desta óptica de análise, foi desenvolvida uma hierarquia de análise de heterogeneidades, com cinco níveis de análise, que serão apresentados a seguir, e esquematizados na figura 04.

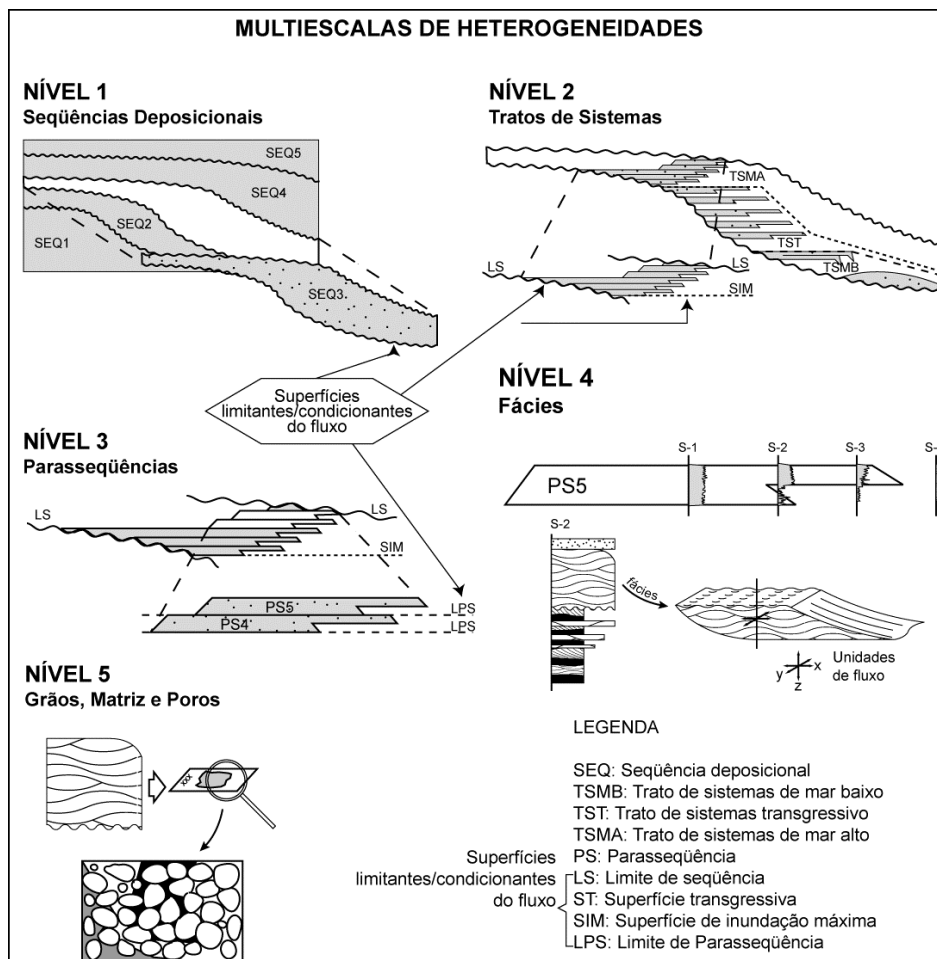


Figura 04: Escalas hierárquicas de heterogeneidades propostas para classificação de reservatórios em multiescala.

Dos cinco níveis propostos, neste estudo foram abordados os níveis 1, 2 e 3, atingindo a resolução de parasseqüências. Caracterizações de nível 4 (fácies) necessitariam de análises petrofísicas e correlações de detalhe, o qual a distribuição e distanciamento dos furos de sondagem não possibilitam. Caracterizações de nível 5 enfocariam detalhamento microscópico.

Heterogeneidade de nível 1 – Seqüências Depositionais – ocorre delimitando como principais alvos para reservatórios ambas as Seqüências 1 e 2, porém cada seqüência deposicional com uma geometria específica, apresentada na figura 05:

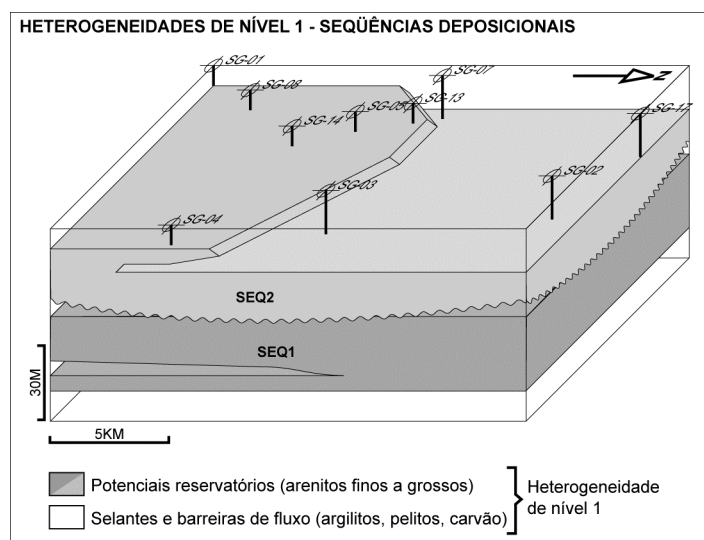


Figura 05: Heterogeneidades de nível 1 (seqüências deposicionais), na área de estudo.

Observa-se que ambas as seqüências deposicionais possuem corpos areníticos, porém com geometrias distintas, e a ocorrência de uma discordância limitando-os é outro fator importante a ser abordado neste nível, pois o limite de seqüências pode agir como uma barreira de fluxo entre os reservatórios, haja visto que é uma superfície de infiltração de argilominerais e de concentração de fluídos diagenéticos (e.g., Ketzer *et al*, 2002).

Heterogeneidades de nível 2 – Tratos de Sistemas – ocorrem como compartimentadores e controladores de sistemas deposicionais, tornando como alvos potenciais neste nível o trato de sistemas transgressivo da Seqüência 1, devido a grande quantidade de arenitos de frentes deltaicas e arenitos de *shoreface* intercalados. Outro trato de sistemas de boa qualidade em nível 2 é o trato de sistemas de mar baixo da Seqüência 2, devido a sua dominância por arenitos de *shoreface*. Tratos considerados secundários em nível 2 seriam o trato de sistemas de mar baixo da Seqüência 1, devido a sua grande quantidade de siltitos e carvões de planície deltaica, o trato de sistemas de mar alto da Seqüência 1 e o trato de sistemas transgressivo da Seqüência 2, ambos devido a suas grandes quantidades de pelitos de *shoreface* inferior e *offshore*, onde arenitos ocorrem subordinadamente.

Heterogeneidades de nível 3 – Parasseqüências – com um maior grau de detalhe, o nível 3 analisa heterogeneidades entre parasseqüências, fornecendo assim conectividades, discontinuidades e barreiras de fluxo que afetam internamente o reservatório. Neste nível, foram identificados cinco corpos reservatórios, denominados *alpha*, *beta*, *gama*, *delta* e *epsilon*. Cada reservatório possui suas propriedades, tais como: litologia, sistema deposicional, espessura, etc., sendo estas propriedades apresentadas na tabela 1. O posicionamento dos reservatórios no arcabouço cronoestratigráfico pode ser observado na figura 02.

Tabela 01: Relação dos reservatórios de nível 3 – Parasseqüências – e suas propriedades.

Reservatório	Litologia	Sistema Deposic.	Paras-seq.	Descontin. Internas	Conectividades	Espess. Mín.	Espess. Máx.	Espess. Méd.
ALPHA	Arenitos finos a médios	Frente deltaica e <i>shoreface</i> superior	5	Raras	Conexões com <i>beta</i>	2,5m	15,5m	9,1m
BETA	Arenitos grossos e finos	Frente deltaica e <i>shoreface</i> superior	6	Incomuns	Conexões com <i>alpha</i> e <i>beta</i>	11m	26,5m	17,6m
GAMA	Arenitos finos	<i>Shoreface</i> superior	7 e 8	Ausentes	Conexões com <i>beta</i> e <i>delta</i>	4,5m	17m	10,9m
DELTA	Arenitos finos	<i>Shoreface</i> superior	9 e 10	Incomuns	Conexões locais com <i>gama</i> e <i>epsilon</i>	6,5m	18,5m	14,3m
EPSILON	Arenitos finos	<i>Shoreface</i> superior	11 e 12	Comuns	Conexões locais com <i>delta</i>	3m	9,5m	5,5m

Com base na análise de heterogeneidades de nível 3, pode-se observar que os melhores reservatórios são o *gama*, *beta* e *delta*, pois possuem as melhores espessuras, litologias favoráveis, sistemas deposicionais com boas correlações laterais (como pode ser observado na figura 03), poucas discontinuidades internas e boas conectividades entre reservatórios. Os reservatórios *alpha* e *epsilon* encontram-se subordinados, porém também com boas propriedades, caracterizando assim um bom conjunto de corpos areníticos formadores de reservatório.

4. Conclusões

A estratigrafia de seqüências é uma ferramenta de análise fundamental para a elaboração de modelos genéticos e geométricos para corpos parálicos potenciais para reservatórios, fornecendo uma abordagem genética aos estratos, e hierarquizando os mesmos em superfícies cronoestratigraficamente significantes, as quais são utilizadas como delimitadoras de reservatórios em um modelo multiescalar.

No presente estudo foram reconhecidas superfícies-chaves aplicadas ao conceito de caracterização multiescala de reservatórios (limites de seqüência, superfícies delimitadoras de tratos de sistemas e limites de parasseqüências), que compartimentam os arenitos reservatórios em unidades diferenciadas em termos genético-geométricos. Estas superfícies devem ser vistas como potenciais geradores de descontinuidades internas, desconectividades de reservatórios ou barreiras de fluxo. Esta abordagem possibilita uma maior precisão na elaboração de modelos de reservatórios para ambientes parálicos, ao contrário da análise puramente litoestratigráfica, onde tais delimitações possivelmente não seriam notadas.

O modelo aqui apresentado torna-se um importante exemplo de caracterização de reservatórios sob a óptica de análise multiescalar baseada em uma compartimentação a partir de superfícies cronoestratigraficamente significativas. Desta forma, pode ser utilizado como um exemplo para caracterização de campos atualmente produtores (e, principalmente, com problemas de produção).

5. Referências Bibliográficas

- BARWIS, J.H.; McPHERSON, J.G.; STUDLICK, J.R.J. 1990. Sandstone Petroleum Reservoirs. Springer-Verlag Ed., New York, USA. 583p.
- GALLOWAY, W.E. & HOBDAI, D.K. 1998. Terrigenous clastic depositional systems. Springer-Verlag ed. New York, USA. 2nd. Ed. 423p.
- KETZER, J.M.; HOLZ, M.; MORAD, S.; AL-AASM, I.S. 2002. Sequence stratigraphic controls on the origin and distribution of diagenetic alterations in paralic sandstones: evidence from the Rio Bonito Formation (early Permian), southern Brazil. *Sedimentary Geology*, in press.
- MILANI, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Tese de doutoramento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre. 2 vol., 532p.
- SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F. & NOGUEIRA, A.A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre. Anais, v.1, p. 41-65.
- VAIL, P.R.; AUDEMARD, F.; BOWMAN, S.A.; EISNER, P.N. & PEREZ_CRUZ, C. 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology - an overview. *In*: EINSELE, G.; RICKEN, W. & SEILACHER, A. (Eds.) 1991. Cycles and events in stratigraphy. Springer Verlag, Berlin. p 617-659.