

CARACTERIZAÇÃO, ANÁLISE E MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE RESERVATÓRIOS EM AMBIENTES PARÁLICOS NO INTERVALO EOPERMIANO, REGIÃO DE SÃO GABRIEL - RS

Paula Dariva dos Reis¹ (UFRGS), Juliano Küchle² (UFRGS), Michael Holz (UFRGS)

¹Bolsista CNPq, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Caixa Postal 15001, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS-Brasil. paula_dariva@yahoo.com.br

² Bolsista Convênio UFRGS-ANP. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Caixa Postal 15001, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS-Brasil. julianokuchle@yahoo.com.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Caixa Postal 15001, CEP 91509-900, Porto Alegre, RS-Brasil.

Este trabalho tem como objetivos realizar uma caracterização de reservatórios análogos em sistemas parállicos através da análise estratigráfica de alta resolução e a determinação das heterogeneidades internas que influenciam no fluxo de fluidos dos corpos reservatórios sedimentares na região de São Gabriel, situado na porção oeste do estado do Rio Grande do Sul. O intervalo de estudo compreende o Eopermiano da Bacia do Paraná (Formação Rio Bonito), amplamente estudada e clássica na literatura brasileira por apresentar camadas de carvão, e constituir-se de amplos corpos areníticos de ambiente flúvio-deltaico e marinho raso (*shoreface* e *foreshore*), de excelente qualidade para reservatório. Para o desenvolvimento deste estudo, foi realizada a aquisição de dados estratigráficos através da descrição detalhada de 2 furos de sondagem e utilizando-se a perfilagem de raios-gama de 2 poços adjacentes enfatizando a sucessão eopermiana, provindos da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – CPRM; posteriormente realizou-se a definição das fácies, associações de fácies e sistemas deposicionais envolvidos; uma correlação dos poços descritos a partir da definição das parasequências, tratos de sistema e sequências deposicionais, resultando em um arcabouço estratigráfico de terceira ordem; e conseqüentemente, a identificação dos potenciais corpos reservatórios e análise através do método multiescalar de heterogeneidades; por fim, gerado um modelo tridimensional com o uso do *software* GOCAD com base nos conceitos da estratigrafia de sequências, estabelecendo-se assim, uma análise integradora e completa acerca das propriedades dos reservatórios mapeados. Como resultados, este estudo contribuiu para melhor caracterizar um potencial corpo reservatório em escala de 3ª e 4ª ordem (tratos de sistemas e parasequências), servindo como modelo análogo para sistemas parállicos, onde a técnica de modelagem tridimensional se fez uma ferramenta útil e eficaz para delimitar os corpos sedimentares e prognosticar o melhor reservatório a ser explotado, visando assim, à melhora da produtividade.

Formação Rio Bonito, Estratigrafia de Sequências, Heterogeneidades de Reservatório.

1. INTRODUÇÃO

A Estratigrafia de Sequências provocou uma revolução na geologia sedimentar, e nos dias de hoje, onde a demanda por combustíveis fósseis, como o petróleo cresce aceleradamente, tornou-se uma ferramenta indispensável para um entendimento apurado do arcabouço geológico dos corpos sedimentares que armazenam estes recursos e para o correto gerenciamento e utilização destas fontes não renováveis. Porém, no que tange aos conceitos e técnicas sobre heterogeneidades de reservatório, a pesquisa brasileira neste setor ainda carece de aprimoramentos, especialmente no âmbito petrolífero, com avaliações apuradas e metodologias que se façam úteis para a otimização e recuperação dos campos produtores.

A área de estudo escolhida para a realização deste projeto foi a região de São Gabriel, situado na porção oeste do estado do Rio Grande do Sul e constituída por rochas sedimentares de idade eopermiana da Bacia do Paraná (Figura 1).

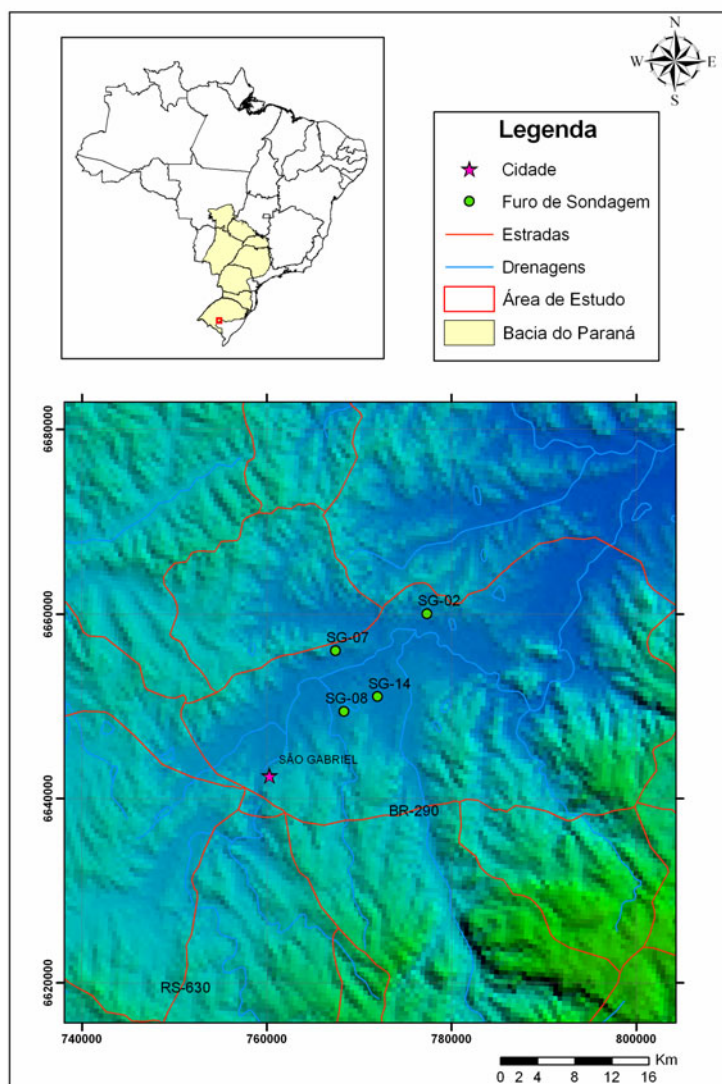


Figura 1: Mapa de situação da área de estudo e a localização dos poços analisados.

A Bacia do Paraná é do tipo intracratônica, de idade ordovício-terciária que abrange uma área de aproximadamente 1.500.000 quilômetros quadrados, distribuídos entre Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. A Formação Rio Bonito é amplamente estudada em virtude de hospedar camadas prospectivas de carvão (A Mina de Candiota, situado no Município de Candiota - RS - é a maior jazida do Brasil) e é o intervalo de interesse do trabalho (Figura 2).

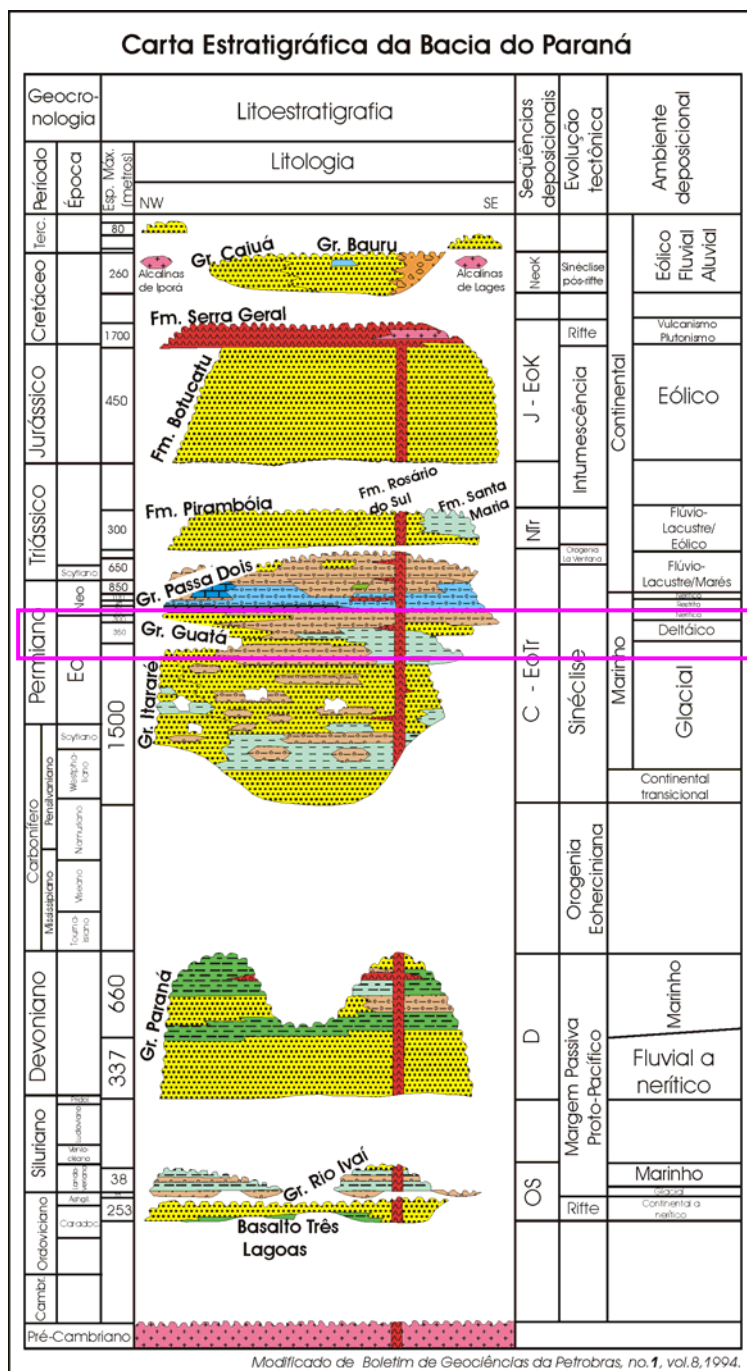


Figura 2: Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná. Em destaque o intervalo temporal de estudo abordado (Modificado de Milani et. al. Boletim de Geociências da Petrobrás, nº1 vol.8, 1994). O quadro indica o intervalo analisado.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho objetiva a caracterização de reservatórios análogos em sistemas parálicos através de uma análise estratigráfica de alta resolução; determinação das heterogeneidades internas que influenciam no fluxo de fluidos dos corpos reservatórios sedimentares mapeados e o estabelecimento de um modelo tridimensional preditivo e que auxilie no diagnóstico dos melhores reservatórios, dentre os que foram mapeados.

3. METODOLOGIA

Os dados estratigráficos utilizados no presente trabalho foram testemunhos de sondagem providos da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM - que durante a década de 70 e 80 realizou um intenso

programa de pesquisa do carvão no Rio Grande do Sul, denominado *Projeto Carvão no Rio Grande do Sul, Sub-Projeto Fronteira Oeste Bagé - São Gabriel* - os quais estão atualmente armazenados na litoteca sito no município de Caçapava do Sul –RS. Para a escolha dos poços a serem descritos levou-se em conta critérios como 1) A existência efetiva do testemunho, ou seja, estar perdido ou não-localizado; 2) O estado de conservação em que os mesmos se encontram; 3) A completude do registro (recuperação efetiva) 4) Que atingisse o embasamento (fornecendo assim, a seção local completa do registro sedimentar). A relação dos furos analisados pode ser visualizada na tabela 1.

Tabela 1: Relação dos poços analisados no presente projeto.

Furo	UTM E	UTM N	Cota da Boca (m)	Prof. Embasamento (m)	Tipo de Análise
SG-02	777350	6660000	75	134.10	Descrição detalhada
SG-07	767450	6656000	100	179	Raio-Gama
SG-08	768400	6649400	90	131	Raio-Gama
SG-14	772000	6651000	80	266	Descrição detalhada

A aquisição dos dados estratigráficos foi realizada através da descrição em detalhe de 2 testemunhos de sondagem (SG-02 e SG-14) enfatizando a sucessão temporal eoperniana (Formação Rio Bonito) com base nas fácies, que foram definidas através da litologia, textura e estruturas sedimentares, conteúdo fóssilífero e relações de contato, e fornecem informações acerca do processo sedimentar envolvido. Após a identificação das fácies, o passo subsequente foi o agrupamento das mesmas em sucessões de fácies, que representam uma relação genética espaço-temporal, constituindo-se assim de critérios relevantes para a interpretação dos sistemas deposicionais componentes.

Através da correlação cronoestratigráfica de alta resolução entre os poços analisados, foram limitadas as parassequências, identificadas as superfícies-chave que limitam os tratos de sistemas e as sequências deposicionais, resultando em um arcabouço estratigráfico de terceira ordem, dentro do qual foram mapeados os potenciais corpos reservatórios que, por conseguinte foram avaliados através de um método multiescalar de heterogeneidades. Por fim, gerado um modelo tridimensional com o uso do *software* GOCAD, onde foi possível a visualização do modelo outrora estabelecido e a caracterização dos melhores corpos análogos como reservatórios.

Tabela 2: Sistemas deposicionais interpretados para a região de São Gabriel e suas respectivas fácies componentes.

Sistema Depositional	Sub-Sistema	Fácies
Fluvial	Canal	Arenitos grossos com drapes de lama e raízes; Gradações normais de conglomerados suportados pelos clastos para folhelhos carbonosos, estrat. cruzada acanalada e restos vegetais
	Planície de Inundação	Carvões, folhelhos carbonosos e siltitos com restos vegetais, raízes e algumas <i>ripples</i>
Estuarino Dominado por Maré	Bay Head Delta	Arenitos grossos com drapes de lama; Arenitos grossos a finos com estrat. cruz. Acanalada Arenitos médios a grossos métricos com drapes duplo
	Central Basin	Arenitos finos wavy com <i>ripples</i> bidirecionais Arenitos médios a grossos centimétricos com drapes duplo
	Barras de Maré	Arenitos grossos a finos com estratificação cruzada acanalada e <i>ripples</i> bidirecionais
Marinho Raso Dominado por Ondas	Foreshore	Arenitos médios e finos com laminação plano-paralela
	Shoreface Superior	Arenitos finos com estratificação cruzada <i>swaley</i> e raros drapes de lama
	Shoreface Médio	Arenitos finos wavy com estratificação cruzada <i>hummocky</i> , <i>ripples</i> , bioturbações
	Shoreface Inferior	Arenitos finos wavy, micro- <i>hummockys</i> , raras <i>ripples</i> e intensamente bioturbado

4. RESULTADOS

4.1 Associações de Fácies e Sistemas deposicionais

Foram identificados 3 sistemas deposicionais com seus respectivos sub-sistemas com base nas assembléias faciológicas: sistemas fluviais, sistema estuarino dominado por marés e um sistema marinho raso dominado por ondas. A tabela 2 apresenta os sistemas deposicionais identificados e a figura 3 as principais fácies descritas.

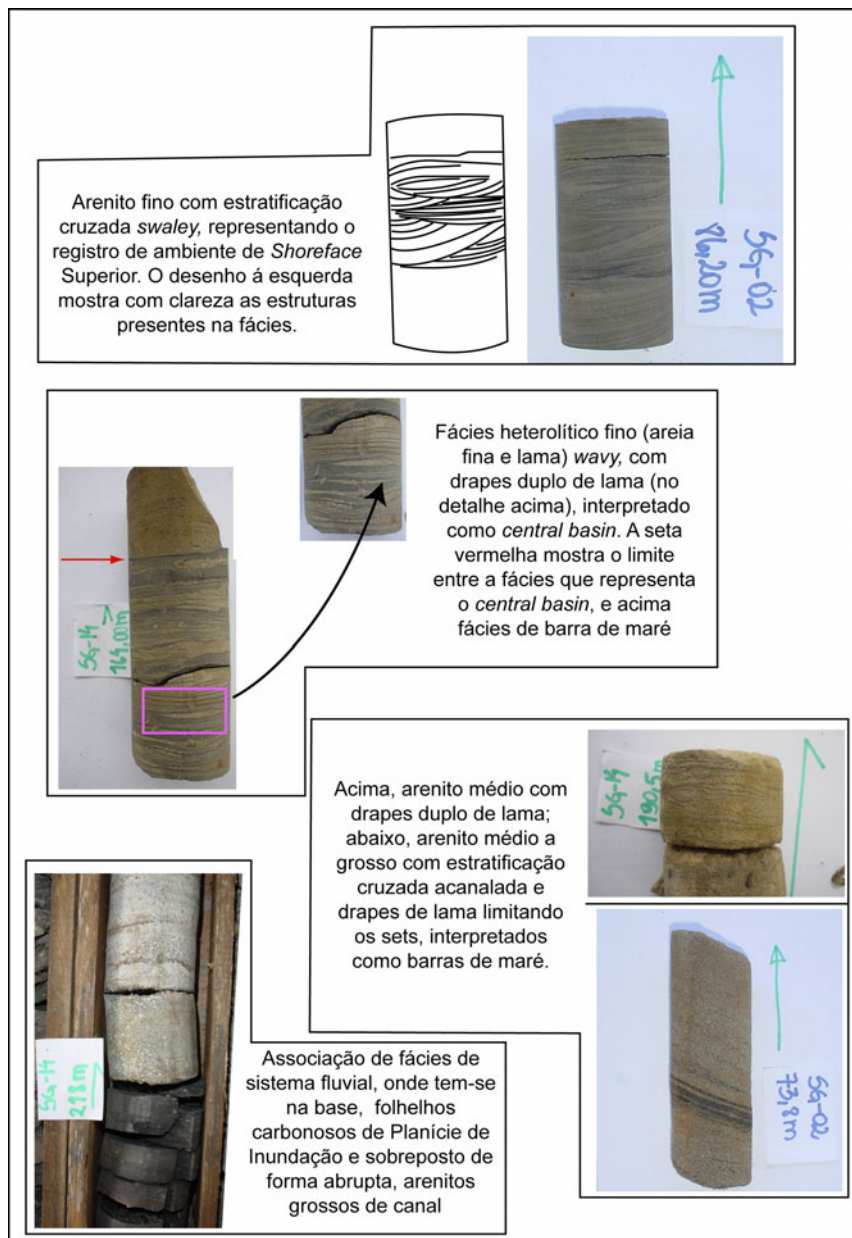


Figura 3: Fotos de algumas das principais fácies descritas.

O **sistema fluvial** é reconhecido na porção basal de todos os quatro poços analisados, e compartimentado em: **Canal Fluvial** - identificado principalmente por apresentar uma associação faciológica composta por ciclos granodecrescentes ascendentes que iniciam na base por arenitos grossos e conglomerados com estratificação cruzada acanalada e culminam com siltitos e folhelhos carbonosos com restos vegetais. Variam entre 1 a 10m de espessura e tem sua base marcada por uma superfície erosiva. Subordinadamente, tem-se arenitos grossos maciços com drapes de lama e raízes; **Planície de Inundação** - constituído por carvões,

folhelhos carbonosos e siltitos com restos vegetais e marcas de raízes, claramente indicando um ambiente continental proximal.

O **sistema deposicional estuarino** foi reconhecido pelos processos sedimentares envolvidos registrados nas estruturas das fácies componentes deste sistema, como *ripples* bidirecionais e drapes duplo de lama. Foi subdividido em: **Bay-Head-Delta** - que é um delta que ocorre na desembocadura do canal fluvial e constitui-se por arenitos grossos a finos com estratificação cruzada acanalada e arenitos grossos com drapes de lama, ocorrente somente no poço SG-14 com espessura da ordem de 10m; **Central Basin** - é uma região onde dissipam-se as correntes de maré, e em vista disso a associação de fácies que caracteriza este sub-ambiente é constituída por finos heterolíticos (areia fina e lama) em uma relação *wavy*, com *ripples* de vetores bidirecionais, e arenitos médios a grossos com drapes duplo de lama em camadas finas (decimétricas), indicando uma alternância de fases de sedimentação de baixa energia (suspensão) quando ocorrem as correntes de maré enchente e fases de maré vazante, onde a energia é mais elevada e os processos são predominantemente trativos. Essa associação foi reconhecida somente no poço SG-14, e apresenta espessura de aproximadamente 10m; **Barras de Maré** - são corpos arenosos alongados no sentido das correntes de maré, e reconhecidos por constituírem-se de arenitos grossos a finos com estratificação cruzada acanalada, *ripples* bidirecionais, e drapes duplo de lama em camadas métricas, de ocorrência em todos os poços.

O **sistema marinho raso dominado por ondas**, ilustrado na Figura 4, teve sua faciologia (com exceção do sub-ambiente de *foreshore*, que foi identificado somente no poço SG-02) reconhecido em todos os poços analisados, e foi compartimentado em: **Foreshore** - é a região onde atuam os processos trativos oriundos da ação de ondas normais, e caracterizado por arenitos médios e finos maciços, ou com laminação plano-paralela ou cruzada de baixo ângulo, no registro analisado com espessuras de 3m; **Shoreface Superior** - zona que recebe a ação de ondas de tempestade, foi reconhecido por arenitos finos com estratificação cruzada *swaley* (que são *hummockys* amalgamados e arenosos) e raros drapes de lama, chegando a atingir um total de 20m de espessura; **Shoreface Médio** - porção plataformar que também recebe ação das ondas tempestáticas, a assembléia faciológica característica deste sub-ambiente é composta por arenitos finos *wavy* com estratificação cruzada *hummocky* (com presença de lama entre as cruzadas), *ripples* e bioturbações, chegando a atingir espessuras em torno de 5m; **Shoreface Inferior** - região onde a ação das ondas de tempestade é incipiente, com o registro de arenitos finos *wavy*, micro-*hummockys*, raras *ripples* e intensamente bioturbado.

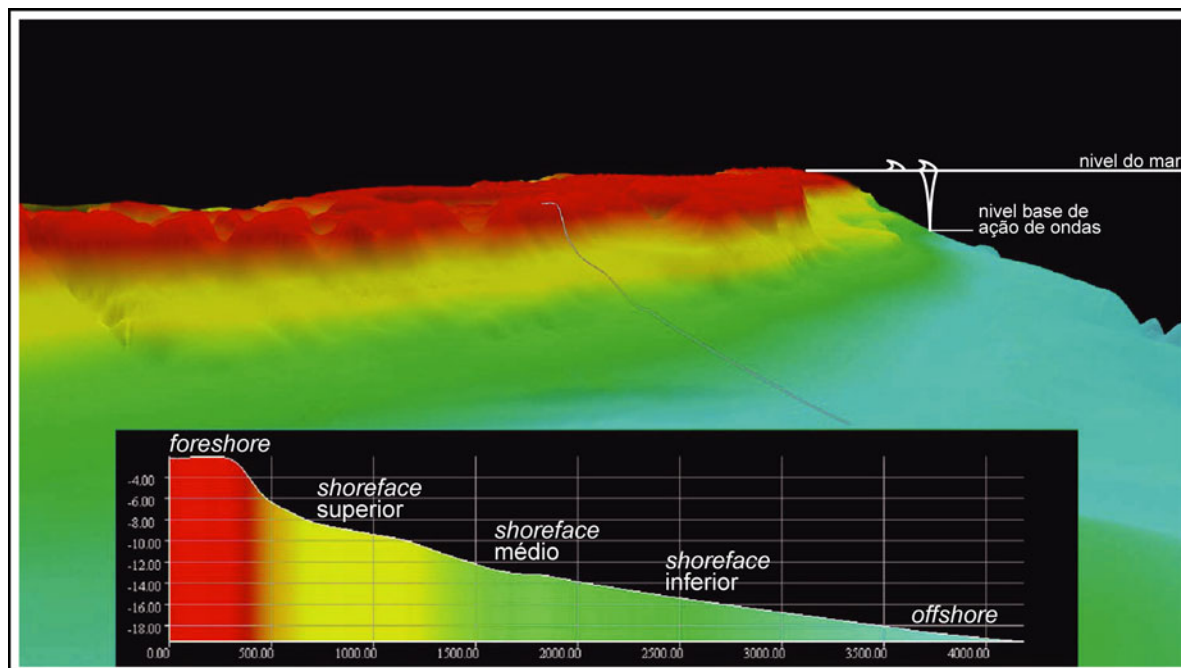


Figura 4: Batimetria digital e perfil variando desde as porções mais proximais (*foreshore*) até as mais distais (*offshore*). Modificado de Boyd, 2004.

4.2 Arcabouço Estratigráfico

A partir do reconhecimento dos padrões de empilhamento e das superfícies-chave, possível através da correlação entre os poços realizada em uma seção *strike-dip*, foi possível a identificação das parassequências, tratos de sistemas e seqüências deposicionais e assim, estabelecido um arcabouço estratigráfico de terceira

ordem. Os perfis estratigráficos tiveram como *datum* a Superfície de Inundação Máxima da Sequência 2 (SIM2), representando o registro do momento de afogamento máximo da sequência.

Na figura 5 pode ser visualizados o perfil de correlação e o arcabouço estratigráfico proposto.

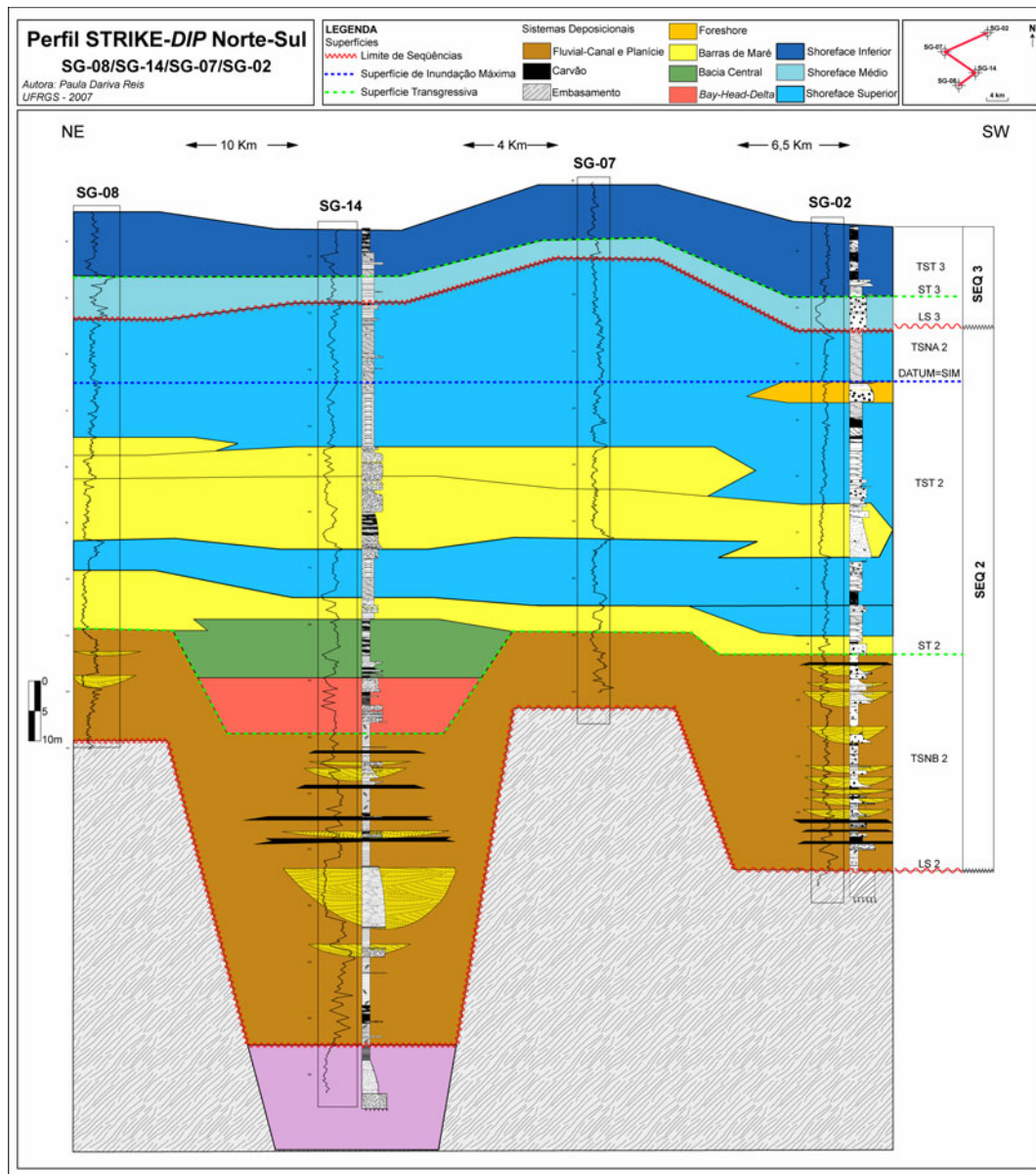


Figura 5: Perfil de correlação dos poços associado com o arcabouço estratigráfico.

A Sequência Depositional 1, que representa os sedimentos do Grupo Itararé que assentam sobre o embasamento, apesar de descrita não foi detalhada no presente trabalho em virtude de encontrar-se fora do intervalo de interesse.

A Sequência Depositional 2 (SEQ2) inicia na base com o Trato de Sistema de Nível Baixo 2 (TSNB2), representado pela sedimentação fluvial que, nos poços SG-02, SG-07 e SG-08 estão depositado sobre o embasamento, enquanto que no SG-14 assenta-se sobre os sedimentos glaciais do Grupo Itararé. No topo deste trato, verifica-se uma notável transgressão marinha, onde delimitou-se a Superfície Transgressiva 2 (ST2), representado pelos primeiros registros do sistema deposicional estuarino. Nos poços SG-02, SG-07 e SG-08 este registro é representado pela passagem dos sistemas fluviais para os arenitos de barras de maré, enquanto que no poço SG-14, para as fácies de Bay-Head-Delta, e sobreposto a este, o registro da porção central do estuário – a sedimentação mais fina do Central Basin. O Trato de Sistemas Transgressivo 2 (TST2) é caracterizado pelas barras de maré que gradam para os arenitos finos de shoreface superior, onde, com o lento e contínuo afogamentos dos sistemas mais proximais, culmina com a Superfície de Inundação Máxima da sequência

(SIM2). Sucedendo o TST2, tem-se o Trato de Sistemas de Nível Alto 2 (TSNA2), constituído por arenitos finos com *swaley*, de *shoreface* superior, e com seu topo erodido pelo Limite de Seqüências 3 (LS3).

A Seqüência Depositional 3 (SEQ3) tem sua porção basal marcado pela deposição abrupta de arenitos finos com *hummocky cross stratification*, interpretados como sistemas de *shoreface* médio, sobre o TSNA2. Seguindo-se a isso, tem-se uma nova transgressão marinha na área de estudo, onde identificou-se a superfície transgressiva 3 (ST3), representado pela sobreposição dos registros do *shoreface* inferior sobre o *shoreface* médio. O Trato de Sistemas Transgressivo 3 (TST3), retratado pela passagem do primeiro sistema deposicional sobre o segundo não teve o seu topo mapeado em virtude de encontrar-se fora do intervalo de interesse, onde o que se tem são os registros faciológicos da Formação Palermo.

4.3 Análise Multiescalar da Área de Estudo

No presente trabalho, foram utilizadas as escalas de heterogeneidades propostas por Küchle & Holz, 2002, onde foram abordadas do nível 1 (Seqüências Depositionais) até o Nível 4 (Fácies) – Figura 6.

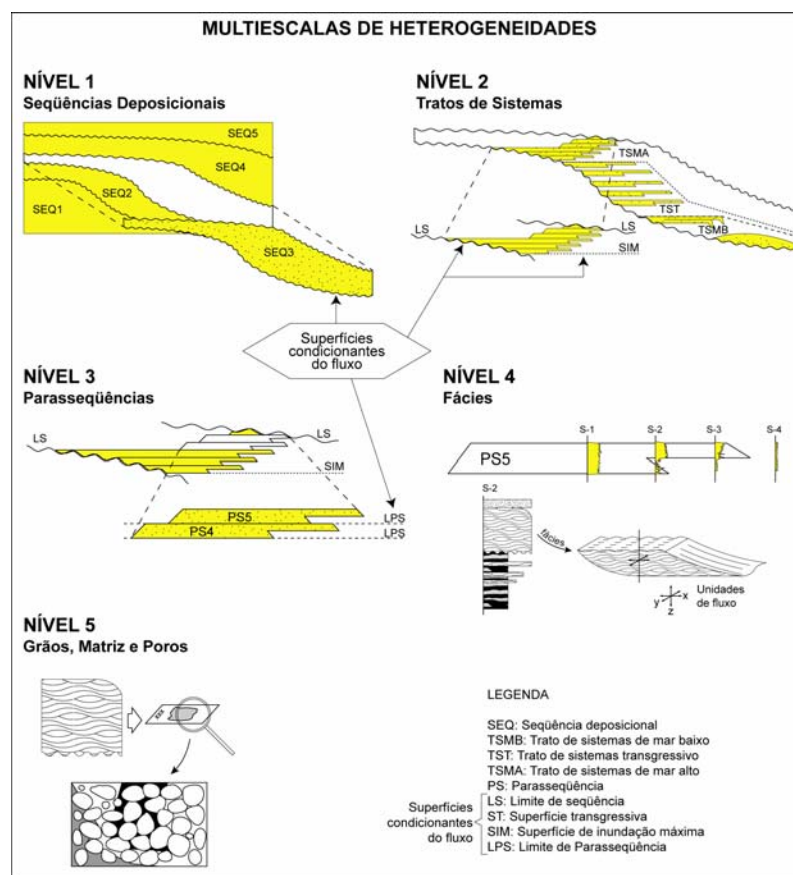


Figura 6: Modelo multiescalar de heterogeneidades aplicado no presente estudo (modificado de Kuchle & Holz, 2002).

Heterogeneidades de Nível 1- No nível de Seqüências Depositionais, as heterogeneidades das seqüências mapeadas estão relacionadas aos limites de seqüências, que podem atuar como uma barreira ao fluxo de fluídos, se levarmos em consideração que nestas superfícies limítrofes atuaram processos diagenéticos, por exemplo, e o material sedimentado limitará o curso do material a ser prospectado, seja ele óleo ou água. Neste nível de análise, os potenciais reservatórios encontram-se na seqüência 2 (SEQ2).

Heterogeneidades de Nível 2- No nível de tratos de sistema, as superfícies condicionantes ao fluxo de fluídos são, além do limite de seqüências, tratado no item anterior, a superfície transgressiva e a SIM, onde ambas apresentam como registro litológico sedimentos finos como siltitos e folhelhos, limitando a passagem de fluídos no corpo reservatório. Neste nível, o que podemos visualizar é que o intervalo que apresenta o melhor potencial está inserido no Trato de Sistemas Transgressivo 2 (TST2), por apresentar as melhores litologias reservatório associadas aos sistemas deposicionais costeiros (no caso, as sucessões de barras de marés intercaladas com os depósitos de *shoreface*, que serão analisados em um nível superior).

Heterogeneidades de Nível 3- No nível de parassequências, os limites basais registram o momento de uma inundação em uma determinada área. Isto significa que o registro destes intervalos são caracterizados por fácies pelíticas, que pode agir como uma superfície limitadora ao fluxo de fluidos internos ao reservatórios. Neste caso, as parassequências formadoras e compartimentadoras internas ao Trato de Sistemas Transgressivo 2 compõem o principal conjunto de unidades reservatório nesta escala de análise.

Heterogeneidades de Nível 4- No nível de fácies temos como superfícies condicionantes do fluxo de fluidos as estruturas internas às fácies, como drapes de lama, *tidal bundles*, estratificações e laminações. Os potenciais reservatórios neste nível de detalhe são os relacionados principalmente a ambientes de *foreshore*, que apresentam areias médias, maduras e bem selecionadas, e ainda sistemas fluviais e barras de maré, compostos por arenitos médios com estratificação cruzada acanalada.

4.4 Modelagem Tridimensional

Utilizando-se dados numéricos, como a profundidade em cota das superfícies mapeadas (topo do embasamento, LS2, TSNB2, ST2, TST2, SIM2, TSNA2, LS3, TSNB3, ST3 E TST3) em cada um dos poços analisados, foi possível elaborar, com o uso do *software* GOCAD, um modelo tridimensional da área de estudo, onde, juntamente com a aplicação dos conceitos da Estratigrafia de Sequências pôde-se compreender o comportamento espaço-temporal destas superfícies cronoestratigráficas delimitadoras do fluxo interno de fluidos, e diagnosticar com maior precisão, o melhor reservatório a ser explorado.

Na área de estudo, os melhores reservatórios são os arenitos fluviais, que situam-se no Trato de Sistemas de Nível Baixo 2 (TSNB2), e de barras de maré e *foreshore*, que encontram-se no Trato de Sistemas Transgressivo 2. A figura 7 apresenta o modelo tridimensional da área de estudo, mostrando a relação entre as superfícies mapeadas.

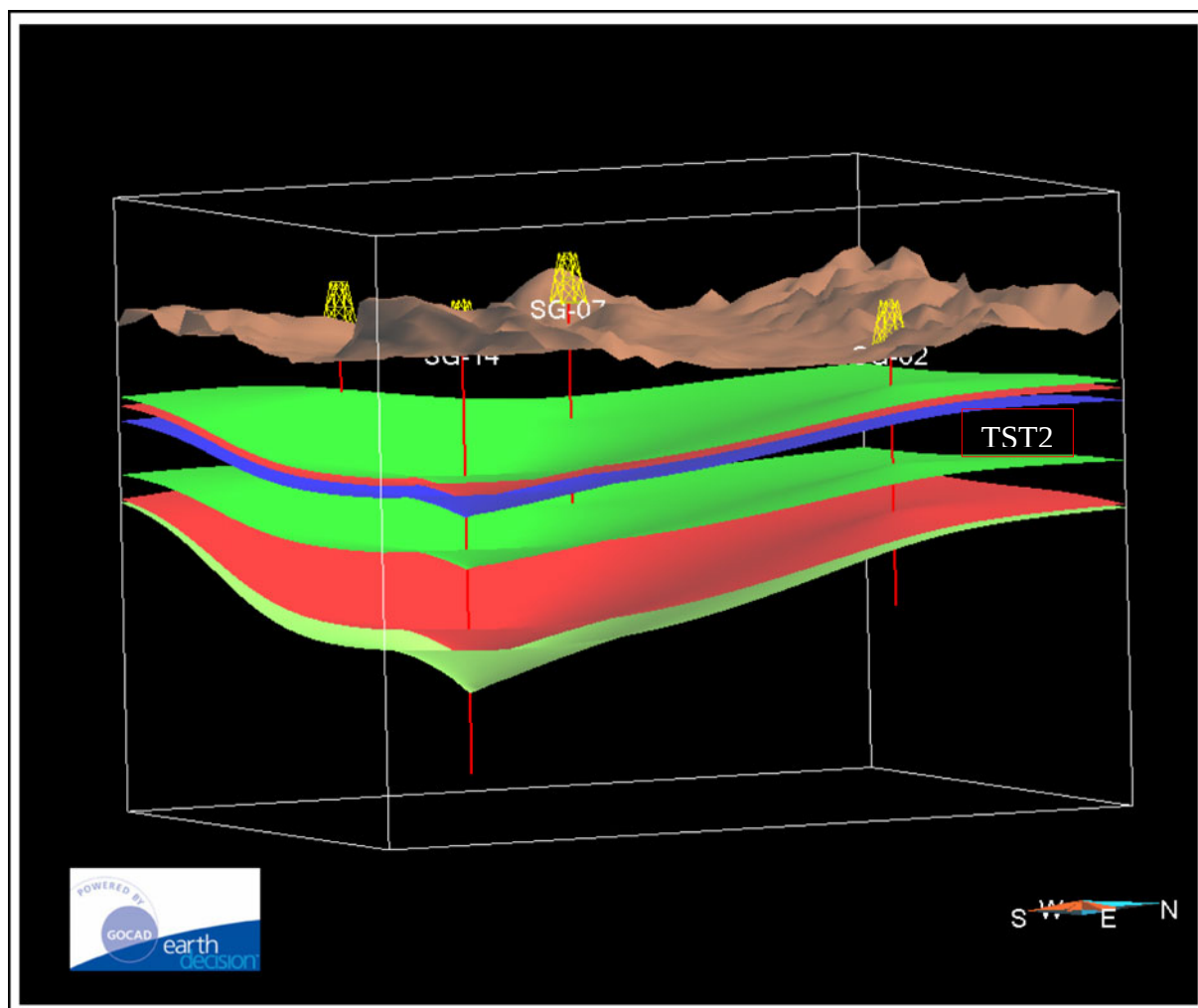


Figura 7: Modelo Tridimensional da área de estudo, no qual tem-se em vermelho os limites de sequências outrora mapeados; em verde as superfícies transgressivas, em azul a superfície de inundação máxima e em marrom a superfície do terreno.

No que diz respeito à geometria dos corpos sedimentares mapeados, os reservatórios associados a ambientes de *foreshore* apresentam baixas espessuras, da ordem de 10m, porém com grandes extensões laterais, por se tratarem de depósitos tabulares, além de maturidade composicional e boa seleção entre os grãos. Desta forma, indica-se como principal enfoque exploratório o eixo ao longo da seção *strike* de correlação (paralelo à linha de costa). Já os depósitos relacionados a sistemas fluviais e de barras de maré, são corpos que apresentam uma geometria alongada, ou seja, de restrita continuidade lateral porém com grandes espessuras. Assim, este tipo de reservatório deve ser prospectado na sua seção *dip* (transversal à linha de costa), seguindo sua extensão deposicional principal.

Usualmente, os corpos sedimentares que apresentam geometria tabular, como os sistemas deposicionais de *foreshore*, são mais confiáveis em termos preditivos de exploração, ou seja, apresentam menor risco de erros na fase de desenvolvimento em comparação aos que constituem-se de formato alongado, como as barras de maré e os sistemas fluviais; porém, o que pode ser visto na área de estudo, é que são justamente estes últimos sistemas citados que apresentam uma melhor correlação, pois, conforme pode ser visualizado na figura 5, o sistema de *foreshore* é reconhecido apenas no poço SG-02. Assim, para um futuro detalhamento e melhor avaliação dos reservatórios associados a sistemas de *foreshore*, sugere-se que sejam selecionados poços em direção leste-oeste da área de estudo, que representaria a seção *strike* de correlação.

5. CONCLUSÃO

A Estratigrafia de Seqüências de alta resolução é uma ferramenta de fundamental importância para a geração de modelos análogos de reservatórios, pois fornece informações de cunho genético em relação aos perfis analisados, e isso, no trabalho atual contribuiu para melhor caracterizar um potencial corpo reservatório em escala de 3ª e 4ª ordens.

A escolha do melhor reservatório vinculados aos sub-sistemas estuarinos de barra de maré levou-se em conta a correlação entre os poços, o correto mapeamento dos sistemas deposicionais envolvidos e o método multiescalar de heterogeneidades que permitiu-nos prever em diversas escalas de análise as possíveis superfícies condicionantes do fluxo de fluidos; e a técnica de modelagem tridimensional se fez um instrumento confiável e eficaz para delimitar o intervalo onde se distribui o corpo identificado como principal modelo análogo de reservatórios.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Cia. de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) pelo acesso a testemunhos de sondagem e material de acervo e à *Earth Decision Softwares* pela liberação de licenças acadêmicas do *software* GOCAD. Paula Dariva dos Reis agradece ao CNPq-PIBIC pela bolsa de Iniciação Científica, Julianio Kuchle agradece à ANP pela bolsa de doutorado e Michael Holz agradece ao CNPq pelo apoio a atividade de pesquisador.

7. REFERÊNCIAS

- GALLOWAY, W.E & HOBDAI, D.K. 1998. Terrigenous clastic depositional systems. Springer-Verlag ed. New York, USA. 2nd.
- JORDAN, D.W & PRYOR, W.A. 1992. Hierarchical Levels of Heterogeneity in a Mississippi River Meander Belt and Application to Reservoir Systems. AAPG, v. 24, p. 1601-1624.
- PAIM, P.S.G; FACCINI, U.F & R.G. NETTO. 2003. Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares – Estudo de casos.
- KÜCHLE, J. & HOLZ, M. 2002. Aplicação da Estratigrafia de Seqüências para Caracterização em Multiescala de Reservatórios no Grupo Guatá (Eopermiano da Bacia do Paraná) na região de São Gabriel-RS, Brasil. Revista Pesquisas em Geociências, v. 29, nº 2, p. 3-20
- BOYD, R., DALRYMPLE, R., and ZAITLIN, B.A., 1992, Classification of clastic coastal depositional environments: Sedimentary Geology, v.80, p.139-150.
- MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B. & SCHNEIDER, R.L. 1994. Bacia do Paraná. In: Feijó, F.J. (Ed.), Cartas estratigráficas das bacias sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da PETROBRÁS 8(2):69-82.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.