

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



**A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) - como
análogo para os reservatórios ígneo- básicos da margem
continental brasileira**

GLEICE DOS SANTOS REIS

ORIENTADORA:

Prof^a. Dr^a. Ana Maria Pimentel Mizusaki

CO-ORIENTADOR:

Prof. Dr. Ari Roisenberg

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rualdo Menegat - UFRGS

Profa. Dra. Márcia Aparecida de S`antana Barros - UFMT

Prof. Dr. Antonio Thomaz Filho - USP

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título
de Mestre em Geociências

Porto Alegre, 2013

Reis, Gleice dos Santos

A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná- como análogo para os reservatórios ígneo-básicos de margem continental brasileira. / Gleice dos Santos Reis. - Porto Alegre : IGEO/UFRGS, 2013.

[89 f.] il.

Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2013.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Maria Pimentel Mizusaki

Co-orientador: Ari Roisenberg

1. Rocha reservatório. 2. Sequência vulcano-sedimentar. 3. Bacia do Paraná. 4. Bacia de Campos. 5. Análogo. Título.

Catálogo na Publicação
Biblioteca Geociências - UFRGS
Miriam Alves CRB 10/1947

Ao meu querido avô Natalino Francisco dos Santos (*in memoriam*), pelo seu exemplo de vida."

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Localização das áreas de estudo: “1” (região do Salto do Jacuí, RS) e “2” (região compreendida entre a Serra do Rio do Rastro (SC), Cambará do Sul e Rota do Sol, (RS).....	8
Figura 2 – Fluxograma da metodologia empregada.....	11
Figura 3 - Mapa de localização dos pontos de coleta de amostras na região do Salto do Jacuí/RS (área “1”) e, na região abrangida pelas cidades de Torres (RS), Criciúma (SC) e Cambará do Sul (RS) (área “2”).....	12
Figura 4 - Fluxograma de trabalho com as etapas e metodologias utilizadas para tratamento e análise dos dados estruturais.....	16
Figura 5 - Mapa de localização da Bacia do Paraná (modif. de Zalán <i>et al.</i> , 1991). .	19
Figura 6 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná (modif. de Milani, 1997).	20
Figura 7 – Formação Botucatu a) afloramento típico destacando-se a presença de fraturas NE; b) detalhe de uma amostra do arenito Botucatu com grãos arredondados, bem selecionados e boa porosidade; c) estratificação cruzada característica indicando ambiente eólico (coords.: 360953° - 715497 °); d) detalhe mostrando <i>intertrap</i> do arenito Botucatu (coords: 341639 ° - 7629700 °) (fotos de 11/2011)	22
Figura 8 - Formação Serra Geral a) Cânion do Itaimbezinho (RS); observar derrames "empilhados" (11/2010); b) aspecto macrocópico da rocha basáltica, textura afanítica e coloração cinza escura (04/ 2011 – UTM: 527502 ⁰ /6755822 ⁰); c) contato entre o arenito Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral; observar a presença de brechas vulcânicas (11/2010 –UTM: 296190 ⁰ /6766406 ⁰); d) feições vesiculares parcialmente preenchidas por zeólitas (04/ 2011 –UTM: 595885 ⁰ /6771315 ⁰).....	27
Figura 9 - a)- <i>Intertrap</i> de arenito em meio aos derrames de lava, cuja origem ocorre através do avanço de dunas sobre os derrames de lava e posteriormente recobertos por estes após o início do evento vulcânico; b)-Brecha vulcânica, formado através de diversos fragmentos da própria rocha; C)-Dique de arenito, estruturas de intrusão de areia em fraturas do basalto; d)-Disjunção colunar, formam através do resfriamento do basalto, onde ocorrem rupturas dando origem a colunas; e)-Basalto Vesicular, vesículas formadas durante a consolidação das lavas; f)-Vesículas preenchidas parcialmente ou totalmente por minerais secundários.	32
Figura 10 – Modelo digital do terreno com interpretação estrutural da Área “1”	35
Figura 11 – Falhamento da família nordeste-sudoeste com mergulho verticalizado (UTM: 341639 ⁰ /6729700 ⁰).....	36
Figura 12 – Modelo digital do terreno com interpretação estrutural da Área “2”	37
Figura 13 – Sistema de falhamento escalonado NE com mergulho verticalizado e brechação, na rodovia Rota do So (UTM: 341639 ⁰ /6729700 ⁰).	38

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	4
AGRADECIMENTOS	6
RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Trabalhos Anteriores	4
1.3. Localização da área de estudo.....	6
1.4 Metodologia.....	9
1.4.1 Petrografia	13
1.4.2 Difratomia de raios X (DRX)	13
1.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	14
1.4.4. Análises químicas.....	14
1.4.5. Análise dos Dados Estruturais.....	15
2. CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA.....	17
2.1. Bacia do Paraná.....	17
2.2. Supersequência Gondwana III	18
2.2.1 Formação Botucatu.....	21
2.2.2 Formação Serra Geral	22
3. RESULTADOS OBTIDOS.....	27
3.1 Rochas vulcânicas, sedimentares e feições de interação nas áreas de estudo.....	27
3.1.1 Derrames	28
3.1.2- Intertraps arenosos.....	29
3.1.3- Feições de interação	29
3.2 Têctonica das áreas de estudo	33
4. GEOLOGIA DO PETRÓLEO.....	40
4.1 Reservatórios não-convencionais – Rochas Igneas.....	40
4.2 . Modelos análogos	41
5. RESULTADOS OBTIDOS.....	43
5.1 carta de submissão do artigo	43
5.2 Artigo: FORMAÇÃO SERRA GERAL (CRETÁCEO DA BACIA DO PARANÁ) – UM ANÁLOGO PARA OS RESERVATÓRIOS ÍGNEO-BÁSICOS DA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA.....	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa em Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de cursar e concluir o mestrado em Geociências.

Agradeço a minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Maria Pimentel Mizusaki pela excelente orientação, pela confiança, amizade e por todo o apoio durante o curso. Também ao Prof. Dr. Ari Roisenberg, meu co-orientador pelo apoio recebido.

Sou grata aos colegas participantes do projeto: Cassiana, Daiane, Guilherme e Léo pela ajuda com as amostras e análises. Ao Luiz Flávio pelas fotos das amostras e ao motorista Sr. Aduino pelo nosso transporte e apoio durante os trabalhos de campo.

Agradeço Sr. Francisco Brasil pelas imagens de satélites cedidas que foram fundamentais na interpretação e elaboração dos mapas. A minha querida tia Terezinha por me acolher durante minha estadia em Porto Alegre e aos meus sogros João e Tarcila que me receberam como filha nos finais de semana.

Aos meus pais Inês e Ely que sempre acreditaram em meus sonhos e aos meus irmãos Saulir, Evyla e ao caçula Joabe pelo seu grande amor.

E de coração agradeço ao meu querido esposo Rogério por todo o apoio e dedicação, pelo auxílio e coleta de dados em campo, pelas horas dedicadas no auxílio dos mapas, realmente um grande companheiro nas horas de alegria e sufoco. Também a nossa pequena geóloga Raquel (“tatu-bola”), que me acompanha nos campos do mestrado desde o ventre e com toda certeza me deu muito mais inspiração para trilhar meu caminho.

RESUMO

As rochas magmáticas vêm ganhando destaque na geologia do petróleo, isto por que um crescente número de descobertas mundiais de hidrocarbonetos tem sido observados onde estas rochas se constituem em reservatórios de hidrocarbonetos, tendo em vista as perspectivas de terem atuado como efetivos selantes e, em consequência, possibilitando a acumulação de hidrocarbonetos gerados nos sedimentos subjacentes. Normalmente, as rochas ígneo-básicas constituem um reservatório em que predomina um intenso sistema de fraturas interligadas, abrindo espaços vazios (porosidade) o que permite também boa permeabilidade ao reservatório. Secundariamente, outras fontes de porosidade podem ser identificadas, como as vesiculares e a porosidade da matriz alterada. Um dos maiores problemas para o conhecimento e exploração dos reservatórios em rochas ígneo básicas é a ausência de modelos. Assim, há necessidade de entendimento das rochas vulcânicas sob o ponto de vista de reservatório e o desenvolvimento de modelos que permitam uma melhor exploração destas reservas. Neste sentido, a Formação Serra Geral (Cretáceo, com aproximadamente 133 Ma) aflorante na Bacia do Paraná, torna-se um excelente análogo para os reservatórios sob ponto de vista tectono-estratigráfico, pois é contemporânea a este vulcanismo Neocomiano das bacias marginais brasileiras e suas feições texturais e estruturais estão expostas em excelentes afloramentos o que não ocorre com o magmatismo das bacias marginais. Com isto, as microestruturas como poros (vesículas), fraturas e descontinuidades, típicas de eventos vulcânicos, consideradas como responsáveis pela permo-porosidade deste tipo de rocha podem ser analisadas em detalhe. As rochas vulcânicas da Bacia do Paraná estão expostas tanto verticalmente quanto lateralmente em áreas de extensão considerável e, por isto, apresentam potencial para uma amostragem seqüencial objetivando diversos tipos de estudos e análises (química, microscopia ótica, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, entre outras).

ABSTRACT

Magmatic rocks are having evidence in petroleum geology because a growing number of hydrocarbon discoveries in which these rocks constitute reservoirs are being recognized. Magmatic rocks in hydrocarbon producing basins can be effective seals or give thermal increase to the oil generation. Nowadays, emphasis is given to the magmatic rocks as non conventional reservoirs. Typically basic igneous-rocks form fractured reservoirs dominated by interconnected fractures (fracture porosity). Secondly, other sources of porosity can be identified, such as vesicular and microporosity. A major problem for knowledge and exploitation of these reservoirs is the lack of models. For that reason, there is a necessity of understanding volcanic rocks from the point of view of the reservoir and the development of models that will allow a better exploitation of these reserves. In this sense, the Serra Geral Formation (Cretaceous, around 133 Ma) which crops out in the Paraná Basin, becomes an excellent analogous for igneous reservoirs. Serra Geral Formation is a contemporary volcanism to the Neocomian igneous reservoirs, economic basement of the Brazilian marginal basins. Their structural, stratigraphy and textural features are exposed in excellent outcrops which doesn't occur with the magmatism of marginal basins. With this, the microstructures such as pores vesicles, fractures and discontinuities, typical of volcanic events, considered responsible for the permo-porosity system of this rock type can be analyzed in detail. Volcanic rocks of the Paraná Basin are exposed both vertically and laterally in areas of considerable extent and, therefore, have potential for a sequential sampling aiming various types of studies and analyzes (chemical, optical microscopy, X-ray diffraction, electron microscopy scanning, among others).

1. INTRODUÇÃO

Rochas vulcânicas extrusivas (derrames) são ocorrências comuns nos diferentes períodos geológicos (principalmente do Paleozóico ao Terciário) das bacias sedimentares brasileiras, especialmente aquelas da margem continental sul-sudeste, nas do tipo *rifte* e nas bacias intracratônicas (Mizusaki *et al.*, 1992; Almeida *et al.*, 1996).

A Bacia do Paraná constitui uma vasta área de sedimentação paleozóica-mesozóica, com uma área superior a 1,4 milhões de km², estendendo-se pelo Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina (Milani, 1997). Nesta bacia ocorre uma sucessão sedimentar-magmática, de registros policíclicos com uma espessura máxima do pacote em torno de 7.000 m, no centro geométrico da bacia (Milani & Thomaz Filho, 2000). Ainda segundo estes autores, o registro estratigráfico da Bacia do Paraná consiste basicamente de cinco sequências deposicionais principais, que variam, em idade, do Ordoviciano ao Cretáceo. É importante frisar que o preenchimento sedimentar da bacia é predominantemente siliciclástico, sendo capeado pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Os derrames de lavas basálticas da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná representam uma das maiores manifestações vulcânicas episódicas de caráter básico do Neocomiano.

As rochas que compõem os derrames da Formação Serra Geral registram uma espessura de até 2.000 m de basalto sobre os sedimentos da Bacia do Paraná, sendo principalmente representadas por derrames de natureza básica e subordinadamente por efusivas ácidas. Também ocorreu significativa atividade ígnea intrusiva (representada por *sills* e diques).

Os derrames encontram-se em contato concordante e abrupto sobre os arenitos da Formação Botucatu. É comum, nas porções mais basais da sequência vulcânica, a presença de *intertraps* deste arenito em meio aos derrames de lava, cuja origem parece estar relacionada a um intervalo de quiescência do evento vulcânico.

Nos últimos anos, os estudos de rochas magmáticas e sua influência sobre os processos de geração e acumulação de hidrocarbonetos vem ganhando destaque na literatura. Citam-se os casos de influência na geração, estruturas que facilitam os processos de migração, estruturas que atuam como reservatórios e também como selantes e trapeadores (Thomaz Filho *et al.*, 2008a). O magmatismo intrusivo é

acompanhado pela elevação da temperatura nas proximidades de intrusões o que pode eventualmente contribuir para o processo de maturação da matéria orgânica nela contida. Ao mesmo tempo, tem se verificado que as heterogeneidades nos contatos diques/ rochas sedimentares podem ser importantes rotas de migração para os hidrocarbonetos. Estudos recentes têm mostrado que o magmatismo deve merecer análises mais pormenorizadas até mesmo em suas manifestações extrusivas, tendo em vista as perspectivas de terem atuado como efetivos selantes e reservatórios não convencionais e, em conseqüência, possibilitando a acumulação de hidrocarbonetos gerados nos sedimentos subjacentes (P'an, 1983; Schiuma, 1988; Mizusaki *et al.*, 1992; Chen *et al.*, 1999; Gu *et al.*, 2002; Sircar, 2004; Mizusaki & Thomaz-Filho, 2004; Eiras & Wanderley Filho, 2006).

As rochas ígneo básicas do embasamento econômico da Bacia de Campos, associam-se ao magmatismo cretáceo que manifestou-se de forma significativa nas bacias da margem continental brasileira, fruto do extravasamento do magma astenosférico que chegou próximo da superfície, quando do processo de *rifteamento* que separou os continentes sul-americano e africano (Thomaz Filho *et al.*, 2008 a,b). Nesta etapa, ocorreram diversas reativações tectônicas do embasamento, onde falhas e fraturas foram reativadas e serviram de conduto para o magmatismo (Almeida, 1986). As rochas ígneo básicas do Cretáceo da Bacia de Campos são reservatórios não convencionais de hidrocarbonetos e vem sendo exploradas.

Pode-se dizer que um dos maiores problemas para o conhecimento e exploração dos reservatórios em rochas ígneo básicas é a ausência de modelos. Assim, há necessidade de entendimento das rochas vulcânicas sob o ponto de vista de reservatório e o desenvolvimento de modelos que permitam uma melhor exploração destas reservas. Neste sentido, a Formação Serra Geral aflorante na Bacia do Paraná, torna-se um excelente análogo para os reservatórios ígneo-básicos. Neste trabalho, a Formação Serra Geral será analisada sob ponto de vista tectono-estratigráfico procurando-se obter informações que permitam o tratamento desta unidade como um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação consiste na análise tectono-estratigráfica integrada da Formação Serra Geral (Bacia do Paraná) visando à proposição de modelo análogo para as rochas vulcano-sedimentares cretáceas que são importantes reservatórios não convencionais das bacias da margem continental brasileira.

A Formação Serra Geral será analisada pela integração da estratigrafia, da tectônica e da aplicação de técnicas analíticas específicas como a petrografia. Com isto será possível o estabelecimento de uma arquitetura interna de fácies, das estruturas e das propriedades permo-porosas, ressaltando-se aquelas situações mais apropriadas do ponto de vista de reservatório de hidrocarboneto.

O trabalho aqui proposto pode ter impacto imediato na interpretação e avaliação de sequências vulcano-sedimentares como reservatório potencial de hidrocarbonetos, podendo contribuir significativamente para a redução do risco exploratório/explotatório.

1.2. Trabalhos Anteriores

Arenitos e carbonatos são considerados como os reservatórios convencionais de hidrocarbonetos. No entanto, um crescente número de descobertas mundiais de hidrocarbonetos tem sido observado onde os reservatórios são constituídos por rochas vulcânicas fraturadas.

As rochas ígneas constituem os denominados reservatórios não convencionais pois o sistema permo-poroso é diferente do apresentado pelos arenitos e carbonatos (P'an, 1983).

Normalmente é um reservatório em que predomina um intenso sistema de fraturas interligadas o que confere a permeabilidade ao sistema. Secundariamente, outras fontes de permo-porosidade podem ser identificadas, como as vesiculares e a microporosidade associada com a matriz alterada, desde que esses espaços vazios sejam intercomunicados e assim permitam o desenvolvimento de permeabilidade (Mizusaki, 1986).

Inúmeras descobertas têm indicado as rochas vulcânicas como reservatórios não convencionais de hidrocarbonetos, a exemplo, os campos de óleo da Bacia de Liaohe (República Popular da China) associados a derrames de basalto e com boas vazões iniciais de óleo (Chen *et al.*, 1999). O campo gigante de Daqing, descoberto em 1959, é o maior campo de petróleo na China e um dos maiores do mundo onde o gás foi encontrado em rochas vulcânicas em profundidades variando entre 3.000 e 6.000 m (Li *et al.*, 2006).

Na Bacia de Neuquen (Argentina), Schiuma (1988) descreve a presença de óleo e gás em diabásios fraturados também com uma excelente produção. Na Bacia do Tacutu, na Guiana, há registro da produção de óleo com depleção posterior em basaltos fraturados (P'an, 1983). São conhecidos ainda reservatórios em traquitos pórfiros na China e em riolitos fraturados no Japão (Gu *et al.*, 2002).

Na Bacia do Cambay, uma das mais antigas produtoras de hidrocarbonetos da Índia, a produção ocorria a partir dos reservatórios arenosos que estão sotopostos aos basaltos do Deccan (embasamento da bacia). Recentemente, verificou-se que os basaltos do Deccan também eram reservatórios. Atualmente, a maior produção provem deste reservatório vulcânico secundário conforme apresentado por Negi *et al.* (2006).

Os campos de Badejo e Linguado da Bacia de Campos, margem continental brasileira, são bons exemplos de produção de hidrocarbonetos em reservatórios de rochas vulcânicas fraturadas (Mizusaki, 1986). São derrames fraturados originados pelo vulcanismo Juro-Cretáceo associado a separação continental Brasil-África, constituindo a denominada Formação Cabiúnas (Mizusaki *et al.*, 1992). O preenchimento deste reservatório é associado aos falhamentos que colocaram os folhelhos geradores da bacia em contato lateral com os derrames básicos. Este reservatório não convencional foi um dos objetivos principais no início da exploração da Bacia de Campos, mas depois ficou em segundo plano em virtude do sucesso obtido com outros prospectos (Eiras & Wanderley Filho, 2006).

A capacidade da rocha vulcânica para o *trapeamento* de hidrocarbonetos varia de acordo com as fácies litológicas. Verifica-se que intervalos de rochas vulcânicas com vesículas (atuam como poros), microfraturas e fraturas bem desenvolvidas e conectadas podem servir de possíveis zonas de reservatório (Sircar, 2004). Além disso, processos de intemperismo muito atuantes nestas zonas contribuem no sentido do aumento da microporosidade. Outra característica importante é a possibilidade de alargamento destes espaços porosos pela circulação de fluídos criando canais e espaços para a migração e *trapeamento* de hidrocarbonetos.

O tectonismo posterior originando fraturas secundárias é outro parâmetro a ser considerado nas sequências vulcano-sedimentares espessas como a observada na Bacia do Paraná e nas bacias marginais brasileiras, especialmente na sua porção sul-sudeste.

Nas bacias sedimentares da margem continental brasileira, o processo de *rifteamento* que no Neojurássico ao Eocretáceo deu origem ao Atlântico Sul, foi marcado por inúmeros eventos magmáticos, especialmente registrados, nos altos que as separam e também no continente emerso adjacente. Esses eventos são bem conhecidos nas áreas continentais emersas. No entanto, na área marginal submersa, o conhecimento depende da disponibilidade e da análise de testemunhos de sondagens obtidas, em sua maioria, pela Petrobras quando da prospecção de hidrocarbonetos (Mizusaki & Thomaz-Filho, 2004).

Diversas pesquisas foram realizadas na Bacia do Paraná (porção sul do continente sul-americano), onde o principal foco foi a influência dos eventos magmáticos que afetaram as bacias paleozóicas brasileiras e que, de alguma forma, poderiam estar relacionados com a ocorrência de petróleo (Thomaz-Filho, 1982;

Araújo *et al.* 2005, 2006; e Thomaz-Filho *et al.*, 2008 a,b). A Bacia do Paraná foi detalhadamente estudada pelos autores permitindo a elaboração de um modelo de geração, migração e acumulação de petróleo que pode ser aplicado em outras porções desta bacia e, mesmo, nas outras bacias paleozóicas brasileiras, com o objetivo de buscar novas oportunidades de exploração de hidrocarbonetos (Thomaz-Filho *et al.*, 2008).

1.3. Localização da área de estudo

Para a realização deste estudo foram selecionadas duas áreas da Bacia do Paraná (Fig. 1) onde a Formação Serra Geral está aflorante. Nestes locais é possível a observação de feições tectono-estratigráficas, bem como intenso fraturamento e vesículas, feições de interesse para a proposição de um análogo de rochas-reservatório. Além disso, ocorre a presença dos chamados “diques de arenito” e de diferentes tipos de brechas vulcânicas, resultantes da interação entre os basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu.

A área de estudo “1” localiza-se na região do Salto do Jacuí, porção central do estado do Rio Grande do Sul. O levantamento stratigráfico, tectônico e coleta de amostras abrange desde as proximidades da cidade de Santa Cruz do Sul até o Salto do Jacuí, com distâncias que variam de 155 a 284 km, respectivamente, em relação a Porto Alegre, capital do estado. As principais rodovias utilizadas, a partir de Porto Alegre, foram a BR-386 e as RS 471, 481, 347 e 287. Esta região foi selecionada pela presença de *intertraps*, fraturas, vesículas e interações dos derrames com o arenito Botucatu formando estruturas consideradas interessantes para um modelo de reservatório não convencional. Estas informações foram obtidas junto a Michelin (2012) que desenvolve tese de doutoramento nesta região.

A área “2” localiza-se na região compreendida entre as cidades de Torres (RS), Criciúma (SC) e Cambará do Sul (RS) incluindo-se aí a Serra do Rio do Rasto (SC). Este segundo levantamento stratigráfico, tectônico e coleta de amostras iniciou-se na Serra do Rio do Rasto (SC) nas proximidades da cidade de Criciúma (SC), de onde dirigiu-se para a cidade de Cambará do Sul (RS) através da estrada que passa por Praia Grande (SC) e finalmente retornou-se pela Rota do Sol (RS 486) até a cidade de Porto Alegre (RS). As distâncias variam entre 360 km e 233 km, em relação a Porto Alegre. As principais rodovias utilizadas, a partir de Porto Alegre, foram as BRs -116 e a 101, as SCs-445, 446, 447, 438 e as RSs-486 (Rota do Sol)

e 235. Esta região foi selecionada devido ao intenso fraturamento observado bem como a presença de estruturas resultantes da interação das lavas com o arenito Botucatu.

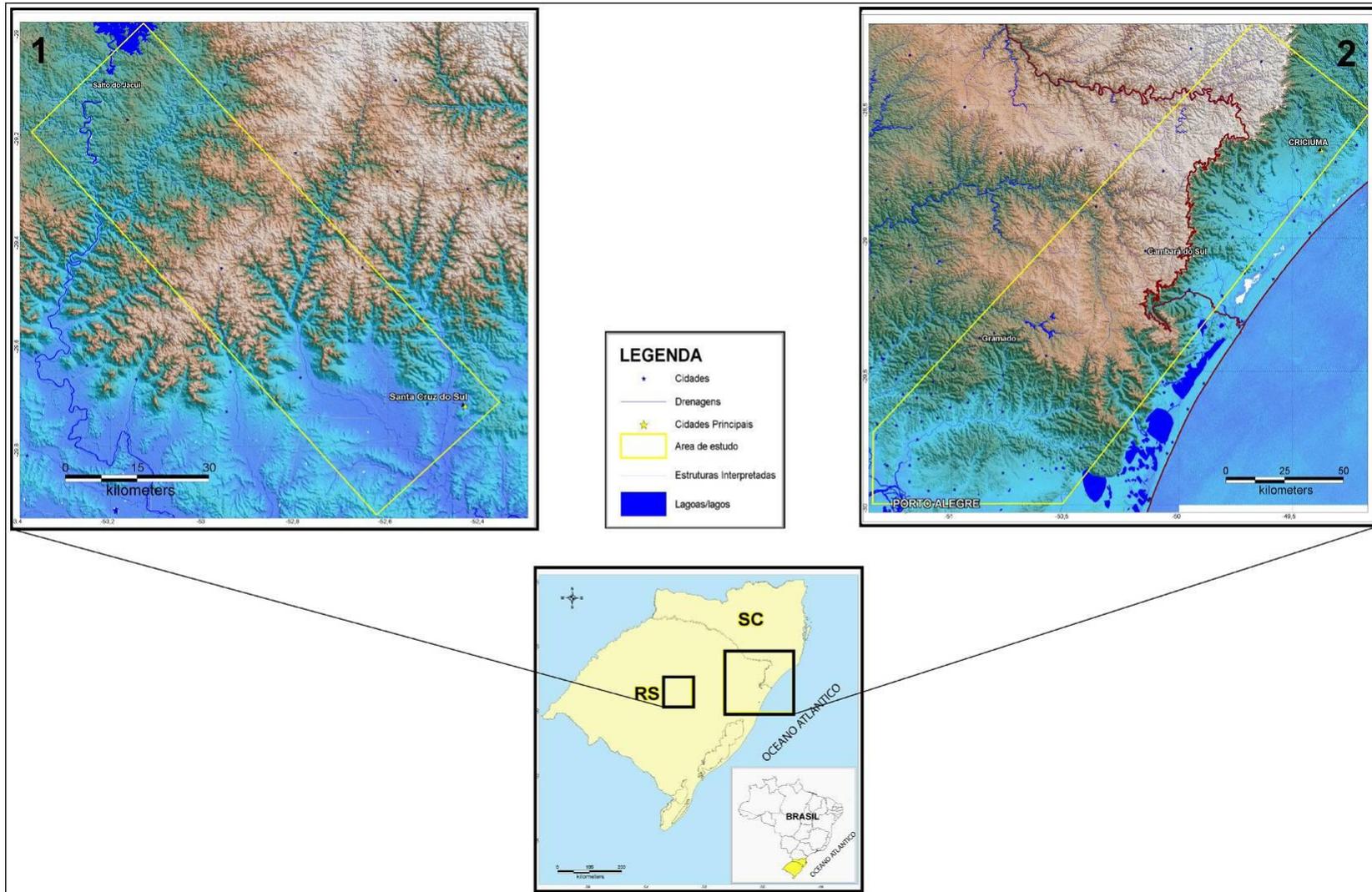


Figura 1– Localização das áreas de estudo: “1” (região do Salto do Jacuí, RS) e “2” (região compreendida entre a Serra do Rio do Rastro (SC), Cambará do Sul e Rota do Sol, (RS)).

1.4 Metodologia

A metodologia pode ser dividida em três etapas principais (Fig. 2)

- pesquisa bibliográfica;
- atividades de campo;
- atividades de laboratório, além do tratamento dos dados e confecção desta dissertação.

A primeira etapa foi destinada ao levantamento bibliográfico dos artigos técnico-científicos nacionais e internacionais, teses e dissertações que discutem as rochas magmáticas básicas e seu papel na geologia do petróleo, especialmente sob o ponto de vista de reservatório.

Paralelamente também foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a Formação Serra Geral da Bacia do Paraná (Milani, 1997; Milani, 2000; Assine *et al.*, 2004; Marques & Ernesto, 2004; Nardy, 2008, entre outros). Nesta etapa ainda foram realizadas: seleções de fotos aéreas, das imagens de satélite e dos mapas topográficos das regiões selecionadas para o estudo.

Na segunda etapa foram realizados trabalhos de campo nos locais selecionados para o estudo:

- região do Salto do Jacuí (RS);
- área compreendida entre as cidades de Torres (RS), Criciúma (SC) e Cambará do Sul (RS), incluindo a Serra do Rio do Rasto (SC) e Rota do Sol (RS).

Nestes pontos, foram recolhidos diversos dados geológicos, através da descrição detalhada das unidades aflorantes, confecção de perfis colunares, documentação fotográfica, medidas de atitudes e orientações de fraturas e falhas e coleta de amostras de rochas para análises petrográficas, químicas, por difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura (Fig. 3).

A terceira etapa englobou o tratamento dos dados de campo obtidos na fase anterior e a elaboração de mapas de pontos, de localização e de estruturas. Isto foi integrado através das observações de campo, das descrições dos afloramentos e das informações dos mapas geológicos anteriores, bem como uma interpretação de imagem CIBERS integradas com dados fisiográficos e geológicos obtidos de órgãos institucionais (SIG-CPRM e SIG-IBEGE).

Estes dados foram tabulados para um sistema X,Y de coordenadas UTM, utilizando-se para este fim o *Software Microsoft Excel*, sendo posteriormente

plotados sobre bases geológicas e imagens de satélite. As análises das imagens do modelo digital do terreno (DEM – *digital elevation model*) possibilitaram a interpretação de aspectos fisiográficos tais como drenagens e na interpretação de morfoestruturas auxiliando assim na interpretação estrutural da área.

Essas imagens foram georreferenciadas no Sistema UTM (South American 1969, Datum 22 e 23, do Hemisfério Sul) utilizado-se para este fim os softwares *MAPINFO professional 11.0*, *Global Mapper 7.0* e *Discovery 12.0*.

Posteriormente estes dados foram analisados, juntamente com os dados de campo e laboratório para elaboração de um modelo da Formação Serra Geral como análogo de reservatórios vulcânicos para as bacias marginais brasileiras.

Foram realizadas duas etapas de campo (nos meses de outubro de 2010 e janeiro de 2011) onde foram coletadas 33 amostras de rocha.

As amostras coletadas foram descritas macroscopicamente em lupa *Wild Heerbrugg* e fotodocumentadas. Foi feita então uma seleção de amostras para serem analisadas por técnicas petrográficas, por difratometria de raios X e por microscopia eletrônica de varredura visando à obtenção de dados complementares.

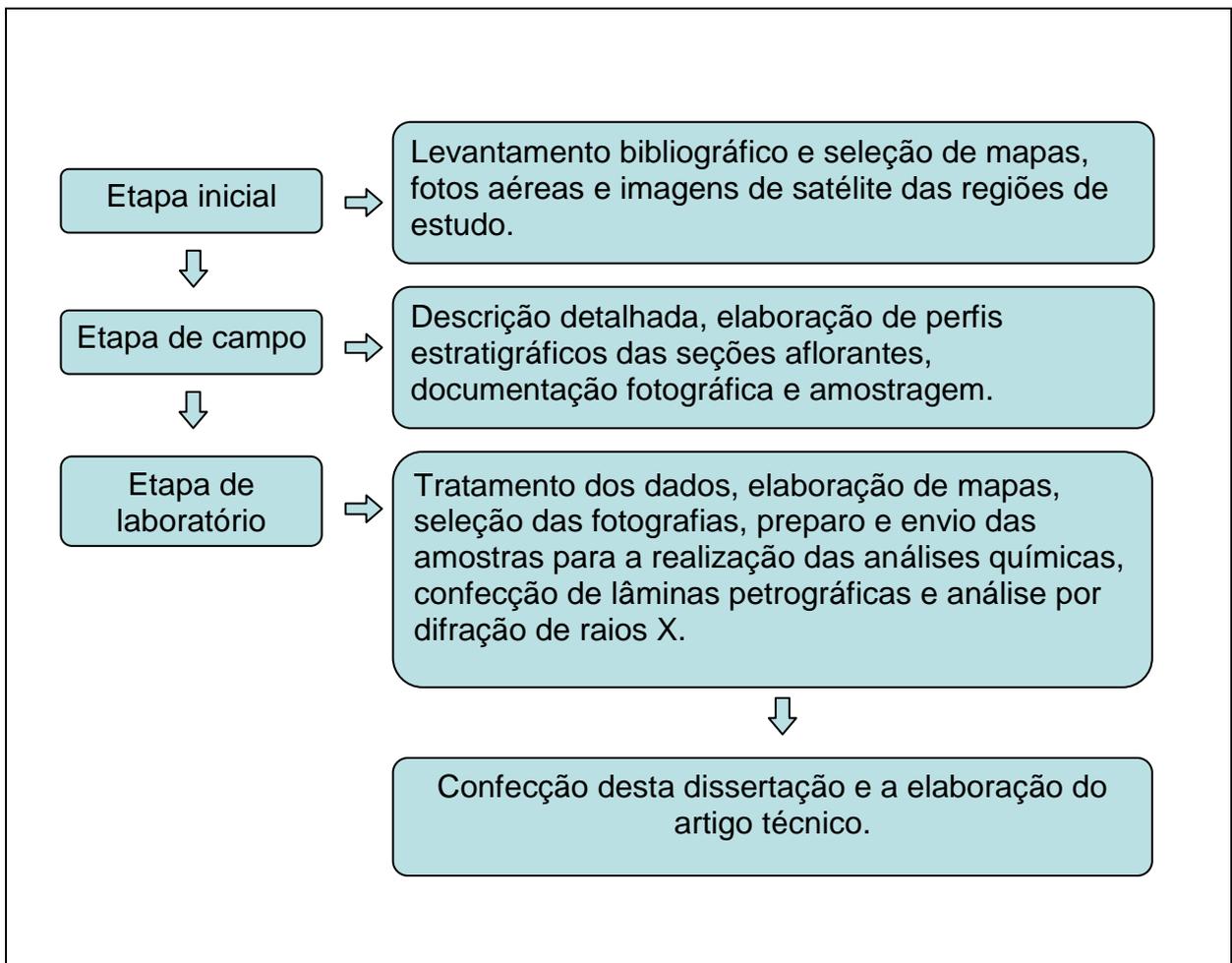


Figura 2 – Fluxograma da metodologia empregada.

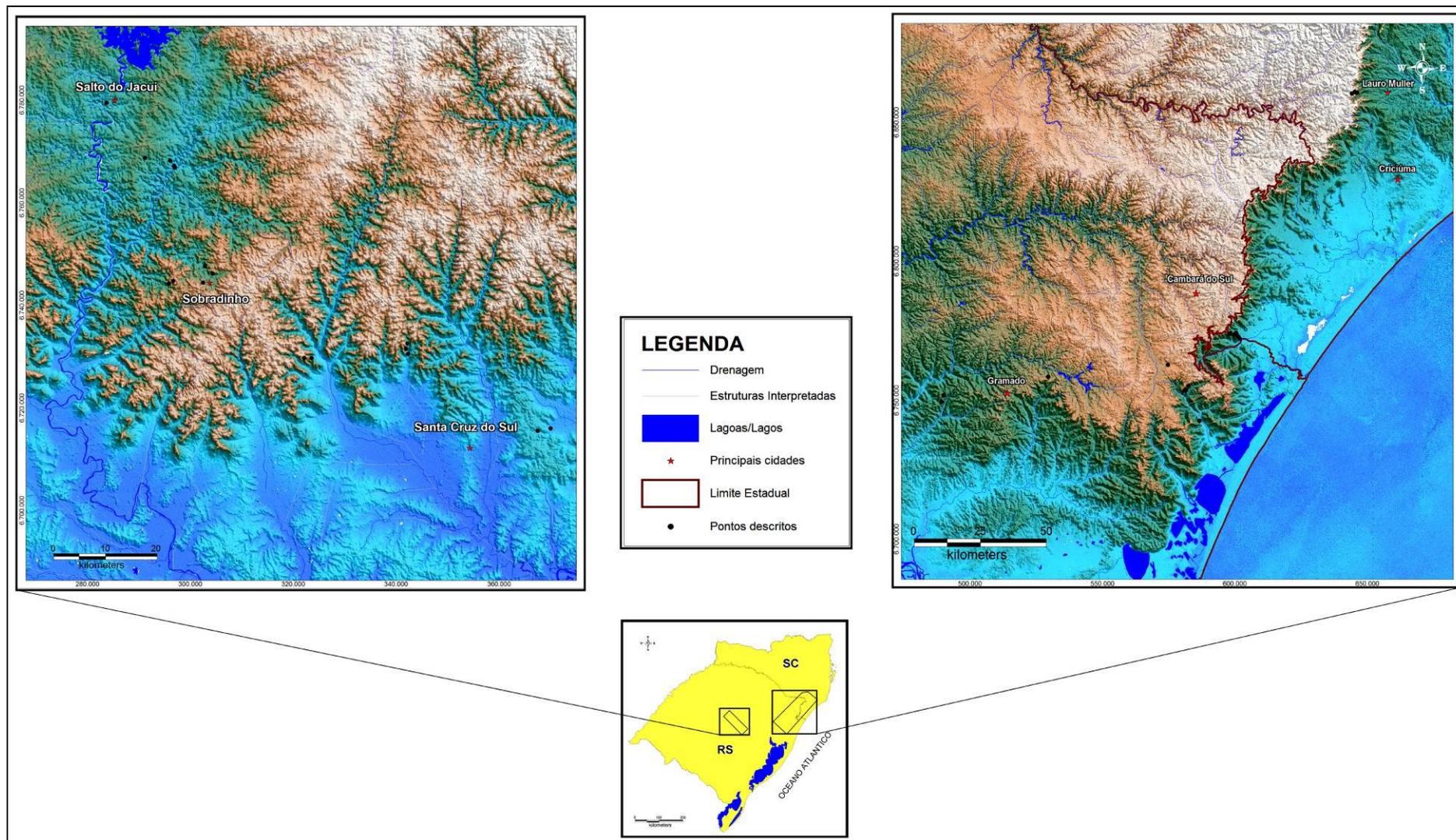


Figura 3– Mapa de localização dos pontos de coleta de amostras na região do Salto do Jacuí/RS (área “1”) e, na região abrangida pelas cidades de Torres (RS), Criciúma (SC) e Cambará do Sul (RS) (área “2”).

1.4.1 Petrografia

A partir das amostras selecionadas foram confeccionadas lâminas petrográficas para descrição e classificação dos principais tipos de rochas encontrados. As lâminas foram descritas com técnicas de luz natural e polarizada em microscópio petrográfico e as principais feições foram micrografadas e, em alguns casos, feições de porosidade foram quantificadas visualmente.

1.4.2 Difractometria de raios X (DRX)

A técnica da difração de raios X foi empregada no sentido de obter-se informações sobre os processos de alteração das rochas vulcânicas. Os grupos de argilominerais presentes nas amostras selecionadas foram identificados, com base na sua estrutura cristalina utilizando-se um difratômetro Siemens D5000 Diffraktometer pertencente ao Laboratório de Difractometria de Raios X do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com radiação $K\alpha Cu$ nas condições de 40 kV e 30 mA de corrente de filamento e no intervalo de 2 a 28° (2 θ).

A preparação das amostras para DRX se baseia nos procedimentos descritos por Alves (1987), onde inicialmente pulverizam-se as amostras com pistilo em um gral de ágata. Aproximadamente 5 g do pó resultante são dispersos em 50 ml de água destilada e submetidos ao ultra-som, na presença de uma solução de pirofosfato de sódio utilizada como defloculante. Na solução resultante, com o auxílio da centrífuga, separa-se a fração inferior a 2 μm (FF < 2 μm). Esta fração é depositada em duas lâminas nas quais os argilominerais são orientados segundo a técnica do esfregaço (Gibbs, 1965). As lâminas assim preparadas são secas em condições naturais.

Analisa-se inicialmente a lâmina seca ao natural (denominada normal). A outra lâmina é colocada num dessecador contendo etilenoglicol (CH_2OHCH_2OH). O dessecador é colocado em estufa aquecida a 60°C por 8 horas, obtendo-se então a amostra glicolada. Após a análise no difratômetro desta segunda lâmina, procedeu-se o seu calcinamento por 2 horas em um forno a 500°C com o objetivo de obter a lâmina calcinada. A partir da análise conjunta dos difratogramas obtidos com material normal, glicolado e calcinado, são reconhecidos, de forma geral, os

argilominerais mais comuns nas rochas vulcânicas alteradas: esmectita, interestratificados illita-esmectita e, eventualmente, traços de caolinita.

1.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento que apresenta profundidade de foco superior aos microscópios óticos comuns. Por sua elevada resolução que permite aumentos superiores a 1.000.000 vezes, é possível a observação direta da microposidade bem como das vesículas e das alterações das rochas amostradas. Fragmentos milimétricos das amostras foram colados (com epóxi) em porta amostras especiais e metalizados com fina película de ouro. Posteriormente, são observados em aumentos variáveis (em geral até 10.000 X) e fotografados. As análises pelo MEV foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS).

1.4.4. Análises químicas

As análises químicas em rocha total para elementos maiores, menores e traços foram preparadas no Activation Laboratories Ltd. (Laboratório *Actlabs*) com sede no Canadá.

As amostras selecionadas foram inicialmente trituradas num britador de mandíbula para a desagregação inicial. Os fragmentos originados foram então lavados em água destilada e secos em temperatura inferior a 70^o C. Esta temperatura não deve ser ultrapassada, pois corre-se o risco de danificar a estrutura dos argilominerais. As amostras secas foram pulverizadas num gral de ágata até uma granulometria inferior a 0,063 mm e homogeneizadas. Logo após, foram separadas 5 gramas de cada amostra e o restante foi acondicionado em sacos plásticos.

Os elementos maiores foram analisados com um ICP-OES (ThermoJarrell-Ash ENVIRO II Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer) e os traços com um ICP-MS (PerkinElmer SCIEX ELAN6000 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer). Para as análises, 0,25 g de cada amostra foram misturadas com um fluxo de metaborato de lítio e tetraborato de lítio e depois fundidas num forno de indução. O material assim obtido, ainda em estado de fusão, foi imediatamente colocado em uma solução de 5% de HNO₃ acrescida de um padrão

interno. Esta preparação foi misturada por aproximadamente 30 minutos até obter-se a dissolução completa. Uma alíquota da solução da amostra foi analisada para os elementos maiores (óxidos) e para o elemento traço SC. Os limites de detecção para os elementos maiores foram em torno de 0,01% em peso, e 2 ppm para o Sc. A perda ao fogo (LOI) foi determinada pela diferença no peso após calcinação da amostra em uma temperatura de 1050⁰C por duas horas. A outra alíquota da amostra em solução foi adicionada de padrões internos de In e Rh e posteriormente diluída 6000 vezes antes da análise no ICP-MS para os elementos traços.

1.4.5. Análise dos Dados Estruturais

Para interpretação estrutural das áreas de estudo foram levados em conta os dados de campo (medidas de campo e descrição das estruturas), compilados para tabelas de Excel, as quais foram plotadas em mapas e efetuados o tratamento estatístico e plotagem em estereograma utilizando-se o software Stereonet (Fig. 4).

Em campo foram efetuados perfis regionais com descrição de estruturas segundo suas características morfológicas, relações no pacote de rocha, dimensões e disposição espacial (atitudes). Para a análise estatística dos dados estruturais de campo para esta área utilizou-se bússola Brunton com notação de mão esquerda. Posteriormente, os dados foram compilados e processados através do *Software Stereonet*, a partir do qual foram gerados os estereogramas com padrão de dispersão tipo roseta, com os dados de cada bloco nele plotados.

Para fins de análise foram considerados estruturas rúpteis ocorrentes nas quais englobam-se plano de falhas, fraturas e juntas. Na área “1” foram obtidas 51 medidas em afloramentos e na área “2”, foram 131 medidas.

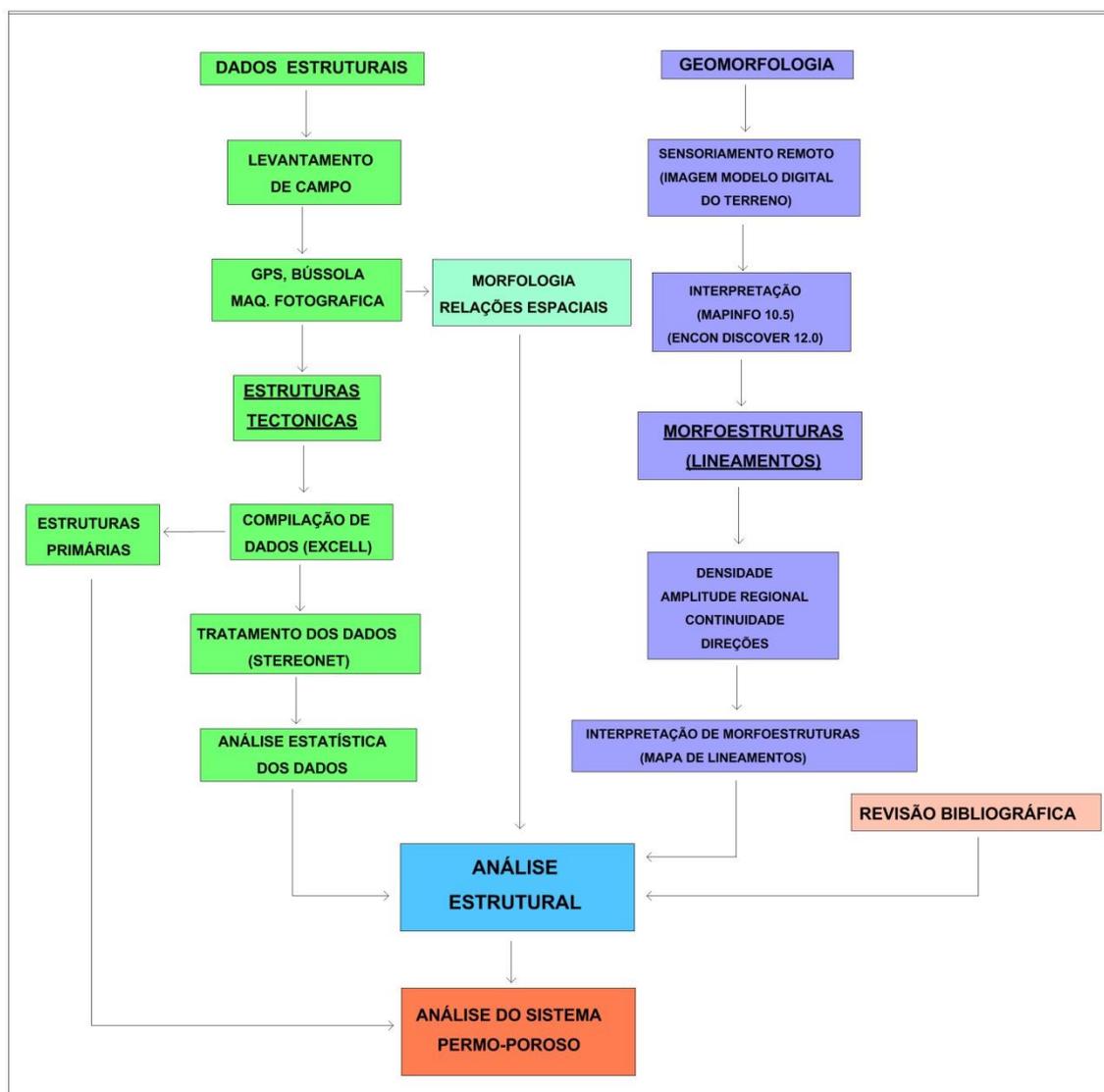


Figura 4 - Fluxograma de trabalho com as etapas e metodologias utilizadas para tratamento e análise dos dados estruturais.

Por outro lado a interpretação de morfoestruturas foi realizada utilizando-se imagens de Modelo Digital do Terreno em escala de cores e escala de cinza, com os softwares *Mapinfo 10.5* e *EnconDiscover 12.0*, levando-se em conta padrões de drenagem, níveis de erosão diferencial e elementos gerais do relevo. A partir da interpretação realizada foram individualizadas morfoestruturas lineares (lineamentos) a análise deste como estruturas levando-se em conta sua densidade na área, amplitude regional, continuidade e direções predominantes.

Conceitualmente entende-se como morfoestruturas o produto da influência da estrutura litológica na gênese das formas de relevo, principalmente aquelas relacionadas à ação da dinâmica das províncias geológicas (Ross, 1985,1992).

Dentre as variadas formas desenvolvidas em um terreno através da interação intemperismo, erosão e controle litológico e estrutural destacam-se os lineamentos.

Segundo Strieder & Amaro (1997) lineamentos são uma expressão topográfica na superfície do terreno de estruturas tridimensionais presentes na crosta terrestre, podendo ser considerados como altos topográficos (relevos positivos) e baixos topográficos (relevos negativos). Estes autores classificam os lineamentos associados a estruturas rúpteis como expressos por feições geomorfológicas negativas que em geral truncam limites litológicos, com morfologias retilíneas representados por drenagens controladas por fraturas com tamanho, orientação e comprimento bem definidos.

A análise estrutural foi realizada levando-se em conta a análise estatística das direções das estruturas, os dados descritivos de campo tais como a morfologia e relações espaciais das estruturas em afloramento além do levantamento de dados bibliográficos a respeito do arcabouço estrutural das áreas.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA

2.1. Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná (Fig. 4) é uma das bacias paleozóicas, intraplaca da Plataforma Sul-Americana, totalizando uma área de aproximadamente 1,4 milhões de km². A bacia tem um formato levemente oval com eixo maior N-S estendendo-se por porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai, Argentina e norte do Uruguai (Milani, 1997).

A evolução geológica da Bacia do Paraná foi complexa e controlada por fatores tectônicos e climáticos decorrentes da dinâmica de placas que conduziu a evolução do supercontinente Gondwana durante o tempo geológico (Zalán *et al.*, 1990). O processo evolutivo desta bacia começou no Paleozóico, com os primeiros depósitos sedimentares datados do Ordoviciano Superior e culminou com o extravasamento de um espesso pacote de rochas vulcânicas no Cretáceo Superior, documentando quase 400 milhões de anos de história geológica.

O registro estratigráfico da Bacia do Paraná compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima de 7.000 metros, coincidindo geograficamente o depocentro estrutural da sinéclise com a região da

calha do rio Paraná, que lhe empresta o nome. Milani (1997) reconheceu no registro estratigráfico da Bacia do Paraná, seis unidades de ampla escala ou supersequências (conforme Vail *et al.*, 1977). São pacotes rochosos materializando cada um deles intervalos temporais com algumas dezenas de milhões de anos de duração e envelopados por superfícies de discordância de caráter inter-regional: Rio Ivai (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico a Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) (Milani *et al.* 2007), conforme observa-se na figura 5.

Com relação às estruturas regionais da Bacia do Paraná, vários trabalhos utilizando os métodos de anomalias de relevo ou drenagem, tanto em mapa como em imagens de satélite e radar, foram realizados por diversos autores, os quais apresentam elevada concordância para as direções NE e NW (Soares *et al.* 1982; Zalán *et al.* 1986; Soares, 1992). Essas estruturas são responsáveis pela evolução da bacia, representando a forte estruturação NE do embasamento, no flanco leste, e a orientação NW dos diques de diabásio relacionados à ruptura continental (Artur & Soares, 2002).

O magmatismo Serra Geral inclui-se na supersequência Gondwana III.

2.2. Supersequência Gondwana III

A Supersequência Gondwana III também é denominada como “Sequência Jurássica-Eocretácea” (Milani *et al.* 1994) e compreende o intervalo da coluna estratigráfica da Bacia do Paraná (Fig. 6) onde se posicionam os sedimentos eólicos da Formação Botucatu e as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. A supersequência é amplamente distribuída pela Bacia do Paraná, e sua sedimentação continental é representada predominantemente por fácies eólicas.

Wildner *et al.* (2007) propuseram denominar esta unidade de Grupo Serra Geral em função da grande variação das características composicionais, texturais e estruturais apresentadas por essas rochas.



Figura 5 - Mapa de localização da Bacia do Paraná (modif. de Zalán *et al.*, 1991).

Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná

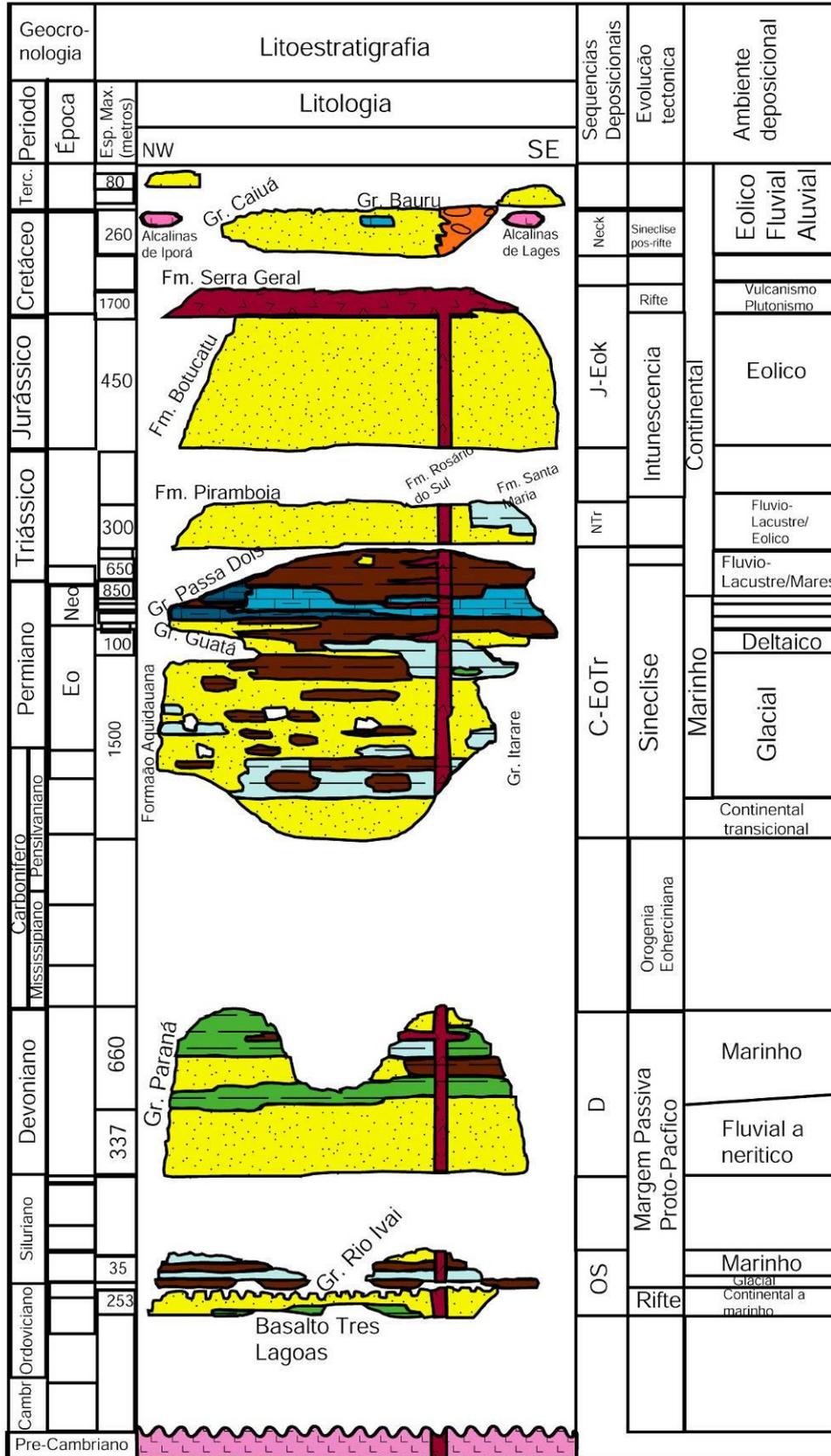


Figura 6 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná (modif. de Milani, 1997).

2.2.1 Formação Botucatu

A Formação Botucatu ocorre em uma área superior a 1,6 milhões km², cobrindo o Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, com espessuras entre 80 e 400 m, sendo que as maiores espessuras encontram-se na porção noroeste da Bacia (Milani, 1997). O contato basal desta unidade é discordante com os depósitos areno - pelíticos da Formação Rio do Rastro e o contato superior é concordante a interdigitado com os derrames da Formação Serra Geral. A Formação Botucatu constitui-se quase que totalmente, em sua área de ocorrência, por arenitos maduros, quartzosos de coloração vermelha, rósea ou amarela-clara, com granulometria fina a média, grãos arredondados e aspecto fosco. Apresentam estrutura característica de ambiente eólico, com ocorrência de estratificação cruzada tangencial de grande porte. Observam-se secundariamente, em alguns locais, especialmente nas ocorrências da porção norte do estado do Rio Grande do Sul ocorrem feições indicativas de fluxos aquosos. São corpos de arenitos de granulometria média a grossa que são interpretados como produzidos por episódios torrenciais num contexto alúvio-fluvial (Milani *et al.*, 2007).

O principal sistema de fraturas desta unidade encontra-se na direção NE (Fig. 7a).

No contato entre os arenitos da Formação Botucatu (Fig. 7b e 7c) e nos primeiros derrames de lavas da Formação Serra Geral, evidenciam-se inúmeras feições de interação entre as lavas e sedimentos. Além disso, os arenitos Botucatu ocorrem como intertraps na Formação Serra Geral, sotoposta (Fig. 7d).

O início da sedimentação da Formação Botucatu é inferida através da identificação de icnofósseis vertebrados por Bonaparte (1996) que a coloca entre o Jurássico superior e o Cretáceo inferior.

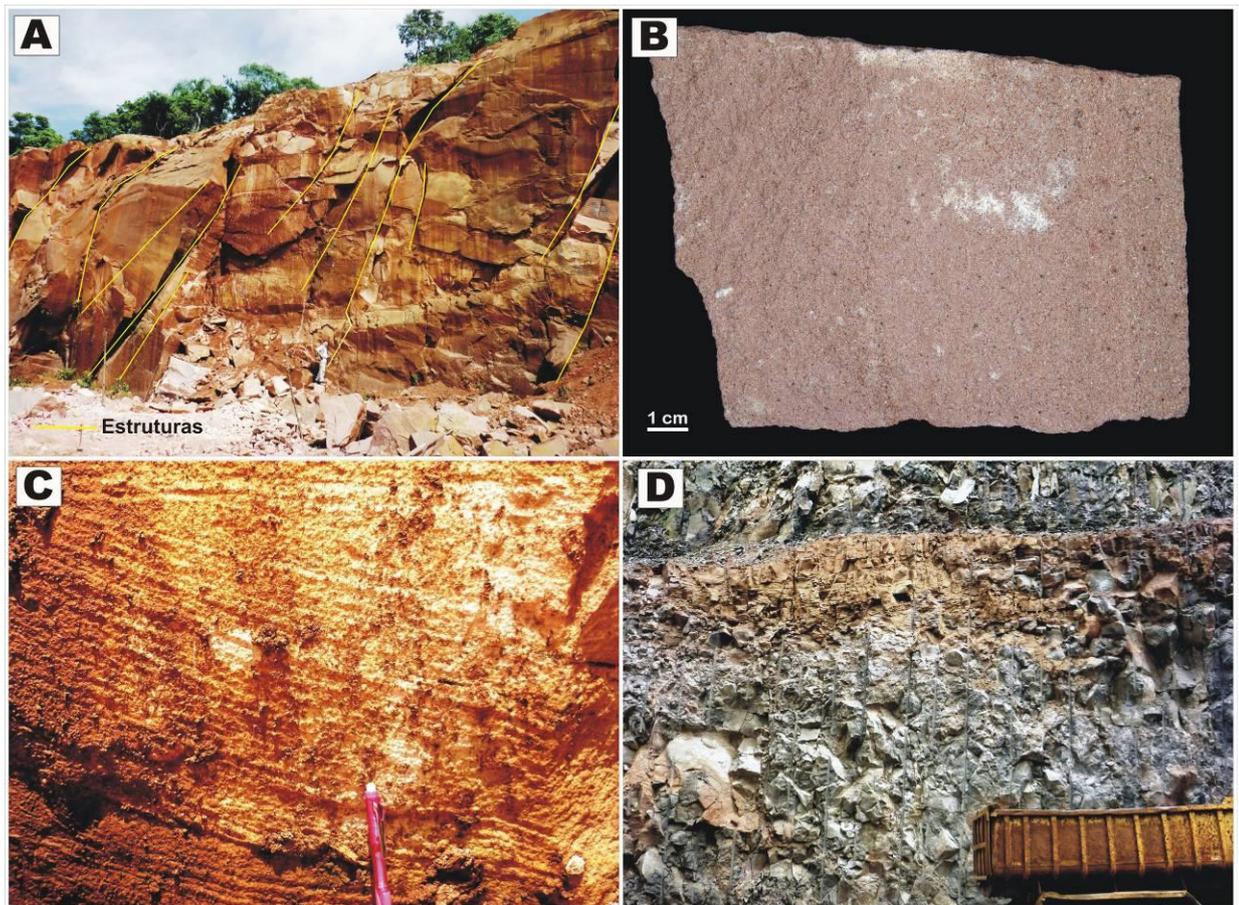


Figura 7 – Formação Botucatu a) afloramento típico destacando-se a presença de fraturas NE; b) detalhe de uma amostra do arenito Botucatu com grãos arredondados, bem selecionados e boa porosidade; c) estratificação cruzada característica indicando ambiente eólico (coords.: 360953° - 715497 °); d) detalhe mostrando *intertrap* do arenito Botucatu (coords: 341639° - 7629700 °) (fotos de 11/2011)

2.2.2 Formação Serra Geral

Os derrames de lavas basálticas e, secundariamente, intrusões de caráter básico do Neocomiano da Formação Serra Geral representam uma das maiores manifestações vulcânicas episódicas e originaram uma das mais extensas províncias de basaltos de platô do planeta. Esse imenso volume de material vulcânico é remanescente do extenso processo de erosão que atingiu a Plataforma Sul-Americana e que, segundo Gallagher *et al.* (1994), o teria reduzido em pelo menos uma ordem de grandeza. O relevo é representado por patamares escarpados com vales profundos formando verdadeiros *canyons*.

Na América do Sul, esta Província está localizada na porção centro-oriental da Bacia do Paraná e sua correlata, na África, na porção noroeste da Namíbia, na

Bacia de Huab (Bellieni *et al.*, 1984; Wildner, 2004). O evento magmático do Neocomiano também manifestou-se de forma significativa nas bacias marginais brasileiras, fruto do extravasamento do magma astenosférico que chegou próximo da superfície, quando do processo de *rifteamento* que separou os continentes Sul-Americano e Africano (Thomaz Filho *et al.*, 2008 a,b). Estima-se que 95% de todo o volume de magma produzido nesta época esteja no continente sul-americano onde ocorrem através de diversas reativações tectônicas do embasamento, onde falhas e fraturas foram reativadas e serviram de conduto para o magmatismo sendo denominado de Formação Serra Geral (Almeida, 1986; Mizusaki & Thomaz-Filho, 2004).

A Formação Serra Geral da Bacia do Paraná (Fig. 5) é constituída por uma sucessão de rochas vulcânicas com espessura remanescente máxima de 2.000 m na região do Pontal de Paranapanema (SP) sendo principalmente representada por derrames de natureza básica e subordinadamente por efusivas ácidas (Fig. a).

Os derrames da Formação Serra Geral estão sobrepostos discordantemente sobre os arenitos eólicos continentais da Formação Botucatu. Localmente é possível observar contatos com outras unidades da Bacia do Paraná como a Formação Rosário do Sul, o Grupo Passa Dois e, ainda com o embasamento cristalino.

Os basaltos toleíticos compreendem cerca de 90% das litologias existentes na Formação Serra Geral, seguido de aproximadamente 7% do volume total de andesitos - toleíticos e 3% de riodacitos - riolitos, segundo Piccirillo & Melfi (1988).

As rochas vulcânicas básicas têm características macroscópicas semelhantes quando observadas no campo (Fig. 8b). As cores variam entre cinza escuro, cinza médio e cinza acastanhado. Texturalmente são afíricas a subafíricas, por vezes porfíricas, com fenocristais (0,5-2,0 mm) e/ou microfenocristais (0,2-0,5 mm) de augita e plagioclásio (An 52-78). Também são observados pigeonita e minerais opacos (magnetita titanífera e ilmenita) e mais raramente olivinas, estas sempre muito alteradas. Outras texturas comuns são a intergranular, a intersertal e hialofítica, com matriz apresentando as mesmas fases cristalinas encontradas como fenocristais. Neste grupo, foram identificados basaltos toleíticos, basaltos andesíticos, andesitos, latiandesitos e latitos, sempre com predomínio dos basaltos toleíticos (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1988; Melfi *et al.*, 1988).

Estas rochas, do ponto de vista químico tem sido divididas em dois grupos (Rüegg, 1975; Comin-Chiaramonti *et al.*, 1983; Bellieni *et al.*, 1984; Piccirillo, *et al.*,

1987,1988), interpretados como uma devida migração da fonte magmática de sul para norte da área atual da bacia:

- Basaltos com alto Ti (HtiB) - elevados teores de TiO_2 ($\geq 2\%$ em peso) e elementos incompatíveis (Ba, La, Ce, Sr, Zr, Hf, Ta, Nd, Sm, Tb e Y);
- Basaltos com baixo Ti (LtiB) - baixos teores de TiO_2 ($\leq 2\%$ em peso) e os mesmos elementos incompatíveis citados acima.

Já Bellieni *et al.* (1984) e Mantovani *et al.* (1985), definiram que na porção norte da bacia dominam as rochas enriquecidas em TiO_2 , ao passo que no sul prevalecem as pobres neste constituinte, tendo tais autores creditado esta variação a uma composição diferenciada já em nível de fonte primária do magma. Por sua vez, Fodor *et al.* (1989), preferem explicar a variação do teor de TiO_2 por diferentes graus de assimilação crustal pelo magma em seu trânsito até a superfície.

Também Peate *et al.* (1992) e Peate (1997), usando os dois grupos relativos ao teor de titânio, definiram seis sub-unidades para estas duas ocorrências. O grupo HTiB é representado pelas sub-unidades Pitanga, Paranapanema e Urubici e o grupo LTiB, pelas sub-unidades denominadas Gramado, Esmeralda e Ribeira.

As rochas ácidas, classificadas como riodacitos e riolitos apresentam cores em tons de cinza claro, sendo comuns estruturas de fluxo e diaclasamento horizontal a subhorizontal. A divisão das rochas ácidas em dois grupos foi feita por Bellieni *et al.* (1986):

- Palmas - PAV – formado predominantemente por riolitos, aflorando principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Apresentam texturas afíricas a subafíricas, cor cinza claro, e uma alteração característica denominada *sal e pimenta*. Nestas rochas ocorrem fenocristais ou microfenocristais de plagioclásio, além de augita, pigeonita, opacos (titanomagnetita e ilmenita) e apatita (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1988). A matriz é predominantemente hialina, podendo ser também hipocristalina exibindo as mesmas fases cristalinas dos fenocristais; por, sendo também registrada a presença de sanidina.

- Chapecó – CAV – formado por riodacitos, que afloram principalmente ao norte da Bacia do Paraná e, em menor proporção, nos estados do Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Estas rochas são frequentemente porfíricas, com macrofenocristais de até 20 mm, e com cor cinza esverdeado em amostra fresca e marrom avermelhado quando alterada. Macro a microfenocristais de plagioclásio, além de augita, pigeonita, opacos e apatita também são observados.

Em função da elevada resistência ao intemperismo, as rochas ácidas tendem a apresentar encostas abruptas e sem cobertura vegetal, o que as distingue das ocorrências das rochas básicas, cujos afloramentos ocorrem em encostas mais suavizadas e com maior cobertura vegetal (Roisenberg, 1989). Ainda segundo este autor, as rochas ácidas do tipo Palmas, no Rio Grande do Sul apresentam características que permitem interpretá-las como unidades de ignimbritos inteiramente soldados.

A porção mais basal da Formação Serra Geral está em contato com os arenitos da Formação Botucatu, tendo uma forte interação com estes. É possível encontrar feições como diques de arenito e *intertraps*, assim como a ocorrência de diferentes brechas e vidro vulcânico, quase sempre com atuação de intensos processos de alteração (Fig. 8c).

Muitas vezes são encontrados *intertraps* deste arenito em meio aos derrames de lava, cuja origem parece estar relacionada a um intervalo de quiescência na atividade vulcânica. Outra estrutura importante observada são os diques de arenito, que parecem preencher fraturas existentes nos derrames de basalto. Os mecanismos de formação desses diques ainda não são muito bem compreendidos e vem sendo analisados (Michelin, 2013).

A forma de ocorrência principal das rochas magmáticas da Formação Serra Geral são os derrames (Fig. 8a). De uma forma geral, podem ser definidos como corpos tabulares de grande continuidade lateral e espessura que vão desde metros a varias dezenas de metros. Nardy *et al.* (2002) citam uma espessura média de 30 m para cada derrame, mas no entanto ocorre grande variação de espessura que vai de menos de 10 a 100 m.

Nas áreas de estudo, os derrames básicos possuem espessura variavel, porém predominando na ordem de dezenas de metros. Na média, variam entre 15 a 30 m, podendo excepcionalmente chegar a espessuras superiores de 50 m. Os derrames ácidos, por sua vez, possuem espessuras marcadamente menores, raramente chegando acima de vinte metros predominando na faixa entre 05 a 15 metros.

Em direção ao topo dos derrames observam-se feições vesiculares que podem ter dimensões de poucos mm até 2,5 cm (Fig. 7d). De acordo com Fernandes *et al.*, (2010), a espessura típica das vesículas varia de 1 a 5 cm, com limites inferiores planares.

Na porção mais central dos derrames individuais observam-se poucas vesículas, presença de disjunções colunares e tabulares com espessura média, em geral, de poucos centímetros.

Já na porção mais superior do derrame destacam-se as vesículas com até 2 ou mais centímetros de diâmetro. Supõem-se ser cavidades em que os gases do magma ficaram aprisionados, muitas vezes preenchidas totalmente ou parcialmente por quartzo, calcita e zeolitas.

Turner *et al.* (1994) e Mantovani *et al.* (1995) com base no método ^{40}Ar - ^{39}Ar , concluíram que a Formação Serra Geral pode ser posicionada no período entre 137 a 127 Ma, ou seja, Eocretáceo (Barremiano-Hauteroviano). Stewart *et al.* (1996) também com base na metodologia ^{40}Ar - ^{39}Ar indicam uma idade máxima para a Formação Serra Geral de 138 Ma, ou seja, concordante com o anteriormente obtido.

Com relação às estruturas regionais da Bacia do Paraná, vários trabalhos, utilizando os métodos de anomalias de relevo ou drenagem, tanto em mapa como em imagens de satélite e radar, foram realizados por diversos autores, os quais apresentam elevada concordância das direções NE e NW (Soares *et al.* 1982; Zalán *et al.* 1986 e Soares 1992).

Em toda a Bacia do Paraná, segundo Zalán *et al.* (1991), dois estilos estruturais principais estão presentes: deformações associadas a intrusões ígneas e deformações associadas a reativações de elementos tectônicos lineares com direção NE e NW. O embasamento cratônico da bacia possui estruturação NE, com blocos limitados por falhas. A forte estruturação NE do embasamento, no flanco leste, e a orientação NW dos diques de diabásio relacionados à ruptura continental (Artur & Soares, 2002).

De acordo com Zalán *et al.* (1987, 1991), as orientações NW e NE são consideradas mais antigas e foram originadas a partir da reativação de zonas de fraqueza presentes em seu embasamento, recorrentemente ativas durante o Fanerozóico. Estas zonas de fraqueza influenciaram fortemente a paleogeografia, sedimentação e distribuição de fácies na Bacia, bem como o desenvolvimento de estruturas tectonosedimentares. Já os lineamentos E-W foram predominantemente desenvolvidos durante a separação do Gondwana, ativos, portanto, a partir do Triássico. As estruturas de orientação NW foram reativadas no Eocretáceo e preenchidas por diques de diabásio (Strugale *et al.*, 2007).

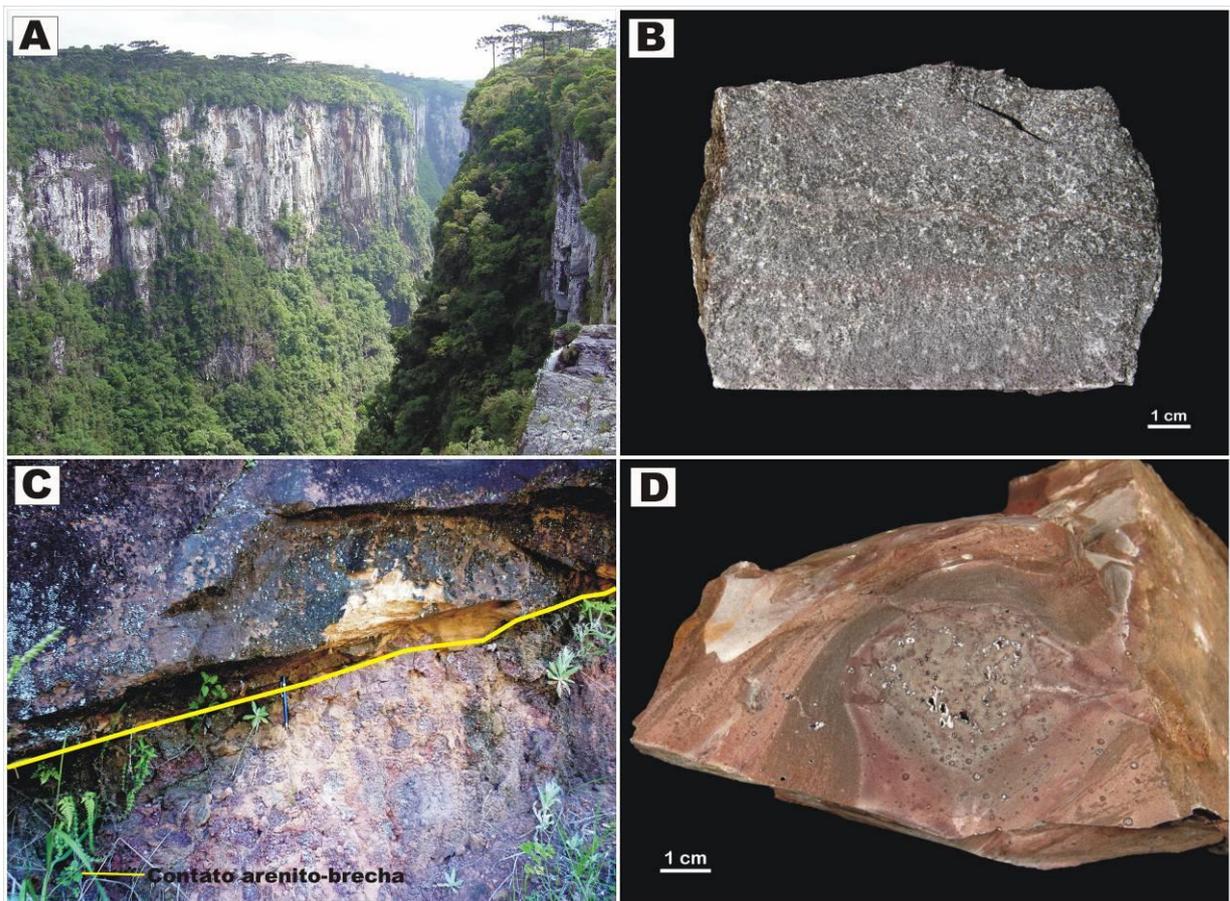


Figura 8 - Formação Serra Geral a) Cânion do Itaimbezinho (RS); observar derrames "empilhados" (11/2010); b) aspecto macrocópico da rocha basáltica, textura afanítica e coloração cinza escura (04/ 2011 – UTM: 527502⁰/6755822⁰); c) contato entre o arenito Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral; observar a presença de brechas vulcânicas (11/2010 –UTM: 296190⁰/6766406⁰); d) feições vesiculares parcialmente preenchidas por zeólitas (04/ 2011 –UTM: 595885⁰/6771315⁰).

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Rochas vulcânicas, sedimentares e feições de interação nas áreas de estudo

Nas área de estudo são identificados derrames de composição basáltica e dacítica, arenitos *intertrap* e as feições de interação entre lavas e sedimentos: diques de arenito, fraturas com sedimentos, brechas vulcano-sedimentares e brechas vulcânicas.

3.1.1 Derrames

A sequência vulcânica da Bacia do Paraná ocorre sob a forma de derrames tabulares (Fig. 8a), algumas vezes, lenticulares de lavas de composição básica, textural e composicionalmente representadas por rochas basálticas. Na região do DMSJ ocorre, no topo da sequência a presença de derrames de composição dacítica identificando o Membro Palmas (Bellieni *et al.*, 1986). Nos derrames individuais pode-se observar diferenças texturais que são marcantes especialmente nos derrames mais espessos (> 10 m) (Fig. 8c). As porções de base e topo apresentam uma textura mais vítrea enquanto as porções mais centrais tem uma textura cristalina (Fig. 8b) com o tamanho dos cristais variando de milimétricos até 1 cm.

De uma forma geral, nos derrames, pode-se reconhecer:

- **Vesículas** – (Figura 8d) são cavidades milimétricas a centimétricas, formas predominantemente arredondadas ou ovaladas, concentram-se especialmente na porção mais superior dos derrames. As vesículas podem estar abertas (Fig. 9e), parcial ou totalmente preenchidas por material de origem secundária (argilominerais, quartzo, calcita, zeolitas, ametista, entre outros) quando podem ser denominadas de amígdalas (Wernick, 2004)(Fig. 9f). As vesículas podem estar orientadas indicando o fluxo e há uma tendência de aumentar o seu diâmetro em direção as porções mais superiores dos derrames.
- **Microfraturas** – As microfraturas localizam-se preferencialmente no topo dos derrames, associadas a zonas vesiculares, muitas vezes ligando estas feições. São originadas pela contração térmica durante o resfriamento das lavas, formam uma rede unindo as vesículas. As microfraturas auxiliam a percolação da água e a difusão dos resíduos finais do magma para o interior das vesículas, ocasionando o preenchimento por materiais secundários. Podem também estar associadas aos processos de dissolução posterior destes preenchimentos formando espaços porosos (porosidade vesicular).
- **Disjunções** - Os derrames de basalto se resfriam a partir da base em direção ao topo. À medida que perde calor ocorre uma contração de até 10%

de seu volume, produzindo rupturas e dando origem a fraturas, denominadas disjunções . As colunas tendem a um formato hexagonal e são ortogonais ao topo e à base do derrame (Fig. 9d). Em derrames espessos, entre as duas zonas colunares permanece uma zona não atingida pela disjunção, chamada de entablamento, região central ou miolo. Esta região central é mais resistente à erosão do que as áreas colunares. Isto provoca o surgimento de uma notável erosão diferencial em regiões onde há uma sucessão de derrames basálticos, como é o caso da Bacia do Paraná (Fernandes, 2010)

3.1.2- Intertraps arenosos

- Os derrames de lava, especialmente na porção mais basal da Formação Serra Geral, cobriram e preservaram a morfologia das dunas eólicas do antigo deserto Botucatu ocasionando a presença de *intertraps* arenosos. As dunas ficam preservadas e podem ser vistas em macroescala, evidenciadas por variações da espessura e estruturas associadas conforme Scherer (1998). São camadas de arenito de cor rosa, quartzoso eventualmente com uma incipiente estratificação cruzada atribuídos a Formação Botucatu (Fig. 9a). Os *intertraps* de arenito representam intervalos de quiescência durante a atividade vulcânica e conseqüente recorrência dos processos sedimentares (Pichler, 1952; Suguio e Fúlfaro, 1974; Waichel, 2006; Petry *et al.*, 2007).

3.1.3- Feições de interação

- **Diques de arenito** – São as fraturas verticalizadas cuja espessura varia de milimétrica a centimétrica, preenchidas por sedimentos (Fig. 9c). Desenvolvem-se da base para o topo dos derrames mas sempre a partir da presença de *intertraps* arenosos bem desenvolvidos, eventualmente com a presença de brechas. Os sedimentos que preenchem as fraturas tem cor rosa a castanha, são essencialmente quartzosos, de granulometria fina a média. Os diques de arenito podem ser cimentados por sílica quando então ficam mais resistentes ao intemperismo podendo ressaltar-se na superfície. Uma das hipóteses da gênese desses diques é encontrada no trabalho de Pichler (1952), onde o autor propõe que estes se formam

concomitantemente ao derrame. O magma relativamente fluido cobre uma camada de areia inconsolidada saturada com água (*intertrap* arenoso) e, as altas temperaturas associadas com o processo, são responsáveis pela vaporização da água. A água vaporizada tem uma elevada pressão e fica trapeada na base do derrame. No entanto, qualquer fraturamento da rocha vulcânica, que acontece durante o processo de resfriamento, ocasiona a expulsão desta água vaporizada que carreando os sedimentos, irá preencher as fraturas de baixo para cima com areia. As relações de contato entre os arenitos e basaltos da Formação Serra Geral permitiram a Suguio e Fúlfaro (1974) também propor um modelo semelhante para a formação destes diques.

- **Fraturas preenchidas com sedimentos arenosos** - Ocorrem também fraturas preenchidas por sedimentos que, ao contrário dos diques de arenito dispõem-se do topo para a base dos derrames. Não são muito extensas e caracterizam-se por paredes mais retilíneas, bem marcadas e sem alterações significativas. O sedimento de preenchimento é um arenito quartzoso, granulometria fina a média, de cor rosada e com a presença eventual de clastos com dimensões entre 0,5 cm e 2 cm, de basaltos, dacitos e raros pelitos (Michelin, 2012). Na realidade, as fraturas preenchidas por sedimentos constituem-se numa feição pós magmática relativamente comum, onde os sedimentos não consolidados ou qualquer outro material preenchem as fraturas existentes nas porções de topo dos derrames.
- **Brechas** – Outra feição resultante da interação entre lava e sedimentos são as brechas (Fig. 9b). Existem inúmeras classificações para as brechas vulcânicas, entre elas: Fischer (1960), Pettijohn, (1975), McPhie *et al.* (1993), entre outros. Aqui foram reconhecidas:
 - brecha sedimentar corresponde aquela formada por clastos de basalto e de dacito, angulosos a subarredondados, com dimensões entre 5 a 20 cm, em matriz de granulometria fina a média, grãos arredondados a subarredondados de quartzo e feldspato.

- brechas vulcânicas tem clastos angulosos de basalto ou dacito em uma matriz sedimentar, semelhante aquela descrita nas brechas sedimentares, porém mais argilosa. As brechas posicionam-se na base do derrames junto ao contato com o *intertrap* e a partir destas ocorre a ramificação dos diques de arenito.

Brechas vulcânicas posteriormente identificadas como autobrechas foram localmente descritas. As brechas são maciças, pobremente selecionadas e compostas por fragmentos de basaltos imersos em matriz arenosa. Estas brechas são interpretadas como resultado da mistura entre a lava e a areia no momento do posicionamento do fluxo (Jerram *et al.*, 1999b).

Na região de Torres (RS), Petry (2006) elaborou um modelo para a interação das lavas e areias. A autora caracterizou três litologias: derrames, arenitos e brechas. As brechas ocorrem como camadas ou bolsões, por vezes interligados por diques clásticos irregulares, dentro da rocha vulcânica do topo dos derrames; têm matriz arenosa, os grãos apresentam contatos pontuais a flutuantes em um cimento carbonático, enquanto que os clastos de rocha vulcânica amigdaloidal presentes são angulosos e com formas irregulares, totalmente alterados. A proposta da pesquisadora é que a brecha represente a frente dos derrames, onde houve a mistura da lava com a areia disponível. O arenito deposita-se sobre a brecha, por processos eólicos, sendo o responsável pelo preenchimento de disjunções nos basaltos.

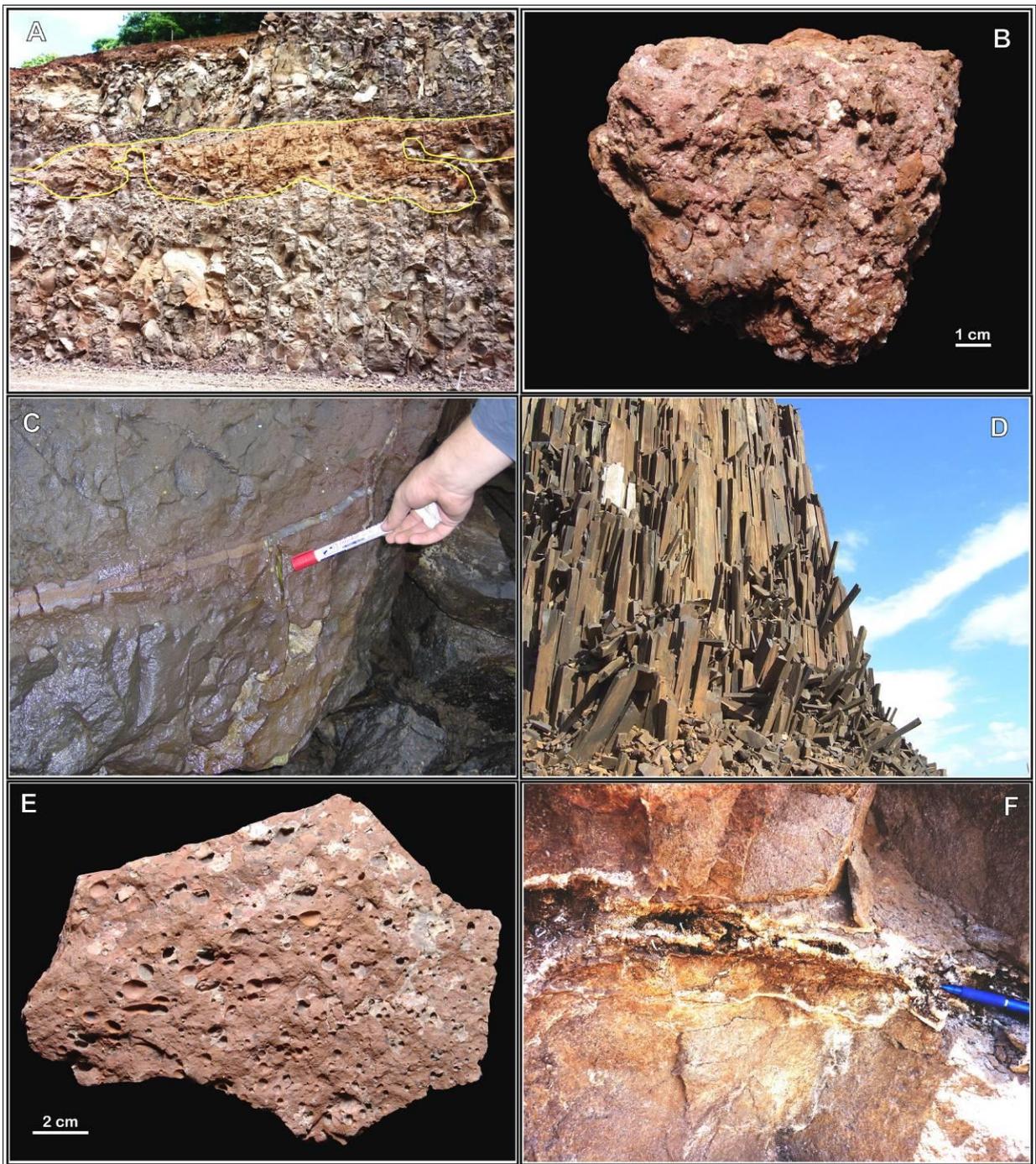


Figura 9 a)-*Intertrap* de arenito em meio aos derrames de lava, cuja origem ocorre através do avanço de dunas sobre os derrames de lava e posteriormente recobertos por estes após o início do evento vulcânico; b)-Brecha vulcânica, formado através de diversos fragmentos da própria rocha; C)-Dique de arenito, estruturas de intrusão de areia em fraturas do basalto; d)-Disjunção colunar, formam através do resfriamento do basalto, onde ocorrem rupturas dando origem a colunas; e)-Basalto Vesicular, vesículas formadas durante a consolidação das lavas; f)-Vesículas preenchidas parcialmente ou totalmente por minerais secundários.

3.2 Têctonica das áreas de estudo

Nas regiões analisadas observam-se três direções principais de estruturas: nordeste, noroeste e leste-oeste, respectivamente. Essas direções já são conhecidas e registradas na Bacia do Paraná por diversos autores (Soares *et al*, 1982; Zálan, 1986; Artur & Soares, 2002). No entanto a despeito de ocorrerem as mesmas direções estruturais para as duas áreas, o comportamento estrutural e morfologia das estruturas para as mesmas direções por vezes é variável entre as regiões.

Em ambas as áreas, verificou-se, em lineamentos de pequeno porte, o predomínio de estruturas nordeste e secundariamente, noroeste. Estas estruturas tem alcance de alguns quilômetros possuindo uma boa densidade nas áreas de estudo, porém, de forma geral, sua continuidade e expressão regional são restritas.

As estruturas com amplitude maior e extensões regionais são efetivamente de ocorrência mais rara, sendo geralmente descontínuas. Betiolo (2006) estudando a distribuição de lineamentos e estruturas ligadas à Formação Serra Geral, na região nordeste do Rio Grande do Sul, identificou a mesma relação entre as ocorrências, direções e quantidades de estruturas de pequeno e médio porte descritas no presente trabalho.

Para o referido autor, os lineamentos nordeste são relativamente mais abundantes e com maior densidade enquanto que os lineamentos noroeste possuem relativamente menor densidade porém com predomínio de estruturas com maior porte regional.

Da mesma forma, Heemann (2005), estudando a morfologia, gênese e controles dos depósitos de ágata da região de Salto do Jacuí (RS), identificou em perfis daquela área e, na região de Sobradinho (RS), um predomínio da direção nordeste sobre outras direções em estruturas locais.

Para as estruturas nordeste de maior porte, com alcance regional, foram em vários locais identificadas associações entre estes lineamentos regionais e zonas de falhamentos com deslocamento de blocos observados em afloramento. Neste mesmo caminho, Betiolo (2006) identificou e relacionou lineamentos regionais nordeste da Formação Serra Geral com falhamentos regionais com contatos interformacionais e deslocamentos relativos de bloco.

A partir da análise dos dados geomorfológicos de ambas as áreas de estudo acompanhado do modelo digital do terreno, verificou-se:

- **Características morfoestruturais da Área “1”**

Na área “1” predominam duas famílias principais de direções de morfoestruturas (lineamentos), sendo também observadas outras direções que ocorrem de forma esporádica ou em lineamentos com pouca expressão espacial (Fig. 10).

A primeira família tem direção nordeste-sudoeste com azimutes que variam em sua maior parte entre N20⁰E. Esses lineamentos são os que ocorrem com maior frequência e de maior amplitude regional podendo ser rastreados, de forma descontínua por ordem de centenas de quilômetros na área. Em sua forma mais marcante estes lineamentos estão associados a um sistema de extensas estruturas regionais as quais marcam formas de relevo que recortam a escarpa com vales extensos nos quais encaixam-se várias das principais drenagens da região. Estas estruturas conectam inúmeras estruturas tectônicas menos expressivas que truncam ou são truncadas por elas. De forma geral, as nordeste são as mais observadas em ambas as áreas, tendo boa distribuição espacial com estruturas ora com expressão regional ora com pacotes com grande densidade destas. Em escala local e de afloramento a importância destas estruturas reside no fato de conectarem diferentes elementos e níveis estratigráficos portadores de porosidade potencial dentro de um derrame (zonas vesiculadas, zonas brechadas e *intertraps* de arenito). Estas estruturas servem também de conexão entre diferentes derrames. Além disso, estes pacotes de fraturas aparentemente conectam níveis considerados porosos com as estruturas regionais.

Em campo, as estruturas relacionadas à família nordeste-sudoeste ocorrem na forma de falhamentos simples onde em seus planos ocorrem fraturas com espaçamento centimétrico, sendo comuns a presença de estrias de deslizamento com indicação de movimentos e material lítico comuinuido, além da presença de minerais tardios precipitados (carbonatos e zeolitas). Sua direção varia desde N15⁰E a N80⁰E, com mergulhos em geral verticalizados a subverticalizados com ângulos entre 70⁰ e 90⁰ (Fig. 11).

Em geral estas estruturas possuem baixo rejeito e afetam vários níveis de derrames dentro da pilha de rocha vulcânica, além de afetar, por vezes, a unidade sedimentar subjacente (Formações Botucatu e Santa Maria).

Além de falhamentos, em campo observa-se a ocorrência de fraturamentos com direção nordeste-sudoeste. Estes fraturamentos apresentam direções predominantes entre N30°E a N40°E e N60°E a N70°E, os quais ocorrem como amplas zonas de fraturas com largura total de metros a dezenas de metros compostos internamente por fraturas paralelas, que cortam disjunções e outros sistemas de fraturas.

A segunda família possui direção leste-oeste, que ocorre de forma menos frequente em relação à primeira. Os lineamentos associados a esta direção possuem também uma amplitude regional, porém não são identificados com muita frequência.

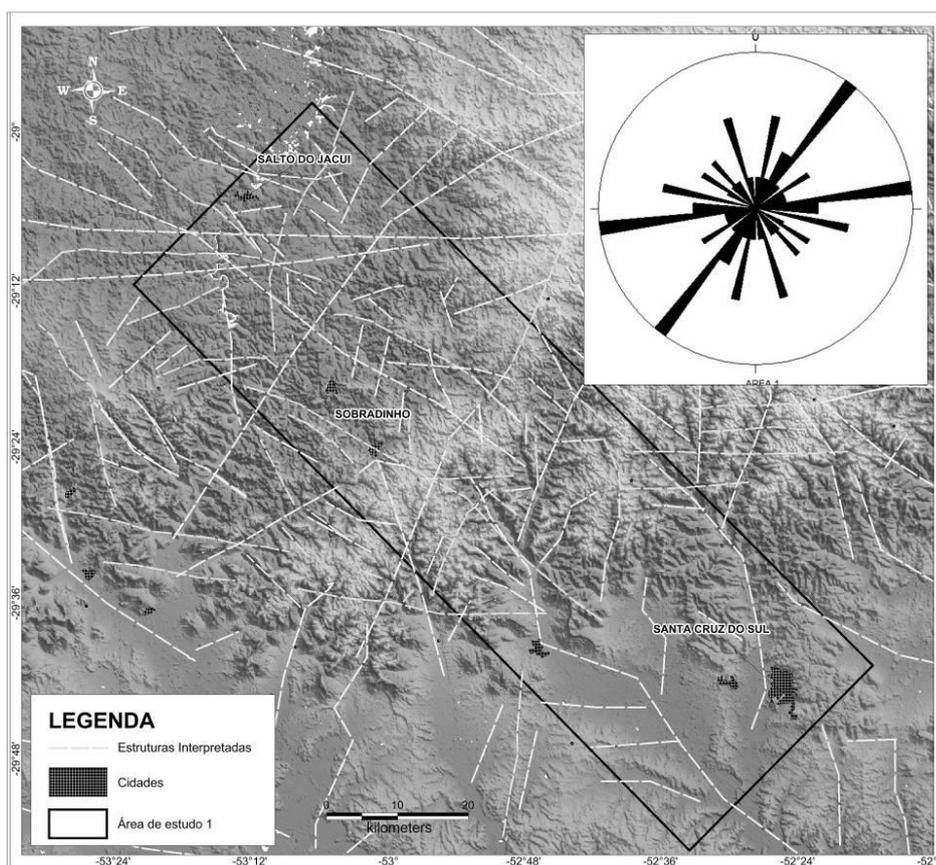


Figura 10 –Modelo digital do terreno com interpretação estrutural da Área “1”.

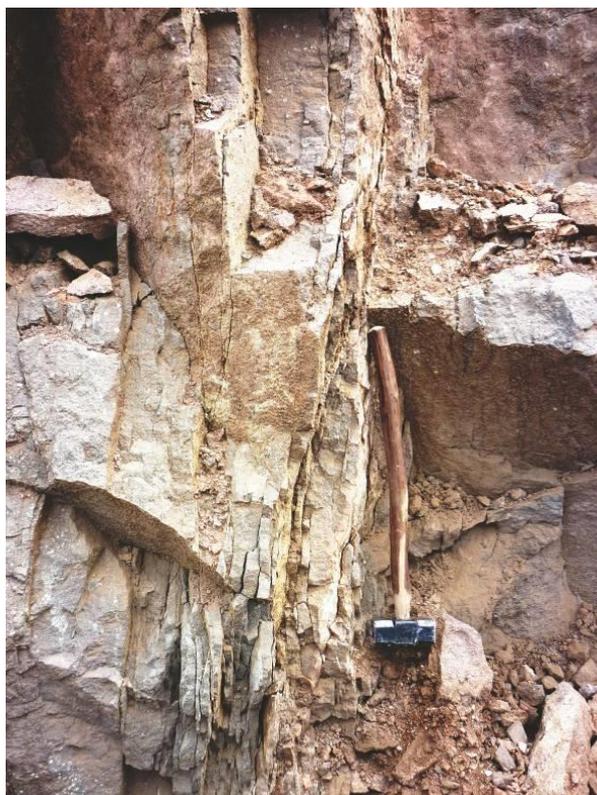


Figura 11 –Falhamento da família nordeste-sudoeste com mergulho verticalizado (UTM: 341639⁰/6729700⁰).

- **Características morfoestruturais da Área “2”**

Verificou-se que na área “2” predominam duas famílias principais de direções de lineamentos: nordeste-sudoeste, noroeste-sudeste com ocorrência mais esporádica de lineamentos leste-oeste (Fig. 12).

Os falhamentos com direção nordeste-sudoeste ocorrem na forma de falhas simples com azimutes variáveis sendo mais comuns N60°E e N75°E e planos com mergulhos verticalizados a subverticalizados (Fig. 13). De maneira mais restrita são observadas falhas escalonadas onde são descritos blocos seccionadas por vários planos de falha, cujo espaçamento entre eles variam desde centímetros até vários metros. No interior dos planos e em espaços gerados por brechação é comum a precipitação de minerais secundários além de ocorrência de estrias, zonas com brechação e cominuição.

Nos planos destas estruturas observam-se indícios de movimentação vertical na forma de estrias. Esta movimentação tem como consequência o posicionamento lateral de diferentes derrames ou por vezes diferentes níveis de derrames, como por exemplo, zona vesiculada ao lado de níveis com disjunções. Além disso, nas

porções basais da Formação Serra Geral estas estruturas podem posicionar paralelamente as rochas vulcânicas com outras litologias pertencentes as unidades basais.

As estruturas noroeste-sudeste da área ocorrem em afloramento como sistemas de fraturamentos e mais raramente, falhamentos regionais. Seus mergulhos são em geral verticalizados a subverticalizados, com padrões azimutais variando entre N35°W e N20°W graus, como observado em pacotes de fraturas, na Serra do Faxinal no extremo sudeste do estado de Santa Catarina.

Os lineamentos leste-oeste ocorrem geralmente como morfoestruturas individuais e isoladas, com grande extensão regional, com baixa frequência, condicionando drenagens ou seccionando e direcionando a escarpas.

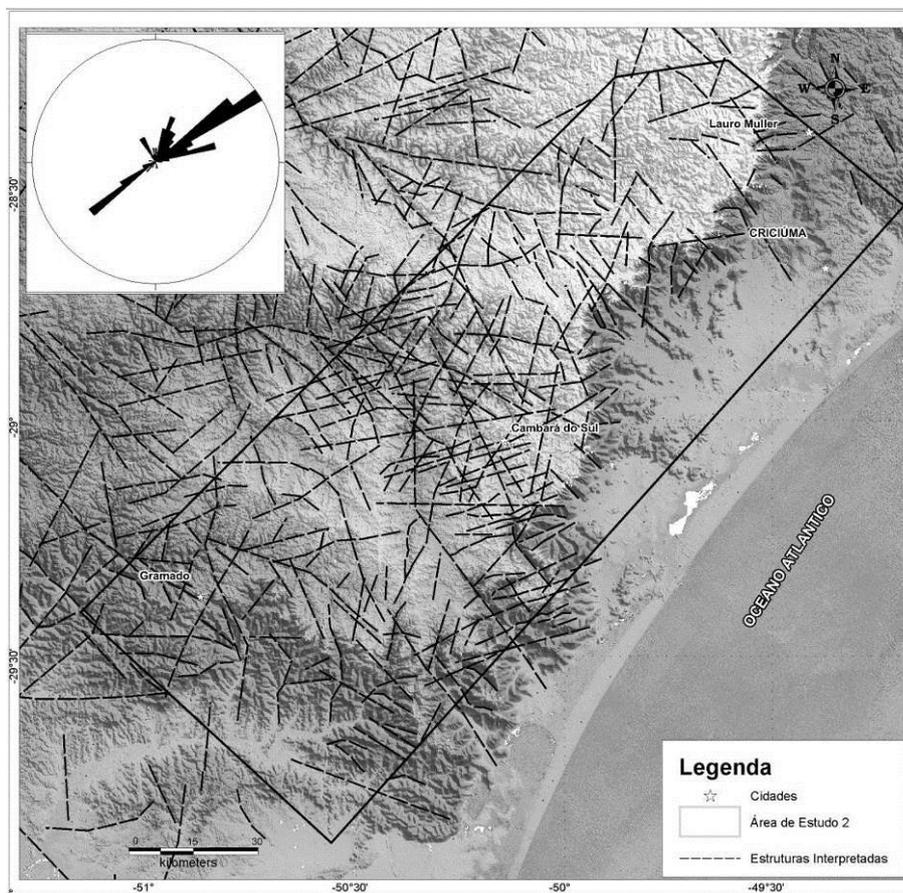


Figura 12 –Modelo digital do terreno com interpretação estrutural da Área “2”.



Figura 13 – Sistema de falhamento escalonado NE com mergulho verticalizado e brechação, na rodovia Rota do So (UTM: 341639⁰/6729700⁰).

Contribuição das estruturas para o sistema permo-poroso Serra Geral

- **Estruturas Nordeste:** Em ambas as áreas, os lineamentos nordeste com grande amplitude regional estão em sua maior parte associados a falhamentos de maior rejeito. Estes lineamentos chegam a atingir por vezes a centenas de quilômetros de extensão, conectando várias estruturas tectônicas menos expressivas que truncam ou são truncadas por elas.

As estruturas nordeste são as mais presentes em ambas as áreas, tendo, de forma geral, boa distribuição espacial com estruturas ora com expressão regional ora com pacotes com grande densidade destas. Em escala local e de afloramento a importância destas estruturas reside no fato de conectarem diferentes elementos e níveis estratigráficos portadores de porosidade potencial dentro de um derrame (zonas vesiculadas, zonas brechadas e *traps* de arenito). Estas estruturas servem também de conexão entre diferentes derrames. Além disso, estes pacotes de fraturas conectam níveis porosos com as estruturas regionais.

- **Estruturas Noroeste:** Em ambas as áreas, as estruturas com direção noroeste tem um comportamento semelhante associado-se de maneira geral a lineamentos de grande extensão e ocorrência esporádica, que truncam estruturas nordeste.

Estas estruturas ocorrem de forma esporádica tendo porém expressiva extensão regional, possuindo grande continuidade e morfologia bem marcada no relevo. Eventualmente podem constituir uma conexão entre estruturas menores e estruturas regionais nordeste nos quais estão truncados.

Estes conjuntos de estruturas noroeste permitem assim a conexão entre estruturas regionais e locais de diferentes direções e a conexão destas com níveis estratigráficos portadores de porosidade dentro da sequência vulcânica.

- **Estruturas Leste-Oeste:** As estruturas com direção leste-oeste tem um comportamento aparentemente diferenciado e incostante para as duas áreas pois ocorre de forma esporádica na área “2” estando visivelmente presente em determinadas porções da área “1”.

Na área “2” as estruturas leste-oeste ocorrem com dimensões restritas e com baixa frequência geralmente truncando e seccionando estruturas de outras direções, porém tendo baixa penetrabilidade no que tange a formas de relevo na paisagem. Em afloramento possuem pouca representatividade tendo em vista que foram observados fraturamentos espaçados e isolados e falhamentos simples de ocorrência esporádica.

A importância destas estruturas local e regionalmente reside no fato das mesmas truncarem diferentes estruturas e estabelecerem a conexão entre as estruturas regionais e no âmbito local com a conexão destas com zonas e níveis específicos portadores de porosidade, sendo porém estas de ocorrência esporádica dentro do sistema.

4. GEOLOGIA DO PETRÓLEO

4.1 Reservatórios não-convencionais – Rochas Ígneas

Como reservatórios convencionais entende-se a rocha que, possuindo uma combinação apropriada de valores de porosidade e permeabilidade, possibilita a acumulação de hidrocarbonetos (óleo e/ou gás). Os melhores reservatórios de hidrocarbonetos são os arenitos e carbonatos. No entanto, rochas ígneas também podem constituir um tipo especial de reservatório de hidrocarbonetos, denominado não convencional (P'an, 1983). Porém, a efetividade destas rochas como reservatório irá depender de feições como fraturas e microfraturas, das vesículas e do grau de alteração da rocha (Mizusaki, 1986).

Assim, intervalos de rochas vulcânicas com vesículas, microfraturas e fraturas bem desenvolvidas e conectadas podem servir de possíveis zonas de reservatório (Sircar, 2004). Além disso, processos de intemperismo muito atuantes nestas rochas contribuem no sentido do aumento da microporosidade da matriz.

Normalmente, as rochas ígneo-básicas constituem um reservatório em que predomina um intenso sistema de fraturas interligadas, fator que além da porosidade também ocasiona a permeabilidade do reservatório. Secundariamente, outras fontes de porosidade podem ser identificadas, como a porosidade vesicular e a microporosidade associada com a alteração da matriz da rocha. É necessário que estes espaços sejam intercomunicados preferencialmente por microfraturas para permitir o desenvolvimento de permeabilidade (Mizusaki, 1986).

Os campos produtores de Badejo e Linguado da Bacia de Campos, margem continental brasileira, são bons exemplos de produção de hidrocarbonetos em reservatórios com este sistema permo-poroso (Mizusaki, 1986). O reservatório não convencional e secundário é formado por uma sucessão de derrames fraturados. São derrames associados ao vulcanismo cretáceo e denominados de Formação Cabiúnas, embasamento econômico da bacia (Mizusaki *et al.*, 1992). O preenchimento deste reservatório pelo hidrocarboneto ocorreu a partir de um intenso falhamento que colocou em contato lateral os geradores subjacentes e os derrames básicos permitindo a migração do óleo. Este reservatório foi um dos objetivos principais no início da exploração da bacia, mas depois ficou em segundo plano em virtude do sucesso obtido com outros prospectos (Eiras & Wanderley Filho, 2006).

Essas bacias produtoras são *offshore* e os reservatórios encontram-se em grandes profundidades, submersos, dificultando o entendimento e os processos que levaram à acumulação do hidrocarboneto nesses reservatórios não-convencionais.

Assim há necessidade de um modelo análogo em superfície que permita a visualização e o entendimento das feições permo-porosas do reservatório.

Por isso, o principal foco deste trabalho é a análise tectono-estratigráfica integrada da Formação Serra Geral (vulcanismo do Cretáceo da Bacia do Paraná) sob o ponto de vista de rocha-reservatório visando à proposição de modelos análogos para o vulcanismo Neocomiano das bacias marginais brasileiras.

4.2 . Modelos análogos

Dois principais motivos justificam o estudo de afloramentos na geologia do petróleo. O primeiro, quase óbvio, é o estudo de sucessões expostas que, em subsuperfície, apresentam potencialidade para exploração de hidrocarbonetos. O segundo é a produção de modelos para o entendimento da distribuição geométrica dos reservatórios.

Slatt (2000) argumenta que os afloramentos fazem uma ponte entre dados pontuais extraídos dos poços e as seções sísmicas 3D de larga escala quando da prospecção de hidrocarbonetos.

Os modelos geológicos de sistemas análogos permitem o reconhecimento de propriedades internas e externas importantes, como a identificação de heterogeneidades e de barreiras de permeabilidade e porosidade, nem sempre identificáveis em subsuperfície. Kneller (1995) e Shanmugam (2000) ressaltam que a consideração dos processos deposicionais no estudo da arquitetura das rochas é uma premissa fundamental para construir modelos deposicionais plausíveis.

A Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná) pode ser considerada como contemporânea ao magmatismo do Neocomiano das bacias marginais brasileiras. As feições texturais e estruturais dos derrames da Formação Serra Geral são observadas em inúmeros e excelentes afloramentos o que não ocorre com o magmatismo das bacias marginais cujo conhecimento depende da disponibilidade e da análise de testemunhos de sondagens e amostras de calha obtidas, em sua maioria, pela Petrobras (Mizusaki & Thomaz-Filho, 2004). Com isto, inúmeras dúvidas surgem em relação às feições como vesículas, fraturas e descontinuidades,

típicas de eventos vulcânicos e consideradas como responsáveis pela permo-porosidade destas rochas.

Como as rochas ígneo-básicas da Bacia do Paraná tem características semelhantes, estão expostas tanto verticalmente quanto lateralmente em áreas de extensão considerável e apresentam potencial para uma amostragem seqüencial objetivando diversos tipos de estudos e análises (química, microscopia ótica, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, entre outras), podem ser análogos para estudo destas feições

Diversas pesquisas tem sido realizadas na Bacia do Paraná, onde o principal foco tem sido a influência dos eventos magmáticos que afetaram as bacias paleozóicas brasileiras e que, de alguma forma, poderiam estar relacionados com a ocorrência de petróleo (Thomaz-Filho, 1982; Araújo *et al.* 2005, 2006; e Thomaz-Filho *et al.*,2008) porém nenhum enfoque sob o ponto de vista de rocha-reservatório.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 carta de submissao do artigo



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 28 de março de 2013.

À
Gleice S. Reis

Venho comunicar o recebimento do manuscrito abaixo listado, submetido para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição. O manuscrito será analisado quanto ao conteúdo e enquadramento nas normas de preparação, para que seja iniciado o processo de análise por pares.

Título: *Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná) – um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira.*

Autor(es): Gleice S. Reis, Ana M. Mizusaki, Ari Roisenberg & Rogério R. Rubert.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Paulo Alves de Souza
Editor Chefe

Pesquisas em Geociências

Instituto de Geociências – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
Av. Bento Gonçalves, nº 9500 - Bloco 1 - Prédio 43127, Sala 209
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.
Tel.: +55.51.3308.7386 - Email: paulo.alves.souza@ufrgs.br

5.2 Artigo: Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná) – um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira

Serra Geral Formation (Cretaceous, Paraná Basin) – an analogous to the igneous reservoir rocks of the Brazilian continental margin

Gleice S. REIS¹, Ana M. MIZUSAKI^{1,2*}, Ari ROISENBERG^{1,2}, Rogério R. RUBERT¹

¹Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, prédio 43127, sala 112, CEP: 91509-900, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil;

(gleicegel@gmail.com; ana.mizusaki@ufrgs.br; ari.roisenberg@ufrgs.br; rogRubert@yahoo.com.br)

² Pesquisador CNPq

*autor correspondente

RESUMO

As rochas ígneas, nos últimos anos, tem tido especial interesse nas bacias sedimentares produtoras de hidrocarbonetos especialmente por que constituem-se em reservatórios não convencionais. Muitos dos reservatórios atualmente conhecidos em rochas ígneas resultaram de descobertas acidentais, uma vez que a chance de encontrar hidrocarbonetos em rochas deste tipo sempre foi considerada remota. No entanto, atualmente, vem se observando um crescente e importante número de descobertas onde as rochas vulcânicas são reservatórios de hidrocarbonetos. As rochas ígneas quando reservatórios de hidrocarbonetos são genericamente denominadas de “embasamento” e os reservatórios considerados como secundários. Na Bacia de Campos, margem continental sudeste do Brasil, os campos produtores de Badejo e Linguado, tem o embasamento econômico constituído por derrames de rochas básicas que apresentam produção de hidrocarbonetos, ou seja, constituem um reservatório não convencional. O reservatório é secundário e formado por uma sucessão de derrames de basalto alterados e fraturados que constituem o embasamento econômico da bacia. Esses campos produtores são *offshore* e os reservatório não convencional encontra-se a grandes profundidades, submerso, dificultando o entendimento e os processos que levaram à acumulação do hidrocarboneto nos derrames. Assim há necessidade de um modelo análogo em superfície que permita a visualização e o entendimento das feições permo-porosas do reservatório não convencional. Por isso, o principal foco deste trabalho é a análise tectono-estratigráfica integrada da Formação Serra Geral (vulcanismo do Cretáceo da Bacia do Paraná) sob o ponto de vista de rocha-reservatório visando à proposição de modelos análogos para o vulcanismo Neocomiano das bacias marginais brasileiras.

Palavras-chave: rocha reservatório, sequência vulcano-sedimentar, Bacia do Paraná, Bacia de Campos, análogo.

ABSTRACT

Magmatic events are registered in all geologic periods specially concerning the evolution of hydrocarbon sedimentary basins. The recognition of magmatic events in hydrocarbon production basins is useful to the understanding and reconstruction of the petroleum system. The magmatism can be associated with positive or negative influences to the petroleum system. As negative consequences, changes in the permeability and porosity values of the reservoirs rocks due to the increase in the temperature associate with magmatic extrusions or intrusions. A positive consequence is the hydrocarbon maturation and production when the increase of the temperature is not so high. Volcanics can also be caps rocks and reservoir rocks. Many reservoir rocks known in the sedimentary basins are volcanics accidentally discovered. Until know these rocks were not considered as reservoirs and ignored in the exploration and exploitation activities. Nevertheless, new discoveries of volcanics reservoir rocks are being common and in this case are named “basement” and the reservoir are considered as secondary. The great problem is the knowledge of the volcanic reservoir rocks model because they constitute a non conventional reservoir. Badejo and Linguado fields in the Campos Basin have hydrocarbon production associated with volcanic rocks which constitutes an unconventional reservoir. The reservoir is associated with basalt flows with a complex system of fracture and vesicular porosity. These fields are offshore and in great depths so the study needs an analogous models to understand. An analogous is the Serra Geral Formation (Cretaceous volcanism of the Paraná basin) with excellent outcrops and possibility to develop a tectono-stratigraphic model to the volcanic reservoirs of the Campos Basin.

Key-words: reservoir rocks, volcano-sedimentary sequence, Paraná Basin, Campos Basin, analogous.

1.Introdução

Manifestações magmáticas são comuns nos diferentes períodos geológicos da evolução das bacias sedimentares especialmente aquelas nas margens de placas divergentes e nas do tipo *rifte*. Nos últimos anos tem sido de considerável importância o reconhecimento e o estudo destes eventos nas bacias produtoras de hidrocarbonetos, nas quais as rochas vulcânicas podem causar tanto impactos negativos como positivos. Como impactos negativos, consideram-se as alterações nas propriedades permo-porosas dos reservatórios adjacentes associados com o aumento de temperatura, verificado quando das extrusões e intrusões magmáticas. Do ponto de vista positivo, eventos magmáticos podem incrementar gradualmente a temperatura da área e assim possivelmente acelerar a maturação dos hidrocarbonetos nas rochas geradoras próximas (Jinglan *et al.*, 1999).

No entanto, em bacias produtoras de hidrocarbonetos, as rochas vulcânicas ainda podem atuar como *cap rocks* e, como rochas-reservatório. Muitos dos reservatórios atualmente conhecidos em rochas ígneas resultaram de descobertas acidentais, uma vez que a chance de encontrar hidrocarbonetos em rochas deste tipo sempre foi considerada remota. No entanto, atualmente, vem se observando um crescente e importante número de descobertas onde as rochas vulcânicas são reservatórios de hidrocarbonetos (Schiuma, 1988). As rochas ígneas quando reservatórios de hidrocarbonetos são genericamente denominadas de “embasamento” e os reservatórios considerados como secundários (P’an, 1983).

Assim, há necessidade de entendimento destas rochas sob o ponto de vista de reservatório não-convencional e o desenvolvimento de modelos que permitam um melhor conhecimento do sistema permo-poroso e conseqüentemente, a melhor exploração destas reservas.

Na Bacia de Campos, margem continental sudeste do Brasil, os campos produtores de Badejo e Linguado, tem o embasamento econômico constituído por derrames de rochas básicas que apresentam produção de hidrocarbonetos, ou seja, constituem um reservatório não convencional (Mizusaki, 1986) (Fig. 1).

O reservatório é secundário e formado por uma sucessão de derrames de basalto alterados e fraturados que constituem o embasamento econômico da bacia (Mizusaki, 1986).

Esses campos produtores são *offshore* e os reservatório não convencional encontra-se a grandes profundidades, submerso, dificultando o entendimento e os processos que levaram à acumulação do hidrocarboneto nos derrames.

Assim há necessidade de um modelo análogo em superfície que permita a visualização e o entendimento das feições permo-porosas do reservatório não convencional.

Por isso, o principal foco deste trabalho é a análise tectono-estratigráfica integrada da Formação Serra Geral (vulcanismo do Cretáceo da Bacia do Paraná, Fig. 1) sob o ponto de vista de rocha-reservatório visando à proposição de modelos análogos para o vulcanismo Neocomiano das bacias marginais brasileiras.

Inserir Fig. 1

2. Rochas vulcânicas como reservatório não convencional

Reservatório é a rocha que, possuindo uma combinação apropriada de valores de porosidade e permeabilidade, possibilita a acumulação de hidrocarbonetos (óleo ou gás).

Porosidade (ϕ) é o volume de espaços vazios, em termos de porcentagem, medido em relação ao volume total da amostra da rocha. A porosidade da rocha é definida como a capacidade em armazenar fluidos no seu interior e pode ser primária ou secundária. A porosidade primária é uma característica inerente à própria rocha, enquanto a porosidade secundária resulta de processos tais como dissolução, recristalização ou fraturamento, que ocasionam o aumento do espaço poroso primário.

Permeabilidade (κ) é a medida da capacidade da rocha em transmitir fluidos, expressa em unidades Darcy. Como a porosidade, a permeabilidade também pode ser primária ou secundária. A permeabilidade primária está relacionada ao espaço poroso inicial da rocha. A permeabilidade secundária é o aumento dos valores iniciais de permeabilidade por fraturamento ou dissolução.

As rochas sedimentares são consideradas como reservatórios convencionais de hidrocarbonetos. No entanto, as rochas ígneas extrusivas podem se constituir em um tipo especial de reservatório de hidrocarbonetos denominado não convencional (P'an, 1983).

Supunha-se que as intrusões e extrusões de material magmático nas bacias sedimentares, na realidade, ocasionavam a destruição da matéria orgânica, dos hidrocarbonetos previamente gerados e ainda, os fluidos associados poderiam obliterar os eventuais poros das rochas-reservatório adjacentes. No entanto, rochas magmáticas vêm ganhando destaque na geologia do petróleo, isto por que um crescente número de descobertas mundiais de hidrocarbonetos tem sido observado onde estas rochas se constituem em reservatórios de hidrocarbonetos (Mizusaki, 1986; Gu *et al.*, 2002).

Normalmente, as rochas ígneo-básicas constituem um reservatório em que predomina um intenso sistema de fraturas interligadas, gerando espaços vazios (porosidade) e também boa permeabilidade ao reservatório. Secundariamente, outras fontes de porosidade podem ser identificadas, como as vesiculares e a porosidade da matriz alterada, desde que esses espaços vazios sejam intercomunicados e permitam o desenvolvimento de permeabilidade (Mizusaki, 1986). Assim, intervalos de rochas vulcânicas com vesículas, microfraturas e fraturas bem desenvolvidas e conectadas podem servir de possíveis zonas de reservatório (Sircar, 2004). Além disso, processos de intemperismo muito atuantes nestes intervalos contribuem no sentido do aumento da microporosidade.

Os campos de Badejo e Linguado da Bacia de Campos, margem continental brasileira, são bons exemplos de produção de hidrocarbonetos em reservatórios com este sistema permo-poroso (Fig. 2). São derrames fraturados associados ao vulcanismo juro-cretáceo que deu origem à Formação Cabiúnas, embasamento econômico da bacia (Mizusaki *et al.*, 1992). O preenchimento deste reservatório ocorreu a partir de um intenso falhamento que colocou em contato lateral os geradores e os derrames básicos. Este tipo de reservatório foi um dos objetivos principais no início da exploração da bacia, mas depois ficou em segundo plano em virtude do sucesso obtido com outros prospectos (Eiras & Wanderley Filho, 2006).

De uma forma geral, as rochas ígneo-básicas constituem um reservatório fraturado (onde predomina a porosidade por fraturamento), pois a porosidade e a permeabilidade são

essencialmente dominadas por fraturas. No entanto, secundariamente, outras fontes de porosidade são identificadas: vesicular e da matriz.

A Formação Serra Geral (Bacia do Paraná, Cretáceo, com aproximadamente 133 Ma segundo Renne *et al.* (1992) é contemporânea a este vulcanismo Neocomiano das bacias marginais brasileiras e suas feições texturais e estruturais estão expostas em excelentes afloramentos o que não ocorre com o magmatismo das bacias marginais (Mizusaki, 1986). Com isto, as microestruturas vulcânicas como poros (vesículas), fraturas e descontinuidades, típicas de eventos vulcânicos, consideradas como responsáveis pela permo-porosidade deste tipo de rocha podem ser analisadas em detalhe. As rochas vulcânicas da Bacia do Paraná estão expostas tanto verticalmente quanto lateralmente em áreas de extensão considerável e, por isto, apresentam potencial para uma amostragem sequencial objetivando diversos tipos de estudos e análises (química, microscopia ótica, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, entre outras).

Inserir Fig. 2

Nas bacias sedimentares da margem continental brasileira, o processo de *rifteamento* que do Neojurássico ao Eocretáceo deu origem ao oceano Atlântico Sul, foi marcado por inúmeros eventos magmáticos, especialmente registrados, nos altos estruturais que as separam e também no continente emerso adjacente. Esses eventos são bem conhecidos nas áreas continentais emersas. No entanto, na área marginal submersa, o conhecimento depende da disponibilidade e da análise de testemunhos de sondagens obtidas, em sua maioria, pela Petrobras quando da prospecção de hidrocarbonetos (Mizusaki *et al.*, 2002).

A Bacia do Paraná permite a elaboração de um modelo de reservatório vulcânico que pode ser aplicado nas bacias da margem continental brasileira e mesmo, nas outras bacias paleozóicas brasileiras.

3. Geologia regional

3.1 Bacia do Paraná e a Formação Serra Geral (Cretáceo)

A Bacia do Paraná, abrangendo aproximadamente 1.400.000 km², estendendo-se pelo Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina, constitui-se de uma vasta área de sedimentação paleozóica-mesozóica. O registro estratigráfico desta bacia consiste basicamente de cinco seqüências deposicionais principais, que variam, em idade, do Ordoviciano ao Cretáceo. É importante frisar que o preenchimento sedimentar da bacia é predominantemente siliciclástico, sendo capeado pelas rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Os derrames de lavas basálticas da Formação Serra Geral representam uma das maiores manifestações vulcânicas episódicas de caráter básico do Neocomiano. Registram uma espessura total de até 2.000 m de basalto sobre os sedimentos da Bacia do Paraná, sendo principalmente representadas por derrames de natureza básica e subordinadamente por rochas ácidas. Também ocorreu significativa atividade ígnea intrusiva (representada por *sills* e diques) associada. Encontram-se em contato concordante e abrupto com os arenitos eólicos subjacentes da Formação Botucatu. É comum, nas porções mais basais da seqüência vulcânica, a presença de *intertraps* deste arenito em meio aos derrames de lava, cuja origem parece estar relacionada a um intervalo de quiescência do evento vulcânico. Feições de interação lava-sedimento como brechas e os denominados diques de arenito também são observados.

4. Área de trabalho

Para a realização deste trabalho foram escolhidas duas áreas da bacia do Paraná devido às suas características tectono-estratigráficas, destacando-se o intenso fraturamento e a presença de vesículas, feições de interesse para um análogo de rochas-reservatório. Além disso, observa-se a presença abundante de feições de interação entre os basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Botucatu (Fig. 3).

A primeira área de estudo localiza-se na região do Salto do Jacuí, porção central do estado do Rio Grande do Sul. O levantamento estratigráfico, tectônico e coleta de amostras abrange desde as proximidades da cidade de Santa Cruz do Sul até o Salto do Jacuí, com distâncias que variam de 155 a 284 km, respectivamente, em relação a Porto Alegre, capital do estado. Esta região foi selecionada pela presença de *intertraps*, fraturas, vesículas e interações dos derrames com o arenito Botucatu formando estruturas consideradas interessantes para um modelo de reservatório não convencional (Michelin, 2013).

A segunda área compreende a região entre as cidades de Torres (RS), Criciúma (SC) e Cambará do Sul (RS) incluindo-se aí a Serra do Rio do Rasto (SC), conforme observado na figura . Esta região foi selecionada devido ao intenso fraturamento observado bem como a presença de estruturas resultantes da interação das lavas com o arenito Botucatu.

Inserir Fig. 3

5. Metodologia

Os trabalhos de campo foram conduzidos no sentido de obter-se dados geológicos, através da descrição detalhada das unidades aflorantes, confecção de perfis colunares, documentação fotográfica, medidas de atitudes e orientações de fraturas e falhas, A coleta de amostras de rochas para análises petrográficas, químicas, por difratometria de raios X e microscopia eletrônica de varredura também foi efetuada nesta etapa.

Os dados de campo obtidos foram aplicados para a elaboração de mapas de pontos, de localização e de estruturas. Isto foi integrado através das observações de campo, das descrições dos afloramentos e das informações dos mapas geológicos anteriores, bem como uma interpretação de imagem CIBERS integradas com dados fisiográficos e geológicos obtidos de órgãos institucionais (SIG-CPRM e SIG-IBEGE).

Estes dados foram tabulados para um sistema X,Y de coordenadas UTM, utilizando-se para este fim o *Software Microsoft Excel*, sendo posteriormente plotados sobre bases geológicas e imagens de satélite. As análises das imagens do modelo digital do terreno (DEM – *digital elevation model*)

possibilitaram a interpretação de aspectos fisiográficos tais como drenagens e na interpretação de morfoestruturas auxiliando assim na interpretação estrutural da área.

Essas imagens foram georreferenciadas no Sistema UTM (South American 1969, Datum 22 e 23, do Hemisfério Sul) utilizado-se para este fim os softwares *MAPINFO professional 11.0*, *Global Mapper 7.0* e *Discovery 12.0*.

As amostras coletadas nas etapas de campo foram descritas macroscopicamente em lupa *Wild Heerbrugg* e fotodocumentadas. Foi feita então uma seleção de amostras para serem analisadas por técnicas petrográficas, por difratometria de raios X e por microscopia eletrônica de varredura visando à obtenção de dados complementares.

As lâminas petrográficas foram descritas com técnicas de luz natural e polarizada em microscópio petrográfico e as principais feições foram fotomicrografadas e, em alguns casos, quantificadas visualmente.

Os grupos de argilominerais presentes nas amostras selecionadas foram identificados, com base na sua estrutura cristalina utilizando-se um difratômetro Siemens D5000 Diffraktometer pertencente ao Laboratório de Difratometria de Raios X do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com radiação $K\alpha Cu$ nas condições de 40 kV e 30 mA de corrente de filamento e no intervalo de 2 a 28° (2 θ).

Fragmentos milimétricos das amostras foram colados (com epóxi) em porta amostras especiais e metalizados com fina película de ouro para análise ao microscópio eletrônico de varredura. São observados em aumentos variáveis (em geral até 10.000 X) e fotografados. As análises foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS).

As análises químicas em rocha total para elementos maiores, menores e traços foram efetuadas no Activation Laboratories Ltd. (Laboratório *Actlabs*, Canadá).

Em campo foram efetuados perfis regionais com descrição de estruturas segundo suas características morfológicas, relações no pacote de rocha, dimensões e disposição espacial (atitudes). Para a análise estatística dos dados estruturais de campo para esta área utilizou-se bússola Brunton com notação de mão esquerda. Posteriormente, os dados foram compilados e processados através do

Software Stereonet, a partir do qual foram gerados os estereogramas com padrão de dispersão tipo roseta, com os dados de cada bloco nele plotados. Para fins de análise foram considerados estruturas rúpteis ocorrentes nas quais englobam-se plano de falhas, fraturas e juntas. Na área “1” foram obtidas 51 medidas em afloramentos e na área “2”, foram 131 medidas.

Por outro lado a interpretação de morfoestruturas foi realizada utilizando-se imagens de Modelo Digital do Terreno em escala de cores e escala de cinza, com os softwares *Mapinfo 10.5* e *EnconDiscover 12.0*, levando-se em conta padrões de drenagem, níveis de erosão diferencial e elementos gerais do relevo. A partir da interpretação realizada foram individualizadas morfoestruturas lineares (lineamentos) a análise deste como estruturas levando-se em conta sua densidade na área, amplitude regional, continuidade e direções predominantes.

Conceitualmente entende-se como morfoestruturas o produto da influência da estrutura litológica na gênese das formas de relevo, principalmente aquelas relacionadas à ação da dinâmica das províncias geológicas (Ross, 1985,1992). Dentre as variadas formas desenvolvidas em um terreno através da interação intemperismo, erosão e controle litológico e estrutural destacam-se os lineamentos.

6. Modelos análogos

O desenvolvimento de modelos análogos compreende o estudo de sucessões expostas que, em subsuperfície, apresentam potencialidade para a exploração de hidrocarbonetos. Isto permite que sejam produzidos modelos para o entendimento principalmente dos reservatórios que estão em subsuperfície e não são integralmente visualizados. Este é o caso dos reservatórios ígneo-básicos do Neocomiano da bacia de Campos que se encontram em profundidades superiores a 3.600 m na margem continental cujo modelo é proposto a partir da análise de alguns testemunhos e perfilagem.

A Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná) pode ser considerada como contemporânea ao magmatismo do Neocomiano das bacias marginais brasileiras (Fig. 4). As feições texturais e estruturais dos derrames da Formação Serra Geral são observadas em inúmeros e excelentes afloramentos o que não ocorre com o magmatismo das bacias marginais cujo conhecimento

depende da disponibilidade e da análise de testemunhos de sondagens e amostras de calha obtidas, em sua maioria, pela Petrobras (Mizusaki *et al.*, 2002). Com isto, inúmeras dúvidas surgem em relação às feições como vesículas, fraturas e descontinuidades, típicas de eventos vulcânicos e consideradas como responsáveis pela permo-porosidade destas rochas.

Na Bacia de Campos, a Formação Cabiúnas, reservatório vulcano-sedimentar do Neocomiano, indica o empilhamento de derrames de composição básica (espessuras médias em torno de 4 metros definidas através da análise de perfilagem), com intercalações de arenitos vulcânicos e vulcanoclásticas quando analisado (Mizusaki, 1986). São interpretados como sequências de derrames basálticos intercalados com rochas vulcanoclásticas e sedimentares onde a porosidade principal está associada ao intenso fraturamento (Mizusaki, 1986) (Fig. 4).

Inserir Fig. 4

O sistema permo-poroso seria constituído por um intenso processo de fraturamento associado a porosidade das zonas vesiculares (porosidade vesicular). Na zona vesicular, microfraturas resultantes do processo de resfriamento conectam as vesículas e conferem permeabilidade a esta porção.

Como as rochas ígneo-básicas da Bacia do Paraná tem características semelhantes, estão expostas tanto verticalmente quanto lateralmente em áreas de extensão considerável e apresentam potencial para uma amostragem sequencial objetivando diversos tipos de estudos e análises (química, microscopia ótica, difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, entre outras), podem ser análogos para estudo destas feições.

7. Formação Serra geral nas áreas de estudo

A sequência vulcânica da Bacia do Paraná na região de estudo é encontrada sob a forma de derrames tabulares, algumas vezes, lenticulares de lavas de composição básica, textural e composicionalmente representadas por rochas basálticas. Na região do DMSJ, ocorre, no topo da sequência a presença de derrames de composição dacítica identificando o Membro Palmas (Bellieni *et*

al., 1986). Nos derrames basálticos individuais pode-se observar diferenças texturais que são marcantes especialmente nos derrames mais espessos (> 6 m). As porções de base e topo apresentam uma textura mais vítrea enquanto as porções centrais tem uma textura holocristalina com o tamanho dos cristais variando de milimétricos até 1 cm. Nos derrames de composição mais ácida (dacitos), esta diferenciação é pouco observada pois predomina uma textura hemicristalina com abundante matriz vítrea. São observadas vesículas, cavidades milimétricas a centimétricas, formas arredondadas ou ovaladas, concentradas especialmente na porção mais superior dos derrames. Na porção basal e central dos derrames, principalmente aqueles de menor espessura, também podem ser observadas porém em menor volume em relação ao topo dos derrames. As vesículas podem estar abertas, parcial ou totalmente preenchidas por material de origem secundária (argilominerais, quartzo, calcita, zeolitas, ametista, entre outros) . Podem também estar orientadas indicando o fluxo e há uma tendência de aumento do diâmetro em direção as porções mais superiores dos derrames. Associando-se as vesículas, preferencialmente as do topo dos derrames, são observadas microfraturas. As microfraturas parecem ser originadas pela contração térmica durante o resfriamento das lavas e formam uma rede unindo as vesículas. Nos derrames dacíticos, as vesículas são pouco representativas, muitas vezes estão orientadas e, as microfraturas não são tão comuns quanto nos derrames basálticos.

Nos derrames individuais, em alguns casos, observa-se o diaclasamento, ou seja fraturas originadas durante o processo de resfriamento (Fig. 5A). O derrame, à medida que perde calor, pode ter uma contração de até 10% de seu volume, produzindo rupturas e dando origem a fraturas, denominadas disjunções. As colunas formadas são ortogonais ao topo e à base do derrame e tendem a um formato hexagonal. Em derrames espessos, entre as duas zonas colunares permanece uma zona não atingida pela disjunção, chamada de entablamento, região central ou miolo, conforme já observado por Fernandes *et al.* (2010).

Intercalados aos derrames, principalmente na base da seção vulcânica, ocorrem *intertraps* de arenito que representam intervalos de quiescência durante a atividade vulcânica e consequente recorrência dos processos sedimentares (Pichler, 1952; Suguio & Fúlfaro, 1974; Waichel *et al.*, 2007; Petry *et al.*, 2007). São camadas de arenito de cor rosa, quartzoso e localmente, com uma incipiente estratificação cruzada atribuídos à Formação Botucatu (Fig. 5B). Os derrames de lava, especialmente

na porção mais basal da Formação Serra Geral, cobriram e preservaram a morfologia das dunas eólicas do antigo deserto Botucatu ocasionando a presença de *intertraps* arenosos. Eventualmente as dunas ficam preservadas e podem ser vistas em macroescala, evidenciadas por variações da espessura e estruturas associadas conforme descrito por Scherer (1998).

Inserir Fig. 5

Da interação das lavas com os sedimentos *intertrap* destacam-se os diques de arenito, fraturas e geodos com sedimentos e as brechas (Fig. 5C).

Como diques de arenito foram designadas as fraturas verticalizadas cuja espessura varia de milimétrica a centimétrica, preenchidas por sedimentos (Michelin, 2013). Desenvolvem-se da base para o topo dos derrames individuais mas sempre a partir da presença de *intertraps* arenosos bem desenvolvidos, eventualmente com a presença de brechas associadas. Os sedimentos que preenchem as fraturas tem cor rosa a castanha, são essencialmente quartzosos, de granulometria fina a média. Os diques de arenito podem ser cimentados por sílica quando então ficam mais resistentes ao intemperismo podendo ressaltar-se na superfície. Uma das hipóteses da gênese desses diques é encontrada no trabalho de Pichler (1952), onde o autor propõe que estes se formam concomitantemente ao derrame. O magma relativamente fluido cobre uma camada de areia inconsolidada saturada com água (*intertrap* arenoso) e, as altas temperaturas associadas com o processo, são responsáveis pela vaporização da água. A água vaporizada tem uma elevada pressão e fica trapeada na base do derrame. No entanto, qualquer fraturamento da rocha vulcânica, que acontece durante o processo de resfriamento, ocasiona a expulsão desta água vaporizada que carreando os sedimentos, irá preencher as fraturas de baixo para cima com areia. As relações de contato entre os arenitos e basaltos da Formação Serra Geral permitiram a Suguio & Fúlfaro (1974) também propor um modelo semelhante para a formação destes diques.

Já a denominação de “fraturas preenchidas com sedimentos arenosos” mostra, ao contrário dos diques de arenito uma ocorrência sempre do topo para a base dos derrames. Não são muito extensas e caracterizam-se por paredes mais retilíneas, bem marcadas e sem alterações significativas. O

sedimento de preenchimento é um arenito quartzoso, granulometria fina a média, de cor rosada e com a presença eventual de clastos com dimensões entre 0,5 cm e 2 cm, de basaltos, dacitos e raros pelitos (Michelin, 2013). Na realidade, as fraturas preenchidas por sedimentos constituem-se numa feição pós magmática relativamente comum, onde os sedimentos não consolidados preenchem as fraturas existentes nas porções de topo dos derrames.

A interação entre lava e sedimentos propicia a formação de brechas. Existem inúmeras classificações para as brechas associadas a eventos vulcânicos, entre elas: Pettijohn (1975), McPhie *et al.* (1993), Fischer (1960), entre outros (Fig. 5C). Neste trabalho, seguindo Michelin (2013), foi utilizada uma classificação de acordo com o processo de formação da brecha, sendo reconhecidas:

- brecha sedimentar corresponde aquela formada por clastos de basaltos, andesitos e dacitos, angulosos a subarredondados, com dimensões entre 5 a 20 cm imersos em matriz arenosa, granulometria fina a média, quartzosa, com grãos arredondados a subarredondados de quartzo e, secundariamente, feldspato, por vezes, material argilosos associado. As brechas sedimentares são originadas por processos pós-magmáticos, localizando-se preferencialmente na porção mais superior dos derrames;

- brechas vulcânicas tem clastos angulosos, de composição muito homogênea (basaltos, andesitos ou dacitos) em uma matriz sedimentar, semelhante aquela descrita nas brechas sedimentares, porém mais argilosa. As brechas posicionam-se na base do derrames junto ao contato com o *intertrap* e a partir destas ocorre a ramificação dos diques de arenito. As brechas ocorrem como camadas ou bolsões, por vezes interligados por diques clásticos irregulares, dentro da rocha vulcânica do topo dos derrames; têm matriz arenosa, os grãos apresentam contatos pontuais a flutuantes em um cimento carbonático, enquanto que os clastos de rocha vulcânica vesicular (Fig. 5D) presentes são angulosos e com formas irregulares, totalmente alterados;

- autobrechas - é uma brecha maciça caracterizada por fragmentos subangulosos a subarredondados, homogêneos de basalto ou dacito cimentados pela própria lava, carbonatos e/ou sílica. Desenvolvem-se de forma concomitante ao evento magmático e são o resultado de processos atuantes durante o movimento de derrames de lava parcialmente solidificados e, em presença de um declive na topografia.

Outro fator relevante é a tectônica, responsável por feições como falhas e fraturas que são importantes do ponto de vista do sistema permo-poroso em reservatórios de rochas vulcânicas.

Nas regiões analisadas (áreas “1” e “2”) (Figs. 6 e 7), três direções principais são dominantes: nordeste, noroeste e leste-oeste. Essas direções são conhecidas e vem sendo registradas na Bacia do Paraná por diversos autores (Soares *et al*, 1982; Zálán, 1986; Artur & Soares, 2002). No entanto a despeito de ocorrerem as mesmas direções estruturais, o comportamento estrutural e morfologia das estruturas para as mesmas direções por vezes é variável entre as áreas.

Em ambas as áreas, verificou-se, em lineamentos de pequeno porte, a predominância de estruturas nordeste e, secundariamente estruturas noroeste. Estas estruturas tem, em geral, o alcance de alguns quilômetros possuindo uma boa densidade nos pontos analisados, tendo porém continuidade e expressão regional restritos.

As estruturas com amplitude maior e extensões regionais são efetivamente de ocorrência mais rara, sendo geralmente descontínuas. Betiolo (2006) estudando a distribuição de lineamentos e estruturas ligadas a Formação Serra Geral, na região nordeste do Rio Grande do Sul, identificou a mesma relação entre as ocorrências, direções e quantidades de estruturas de pequeno e médio porte descritas no presente trabalho.

A partir da análise dos dados geomorfológicos e do Modelo digital do terreno, verificou-se que na área “1” (Fig. 6) predominam duas famílias principais de direções de morfoestruturas (lineamentos), sendo também observadas outras direções que ocorrem de forma esporádica ou em lineamentos com pouca expressão espacial.

A primeira família tem direção nordeste-sudoeste com azimutes que variam em sua maior parte entre N20⁰E. Esses lineamentos são os que ocorrem com maior frequência e com maior amplitude regional podendo ser rastreados, de forma descontínua por ordem de centenas de quilômetros na área. Em sua forma mais marcante estes lineamentos estão associados a um sistema de extensas estruturas regionais as quais marcam formas de relevo que recortam a escarpa com vales extensos nos quais encaixam-se várias das principais drenagens da região. Estas estruturas conectam inúmeras estruturas tectônicas menos expressivas que truncam ou são truncadas por elas. Em geral

estas estruturas possuem baixo rejeito e afetam vários níveis de derrames dentro da pilha de rocha vulcânica, além de afetar por vezes a unidade sedimentar subjacente (Formações Botucatu e Santa Maria).

Inserir Fig. 6

Além de falhamentos, em campo, observa-se a ocorrência de fraturamentos com direção nordeste-sudoeste (direções predominantes entre N30°E a N40°E e N60°E a N70°E) os quais ocorrem como amplas zonas de fraturas com largura total de metros a dezenas de metros compostos internamente por fraturas paralelas, que cortam disjunções e outros sistemas de fraturas.

A segunda família possui direção leste-oeste, e ocorre de forma menos frequente em relação à primeira. Os lineamentos associados a esta direção possuem também uma amplitude regional, porém não são identificados com muita frequência.

Na área “2” (Fig. 7) predominam duas famílias principais de direções de lineamentos: nordeste-sudoeste, noroeste-sudeste com ocorrência mais esporádica de lineamentos leste-oeste.

Os falhamentos com direção nordeste-sudoeste ocorrem na forma de falhas simples com azimutes variáveis sendo mais comuns N60°E e N75°E e planos com mergulhos verticalizados a subverticalizados. De maneira mais restrita são observadas falhas escalonadas onde são observados blocos seccionadas por vários planos de falha, cujo espaçamento entre os planos varia desde centímetros até vários metros. Nos planos destas estruturas observam-se indícios de movimentação vertical na forma de estrias. Esta movimentação tem como consequência o posicionamento lateral de diferentes derrames ou por vezes diferentes níveis de derrames, como por exemplo zona vesicular ao lado de níveis com disjunções. Além disso, nas porções basais da Formação Serra Geral estas estruturas podem posicionar paralelamente as rochas vulcânicas com outras litologias pertencentes as unidades basais.

Inserir Fig. 7

Os lineamentos leste-oeste ocorrem geralmente como morfoestruturas individuais e isoladas, com grande extensão regional, com baixa frequência, condicionando drenagens ou seccionando e direcionando a escarpas.

8. Modelo análogo para a Formação Cabiúnas (Bacia de Campos)

A Formação Serra Geral apresenta-se em derrames sucessivos, onde os sistemas principais de fraturamento estão relacionados a esforços tectônicos, gerando fraturas subverticais associadas as disjunções sub-horizontais (entablamentos), originadas pelos processos de resfriamento. Nos derrames e *intertraps* arenosos observa-se que o sistema permo - poroso constitui-se da porosidade: por fraturamento, vesicular, por dissolução e microporosidade. A permeabilidade do sistema está associada com as fraturas (tectônicas e de resfriamento) e microfraturas.

As fraturas que constituem o chamado entablamento resultam do processo de resfriamento extremamente rápido da lava basáltica associado ao fluxo. São fraturas naturais e devido as suas condições de formação não são contínuas, ou seja, são de dimensões reduzidas quando comparadas ao derrame como um todo. São geralmente horizontalizadas e descontínuas, limitando-se ao derrame onde foram formadas. Considera-se que possam ser responsáveis por porosidade nos derrames porém esta seria muito localizada e somente efetiva quando seccionada por outras fraturas.

As fraturas tectônicas, posteriores ao evento magmático, propiciam a formação do sistema permo-poroso mais importante pois, em sua maioria, interconectam-se, prolongam-se por todo o derrame e também cortam vários derrames superpostos. As estruturas tectônicas nordeste são as mais comuns nas áreas de estudo, tendo de forma geral boa distribuição espacial com estruturas ora com expressão regional ora com pacotes com grande densidade destas. Em escala local e de afloramento a importância destas estruturas reside no fato de conectarem os níveis portadores de porosidade potencial dentro da sequência (zonas vesiculares, brechadas e *intertraps* arenosos), os diferentes derrames e os níveis porosos com as estruturas regionais.

Os derrames podem ainda apresentar intenso microfraturamento associado, considerado fundamental para o desenvolvimento do sistema permo-poroso, e já identificado anteriormente nas

rochas ígneo-básicas do campo de Badejo (Mizusaki, 1986). As microfraturas permitem a circulação de fluidos que auxiliam na dissolução do material de preenchimento das vesículas (porosidade vesicular), o que posteriormente facilita a percolação dos fluidos (água e/ou óleo) no caso de ser um reservatório. Na realidade, a influência maior do microfraturamento parece ser no sentido de conexão de vesículas e conseqüente aumento de permeabilidade na zona vesicular.

A porosidade vesicular é originada pela dissolução do material de preenchimento das vesículas. Como essas feições concentram-se predominantemente no topo e na base dos derrames, a porosidade vesicular é característica desses intervalos. Intervalos com porosidade vesicular apresentam a permeabilidade associada ao microfraturamento originado pelo resfriamento conforme as figuras 8A e 8B .

Também os processos de intemperismo muito atuantes nestas zonas contribuem no sentido do aumento da microporosidade . Nas amostras alteradas, há predomínio dos argilominerálias esmectita e inter-estratificada illita-esmectita e, conforme pode ser visto na figura 8C , há o desenvolvimento de microporos. Microporos também resultam da alteração dos minerais primários como os feldspatos e do vidro vulcânico. Os processos intempéricos quando atuantes podem ocasionar não só trocas composicionais como também mudanças nas características das rochas vulcânicas aumentando os seus valores de permo-porosidade, em geral, extremamente reduzidos. Verifica-se que para rochas muito alteradas há um incremento nos valores de porosidade confirmando que a microporosidade tem uma contribuição efetiva (Fig. 8D).

As zonas vesiculares da Formação Serra Geral, assim como microfraturas e fraturas bem desenvolvidas e conectadas podem contribuir significativamente para a porosidade e permeabilidade em sistemas ígneos.

Inserir Fig. 8

As outras feições tais como os diques de arenito, fraturas com sedimentos, intertraps e brechas que são descritas nas áreas de estudo também foram analisadas do ponto de vista de reservatório.

Os diques de arenito e as fraturas com sedimentos, em sua maioria, apresentam-se preenchidos por um arenito de granulometria fina a média com excelente porosidade (até 20%). Na região do

DSMJ eventualmente o arenito de preenchimento está cimentado por opala ou sílica microcristalina. Trata-se de uma cimentação precoce pois preserva o aspecto textural original do arenito mostrando grãos com contatos predominantemente pontuais. Este arenito não se constitui em reservatório devido as suas dimensões restritas. Diques de arenito e fraturas preenchidas com sedimentos podem, no máximo, constituir-se em canais localizados para migração de fluidos conforme pode se observar na figura .

Os *intertraps* constituem camadas de arenito com espessura de até 10 m (região do DMSJ), granulometria variando de fina a grossa, predominantemente quartzoso localmente observando-se um maior teor da fração argila. A porosidade é mediana (< 10%) mas somente considerando-se um *intertrap* individualizado, este não se constitui em reservatório efetivo pois a área de ocorrência é de difícil delimitação, quase sempre somente marcada pelas feições de interação entre a lava e o sedimento. A associação entre os *intertraps* e derrames é mais interessante do ponto de vista de reservatório conforme observa-se na figura .

As brechas vulcânicas, sedimentares e as autobrechas ocorrem sob a forma de bolsões, na base ou no topo dos derrames. Em termos de volume, constituem uma fração muito pequena em relação aos derrames e, em relação a porosidade, sua contribuição parece ser reduzida. A porosidade associada é originada pela dissolução do cimento que origina porosidade secundária localizada. Já os sedimentos mais argilosos não apresentam porosidade primária ou secundária.

Na tabela 1 pode-se verificar as diferentes feições observadas e os diferentes tipos de porosidade associados. É proposta uma qualificação e semi-quantificação da porosidade verificando-se que a porosidade por fraturas é a de maior interesse (Quadro 1).

Inserir Fig. 9

Na figura 9, propõe-se uma seção representativa para um reservatório vulcano-sedimentar com base nas feições observadas nas áreas “1” e “2”, selecionadas para este estudo.

Os melhores reservatórios são os derrames básicos onde domina a porosidade por fraturamento e, secundariamente, a porosidade vesicular (Tab. 1). A porosidade vesicular é

importante mas somente torna-se efetiva caso as vesículas sejam conectadas por microfaturas, o que origina a permeabilidade necessária ao intervalo. A microporosidade ocorre praticamente em todas as unidades mas, de uma forma geral, somente contribui para o incremento dos valores da porosidade caso haja permeabilidade associada.

Outras unidades tais como brechas e diques de arenito podem apresentar porosidade mas devido as suas dimensões de pequeno porte, não formam reservatórios efetivos.

Conforme anteriormente já discutido, as fraturas tectônicas, posteriores ao evento magmático, é que propiciam a formação do sistema permo-poroso mais importante pois, em sua maioria, interconectam-se, prolongam-se por todo o derrame e também cortam vários derrames superpostos.

9. Conclusões

Na Bacia de Campos, margem continental sudeste do Brasil, os campos de Badejo e Linguado, tem o embasamento econômico constituído por derrames de rochas básicas que apresentam produção de hidrocarbonetos, constituindo um reservatório não convencional. São interpretados como seqüências de derrames basálticos intercalados com rochas vulcanoclásticas e sedimentares onde a porosidade principal está associada ao intenso fraturamento (Mizusaki, 1986).

O reservatório encontra-se a grandes profundidades, submerso, necessitando assim de um modelo análogo em superfície que permita a visualização e o entendimento das feições permo-porosas deste reservatório não convencional. Como modelo análogo para este reservatório propôs-se a Formação Serra Geral, Cretáceo da Bacia do Paraná.

A Formação Serra Geral, observada em inúmeros e excelentes afloramentos, o que não ocorre com o magmatismo das bacias marginais, permitiu a proposição de um modelo de reservatório vulcano-sedimentar que pode indicar como seria o reservatório não convencional dos campos de Badejo e Linguado da Bacia de Campos. Conclui-se então a importância dos modelos análogos para o entendimento de reservatórios não convencionais em sub-superfície, especialmente os vulcano-sedimentares.

Agradecimentos – A primeira autora agradece a CAPES pela bolsa de mestrado que permitiu a realização deste trabalho.

9. Referências

- Artur, P.C., Soares, P.C. 2002. Paleoestruturas e petróleo na Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4):433-448.
- Bellieni G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisenberg, A., Stolfa, D. 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): mineralogical and petrochemical relationships. *Journal of Petrology*, 27:915-944.
- Betiolo, L.M. 2006. Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 117 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Eiras, J.F., Wanderley Filho, J.R. 2006. Sistemas petrolíferos Igneo-Sedimentares. CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETROLEO E GÁS, 2., 2006, Rio de Janeiro. *Boletim de Resumos...* Rio de Janeiro, SBG, v.1.
- Fernandes, A. J., Maldaner, C. H., Sobrinho, J. M. A., Pressinotti, M. M. N., Wahnfried, I. 2010. Estratigrafia dos Derrames de Basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto - SP) Baseada na Geologia Física, Petrografia e Geoquímica. *Geologia USP, Série Científica*. 10(2):73-99.
- Fisher, R.V. 1960. Classification of volcanic breccias. *Geologic Society American Bulletin*, 71:973-982.
- Gu, L., Zuwei, R., Wu, C., Zhao, M., Qiu, J. 2002. Hydrocarbon reservoirs in a trachyte porphyry intrusion in the Eastern depression of the Liaohe basin, northeast China. *American Association of Petroleum Geology*, 83(6):1821-1832.
- Jinglan, L.; Chengli, Z.; Zhizhao, Q. 1999. Volcanic reservoir rocks: a case study of the Cretaceous Fenghuadian Suite, Huanghua basin, Eastern China. *Journal of Petroleum Geology*, 22(4):397-415.
- Michelin, C. 2013. *Gênese das jazidas de ágata - uma abordagem na região do Salto do Jacuí (RS)*. Porto Alegre, XXp. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (em fase final).
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R. 1993. Volcanic Textures. A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. *Hobart, University of Tasmania*, 198p.
- Mizusaki, A.M.P. 1986. *Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos - caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos*. Rio de Janeiro, 104p. Mestrado em Geociências, Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Mizusaki, A.M.P., Petrini, R., Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Dias, J., Min, A., Piccirillo, E.M. 1992. Basalt magmatism along the passive continental margin of SE Brazil (Campos basin). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 111:143-160.
- Mizusaki, A.M.P., Thomaz-Filho, A. 2004. O magmatismo pós-paleozóico no Brasil. In: Neto, V. M., Bartorelli, A., Carneiro, J. C., Brito-Neves, B.B. (Ed.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p. 281-292.
- P'An, C. H. 1983. Petroleum in basement rocks. *AAPG Bulletin*, 66(10):1597-1643.
- Pitcheler, E. 1952. Diques de arenitos em Salto Grande, rio Paranapanema. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 1:15-22.
- Petry, K., Jerram, D.A., Almeida, D.P.M., Zerfazz, H. 2007. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159:313-325.
- Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary rocks*. New York, Harper & Row, 628p.
- Renne, P., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M., Perrin, M. 1992. The age of Paraná Flood Volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, 258: 975-979.
- Ross, J.L.S. 1985. Relevo Brasileiro: uma nova proposta de classificação. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, 4:25-39.
- Ross, J.L.S. 1992. O registro cartográfico e a questão da taxonomia do relevo. *Revista de Geografia*, 06:45-58.
- Sircar, A. 2004. Hydrocarbon production from fractured basement formations. *Current Science*, 87(2):147-151.
- Scherer, C.M.S. 1998. *Análise estratigráfica e faciológica da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 202p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schiama, M. F. 1988. Reservorios de hidrocarbonuros en rocas ígneas fracturadas. *Boletim Interno da Petrobras*, p. 35-45
- Soares, P.C., Barcellos, P.E., Csordas, S.M. 1982. Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná. São Paulo, Paulipetro, Consórcio CESP/IPT. Relatório Interno, 382p.

- Suguio, K., Fulfaro, J.V. 1974. Diques clásticos e outras feições de contato entre arenitos e basaltos da Formação Serra Geral. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais...* Porto Alegre, SBG, v.2, p. 107-112.
- Zalán, P.V., Conceição, J.C., Wolff, S., Astolfi, M.A., Vieira, I.S., Appi, V.T., Neto, E.V.S., Cerqueira, J.R., Zanotto, O.A., Paumer, M.L., Marques, A. 1986. *Análise da Bacia do Paraná*. Rio de Janeiro, PETROBRAS. DEPEX. CENPES, 195p.
- Waichel, B.L., Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A. 2006. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. *Bulletin of Volcanology*, 68(7/8):599-610.

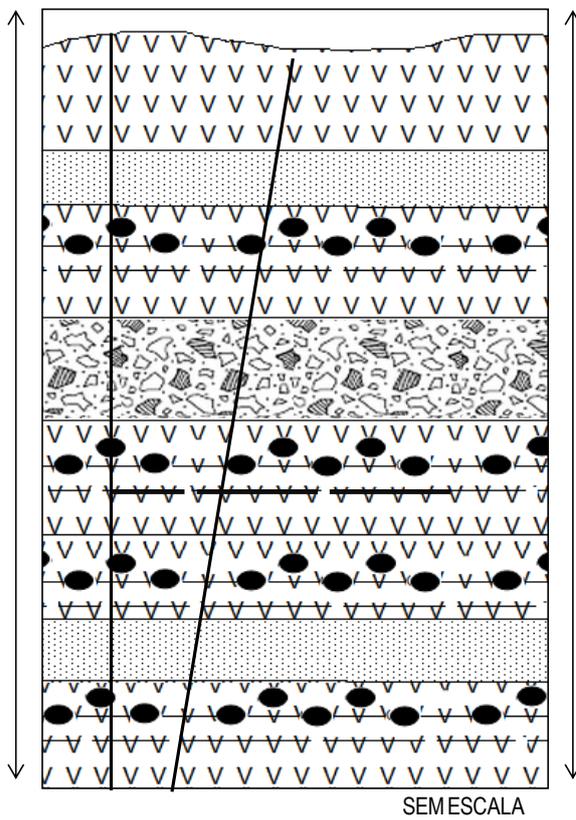
LEGENDAS DAS FIGURAS

- 1 – Localização das bacias do Paraná e de Campos (modif. Zalán *et al.*, 1991).
- 2 - Modelo para o reservatório vulcano-sedimentar do Neocomiano da Bacia de Campos (modif. Mizusaki, 1986).
- 3 - Localização das áreas de estudo: “1” (região do Salto do Jacuí, RS) e “2” (região compreendida entre a Serra do Rio do Rastro (SC), Cambará do Sul (RS) e Rota do Sol, (RS)).
- 4– Comparação dos intervalos estudados nas colunas estratigráficas das bacias de Campos e do Paraná.
- 5 - Detalhes: A) derrame mostrando diaclasamento (associado com o processo de resfriamento); B) *intertrap* arenoso; C) brecha resultante da interação lava e sedimentos; D) vesículas e porosidade vesicular.
- 6 – Mapa de modelo digital do terreno com interpretação estrutural da área “1”.
- 7 – Mapa de modelo digital do terreno com interpretação estrutural da área “2”.
- 8 – Detalhes ao Microscópio Eletrônico de Varredura; A) porosidade vesicular em amostra da Formação Serra Geral, Bacia do Paraná (45 X, ES); B) microfraturamento (1000X, ES); C) microporos associados com processos de alteração originando microporosidade efetiva na rocha (20K, ES); D) porosidade vesicular e microfraturas em amostra da Formação Cabiúnas, Bacia de Campos (250 X, ES) (Mizusaki, 1986).
- 9 – Modelo de reservatório vulcano-sedimentar com base na Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) constituindo-se num análogo para os reservatórios vulcânicos da Bacia de Campos (Campos de Badejo e Linguado, Cretáceo, Formação Cabiúnas).

Legenda dos quadros

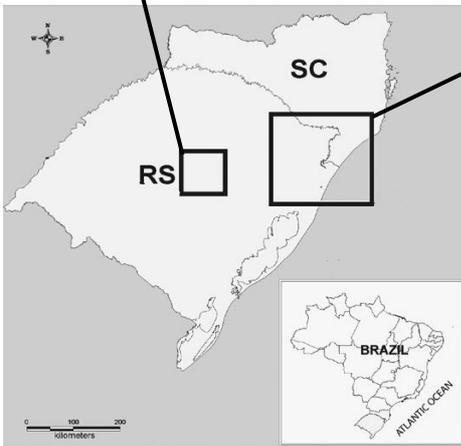
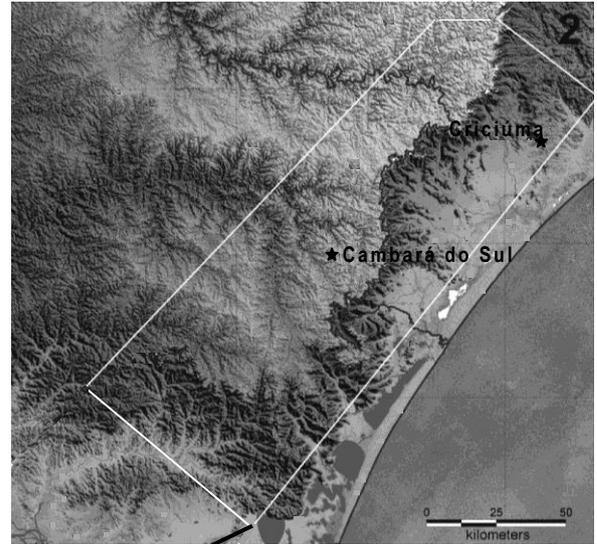
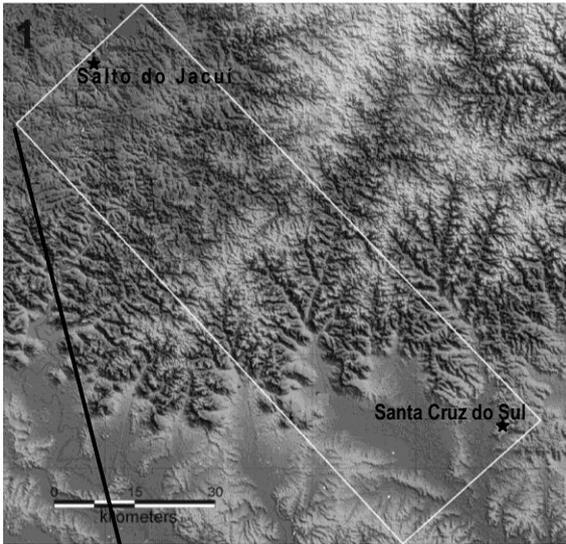
- 1 - Tipos de porosidade e permeabilidade e sua ocorrência nas diferentes feições da Formação Serra Geral, Bacia de Campos – análogo como reservatório vulcânico para a Formação Cabiúnas da Bacia de Campos.

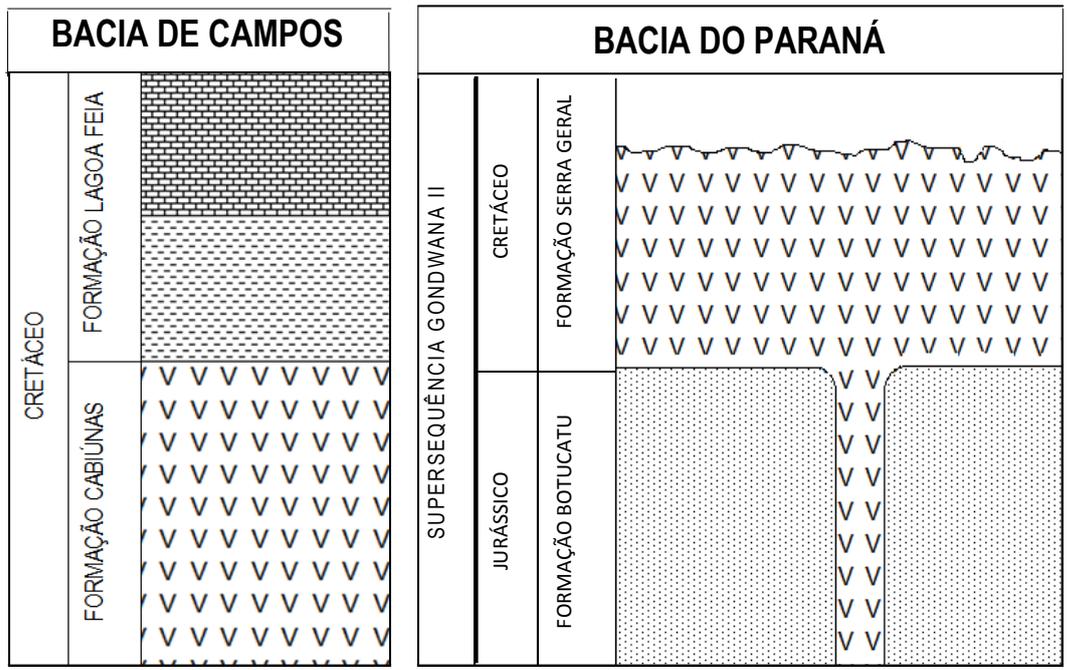




LEGENDA

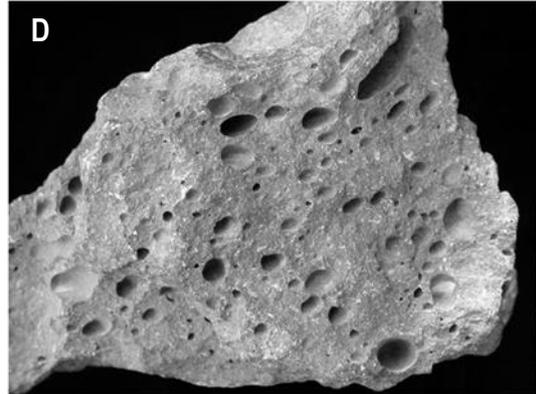
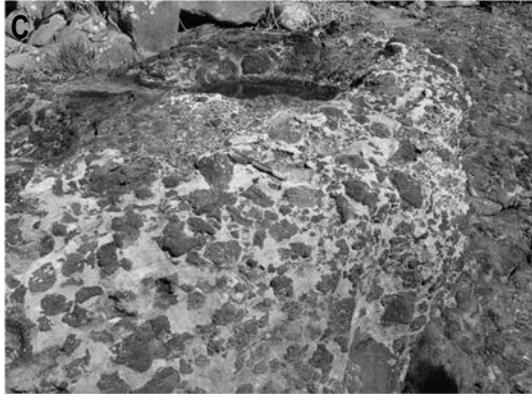
-  Derrames
-  Intertrap
-  Brechas
-  Vesículas e microfraturas (porosidade vesicular)
-  Fraturas (porosidade por fraturamento)
-  Fraturas horizontais

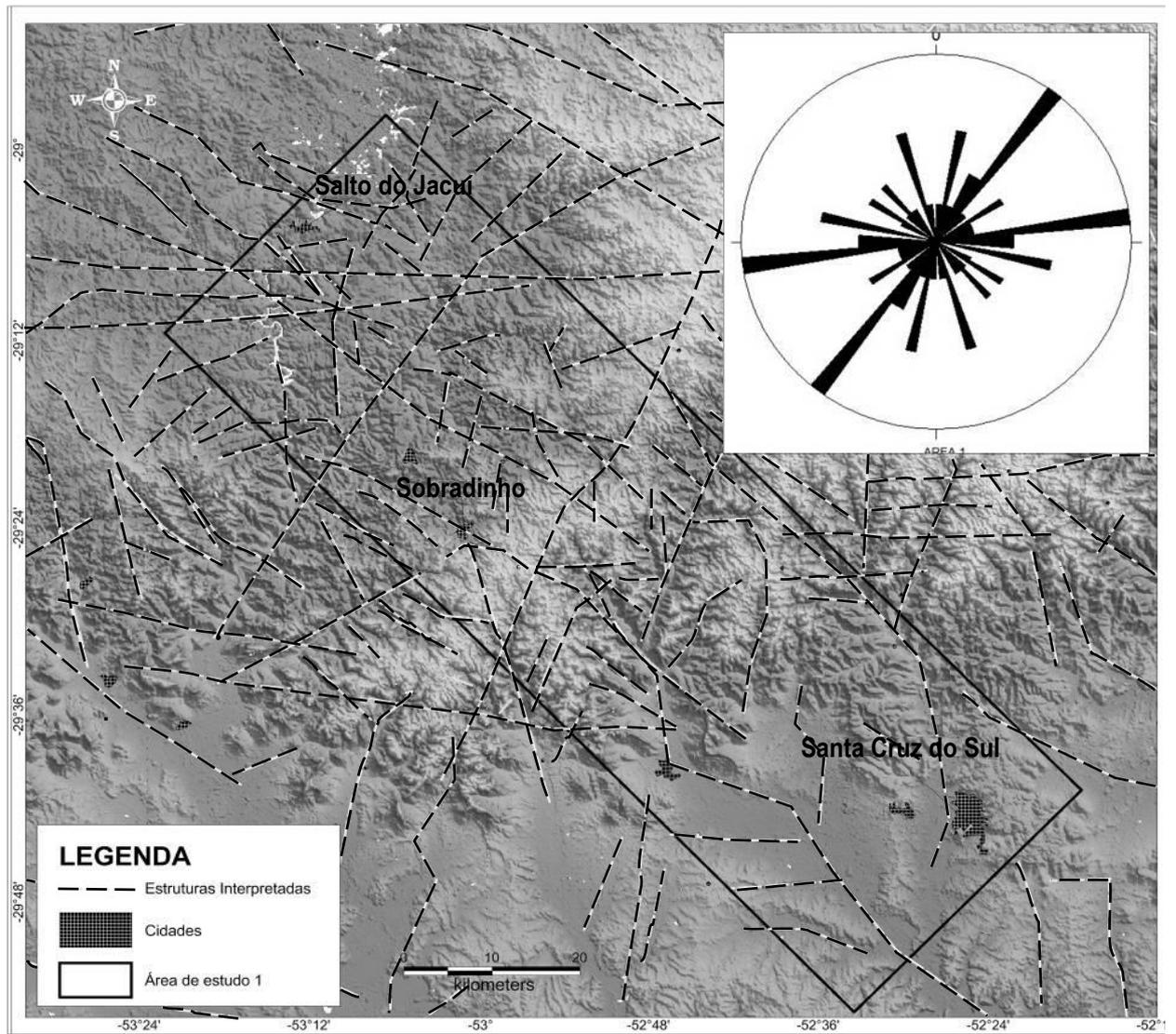


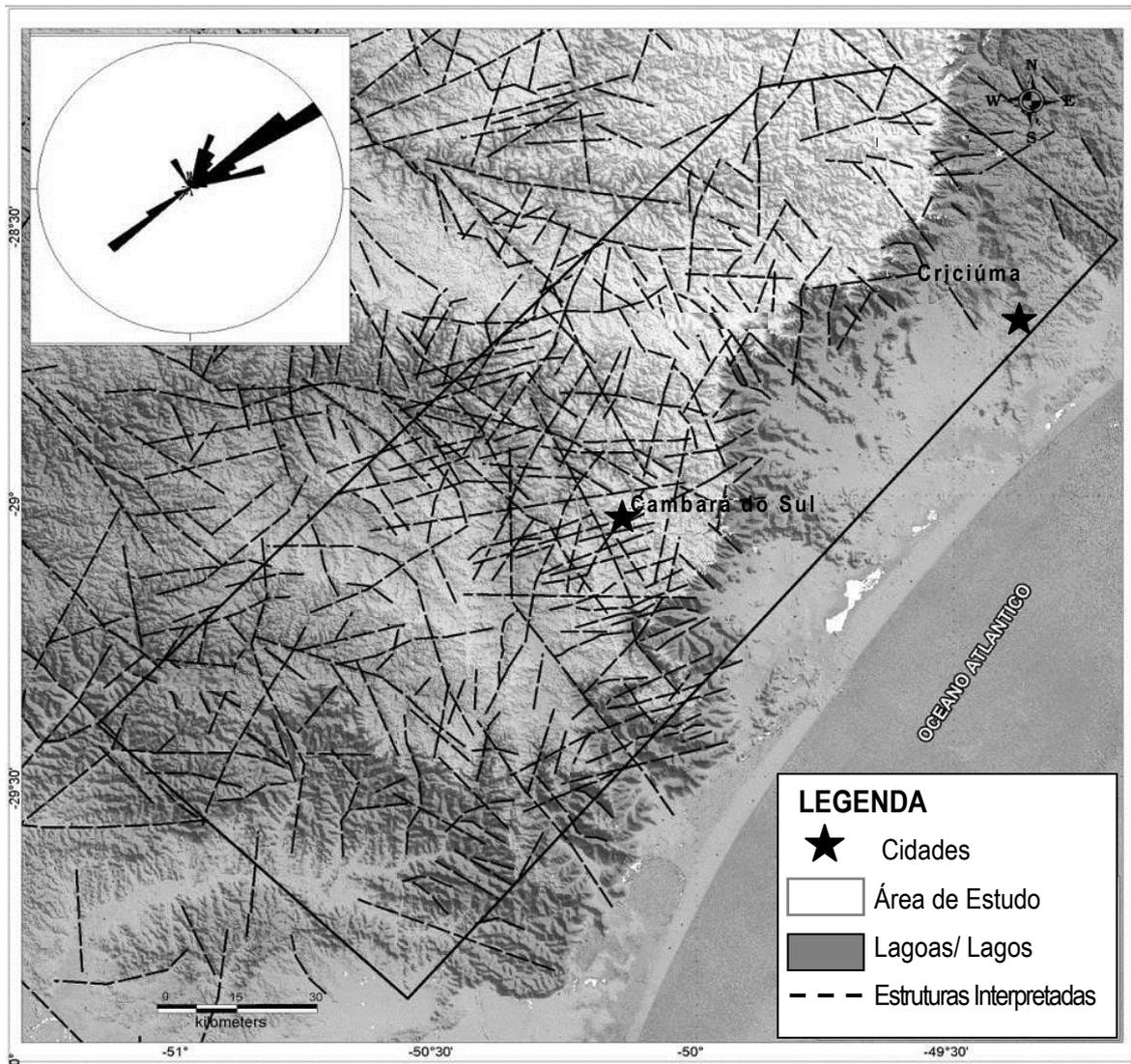


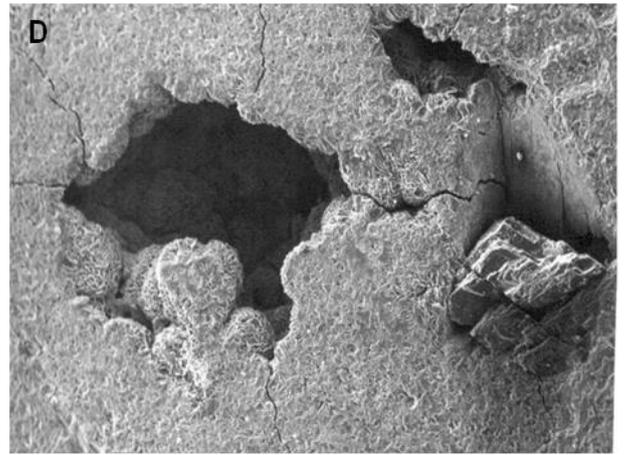
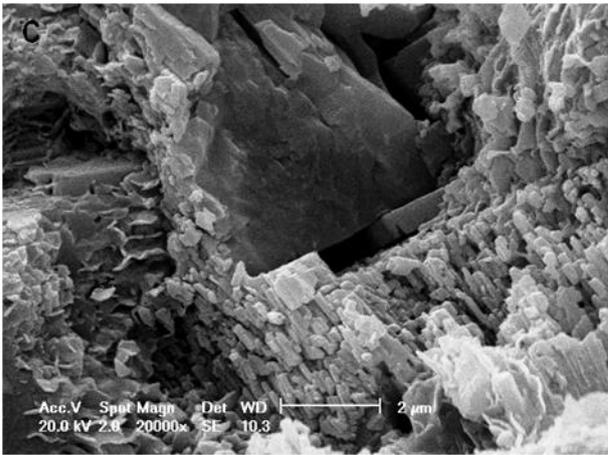
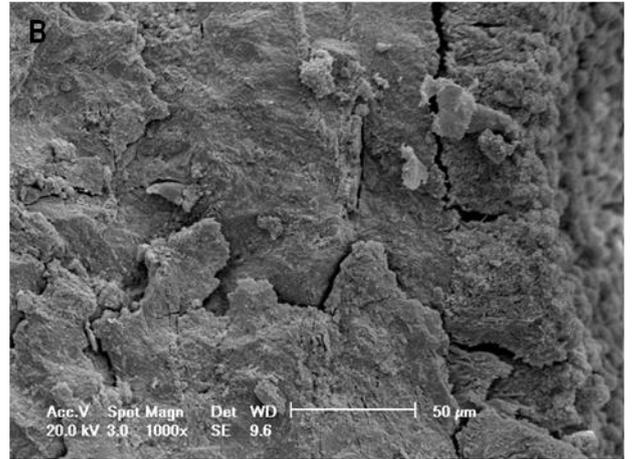
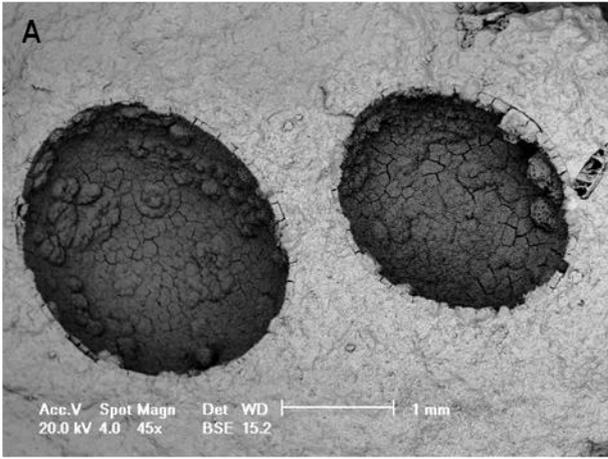
SEM ESCALA

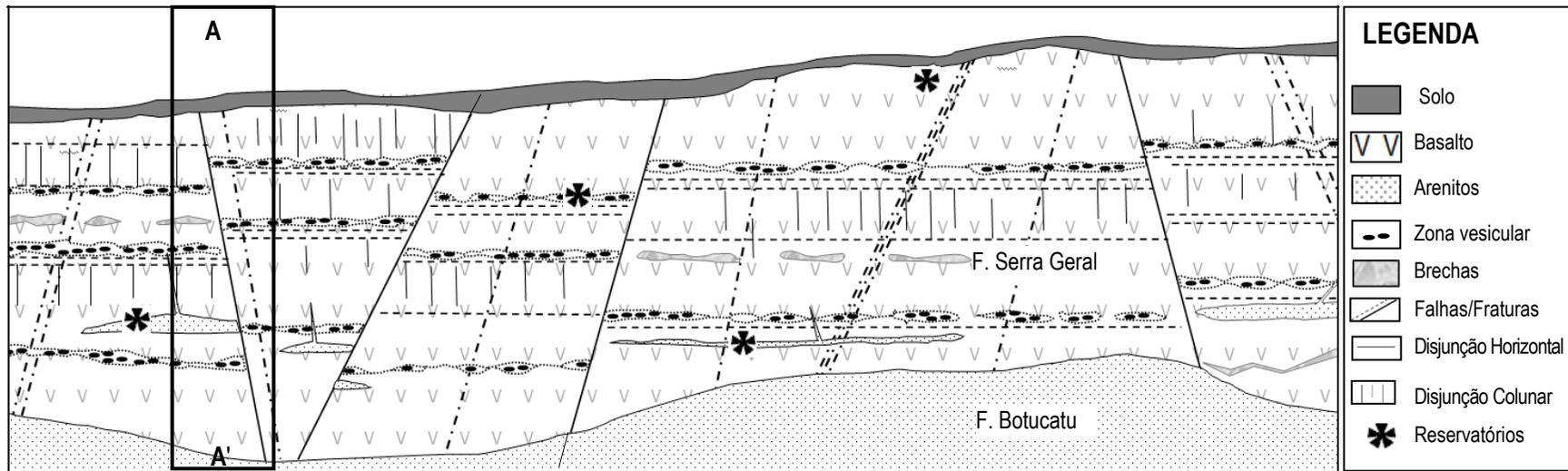






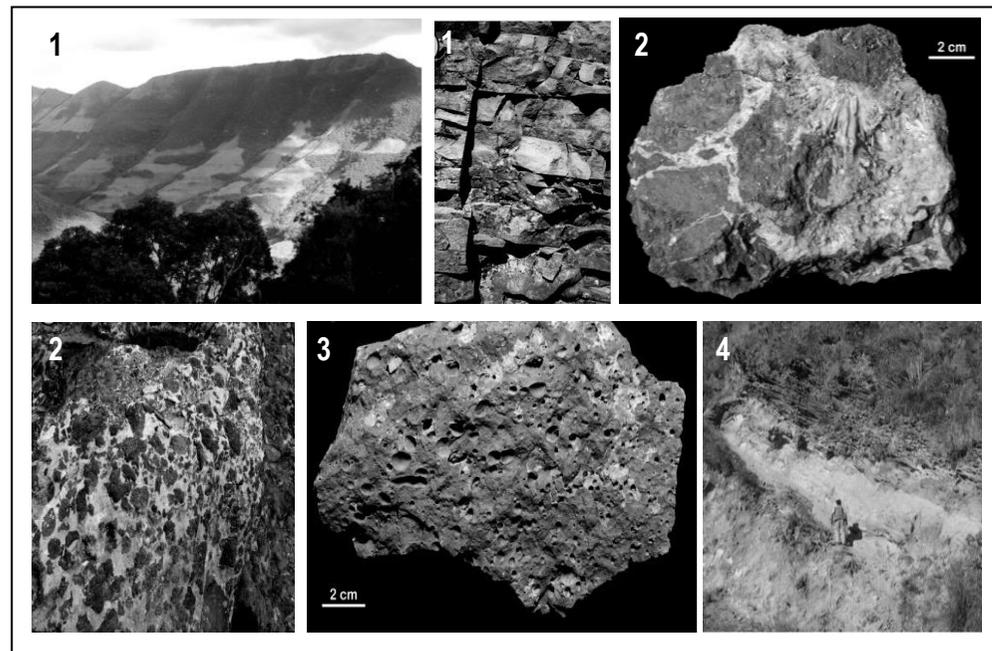
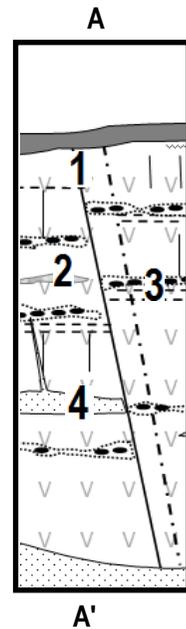






Perfil A-A': Sistema Permo Poroso;

- 1 - Falhas Regionais, fraturas e disjunções;
- 2 - Brechas e zonas alteradas;
- 3 - Zona vesicular e microfraturas.
- 4 - Intertrap e diques de arenitos;



Ø Feição	Fraturas (tectônicas)	Fraturas (resfriamento)	Microfraturas	Vesículas	Microporosidade
Derrames básicos	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Derrames ácidos	XXX	X	X	X	XX
Intertrap arenoso	X	-	X	-	XX
Brechas	X	-	-	-	X
Diques de arenito	-	-	-	-	X
Fraturas com arenito	-	-	-	-	X

Ø= porosidade XXX= frequente XX=comum X=raro

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(4): 325-349.
- Almeida, F.F.M., Carneiro, C.D.R., Mizusaki, A.M.P. 1996. Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes. *Revista Brasileira de Geociências*, 26(3):125-138.
- Alves, D. B. 1987. Desenvolvimento da metodologia de preparação de amostras para análise difratométrica de argilominerais no Centro de Pesquisas da Petrobras. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 1(2):157-175.
- Araújo, C.C., Yamamoto, J.K., Rostirolla, S.P., Madrucci, V., Tankard, A. 2005. Tar Sandstones in the Parana Basin of Brazil: structural and magmatic controls of hydrocarbon charge. *Marine and Petroleum Geology*, 22:671-685.
- Araújo, C.C., Yamamoto, J.K., Rostirolla, S.P. 2006. Arenitos asfálticos na Bacia do Paraná: estudo das ocorrências no alto estrutural de Anhembi. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 14(1):47-70.
- Artur, P.C., Soares, P.C. 2002. Paleoestruturas e petróleo na Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4):433-448.
- Assine, M.L., Piranha, J.L., Carneiro, C.D.R. 2004. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: Neto, V. M., Bartorelli, A., Carneiro, J. C., Brito-Neves, B.B. (Eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p.77-92.
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Piccirillo, A.J.R., Roisenberg, A. 1984. High-and-low-TiO₂ flood basalts from the Paraná Plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie, Stuttgart*, 150(3):273-306.
- Bellieni G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisenberg, A., Stolfa, D. 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): mineralogical and petrochemical relationships. *Journal of Petrology*, 27:915-944.
- Betiolo, L.M. 2006. Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 117 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Bonaparte, J.F. 1996. Late Jurassic vertebrate communities of eastern and western Gondwana. *Georesearch Forum*, 1/2:427-432.

- Chen, Z., Yan, H., Li, J., Zhang, G., Zhang, Z., Liu, B. 1999. Relationship between tertiary volcanic rocks and hydrocarbon in the Liaohe Basin, People's Republic of China. *American Association of Petroleum Geology*, 83(6):1004-1014.
- Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., Piccirillo, E.M., Rivalenti, G. 1983. High-TiO₂ basaltic dikes in the coastline of São Paulo and Rio de Janeiro States (Brazil). *Neues Jahrbuch für der Mineralogie. Abhandlungen*, 146(2):133-150.
- Comin-Chiaramonti, P., Belliene, G., Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. 1988. Classification and petrography of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brasil). In: Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. (Eds.). *The mesozoic flood volcanism of the Parana Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. Instituto Astronômico e Geofísico, São Paulo, 600p.
- Eiras, J.F., Wanderley Filho, J.R. 2006. Sistemas petrolíferos Igneo-Sedimentares. CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETROLEO E GÁS, 2., 2006, Rio de Janeiro. *Boletim de Resumos...Rio de Janeiro, SBG, v.1*.
- Fernandes, A. J., Maldaner, C. H., Sobrinho, J. M. A., Pressinotti, M. M. N., Wahnfried, I. 2010. Estratigrafia dos Derrames de Basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto - SP) Baseada na Geologia Física, Petrografia e Geoquímica. *Geologia USP, Série Científica*.10(2):73-99.
- Fisher, R.V. 1960. Classification of volcanic breccias. *Geologic Society American Bulletin*, 71:973-982.
- Fodor, R.V., Mckee, E. M., Roisenberg, A. 1989. Age distribution of Serra Geral (Paraná) flood basalts, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2:343-349.
- Gallagher, K., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M. 1994. The denudation history of the onshore continental margin of SE Brazil inferred from apatite fission track data. *Journal of Geophysical Research*, 99(18):117-145.
- Gibbs, R. J. 1965. Error due to segregation in quantitative clay mineral X-ray diffraction mounting technique. *American Mineralogist*, 50:741-751.
- Gu, L., Zuwei, R., Wu, C., Zhao, M., Qiu, J. 2002. Hydrocarbon reservoirs in a trachyte porphyry intrusion in the Eastern depression of the Liaohe basin, northeast China. *American Association of Petroleum Geology*, 83(6):1821-1832.
- Heemann, R. 2005. Modelagem exploratória estrutural e tridimensional dos depósitos de ágata do distrito Mineiro de Salto do Jacuí (RS), Porto Alegre, 163p. Tese de doutoramento, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Jerram D., Moutney, N., Hololzforster, F., Stollhofen, H.1999. Internal stratigraphic relationships in the Etendeka Group in the Heeab Basin, NW Namibia: unsterstanding the onset of the onset of the food volcanism. *Journal of Geodynamics*, 28:393-418.
- Kneller, B. 1995. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction. In: A.J. Hartley &D.J. Prosser (Eds.)

- Characterization of deep marine clastic systems*. London, The Geological Society, Special Publication, p. 31-49.
- Li, G., Wang, Y.H., Yang, F.P., Zhao, J., Meisenhelder, J., Neville, T.J., Farag, S., Yang, X.W., Zhu, Y.Q., Luthi, S., Hou, H.J., Zhang, S.P., Wu, C., Wu, J.H., Conefrey, M. 2006. Computing Gas in Place in a Complex Volcanic Reservoir in China. SPE INTERNATIONAL OIL AND GAS CONFERENCE. 2006, Beijing. Anais... Beijing, v.1, p. 5–7.
- Marques, L.M., Ernesto, M., 2004. O magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná. *In: Neto, V. M., Bartorelli, A., Carneiro, J. C., Brito-Neves, B.B. (Eds.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p. 245-263.
- Mantovani, M. S. M., Marques, L. S., Sousa, M. A., Civetta, L., Atalla, L., Innocenti, F. 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. *Journal of Petrology*, 26:187-209.
- Mantovani, M.S.M., Shukowsky, W., Hallinan, S.E. 1995. Análise da espessura elástica efetiva no segmento lotosférico Rio de La Plata – Dom Feliciano. *Anais da Academia Brasileira de Ciência*, 67(2):200-220.
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R. 1993. *Volcanic Textures. A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Hobart, University of Tasmania, 198p.
- Melfi, A.J., Piccirillo, E.M., Nardy, A.J.R. 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin - an introduction. *In: Piccirillo E.M., Melfi A.J. (Eds.) The mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 600p.
- Michelin, C. 2013. *Gênese das jazidas de ágata - uma abordagem na região do Salto do Jacuí (RS)*. Porto Alegre, XXp. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (em fase final).
- Milani, E.J., França, A.B., Schneider, R. L. 1994. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências Petrobras*, 8(1):69-82.
- Milani, E. J. 1997. *Evolução Tectono-Estratigráfica da Bacia do Paraná e seu Relacionamento com a Geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental*. Porto Alegre, 255p. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milani, E.J., Thomaz Filho, A. 2000. Sedimentary Basins of South America. *In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.) Tectonic Evolution of South America*, Edição Especial, Rio de Janeiro, p. 389-449.
- Milani, E.J., Melo, G.H.J., Souza, A.P., Fernandes, A.L., França, B.A. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências Petrobras*, 15(2):265-287.
- Mizusaki, A.M.P. 1986. *Rochas ígneo-básicas do Neocomiano da Bacia de Campos – caracterização e comportamento como reservatório de hidrocarbonetos*. Rio de Janeiro,

- 104p. Mestrado em Geociências, Programa de Pós Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Mizusaki, A.M.P., Petrini, R., Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Dias, J., Min, A., Piccirillo, E.M. 1992. Basalt magmatism along the passive continental margin of SE Brazil (Campos basin). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 111:143-160.
- Mizusaki, A.M.P., Thomaz-Filho, A. 2004. O magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *In: Neto, V. M., Bartorelli, A., Carneiro, J. C., Brito-Neves, B.B. (Ed.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* São Paulo, p. 281-292.
- Nardy, A.J.R.; Oliveira, M.A.F., Betancourt, R.H.S., Verdugo, D.R.H., Machado, F.B. 2002. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. *Revista Geociências*, 21(2):15-32.
- Nardy, A.J.R., Machado, F.B., Oliveira, M.A.F. 2008. As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(1):178-195.
- Negi, A.S., Sahu, S.K., Thomas, P.D., Raju, D.S.A.N., Chand, R., Ram, J. 2006. Fusing Geologic Knowledge and Seismic in Searching for Subtle Hydrocarbon Traps in India's Cambay Basin. *The Leading Edge*, 25(7):872-880.
- P'An, C. H. 1983. Petroleum in basement rocks. *AAPG Bulletin*, 66(10):1597-1643.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55:119-139.
- Peate, D. 1997. The Paraná-Etendeka Province. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism. *Geophysical Monograph Series*, 100:217-245.
- Petry, K., Jerram, D.A., Almeida, D.P.M., Zarfazz, H. 2007. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159:313-325.
- Piccirillo, E.M., Raposo, M.I.B., Melfi, A.J., Comin-Chiaramonti, P., Bellieni, G., Cordani, U.G., Kawashita, K. 1987. Bimodal fissural volcanic suites from the Paraná Basin (Brazil): K-Ar age, Sr-isotopes and geochemistry. *Geochimica Brasiliensis*, 1:53-69.
- Piccirillo, E.M., Melfi, A. J. 1988. *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin (Brazil): petrogenetic and geophysical aspects.* São Paulo, IAG-USP, 600p.
- Pitcheler, E. 1952. Diques de arenitos em Salto Grande, rio Paranapanema. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 1:15-22.
- Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary rocks.* New York, Harper & Row, 628p.
- Roisenberg, A. 1989. *Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da Província Meridional da Bacia do Paraná.* Porto Alegre, 285p. Tese de Doutorado, Programa de

- Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ross, J.L.S. 1985. Relevo Brasileiro: uma nova proposta de classificação. *Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, 4:25-39.
- Ross, J.L.S. 1992. O registro cartográfico e a questão da taxonomia do relevo. *Revista de Geografia*, 06:45-58.
- Rüegg, N. R., 1975. *Modelos de variação química na província basáltica do Brasil meridional. Características de teor, distribuição geográfica e diferenciação*. São Paulo, 309p. Tese doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Sircar, A. 2004. Hydrocarbon production from fractured basement formations. *Current Science*, 87(2):147-151.
- Scherer, C.M.S. 1998. *Análise estratigráfica e faciológica da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 202p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schiuma, M. F. 1988. Reservorios de hidrocarburos en rocas ígneas fracturadas. *Boletim Interno da Petrobras*, p. 35-45.
- Slatt R.M. 2000. Why Outcrop Characterization of Turbidite System. In: Bouma A.H., & Stone C.G. (eds.) Fine- Grained Turbidite Systems. AAPG, Memoir 72. *SEPM, Special Publication 68*, p.181-185.
- Shanmugam, G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17:285-342.
- Soares, P.C., Barcellos, P.E., Csordas, S.M. 1982. Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná. São Paulo, Paulipetro, Consórcio CESP/IPT. Relatório Interno, 382p.
- Soares, P. C. 1992. Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná – controles. Curitiba, 131p. Tese para concurso ao cargo de Professor Titular. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Paraná.
- Stewart, K., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C., Kirstein, R.L., Mantovani, M. 1996. 3-D, 40Ar-39Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143:95–109.
- Strieder, A.J., Amaro, V.E. 1997. Structural patterns removed from remotely sensed lineaments. *Revista da Escola de Engenharia*, 25(4):109-117.
- Strugale, M., Rostirolla, S. P., Mancini, F., Portela Filho, C. V., Ferreira, F. J. F., Freitas, R. C. 2007. Structural framework and Mesozoic–Cenozoic evolution of Ponta Grossa Arch, Paraná Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 24:203–227.

- Suguio, K., Fulfaro, J.V. 1974. Diques clásticos e outras feições de contato entre arenitos e basaltos da Formação Serra Geral. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBG, v.2, p. 107-112.
- Thomaz-Filho, A. 1982. Ocorrência de Arenito Betuminoso em Anhembi (SP) – Cubagem e Condicionamento Geológico. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 32, 1982, Salvador. *Anais...* Salvador, SBG, v.5, p. 2344-2348.
- Thomaz-Filho, A., Mizusaki, A.M.P., Antonioli, L. 2008. Magmatism and Petroleum Exploration in the Brazilian Paleozoic Basins. *Marine and Petroleum Geology*, 25:143-151.
- Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C., Mantovani, M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: High precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 121:333–348.
- Zalán, P.V., Conceição, J.C., Wolff, S., Astolfi, M.A., Vieira, I.S., Appi, V.T., Neto, E.V.S., Cerqueira, J.R., Zanotto, O.A., Paumer, M.L., Marques, A. 1986. *Análise da Bacia do Paraná*. Rio de Janeiro, PETROBRAS. DEPEX. CENPES, 195p.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T., Zanotto, O.A. 1987. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 3., 1987, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBG, v.1, p.441-473.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Conceição, J.C.J., Appi, V.T., Neto, E.V.S., Cerqueira, J.R., Marques, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. *Tulsa: AAPG Memoir*, 51:681-708.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T., Zanotto, O.A. 1991. Bacia do Paraná. *In: Gabaglia, G.R. and Milani, E.J. (Ed.) Origem e evolução de bacias sedimentares*. Petrobras. Rio de Janeiro, p.135-168.
- Waichel, B.L., Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A. 2006. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. *Bulletin of Volcanology*, 68(7/8):599-610.
- Wernick, E. 2004. *Rocha magmáticas: conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica*. São Paulo, Editora UNESP, 655p.