



Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) - Um modelo análogo para reservatórios não convencionais fraturados

Porto Alegre, 2015.

LUIS FELIPE DE SALES DORNELES DA SILVA

Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) - Um modelo análogo para reservatórios não convencionais fraturados

Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em geologia.

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

Supervisor: Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa.

Porto Alegre, 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Dorneles, Luis Felipe de Sales Dorneles da Silva
Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) - Um análogo para
reservatórios não convencionais fraturados . / Luis Felipe de Sales Dorneles da
Silva Dorneles. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015.
[73 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade
Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de
Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es):Ana Maria Pimentel Mizusaki

Coorientador(es):Nelson Amoretti Lisboa

1. Reservatório vulcânico 2. Porosidade por fratura 3. Formação Serra Geral
4. Fratura I. Título.

CDU 55

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

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto
Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA.

A comissão Examinadora, Abaixo assinada, aprova o trabalho de Conclusão de Curso "Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) – Um modelo análogo para reservatórios não convencionais fraturados", elaborado por LUIS FELIPE DE SALES DORNELES DA SILVA, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Karin Goldberg.

Prof. Dr. André de Borba.

Prof. Dr. Anderson Maraschin.

**DEDICO ESTE TRABALHO A MINHA FAMÍLIA
QUE SEMPRE ME APOIOU EM TODOS OS
MOMENTOS, MÃE, PAI, MANA AMO VOCÊS.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Gessi de Sales Dorneles da Silva e Luiz Fernando Nunes da Silva pela total confiança e investimento em mim nesses anos todos, e por tudo que sempre fizeram em toda minha vida.

A minha irmã, Carla Regina de Sales Dorneles da Silva, pela parceria acima de tudo, pela cumplicidade de toda vida - "ATIVAR"!

Agradeço a minha orientadora Professora Ana Maria Pimentel Mizusaki que sempre me apoiou e teve muita dedicação e paciência em diversos momentos no decorrer deste trabalho, obrigado pelos ensinamentos.

Agradeço ao professor Nelson Amoretti Lisboa por aceitar supervisionar meu trabalho, muito obrigado pelas contribuições e atenção.

Aos amigos eu fiz durante estes anos, Carina Paludo, Gustavo Colares, Manoela Brandelli, Leonardo Leite, William Saraiva, Leonardo neis e Pedro Meirelles, muito obrigado por tudo, certamente nossa amizade permanecerá para a vida.

Obrigado a Patrícia Zacca, pelas aulas de formatação no Word, e toda a ajuda recebida.

Finalmente, mas nunca menos importante, agradeço a Larissa Petrolli obrigado por me amar e ajudar das mais diversas formas no decorrer deste trabalho e por se mostrar cada dia mais especial na minha vida.

RESUMO

A proposta deste trabalho é analisar um setor da Formação Serra Geral como modelo análogo para reservatórios não convencionais de hidrocarboneto no meio fraturado vulcânico, dando ênfase no estudo da porosidade por fratura. A área situa-se na borda sul do Planalto Meridional, Rio Grande do Sul, e está inserida dentro de um polígono demarcado pelas coordenadas geográficas (284910E/6779977S; 327086E/6716474S; 361531E/6710989S; 345915E/6780143S), e faz parte do bloco morfotectônico Central-Missões. Foi realizado o estudo de geoprocessamento, e posterior trabalho de campo que forneceu amostras para análises em laboratório. A metodologia aplicada teve início com a visualização das áreas de interesse através de modelos digitais do terreno. E nessa imagem digital foram traçadas as estruturas compatíveis com os lineamentos da região em diferentes escalas. Algumas amostras de rocha foram utilizadas para visualização e avaliação, por microscopia eletrônica de varredura, de microestruturas, e descontinuidades. Também foram descritas por petrografia em microscópio óptico para a caracterização dos litotipos. Ao final do trabalho, dois lineamentos de médio porte foram identificados, sendo eles o lineamento retilíneo Rio Pardo (LRP) e lineamento curvo Gramado Xavier (LC), que por sua vez são fundamentais no contexto morfoestrutural da área de estudo. O lineamento Rio Pardo provavelmente corresponde a uma falha resultante da reativação mesozóica da Zona de Falhas Passo do Marinheiro (N20°E) do Escudo Sul – Rio-Grandense e divide a área em dois blocos morfoestruturais denominados neste trabalho por bloco A que está na parte Leste da área de estudo e o bloco B localizado a Oeste. Dentre estes dois blocos, há um terceiro bloco intermediário "C", que está associado ao lineamento Rio Pardo. Através da integração de todos os dados coletados foi possível estabelecer que os blocos "A" e "C" apresentam uma maior densidade de lineamentos e foram considerados como um bom análogo para reservatório vulcânico fraturado.

Palavras-Chave: Reservatório vulcânico, Porosidade por fratura, Formação Serra Geral.

ABSTRACT

The main objective of this research is to analyze the Serra Geral Formation as an analogous for non-conventional fractured volcanic reservoirs. The fracture porosity, typical of these reservoirs is here described and emphasized. The study area is located in the south border line of the Planalto Meridional, Rio Grande do Sul, roughly defining a polygon marked by the geographical coordinates (284910E/6779977S; 3270086E/6716474S; 361531E/6710989S; 345915E/6780142S) and indicates the morphotectonic block Central-Missões. The study of geoprocessing, field work and rock samples analysis were realized. The applied methodology began with the visualization of areas of interest through digital terrain models. At these digital images were drawn structures, compatible with the lineaments of the region, following several scales. Some rock samples were prepared and analyzed with a scanning electron microscope allowing the microfractures description. Lithologies as arenites, basalts and riolites were recognized with optical petrography. With the integration of these data it is proposed the presence of two medium scale lineaments named LRP (Lineamento Rio Pardo) e LC (lineamento Gramado Xavier). These two structures were fundamental to the morphostructural control of the study area. The LRP probably is a fault associated to the mesozoic reactivation of the Passo do Marinheiro Fault Zone (N20E), Sul-Rio-Grandense Shield. Also, divides the principal area into two morphostructural blocks: A (East portion) and B (West portion). Another block named C is recognized between A and B, associated with LRP. So, considering the integration of all data, it is proposed that A and B blocks have a great concentration of lineaments and can be considered as analogous for a fractured volcanic reservoir, especially when the fracture porosity is considered.

Keywords: Volcanic reservoir, Fracture porosity, Serra Geral Formation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Localização da área de estudo, representada pelo polígono vermelho. Fonte: (Machado. 2005) Modificado por Dorneles (2015). 10
- Figura 2 - Mapa de localização da Bacia do Paraná Fonte: (Reis, 2013), modificado por Dorneles (2015)..... 12
- Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque no retângulo vermelho para o intervalo estudado. Fonte: Milani (1997) modificada por Dorneles (2015)..... 16
- Figura 4 - Modelo análogo entre as vulcânicas da Bacia do Paraná e da Bacia de Campos evidenciando semelhanças (Reis, 2013).....20
- Figura 5 - Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de onda nos campos M (magnéticos) e E (elétricos). Fonte: Meneses, 2012.....22
- Figura 6 - Ilustração dos níveis de coleta dos dados. Fonte: Meneses, 2012.....23
- Figura 7 - Mapa da área de estudo confeccionado utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Fonte: Dados da Pesquisa (2015) (a) imagem Modelo Numérico do terreno (MNT) e (b) Imagem LANDSAT.26
- Figura 8- Vista Geral do Afloramento tipo corte de estrada – localizado na RS - 153 (Km – 526). Fonte: Dados da Pesquisa (2015).28
- Figura 9 - Amostras coletadas na fase de campo. A) Basalto com vesículas, B) Basalto. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).29
- Figura 10 - Representação diagramática do MEV.....32
- Figura 11 - Microscópio Eletrônico de varredura. Fonte: – MEV/Laboratório de Geologia Isotópica - UFRGS (2015).....32
- Figura 12 - Compartimentação morfotectônica do sistema aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul (RS) (modificado de Machado, 2005). A área de estudo situa-se no Compartimento Central Missões e é identificada pela marcação em vermelho. Fonte da base cartográfica.....36
- Figura 14 – Análise morfoestrutural de semi-detulhe da área de estudo destacando as morfoestruturas lineares (lineamentos) e os blocos morfoestruturais. Observar também o lineamento curvo de médio porte LC. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).39
- Figura 15 - Diagrama de roseta dos lineamentos dos blocos A e B, evidenciando as diferenças de orientação de seus lineamentos. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).40
- Figura 16 – Detalhe do Bloco A, ressaltando o lineamento curvo (LC) Gramado Xavier onde se posiciona provável dique alimentador “curvo” do magmatismo. Fonte: Google Earh e Dados da Pesquisa (2015).41
- Figura 17 – Observar dique anelar Gramado Xavier no Bloco A; (a) , visto em planta na imagem Google Earth, (b) em perfil transversal, foto de campo; (c) em bloco diagrama ilustrativo. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).42
- Figura 18 – Localização dos pontos descritos na fase de campo. Fonte: Imagem Google Earth e dados da Pesquisa (2015).....43

Figura 19 – Secção estratigráfica idealizada da área de estudo. Fonte: e Dados da Pesquisa (2015).	44
Figura 20 – Tipos e disposição ideal das discontinuidades observadas no pacote vulcânico ao longo dos cortes estudados. Modelo conceitual. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).	46
Figura 21 - Diagrama de roseta ilustra o total de medidas das orientações das juntas sistemáticas na área de estudo. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).	47
Figura 22 – Bloco diagrama explicativo da medida da distância de famílias de juntas em afloramento: Fonte: Ferrer, 1999.....	50
Figura 23 – Croquis do afloramento do ponto 1 conforme figura 17 (estrada Passa Sete secundária a rodovia RS400) com medidas dos espaçamentos das diaclases associadas à direção estrutural Dorsal de Canguçu. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).	51
Figura 24 – Detalhe ao microscópio eletrônico de varredura (ES, 800X), de amostras da porção maciça dos derrames, exemplificando as microfraturas. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).	52
Figura 25 – Modelo integrado da área estudada. Fonte: Dados da Pesquisa (2015). No canto superior esquerda (I), área selecionada para o estudo, evidenciada pelo quadrado vermelho, com destaque para a divisão proposta dos blocos A, B e C, no canto superior direito (II) imagem de um dos afloramentos da área (Ponto 01), e suas amostras macro e MEV, no centro (III) Perfil estratigráfico esquemático da área pesquisada, no canto inferior esquerdo (IV) diagrama de roseta com as direções preferenciais de toda área pesquisada, no canto inferior direito, tabela das características dos Blocos propostos e perfil estratigráfico generalizado dos afloramentos da BR153. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).....	55

LISTA DE TABELAS

- Quadro 1** - Coordenadas, em UTM, dos afloramentos analisados neste trabalho, ver figura 18.44
- Quadro 2** – Apresentação da tabulação dos dados e resultado do valor médio do espaçamento das diaclases da família N70E, 0,87m.51
- Quadro 3** – Características principais dos blocos A, B e C, como análogos para reservatório não convencional de hidrocarbonetos. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).54

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Reservatório.....	2
2.1.1 Porosidade.....	2
2.1.2 Permeabilidade	3
2.1.3 Microfratura:.....	3
2.1.4 Fraturas.....	3
2.1.5 Falhas:	4
2.1.6 Juntas:	5
2.2 Imagens de sensoriamento remoto.....	5
2.2.1 Lineamento:	5
2.2.2 Morfotectônica:	6
2.2.3 Morfoestrutura:.....	6
3 PROBLEMAS, PREMISSAS, HIPÓTESES E TÉCNICAS DE SOLUÇÃO	7
4 OBJETIVO.....	9
5 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE INVESTIGAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO	10
5.1 Localização da área de estudo:	10
6 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	12
6.1 Bacia do Paraná	12
6.2 Supersequência Gondwana III.....	14
7 MODELOS ANÁLOGOS	19
8 PROCEDIMENTO E DETALHAMENTO DE CADA TÉCNICA A SER UTILIZADA NA PESQUISA.....	21
8.1 SENSORIAMENTO REMOTO.....	21
8.1.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa	21
8.1.2 Vulnerabilidade da técnica.....	24
8.2 LEVANTAMENTO DE DADOS PRÉ-CAMPO.	25
8.2.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa	25
8.2.2 Pontos críticos dos procedimentos e cuidados adotados	26

8.2.3 Vulnerabilidade da técnica	26
8.3 LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO.....	27
8.3.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa	27
8.3.2 Procedimento passo a passo.....	27
8.3.3 Vulnerabilidade da técnica	27
8.4 LEVANTAMENTO DE DADOS PÓS-CAMPO	28
8.4.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa	28
8.5 MICROSCÓPIO ÓTICO.....	29
8.5.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa	29
8.5.2 Procedimento passo a passo.....	29
8.5.3 Pontos críticos dos procedimentos e cuidados adotados	30
8.5.4 Vulnerabilidade da técnica	30
8.6 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)	30
8.6.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa	30
8.6.2 Procedimento Passo a passo	33
8.6.3 Pontos críticos dos procedimentos e cuidados adotados	34
8.6.4 Vulnerabilidade da técnica.....	34
9 RESULTADOS E DISCUSSÕES:	35
9.1 Análise Morfotectônica e Morfoestrutural: Lineamentos e Blocos Morfoestruturais	35
9.1.2 Localização Morfotectônica da Área de Estudo	35
9.2 Análise Morfoestrutural da Área de Estudo	37
9.2.1 Análise Morfoestrutural Regional	37
9.2.2 Análise morfoestrutural de semi detalhe	38
9.3 Dados de campo:.....	42
9.4 ESPAÇAMENTO DAS DIACLASES SISTEMÁTICAS.....	49
9.5 Análises microscópicas:.....	52
10 CONCLUSÃO:.....	53
11 REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O estudo das rochas vulcânicas em bacias sedimentares é de grande relevância, pois estas são reservatórios não convencionais de hidrocarbonetos (P'an, 1983). Na Bacia de Campos, situada na margem continental sudeste do Brasil, onde os campos de Badejo e Linguado tem produção de hidrocarbonetos em reservatórios vulcânicos fraturados que se constituem no seu embasamento econômico, ou seja, a última unidade perfurada e que apresenta potencial para exploração. Porém, há necessidade do entendimento especialmente do sistema permo-poroso destas rochas, o que permitirá o desenvolvimento de modelos visando a melhor exploração destes reservatórios. Nos reservatórios vulcânicos fraturados, a porosidade por fratura é a que mais se destaca sendo responsável pela maior parte da produção (Reis *et al.*, 2014). A porosidade por fratura se caracteriza como o espaço vazio entre as paredes de fraturas, de falhas e de diaclases. Para o caso dos reservatórios vulcânicos fraturados da margem continental brasileira há necessidade de modelos análogos que permitam a visualização e o entendimento da porosidade por fratura, pois estes se encontram a profundidades consideráveis o que dificulta o seu entendimento. A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) tem sido considerada como modelo análogo para os reservatórios vulcânicos de hidrocarbonetos da margem continental brasileira (Reis, 2013). Com este trabalho pretende-se analisar a Formação Serra Geral como análogo para verificar como se desenvolve, quais são as suas características principais e qual o potencial da porosidade por fratura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Reservatório

Denomina-se reservatórios convencionais aquelas rochas que, possuindo uma combinação apropriada de valores de porosidade e permeabilidade, possibilitam a acumulação de fluidos (óleo, gás e/ou água). No caso de hidrocarbonetos, os melhores reservatórios são os arenitos e carbonatos. No entanto, rochas ígneas, metamórficas e folhelhos, entre outros, podem constituir um tipo especial de reservatório, 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).

2.1.1 Porosidade

Define-se porosidade como a porcentagem de vazios de uma rocha reservatório. Estima-se que na maioria dos reservatórios, os valores de porosidade variam de 10 a 20%, em média. Então, a porosidade absoluta corresponde ao volume total de poros, enquanto que a porosidade denominada efetiva se refere apenas aos poros conectados entre si. Normalmente os reservatórios apresentam uma variação nos valores relativos a porosidade determinada na horizontal e na vertical. Além disso, outros parâmetros como, tamanho, geometria e grau de conectividade dos poros controlam diretamente a produtividade do reservatório.

A porosidade é chamada de primária, quando formada durante a deposição dos sedimentos. Esta porosidade tende a diminuir com o soterramento, devido à compactação mecânica e atuação da diagênese. Já a porosidade secundária, tem sua formação após a deposição, geralmente como resultado de processos posteriores como a dissolução de minerais. Porosidade primária é a mais comum em arenitos, enquanto a porosidade secundária ocorre em rochas carbonáticas mais frequentemente. Reservatórios não convencionais apresentam outros tipos de porosidade como, por exemplo, microporosidade, vesicular e por fraturas.

A porosidade por fratura é considerada como a mais importante e influente nos reservatórios não convencionais.

2.1.2 Permeabilidade

Permeabilidade é a capacidade de um reservatório em transmitir um fluido, controlada principalmente pela quantidade, geometria e grau de conectividade dos poros. Logo, é a habilidade de um fluido passar através de um material poroso.

A permeabilidade é medida em D (Darcy) e assim como a porosidade, raramente é a mesma em todas as direções (horizontal e vertical). Em reservatórios não convencionais, as fraturas constituem um incremento aos valores de permeabilidade primários.

2.1.3 Microfratura:

As microfraturas são estruturas de tamanhos milimétricos a micrométricos, observados com o uso de microscopia eletrônica de varredura - MEV. 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).

2.1.4 Fraturas

As rochas podem apresentar algumas feições geológicas como planos de acamamento, falhas, fraturas, juntas, feições que são caracterizadas pelo termo

descontinuidade. O termo descontinuidade foi inicialmente utilizado por vários autores (Fookes & Parrish, 1969; Attewell & Woodman, 1969; Priest, 1975; Goodman, 1976) para nomear uma gama de imperfeições mecânicas encontradas em formações rochosas.

Faturas constituem um plano de ruptura que, em geral se forma devido a tensões concentradas ao redor de defeitos, heterogeneidades e descontinuidades físicas apresentadas pelas rochas. Estas se formam em resposta a tensões tectônicas, térmicas e elevadas pressões dos fluxos. Hidraulicamente, cada fatura se comporta como um canal na qual o fluxo passa, e quando estão conectadas a outras, formam um sistema de condutividade preferencial dentro do meio rochoso.

Blöcher et al. (2010) indicam que as faturas podem representar caminhos preferenciais para os fluxos, ou podem atuar como barreiras geológicas. Estas duas opções dependerão essencialmente da origem da orientação das faturas em relação a seu recente campo de esforços (*Barton et al.*, 1995; *Gudmundsson*, 2001; *Moeckel et al.*, 2008; *Sheck-Wenderoth et al.*, 2008; *Magri et al.*, 2010). A definição da geometria de uma família de faturas dependerá da caracterização das propriedades que conformam esta família, e envolve as seguintes definições: orientação, frequência, espaçamento, forma, tamanho, abertura e, material de preenchimento.

Faturas podem aumentar significativamente o volume de espaços vazios em rochas reservatórios. Em reservatórios areníticos e carbonáticos as faturas contribuem para o aumento da conectividade dos poros, enquanto nos folhelhos, rochas ígneas e metamórficas, as faturas correspondem por grande parte da porosidades nestes sistemas (porosidade por fatura).

2.1.5 Falhas:

Falhas são rupturas e deslocamentos que ocorrem numa rocha ao longo de um plano, pelas quais as paredes opostas se movem uma em relação à outra. A característica essencial é o movimento diferencial de dois blocos ou camadas ao longo de uma superfície de fatura ou fraqueza (*Fossen*, 2010).

A extensão e os deslocamentos das falhas podem variar de poucos centímetros até dezenas de quilômetros. A atitude ou posição de uma falha é dada pela medida de sua direção e de seu mergulho.

O bloco acima do plano de falha é chamado de capa e o abaixo, de lapa.

2.1.6 Juntas:

Junta consiste em uma quebra de origem geológica na continuidade de um corpo de rocha ao longo da qual não houve nenhum deslocamento visível. As juntas podem ser abertas, preenchidas ou seladas.

2.2 Imagens de sensoriamento remoto

2.2.1 Lineamento:

O sentido do termo lineamento utilizado neste trabalho é o que foi definido por O'Leary *et al.* (1976), como sendo uma feição linear simples ou composta alinhada de forma retilínea ou levemente curvilínea, que se diferencia dos padrões das feições adjacentes, refletindo provavelmente um fenômeno de sub-superfície.

Conforme Gold (1980), lineamentos podem ser definidos e classificados da seguinte forma:

A) pequeno porte: extensão entre 1,6 km a 10 km e correspondem a fraturas, juntas e falhas;

B) médio porte: com extensão entre 10 km e 100 km, geralmente coincidem com falhas e outras estruturas tectônicas de maior porte, como zonas de cisalhamento, por exemplo.

2.2.2 Morfotectônica:

O termo Morfotectônica se refere às interações entre a Tectônica e a Geomorfologia. Na prática, a abordagem morfotectônica significa o estudo de paisagens como chave para inferir a ocorrência de estruturas tectônicas, principalmente em áreas relativamente estáveis com sismicidade, taxas de soerguimento e subsidência negligenciáveis. Nestas condições as unidades morfotectônicas podem ser marcadoras do tectonismo. Estas unidades podem ser analisadas em mapas topográficos, imagens de sensoriamento remoto e modelos digitais do terreno, (Goudie, 2004).

2.2.3 Morfoestrutura:

As morfoestruturas constituem uma tipologia hierárquica de formas, que compreendem desde conjuntos regionais de primeira ordem de grandeza (mega-morfoestruturas) até as menores ordens (micro-morfoestruturas), tais como os grábens e cimeiras em cristas de expressão local. O mapeamento e taxonomia das morfoestruturas possuem importância teórica e explicativa para as relações interativas entre as litologias, estruturas e processos de intemperismo – erosão e o relevo (Demek *et al.* 2007).

A partir da década de 1940, geomorfólogos russos e da Europa Oriental, passaram a designar como morfoestrutura os compartimentos de relevo definidos com base na interação entre distintos litotipos e os modos tectônicos vigentes (Gerasimov 1946; Gerasimov & Mescerjakov 1967; Demek 1972).

3 PROBLEMAS, PREMISSAS, HIPÓTESES E TÉCNICAS DE SOLUÇÃO

Com o crescente aumento no consumo mundial de hidrocarbonetos gera-se uma necessidade de busca de novas reservas e do aprimoramento das técnicas de exploração. 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 ou inexistente. Um maior entendimento das rochas vulcânicas sob o ponto de vista de reservatório não-convencional e o desenvolvimento de modelos sem dúvida deverá contribuir de forma significativa na redução do risco e redução de custo para a exploração de hidrocarbonetos nestes reservatórios não convencionais. Países, como a China, tem sua produção atual de hidrocarbonetos predominantemente em reservatórios vulcânicos (Gu *et al.*, 2002) confirmando então, necessidade de conhecer melhor este tipo de reservatório.

O estudo de rochas vulcânicas como reservatórios de hidrocarbonetos vem sendo amplamente discutido e estudado, pois as reservas deste tipo tem tido um grande incremento nos últimos anos. Nos reservatórios não convencionais, a porosidade por fratura é a que mais se destaca. Entretanto poucos trabalhos foram desenvolvidos com este enfoque (Reis, 2013).

A análise da porosidade por fratura permitirá estabelecer um modelo análogo da Formação Serra Geral para os reservatórios vulcânicos presentes nas bacias marginais brasileiras, mais precisamente a Bacia de Campos (Campos de Badejo, Pampo e Linguado (Mizusaki,1986). Estes reservatórios vulcânicos somente são descritos por meio de amostras indiretas (testemunhos e amostras de calha) e perfilagem sísmica, o que dificulta o entendimento e a proposição de um modelo a partir destes dados. Com isto, é imprescindível a proposição de um modelo análogo, especialmente em relação à porosidade (Reis, 2013).

Com este trabalho pretende-se analisar a Formação Serra Geral verificando a porosidade por fratura (inerente aos reservatórios vulcânicos) para averiguar como se desenvolve este tipo de feição, e quais são suas características principais e seu real potencial de acumulação.

Para tanto, pretende-se avaliar uma área selecionada da Formação Serra Geral onde as características de reservatório possam ser estudadas. A metodologia principal incluirá levantamentos de campo, (descrição e amostragem) e análise de imagens de sensoriamento remoto. Paralelamente será feito o levantamento de bibliografias sobre o assunto, que fundamentará a compreensão e análise dos dados do estudo até o final do trabalho.

4 OBJETIVO

Avaliar a Formação Serra Geral como análogo para o estudo e proposição do modelo permo-poroso para reservatórios não convencionais, destacando-se especialmente a porosidade por fratura, categoria mais importante nos reservatórios vulcânicos.

5 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE INVESTIGAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO

5.1 Localização da área de estudo:

Este trabalho foi realizado na região central do Estado do Rio Grande do Sul (Fig.01), a coleta de amostras e de dados de campo abrangem mais precisamente um polígono com as coordenadas: (284910E/6779977S; 327086E/6716474S; 361531E/6710989S; 345915E/6780143S) englobando o entorno as cidades de Salto do Jacuí, Santa Cruz do Sul, Herveiras, Sinimbu e Rio Pardo. A área investigada corresponde a aproximadamente 250 km². E está, a aproximadamente 195 km da Capital do Rio Grande do Sul, a cidade de Porto Alegre.

A área em questão pertence à borda sul do planalto meridional, correspondendo a parte do planalto de Soledade, segundo o IBGE 1986. Do ponto de vista geológico a área corresponde a Formação Serra Geral, que ocorre com rochas básicas na base e rochas ácidas no topo.

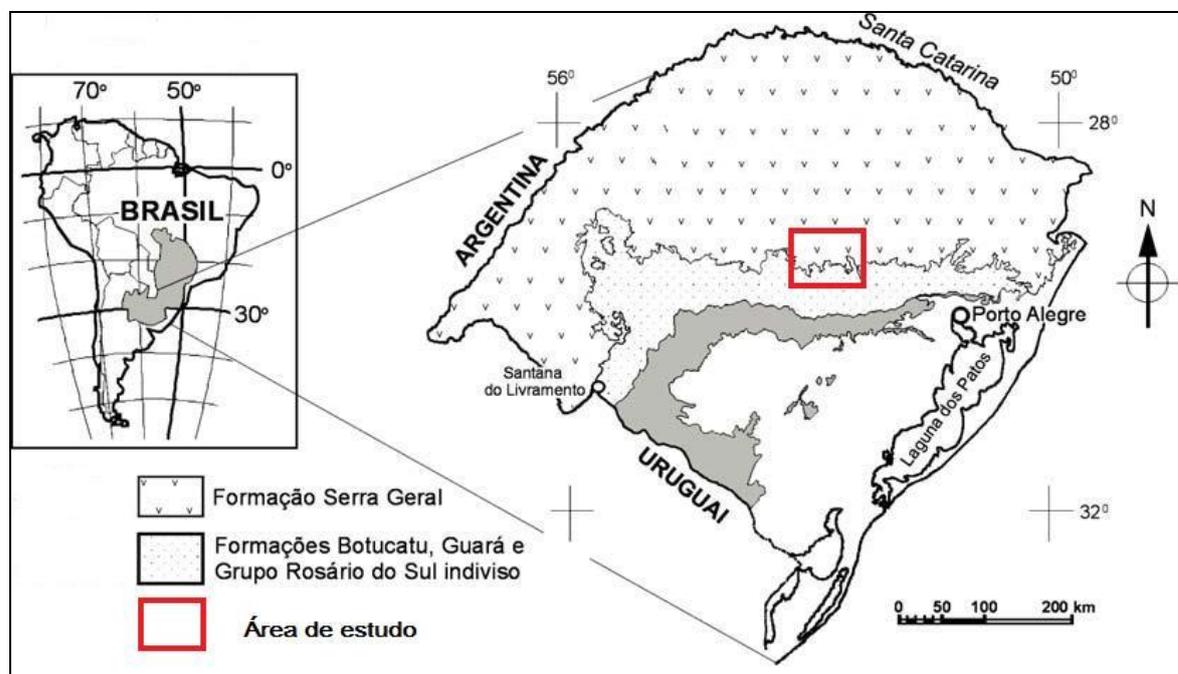


Figura 1 - Localização da área de estudo, representada pelo polígono vermelho. Fonte: (Machado, 2005) Modificado por Dorneles (2015).

Esta região foi selecionada por apresentar a Formação Serra Geral com ótimas exposições em afloramentos de cortes de estrada. Outro fator que foi levado em consideração para escolha da área foi que já existem dados geológicos estudados e publicados sobre este local. (Reis, 2013; Michelin, 2014).

6 CONTEXTO GEOLÓGICO

6.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma bacia paleozóica da Plataforma Sul-Americana, com uma área aproximada de 1,6 milhões de km² (CPRM, 2006). O nome "Bacia do Paraná" se deve a presença do rio Paraná na região (Milani, 2007).

É considerada como uma bacia do tipo intraplaca, com formato levemente oval e o eixo principal segundo a direção N-S, abrangendo não só a porção sul do Brasil, mas também regiões dos países adjacentes: Paraguai, Argentina e Uruguai (Fig. 02). A bacia tem uma acumulação de rochas sedimentares e vulcânicas com idades entre o Ordoviciano e o Cretáceo atingindo 7.000m de espessura no seu depocentro. (Zalán *et al.*,1988, 1990).



Figura 2 - Mapa de localização da Bacia do Paraná Fonte: (Reis, 2013), modificado por Dorneles (2015).

O processo evolutivo da bacia começou no Paleozóico, com os primeiros depósitos sedimentares datados do Neo-Ordoviciano e culminou com o extravasamento de um espesso pacote de lavas basálticas durante o Cretáceo, documentando um registro geológico de aproximadamente 400 milhões de anos. Dois terços de sua área na porção brasileira estão cobertos por estes derrames de basalto que atingem aproximadamente 1.300m de espessura, os quais somados as intrusões básicas (soleiras) chegam até 2.000 m de espessura de rochas ígneas.

O registro vulcano-sedimentar da Bacia do Paraná é dividido em seis unidades estratigráficas de ampla escala ou supersequências de acordo com Milani (1997).

Como Supersequências são considerados pacotes rochosos que representam intervalos deposicionais e temporais com algumas dezenas de milhões de anos de duração, limitados por superfícies de discordância de caráter interregional. As Supersequências descritas por Milani (1997) são:

- Rio Ivaí (Neo-Ordoviciano ao Eo-Siluriano);
- Paraná (Devoniano);
- Gondwana I (Neo-Carbonífero ao Eo-Triássico);
- Gondwana II (Meso-Triássico ao Neo-Triássico);
- Gondwana III (Neo-Jurássico ao Eo-Cretáceo);
- Bauru (Eo-Cretáceo ao Neocretáceo);

O magmatismo Serra Geral, alvo deste estudo, inclui-se na Supersequência Gondwana III.

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 tectono-sedimentares. 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.*, 2004).

6.2 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 onde se posicionam os sedimentos eólicos da Formação Botucatu e as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. (Fig. 03). A Supersequência é amplamente distribuída pela Bacia do Paraná, e sua sedimentação continental é representada predominantemente por fácies eólicas. 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.

No contato entre os arenitos da Formação Botucatu e os 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 (Reis, 2013).

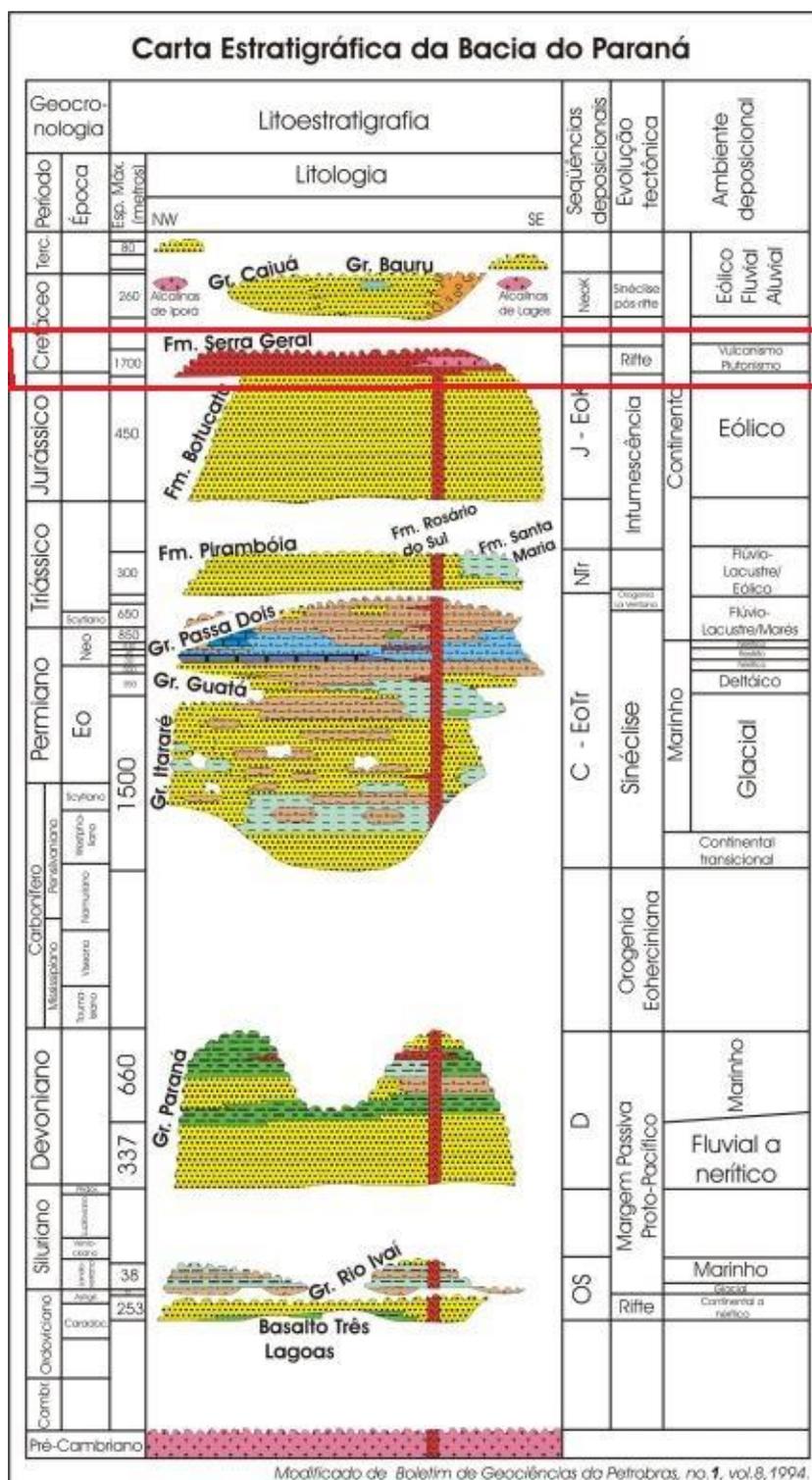


Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaque no retângulo vermelho para o intervalo estudado. Fonte: Milani (1997) modificada por Dorneles (2015).

Os derrames de lavas basálticas associados e, secundariamente, intrusões de caráter básico do Neocomiano da Formação Serra Geral representam uma das

maiores manifestações vulcânicas do planeta. O relevo resultante é representado por patamares escarpados com vales profundos formando verdadeiros *canyons*.

A Formação Serra Geral da Bacia do Paraná 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.

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 (Piccirillo & Melfi , 1988).

As rochas vulcânicas básicas têm características macroscópicas semelhantes quando observadas no campo. Apresentam cores variando entre cinza escuro, cinza médio e cinza acastanhado. Texturalmente são afíricas a subafíricas, por vezes porfiríticas, com fenocristais e/ou micro fenocristais de augita e de plagioclásio. 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, são identificados basaltos toleíticos, basaltos andesíticos, andesitos, latianandesitos e latitos, sempre com predomínio dos basaltos toleíticos (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1988; Melfi *et al.*, 1988).

As rochas ácidas são, classificadas como riodacitos e riolitos. E possuem cores em tons de cinza claro, sendo comuns estruturas de fluxo e diaclasamento horizontal a subhorizontal.

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).

A forma de ocorrência principal das rochas magmáticas da Formação Serra Geral são os derrames. De uma forma geral, podem ser definidos como corpos tabulares de grande continuidade lateral e espessura que vão desde metros a várias

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 variável, 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 (Michelin, 2014).

7 MODELOS ANÁLOGOS

Existem dois motivos principais para se estudar os afloramentos na geologia do petróleo. O primeiro, 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 (Luca & Basilici, 2008).

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. 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.

Neste contexto a Formação Serra Geral (Cretácea da bacia do Paraná) é de grande interesse como modelo análogo, pois, tem características semelhantes e são contemporâneas ao magmatismo do Neocomiano das bacias marginais brasileiras (Reis, 2013).

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.

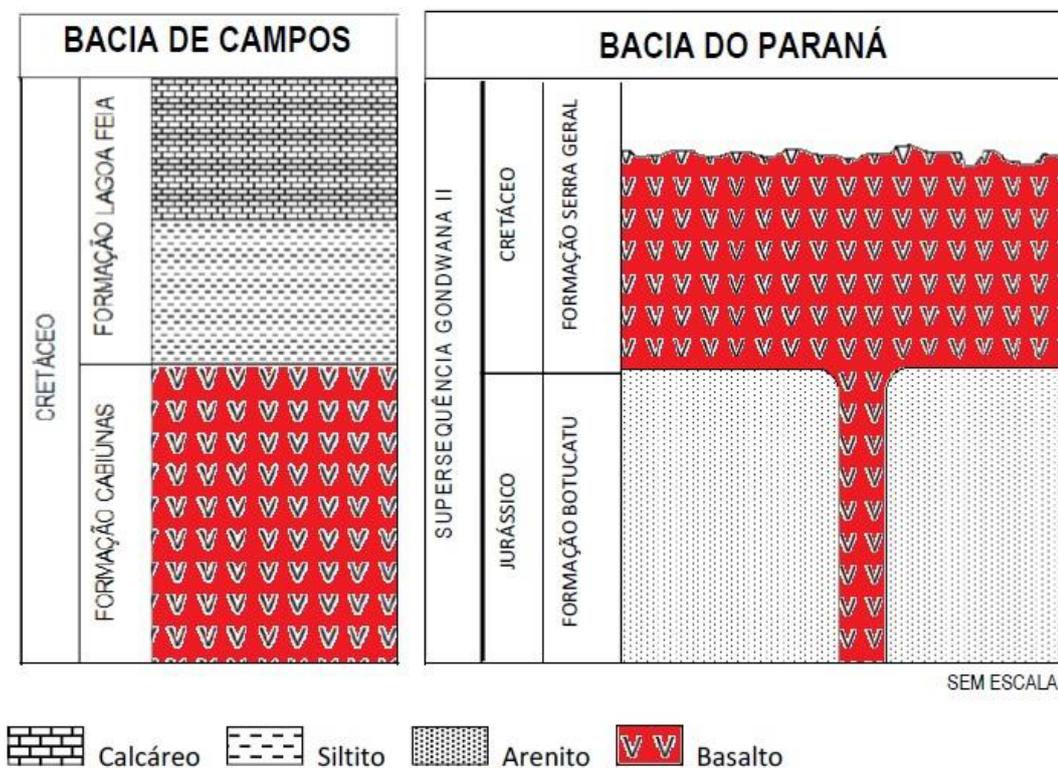


Figura 4 - Modelo análogo entre as vulcânicas da Bacia do Paraná e da Bacia de Campos evidenciando semelhanças (Reis, 2013).

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, podem ser análogos para estudo destas feições.

Diversas pesquisas têm sido realizadas na Bacia do Paraná, onde o principal foco é 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) e alguns trabalhos sob o enfoque de reservatório (Reis, 2013; Fig. 04).

8 PROCEDIMENTO E DETALHAMENTO DE CADA TÉCNICA A SER UTILIZADA NA PESQUISA

8.1 SENSORIAMENTO REMOTO

8.1.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa

Sensoriamento remoto, termo cunhado no início dos anos de 1960 por Evelyn L. Pruitt e colaboradores, é uma das mais bem sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global. Atualmente, a resolução espectral das imagens obtidas pelos sensores imageadores já ultrapassa centenas de bandas, e a resolução espacial de muitas imagens já é maior que 1 m, possibilitando suas aplicações nas áreas de levantamentos de recursos naturais e mapeamentos temáticos, monitoramento ambiental, detecção de desastres naturais, desmatamentos florestais, previsões de safras, cadastramentos multi-finalitários, cartografia de precisão, defesa e vigilância, entre outras.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE teve uma ação decisiva na consolidação do sensoriamento remoto como uma tecnologia de uso em escala nacional, projetando o Brasil como a nação pioneira no hemisfério sul a dominar essa tecnologia.

Historicamente, reconhece-se que o termo Sensoriamento Remoto foi criado para designar o desenvolvimento dessa nova tecnologia de instrumentos capazes de obterem imagens da superfície terrestre a distâncias remotas. Por isso, a definição mais conhecida ou clássica de sensoriamento remoto é como sendo uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto. Em uma concepção um pouco mais científica, que é regida segundo os seguintes preceitos:

- i) exigência: ausência de matéria no espaço entre o objeto e o sensor;
- ii) consequência: a informação do objeto é possível de ser transportada pelo espaço vazio;

iii) processo: o elo de comunicação entre o objeto e o sensor é a radiação eletromagnética, a única forma de energia capaz de se transportar pelo espaço.

Outra definição de Sensoriamento Remoto é: "uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres. Essa definição de sensoriamento remoto é explícita em afirmar que o objeto imageado é registrado pelo sensor por meio de medições da radiação eletromagnética, tal como, por exemplo, a luz solar refletida da superfície de qualquer objeto".

A partir da definição de sensoriamento remoto fica óbvio que só se pode entender o processo de aquisição e de análise das imagens, se conhecermos primeiro o que é a radiação eletromagnética - REM.

REM é concebida como o resultado da emissão de pequenos pulsos de energia, enquanto que sob uma perspectiva ondulatória, a REM se propaga na forma de ondas formadas pela oscilação dos campos elétrico e magnético, conforme mostrado na figura 05.

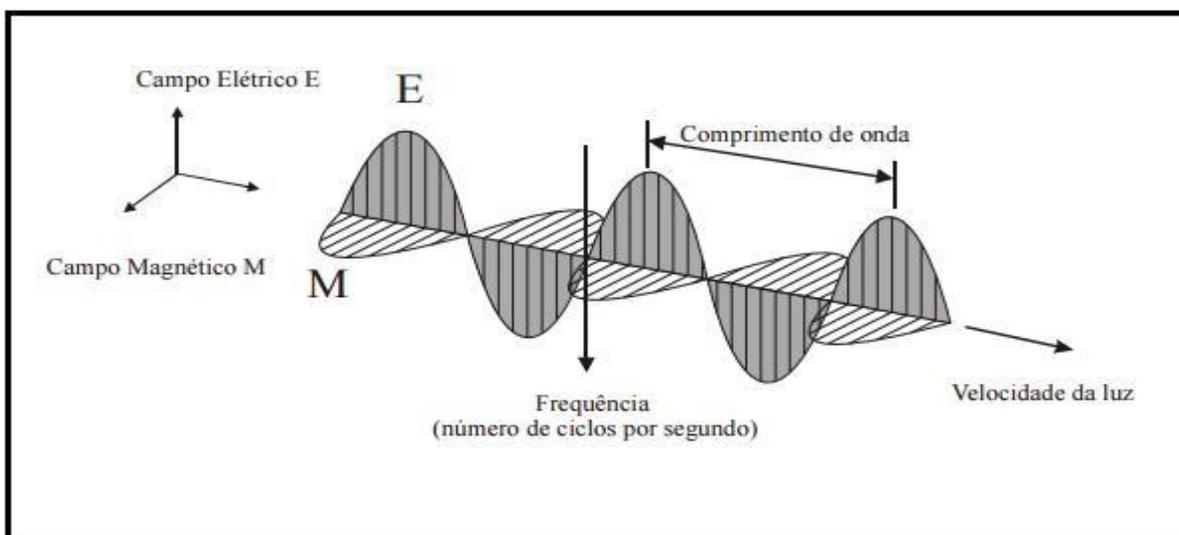


Figura 5 - Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de onda nos campos M (magnéticos) e E (elétricos). Fonte: Meneses, 2012.

No comportamento espectral de objetos naturais, o fluxo de energia eletromagnética ao atingir um corpo sofre interações com o material que o compõe,

sendo então, parcialmente refletido, absorvido ou transmitido pelo mesmo. A absorção, reflexão ou transmissão da energia incidente pode ser total ou parcial, guardando sempre o princípio de conservação de energia, a capacidade de um objeto de refletir, absorver ou transmitir a radiação é denominada, respectivamente de: reflectância, absortância e transmitância.

Os objetos interagem de maneiras diferenciadas espectralmente com a energia eletromagnética incidente, pois apresentam diferentes propriedades físico-químicas e biológicas. Estas diferentes interações são o que possibilitam a distinção e o reconhecimento dos diversos objetos terrestres sensoriados remotamente. São reconhecidos devido a variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda.

Os sistemas para a obtenção de dados denominados sistemas sensores, podem ser mantidos no nível da órbita (satélites) ou suborbital (acoplados em aeronaves ou mantidos ao nível do solo), conforme figura 06 Também é possível a obtenção de dados de campo a partir do nível do solo. Essas medidas são obtidas utilizando-se radiômetros ou espectroradiômetros, mas este não é o enfoque do trabalho.

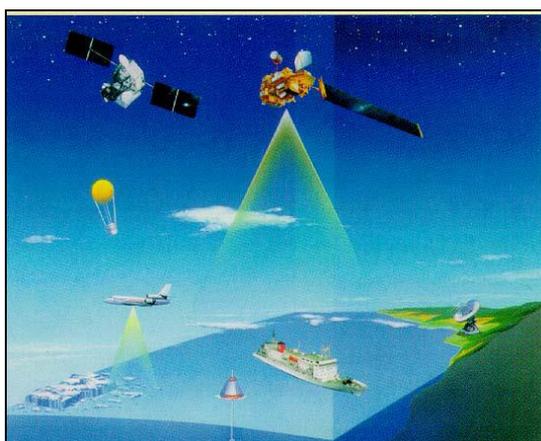


Figura 6 - Ilustração dos níveis de coleta dos dados. Fonte: Meneses, 2012.

O sistema fotográfico, que foi o primeiro imageador da superfície terrestre, utilizado na primeira guerra mundial, em 1914, utiliza como equipamento a câmera fotográfica. O filme exerce o papel de detector neste sistema, possuindo sensibilidade espectral nas regiões do visível e infravermelho próximo (0,36 a 0,90 μ m). Os filmes são caracterizados através de sua sensibilidade e resolução. A resolução de um sistema fotográfico está associada às resoluções das lentes e do filme, como também as perdas de informação.

Os filmes podem ser classificados em pancromáticos (preto e branco), infravermelhos preto e branco, filmes coloridos e filmes infravermelhos coloridos (falsa-cor). Por tratar-se de uma projeção central, a fotografia aérea apresenta distorção radial, crescente a partir do centro da foto, contudo ainda é utilizada com frequência em estudos geológicos.

As imagens colhidas pelo satélite LANDSAT fazem parte do programa estabelecido pela NASA, visando o desenvolvimento das tecnologias espaciais, juntamente com a aquisição de informação multiespectral periódica da superfície terrestre. O imageamento é realizado através de um simples espelho oscilante, que varre perpendicularmente à direção de deslocamento do satélite. Quando a energia refletida ou emitida pela superfície atinge os detectores, estes produzem um sinal elétrico (analógico), que posteriormente é enviado para um sistema multiplex (sistema de transmissão simultânea de sinais), que é responsável pela emissão dos dados digitais para as estações terrestres.

8.1.2 Vulnerabilidade da técnica

Iluminação da cena a ser capturada, reflectância dos alvos, espelhamento e o ângulo em relação ao sol, cobertura vegetal, cobertura da área foco, entre outras.

8.2 LEVANTAMENTO DE DADOS PRÉ-CAMPO.

8.2.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa

A etapa pré-campo compõe-se por levantamento bibliográfico e obtenção das cartas topográficas da área a ser estudada. As folhas utilizadas são: Salto do Jacuí, Herveiras, Sinimbu, Candelária, Rio Pardo. Foram confeccionados mapas de lineamentos destas áreas, utilizando imagens do satélite LANDSAT e Modelo Numérico do Terreno (MNT) - EMBRAPA (Miranda, 2010), com a finalidade de determinar pontos a serem explorados em campo e suas rotas de acesso. Os mapas de lineamentos foram elaborados levando em conta as seguintes etapas:

- 1- Modelos digitais do terreno;
- 2- Mapas de base do Instituto Brasileiro de Geografia e estatística;
- 3- Cartas topográficas digitais;
- 4- Análise em programas de computador (ENVI 4.5);

A etapa de análise de lineamentos foi bastante detalhada e criteriosa, para que nenhum lineamento significativo fosse omitido. Para tal usou-se imagens Modelo Numérico do Terreno (MNT) – SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) , e imagens LANDSAT ETM7 (5R, 4G, 3B) com resolução espacial até à escala 1:25 000, obtidas em cdbrazil.cnpm.embrapa.br (Miranda, 2010), figura 7.

Os produtos finais foram apresentados respectivamente nas escalas 1:200000 e 1:100000.

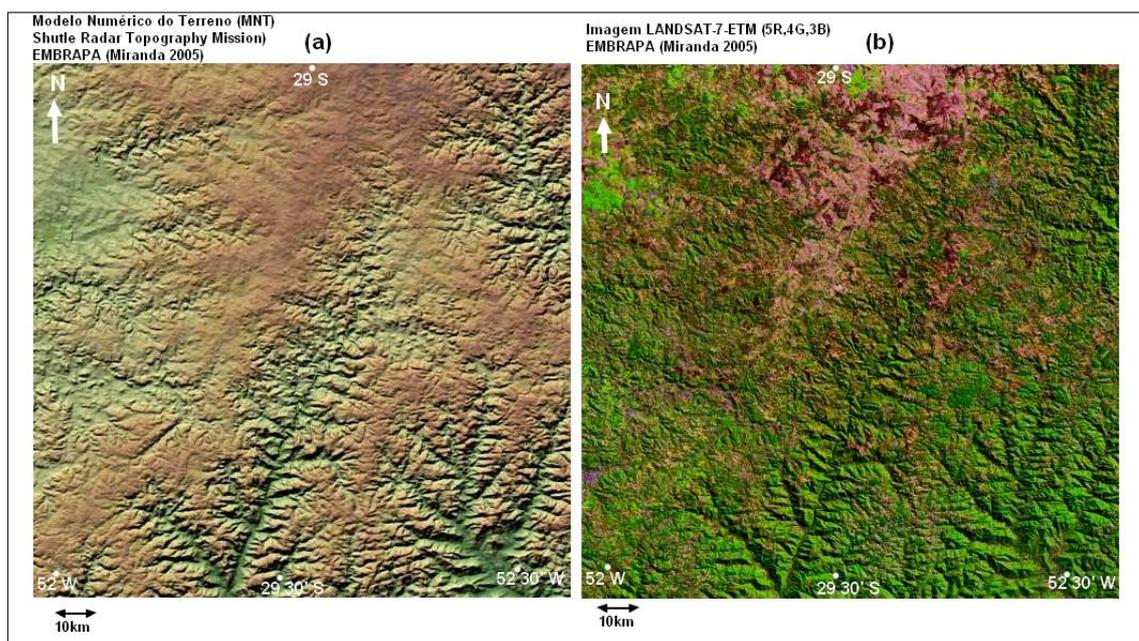


Figura 7 - Mapa da área de estudo confeccionado utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Fonte: Dados da Pesquisa (2015) (a) imagem Modelo Numérico do terreno (MNT) e (b) Imagem LANDSAT.

8.2.2 Pontos críticos dos procedimentos e cuidados adotados

No Brasil e no mundo existe acesso a muitas imagens de cartas topográficas e imagens de satélite disponíveis de diferentes instituições de ensino, procurou-se selecionar imagens somente de lugares confiáveis e com boa nitidez como NASA, IBGE e Satélites LANDSAT.

8.2.3 Vulnerabilidade da técnica

Como ponto crítico destaca-se a dificuldade em obter imagens confiáveis. A interpretação das estruturas foi desafiadora no começo do projeto, contudo essa dificuldade foi superada.

8.3 LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO

8.3.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa

Inicialmente trata-se de um método direto de campo, e fornece informações amplas sobre a geologia da área a ser estudada.

8.3.2 Procedimento passo a passo

Para esta etapa de campo foram desenvolvidas em duas fases: campo e pós campo.

Em campo foram observados diversos afloramentos e coletadas amostras de seus pontos mais importantes (Fig. 08), para isso foi utilizado materiais como: GPS Garmin, trena, mapas geológicos e cartográficos, caderneta de campo, máquina fotográfica de 16MP, lupa com 10X de aumento da marca Intex, martelo petrográfico, marreta e sacos plásticos para acondicionar as amostras coletadas. Diversas fraturas foram medidas em pontos distintos dos afloramentos, na maioria foram feitas medidas de suas estruturas utilizando técnicas com bússola e programas de computador específicos para a criação e interpretação de diagramas a partir de redes de Schmidt (Roseta).

8.3.3 Vulnerabilidade da técnica

Declinação e qualidade do equipamento, erro nas medidas, clima.



Figura 8- Vista Geral do afloramento (tipo corte de estrada) – localizado na RS - 153 (Km – 526).
Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

8.4 LEVANTAMENTO DE DADOS PÓS-CAMPO

8.4.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa

A etapa pós-campo foi composta basicamente pela interpretação, integração e associação das informações obtidas nas etapas anteriores. Nesta etapa as amostras foram classificadas e fotografadas amostra (Fig.09). Algumas destas amostras foram analisadas por técnicas petrográficas e de microscopia eletrônica de varredura.

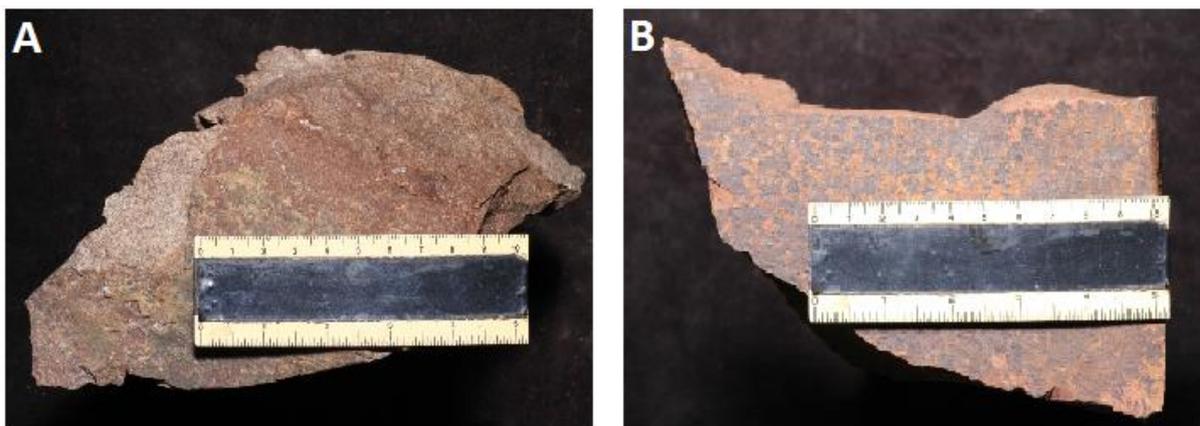


Figura 9 - Amostras de rocha coletadas na fase de campo. A) basalto; B) riolito. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

8.5 MICROSCÓPIO ÓTICO

8.5.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa

A microscopia ótica permite a identificação de minerais, e também, de estruturas, texturas e relações entre os grãos de uma rocha. Estes atributos são observados e analisados por meio de lâminas delgadas inseridas no equipamento denominado microscópio ótico. O microscópio ótico consiste num instrumento utilizado em larga escala para examinar variados minerais á luz polarizada (Kerr, 1977). A técnica é de alta eficácia e custo relativamente baixo.

8.5.2 Procedimento passo a passo

A utilização de lâminas ao microscópio ótico é possível devido ás suas ferramentas constituintes básicas, como: lentes oculares, lentes Amici-Bertrand, revólver, analisador, espelhos, braço, lente objetiva, platina, polarizador e acessórios.

Antevendo a utilização desta técnica são previamente escolhidas amostras de rocha para a laminação, ou seja, a confecção de lâminas delgadas. Com as lâminas já confeccionadas, essas são inseridas e analisadas com um microscópio ótico de marca LEITZ Labrolux12Pol.

8.5.3 Pontos críticos dos procedimentos e cuidados adotados

Verificar se as lâminas tem a espessura ideal, pois uma espessura em desacordo com a norma altera as propriedades óticas características de cada mineral (como exemplo, a mudança da birrefringência dos minerais).

8.5.4 Vulnerabilidade da técnica

Nem todos minerais são facilmente identificáveis ao microscópio ótico, por exemplo, os argilominerais.

8.6 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV)

8.6.1 Relevância e adequação da técnica a ser utilizada na pesquisa

O princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de Tungstênio, mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KeV. Essa variação de voltagem permite a aceleração dos elétrons, e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas

lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra analisada.

Como resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra, uma série de radiações são emitidas, como: elétrons secundários, elétrons retroespehados, raios X característicos, catodo luminescência, fótons, elétrons *auger* e absorvidos. Estas radiações quando captadas corretamente irão fornecer informações características sobre a amostra (topografia da superfície, composição, cristalografia...)

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para formação da imagem são os elétrons secundários (SE) e os retroespehados (BSE). À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra e estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os SE fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os BSE fornecem imagem de variação de composição. A resolução espacial pode chegar a 10nm no modo topográfico e 100nm no modo composicional (Maliska, 2004).

A instrumentação combinada do MEV pode ser resumida de acordo com as figuras 10 e 11, onde são indicados algumas das partes principais do aparelho.

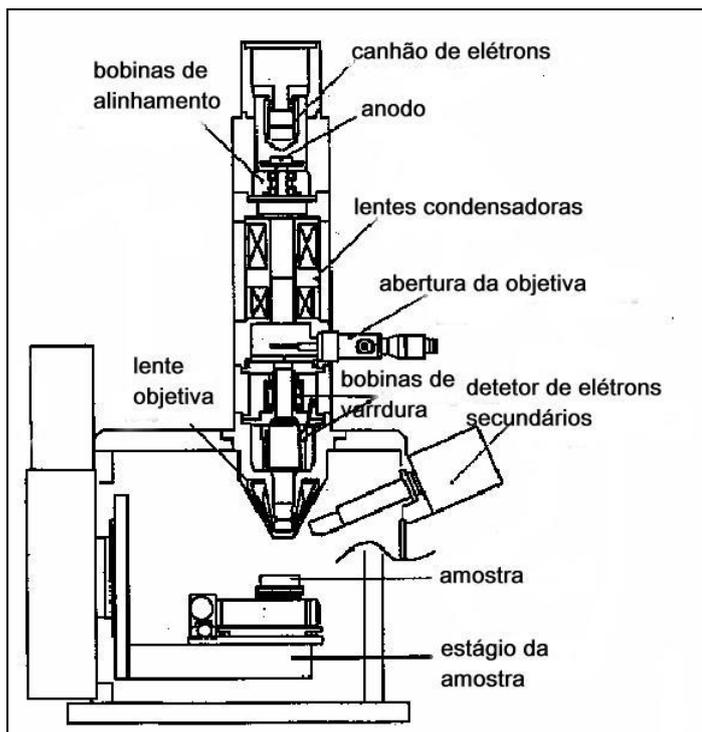


Figura 10 - Representação diagramática do MEV.



Figura 11 - Microscópio Eletrônico de varredura. Fonte: – MEV/Laboratório de Geologia Isotópica - UFRGS (2015).

8.6.2 Procedimento Passo a passo

Segundo Klein & Dutrow (2012), a técnica do MEV tem por base a emissão da alta intensidade de um feixe de elétrons sobre uma determinada amostra. O impacto de um feixe de elétrons na superfície de uma amostra sólida ocasiona vários tipos de sinais de radiação que são registrados por detectores acima do espécime. Esses sinais de radiação incluem elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios X, catodo luminescência e elétrons absorvidos pelo espécime. Tipicamente, o MEV é equipado com vários detectores para medir esses sinais. A intensidade do sinal detectado em um detector de elétrons retroespalhados está relacionada ao número atômico médio do espécime, sua orientação cristalográfica e sua topografia superficial.

As amostras foram analisadas no Laboratório de Geologia Isotópica do IGEO/UFRGS. com um microscópio eletrônico de varredura da marca *Phillips*, e utilizado conjuntamente com o detector de energia dispersiva (EDS), que permite uma microanálise química das diferentes fases minerais para a obtenção de uma identificação mineralógica mais segura da amostra.

A preparação das amostras seguiu detalhadamente os procedimentos descritos por Mizusaki (1986) e foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, seguindo as etapas:

- a) porções milimétricas das amostras de rocha são fixadas com fita de carbono em porta-amostras especiais;
- b) as amostras são metalizadas, ou seja, são recobertas com uma película metálica constituída de liga de ouro, com espessura média de 20 angstroms, com a finalidade de se tornarem boas condutoras;
- c) a amostra é inserida no MEV e impactada por elétrons diversos;
- d) a amostra é analisada e as imagens obtidas em diferentes aumentos são gravadas constituindo documentação fotográfica.

8.6.3 Pontos críticos dos procedimentos e cuidados adotados

A montagem deve ter uma boa metalização, especialmente as amostras de texturas muito finas. Uma amostra com metalização deficiente não se torna boa condutora, atrapalhando a dispersão dos elétrons, e conseqüentemente, a geração de imagens de qualidade.

8.6.4 Vulnerabilidade da técnica

A vulnerabilidade consiste nas litologias argilosas ou oxidadas onde o processo de metalização deve ser feita no mínimo duas vezes para bons resultados.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES:

9.1 Análise Morfotectônica e Morfoestrutural: Lineamentos e Blocos Morfoestruturais

9.1.2 Localização Morfotectônica da Área de Estudo

A importância dos estudos em hidrogeologia, de lineamentos e da compartimentação da Formação Serra Geral em blocos morfoestruturais, está ligada ao entendimento do armazenamento e fluxo de fluídos, no caso água. Estes aspectos são abordados por diversos autores no Rio Grande do Sul, (Lisboa 1996; Machado, 2005; Betiollo, 2006; Nanni, 2008; Giardin & Faccini, 2002).

Os estudos efetuados para a água subterrânea, com devidas ressalvas, podem ser de valia para o entendimento de reservatórios de hidrocarbonetos não convencionais, pois apresentam os mesmos tipos de porosidade. A porosidade por fratura é a principal em ambos os casos.

Machado (2005, Fig. 12) efetua a compartimentação morfotectônica regional do sistema aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul. O autor define blocos morfotectônicos regionais delimitados por lineamentos de grande porte (>100 km, ver item 2.2.1), denominando estes blocos como compartimentos. De acordo com esta classificação a área de estudo situa-se no Compartimento Central-Missões.

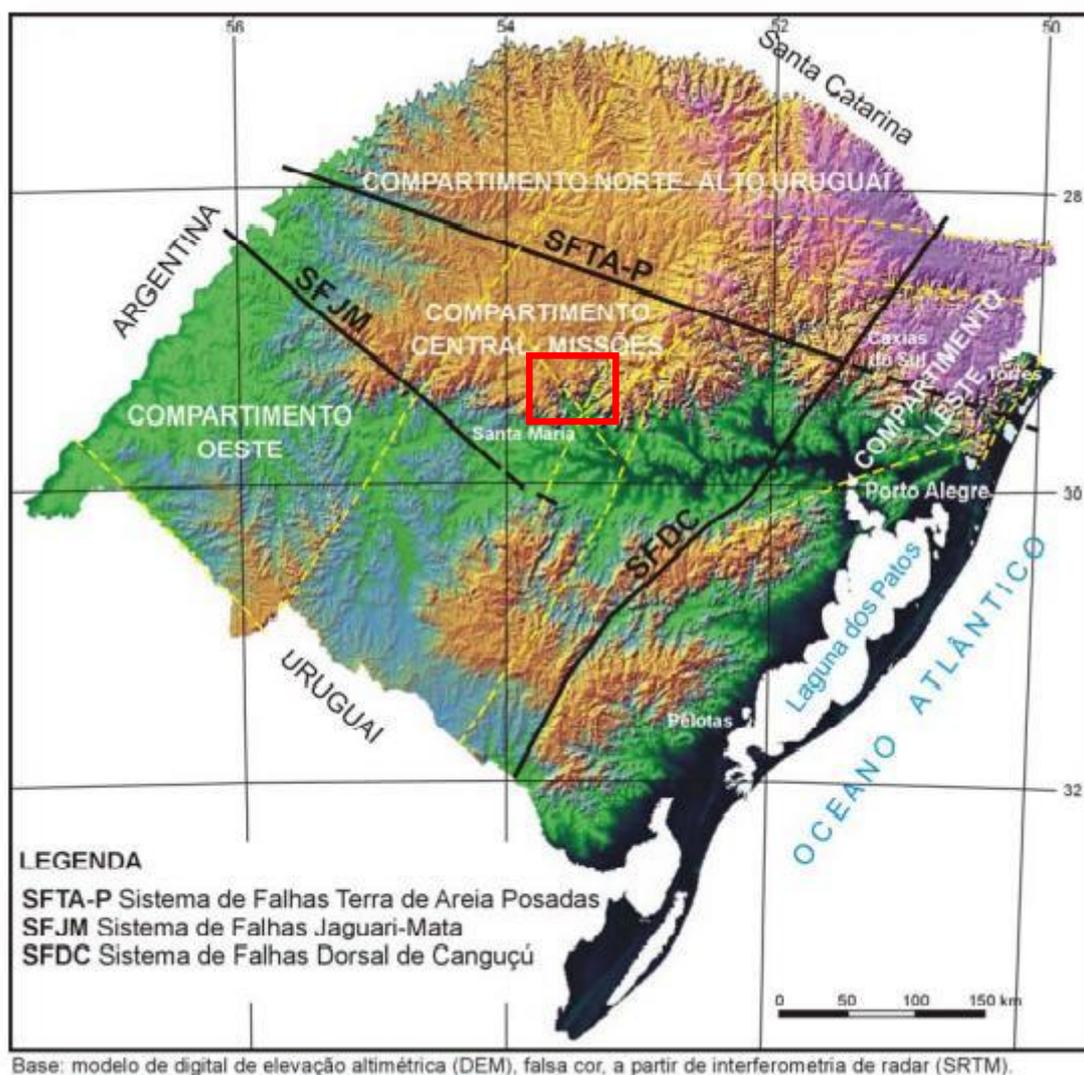


Figura 12 - Compartimentação morfo-tectônica do sistema aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul (RS) (modificado de Machado, 2005). A área de estudo situa-se no Compartimento Central Missões e é identificada pela marcação em vermelho. Fonte da base cartográfica.

9.2 Análise Morfoestrutural da Área de Estudo

9.2.1 Análise Morfoestrutural Regional

A análise dos lineamentos regionais, de médio porte ($>10\text{km} <100\text{km}$, ver item 2.2.1) estudados na área de pesquisa e seu entorno demonstra a existência das principais direções tectônicas do Escudo Sul – Rio - Grandense (Picada, 1971) reativadas na Bacia do Paraná (Frasca & Lisboa, 1993) conforme a figura 13.

Na imagem modelo digital do terreno (MNT) (Fig. 13), a direção morfoestrutural **DC** corresponde à reativação da zona de falhas Dorsal de Canguçu, **APA**, da zona de falhas Açotea-Pedras Altas, **PM** da zona de falhas Passo do Marinheiro e **LI** da zona de falhas Ibaré conforme Picada (1971).

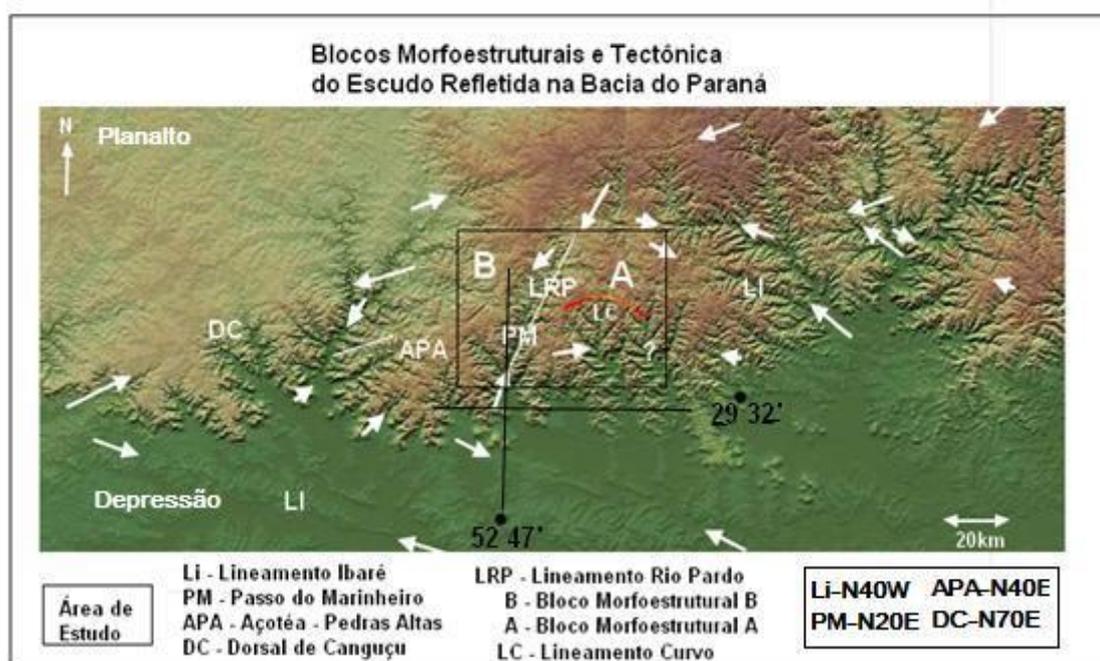


Figura 13 – Análise morfoestrutural regional dos lineamentos em imagem MNT. A área de estudo é compartimentada em dois blocos morfoestruturais (A e B) delimitados pelo Lineamento do Rio Pardo (LRP). Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

De particular interesse para este trabalho é o lineamento aqui denominado Rio Pardo (LRP), morfoestrutura linear de médio porte com aproximadamente 50 km

de comprimento, direção nordeste (N20⁰E), correspondente à reativação da zona de falhas transcorrentes Passo do Marinheiro, no Escudo Sul - Rio-Grandense.

O lineamento Rio Pardo (LRP) compartimenta a área pesquisada em dois blocos morfoestruturais, **A** Leste e **B** Oeste (Fig. 13)

No bloco A ocorre um peculiar lineamento curvo de médio porte que foi denominado Lineamento Gramado Xavier (**LC**) o qual não se relaciona com as quatro direções tectônicas do Escudo, impressas na área por suas reativações através dos lineamentos: DC (Dorsal de Canguçu), APA (Açotea-Pedras Altas), PM (Passo do Marinheiro) e Li (Ibaré) (Fig.13).

9.2.2 Análise morfoestrutural de semi detalhe

A análise em semi detalhe dos lineamentos da área de estudo, apresentada na escala 1:100.000 foi efetuada em imagem Modelo Numérico do Terreno (MNT), EMBRAPA/LANDSAT TM 7 órbita 222/80 de 29/07/2001. (I). Para melhor visualizar os lineamentos traçados, anexa-se imagem LANDSAT TM 7 (543) (ver figura 7) da mesma área em que estes foram traçados na imagem MNT, (II) na figura 14. Na imagem LANDSAT pode-se observar que os lineamentos destacam-se como linhas retas finas e escuras.

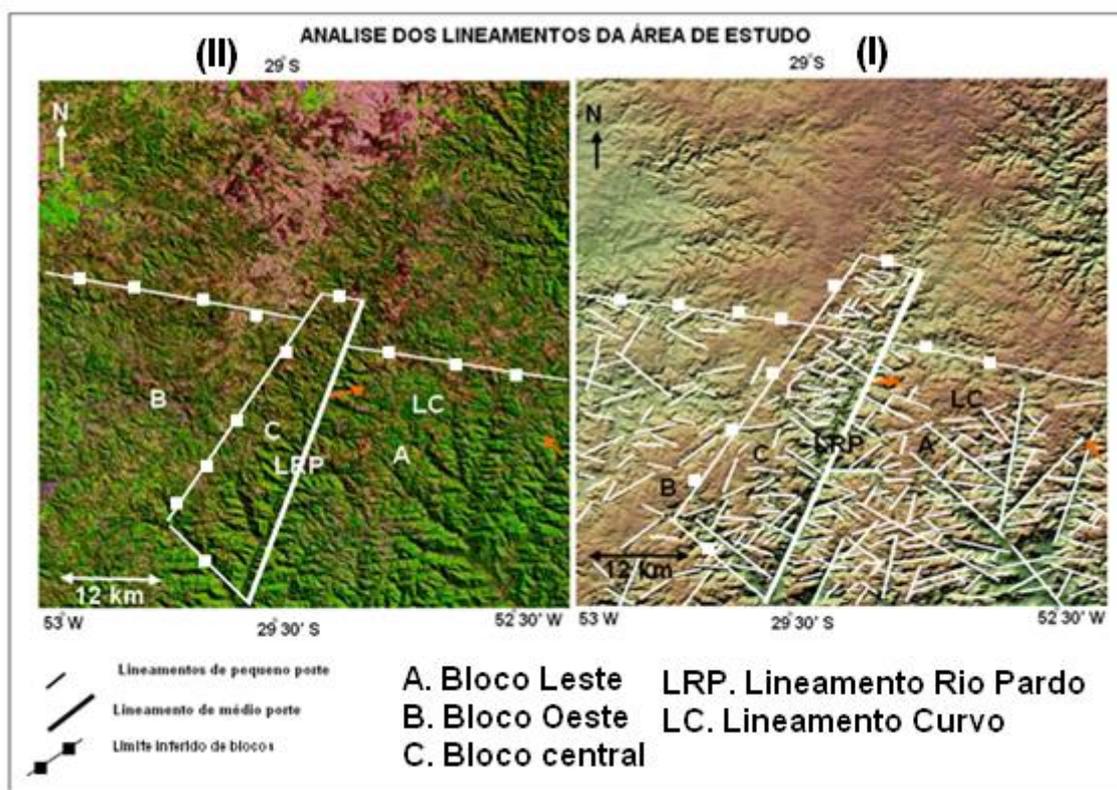


Figura 14 – Análise morfoestrutural de semi-detálhe da área de estudo destacando as morfoestruturas lineares (lineamentos) e os blocos morfoestruturais. Observar também o lineamento curvo de médio porte LC. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

O traçado dos lineamentos de pequeno (<10km) e médio porte (>10km<100km, ver item 2.2.1), em escala de semi detalhe, realça o Lineamento Rio Pardo (LRP) e o Lineamento Curvo Gramado Xavier (LC), já identificados na análise regional dos lineamentos (Fig. 13). Além disto, possibilita a individualização de um terceiro bloco morfoestrutural C, central, não visualizado na análise regional. Este bloco morfoestrutural está associado espacialmente ao LRP. Observa-se que uma característica fundamental do bloco é a alta densidade de lineamentos de pequeno porte na maioria ortogonais ao LRP. Estes lineamentos de pequeno porte que, provavelmente estão relacionados à movimentação de blocos ao longo do lineamento LRP. Destaca-se que, pelo comprimento inferido, em torno de 50 km o LRP provavelmente é uma falha (Gold 1980, ver capítulo 2 fundamentação teórica), associada à reativação da zona de falhas Passo do Marinheiro (PM) no embasamento da Bacia do Paraná (direção N 20° E).

Os blocos morfoestruturais A e B apresentam densidades e orientações diferentes dos lineamentos de pequeno porte (<10km). O bloco A, tem densidade alta e predomínio de lineamentos de pequeno porte na direção W – NW. O bloco B, por sua vez, tem densidade média a baixa para os lineamentos de pequeno porte e equilíbrio nas direções nordeste e noroeste.

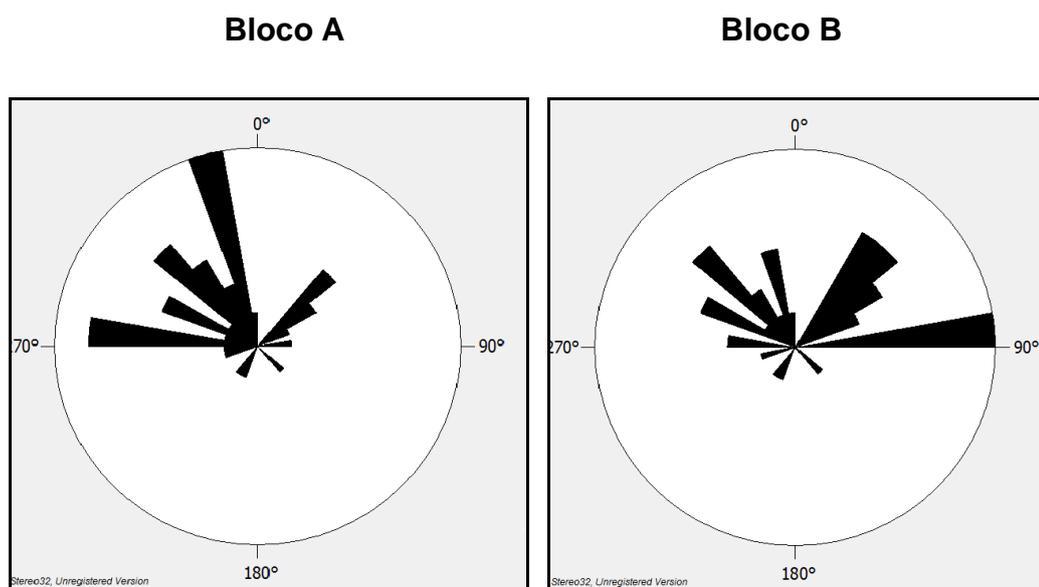


Figura 15 - Diagrama de roseta dos lineamentos dos blocos A e B, evidenciando as diferenças de orientação de seus lineamentos. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Com base nestes dados morfoestruturais, ilustrados para os blocos A e B pelos diagramas de roseta, pode-se afirmar que existe heterogeneidade, quanto ao número e orientação de lineamentos em cada bloco.

O bloco C, provável zona de falha associada ao Lineamento Rio Pardo, tem a maior densidade de lineamentos, quando comparado aos blocos A e B. Consequentemente, com maior porosidade por fratura e apresenta o maior potencial como análogo de reservatório de hidrocarboneto na área de estudo. Considerando-se que teria também o com maior valor de porosidade por fratura.

O bloco B, afastado do lineamento Rio Pardo com baixa densidade de lineamentos é o de menor potencial como análogo de reservatório de hidrocarbonetos. O bloco A, embora não relacionado com a provável zona de falha, apresenta alta densidade de lineamentos, possivelmente associada à ocorrência do

lineamento curvo Gramado Xavier. Este bloco morfoestrutural também tem um bom potencial como armazenador de hidrocarbonetos.

O lineamento curvo Gramado Xavier (**LC**), pode ser bem visualizado na imagem MNT, onde é materializado por fina linha curva com tom cinza escuro. Na figura 16, aparece realçado em imagem Google Earth.

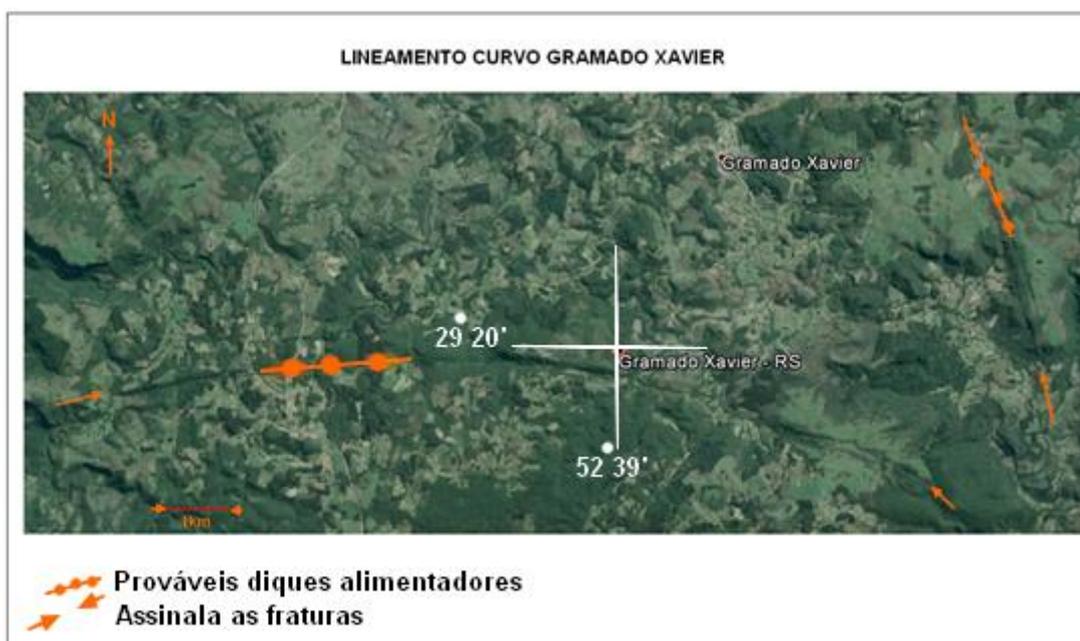


Figura 16 – Detalhe do Bloco A, ressaltando o lineamento curvo (LC) Gramado Xavier onde se posiciona provável dique alimentador “curvo” do magmatismo. Fonte: Google Earth e Dados da Pesquisa (2015).

Considera-se que o lineamento curvo Gramado Xavier, pelas suas características, provavelmente compõe uma morfoestrutura anelar análoga a **Morfoestrutura Anelar do Lajeado Grande** que foi classificada como uma provável caldeira vulcânica (Lisboa & Castro, 1998), associada à efusão de ignibritos e extrusão de lava da sequência de composição ácida da parte superior da Formação Serra Geral.

As relações de campo encontradas neste lineamento curvilíneo, observadas no ponto 12 da figura 18, sugerem o seu preenchimento por diques anelares alimentadores das eruptivas e efusivas ácidas em borda de caldeira (Fig. 17 a,b, c).

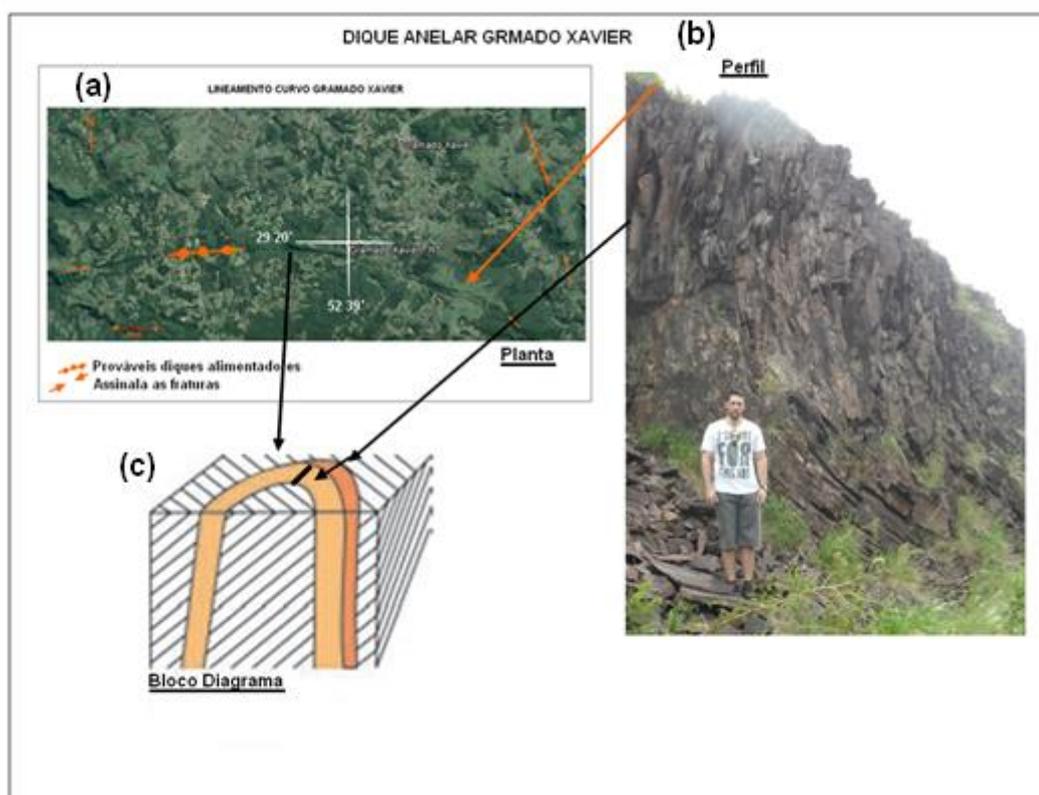


Figura 17 – Observar dique anelar Gramado Xavier no Bloco A; (a) , visto em planta na imagem Google Earth, (b) em perfil transversal, foto de campo; (c) em bloco diagrama ilustrativo. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

9.3 Dados de campo:

A coleta de dados em campo ocorreu no período de três dias ao longo das rodovias, no sentido oeste para leste na direção Candelária-Santa Cruz , figura 18.

- RS400 - pontos: 001, 002, 003, 004, 005 e 006.
- BR153 - pontos: 007, 008, 009, 010, 011, 012, 013
- BR471- pontos: 014, 015 e 016.

Nos cortes de estrada mais significativos e preservados, foram selecionados um total de dezesseis pontos (afloramentos) que foram descritos e amostras de rocha foram coletadas, figura 18. A descrição se fixou principalmente no reconhecimento e medidas de orientação das discontinuidades primárias e secundárias bem como na descrição e estratigrafia da sequência vulcânica.



Figura 18 – Localização dos pontos descritos na fase de campo. Fonte: Imagem Google Earth e dados da Pesquisa (2015).

PONTOS	COORDENADAS
01	322821/6726908
02	321574/6729044
03	301493/6748459
04	2596385/6766071
05	295515/6767613
06	302071/6747008
07	341150/6730852
08	340376/6750484
09	338684/67455513

10	340606/6765945
11	340536/6761558
12	341578/6755061
13	339976/6738486
14	3595513/6714744
15	3579750/6719183
16	355653/6726785

Quadro 1 - Coordenadas, em UTM, dos afloramentos analisados neste trabalho, ver figura 18.

Ao longo da BR 153, sentido Vera Cruz – Barros Cassal (ver Fig. 18), onde se encontram os melhores cortes, foi efetuada uma secção estratigráfica idealizada. Ela foi obtida com a utilização do perfil topográfico de referência, através da ferramenta “Traçar perfil” do Google Earth, conforme figura 19. A passagem de uma zona de derrame para outra não é nítida, os limites na secção são inferidos e altitudes foram avaliadas de modo expedito através de GPS.

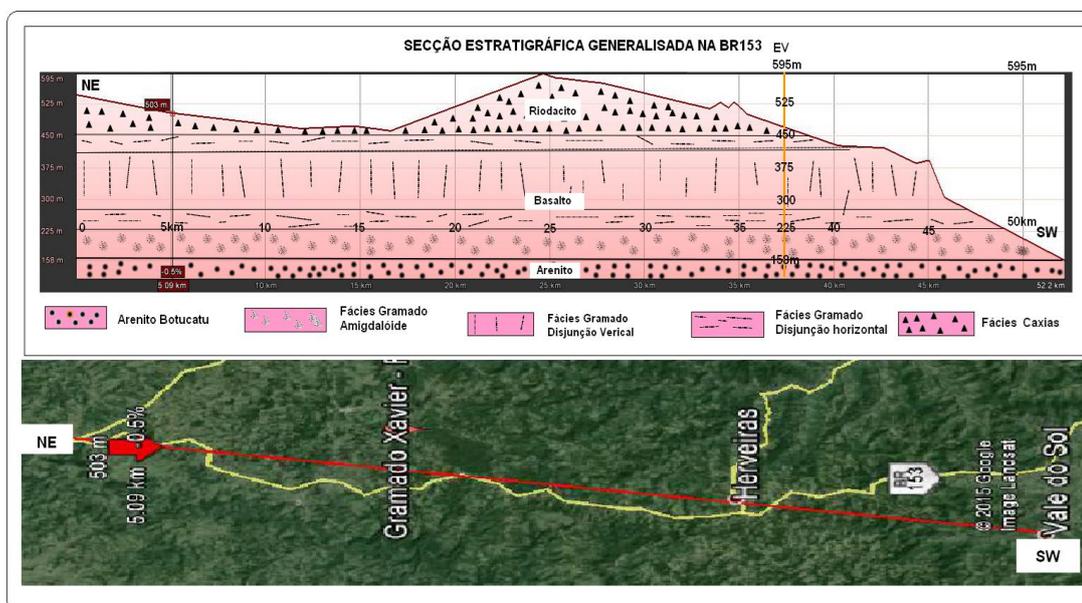


Figura 19 – Secção estratigráfica idealizada da área de estudo. Fonte: e Dados da Pesquisa (2015).

Da base para o topo, observa-se, com base na bibliografia existente e na descrição de lâminas petrográficas:

- Formação Botucatu como depósitos em *sets* e/ou *co-sets* com estratificação cruzada de grande porte, espessura aproximada de 37 metros de arenito de granulometria variando de fina a grossa, grãos arredondados, alta esfericidade, quartzoso (CPRM, 2006);

- Formação Serra Geral (Fácies Gramado conforme mapa geológico do Rio Grande do sul, CPRM, 2006) sob forma de derrames de basalto, tipo “pahoehoe”, espessura máxima de 290 metros, basalto com textura granular, fina a média, com níveis vesiculares preenchidos por carbonatos e zeolitas;

- Formação Serra Geral (Fácies Caxias conforme mapa geológico do Rio Grande do sul, CPRM, 2006) sob forma de derrames de composição intermediária a ácida, riolitos e riodacitos, textura microgranular a vitrofirica, eventualmente esferulítica, com até 72 metros de espessura. Observa-se forte disjunção tabular embora a porção central destes derrames seja maciça, dobras de fluxo e auto brechas frequentes, algumas vesículas preenchidas por ágata e calcedônia.

Com a generalização dos dados de descontinuidades observados e medidos nos afloramentos selecionados, efetuou-se um modelo conceitual ideal para o conjunto das descontinuidades, especificamente para o pacote vulcânico, na área de estudo (Fig. 20).

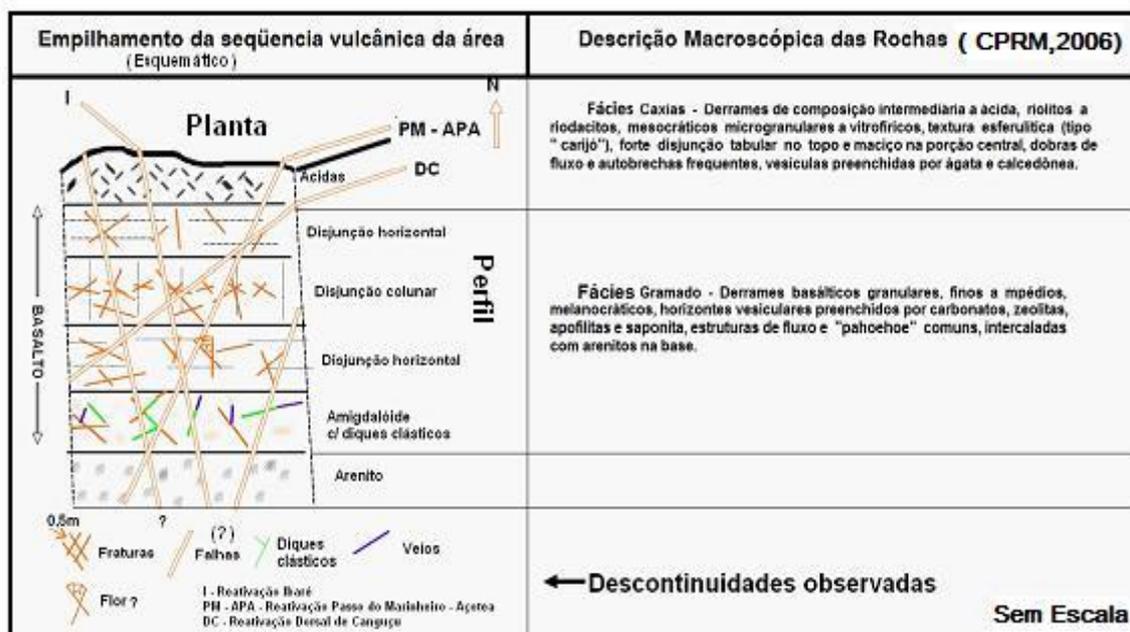


Figura 20 – Tipos e disposição ideal das descontinuidades observadas no pacote vulcânico ao longo dos cortes estudados. Modelo conceitual. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

De acordo com o esquema proposto na figura 20, observa-se zonas de descontinuidades maiores que atravessam toda a secção vulcânica bem como o arenito basal. Provavelmente estas zonas de descontinuidade relacionam-se a falhas que podem atravessar toda a sequência vulcânica da Bacia do Paraná. As orientações destas prováveis zonas de falhas ocorrem tanto para o quadrante nordeste, como para o noroeste.

Associadas a estas zonas de fraturas maiores ocorrem famílias de juntas sistemáticas, formando ângulos variados, bem como feições interpretadas como estruturas "em flor" (Fig. 20).

As juntas sistemáticas podem apresentar-se preenchidas, então formam veios de largura milimétrica a centimétrica, figura 20. A mineralogia do preenchimento é variada com predominância de quartzo, mas também ocorrem preenchimentos com calcita e zeólitas.

No derrame basal com estrutura vesicular – amigdalóide ocorrem diques clásticos de arenito sub verticais de espessura centimétrica, figura 20.

A figura 21 é um diagrama de rosetas com as orientações preferenciais das descontinuidades primárias medidas em afloramentos.

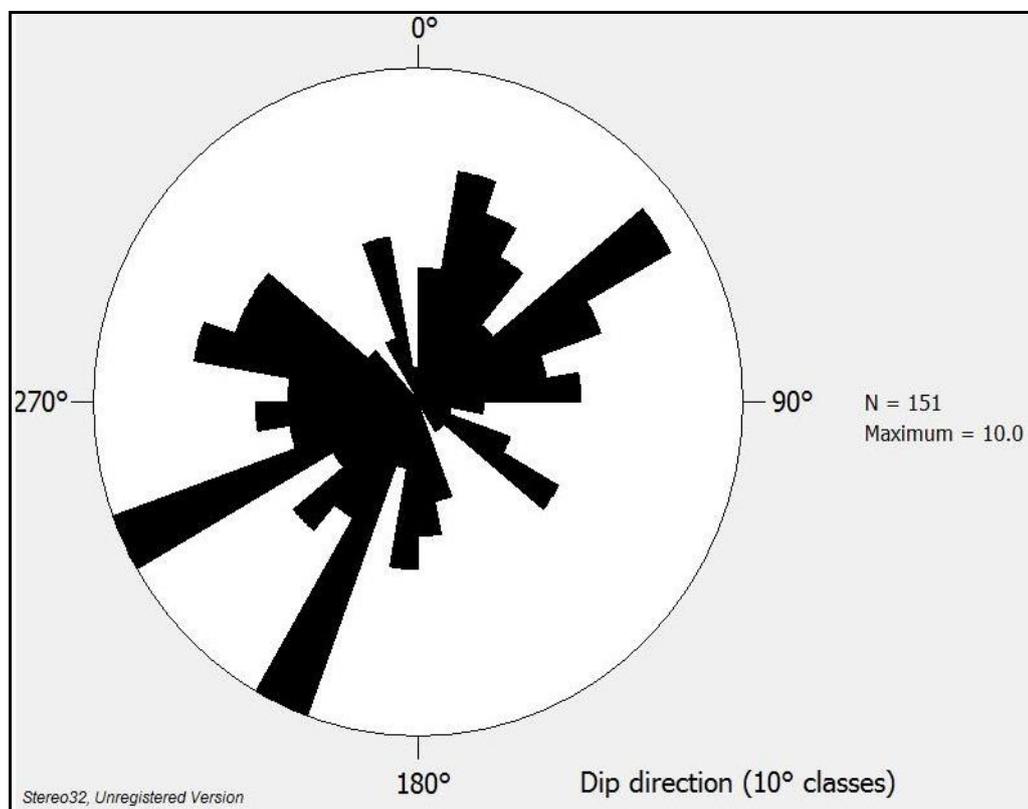


Figura 21 - Diagrama de roseta ilustra o total de medidas das orientações das juntas sistemáticas na área de estudo. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

O diagrama de roseta é um modo visualmente atrativo e útil de representar a direção de fraturas e lineações da superfície terrestre (Fossen, 2010).

O diagrama de roseta da figura 21 permite a visualização da distribuição espacial das 151 direções medidas das famílias de diaclases sistemáticas nos afloramentos dos 16 pontos de campo.

A comparação da distribuição das orientações das juntas sistemáticas em afloramento com os lineamentos de médio porte assinalados na figura 13, mostra boa correspondência com as direções Dorsal de Canguçu-Açotéa- Passo do Marinheiro no quadrante nordeste e Ibaré no noroeste, figura 20.

Comparando a figura 21 com a figura 15, bloco B, observa-se boa correlação das orientações das diaclases medidas nos afloramentos, com as orientações dos lineamentos traçados na imagem MNT – Modelo Numérico do Terreno.

9.4 ESPAÇAMENTO DAS DIACLASES SISTEMÁTICAS.

No estudo de um maciço rochoso, por exemplo, para a construção de um túnel, parte essencial do projeto e execução, é o estudo quantitativo das descontinuidades, na sua orientação, espaçamento, continuidade, rugosidade, abertura e preenchimento (Ferrer, 1999). Em projetos de túneis, para cada parâmetro, são efetuadas milhares de medidas e observações, essenciais para o projeto e execução da obra.

Em virtude do pouco tempo de campo disponível, não faz parte deste projeto estabelecer valores quantitativos referentes aos parâmetros relacionados a descontinuidades do pacote de rochas basálticas da área de estudo.

A título de exemplo, como contribuição para futuros trabalhos de detalhe, escolheu-se um afloramento em condições ideais para medir um dos parâmetros mais importantes das descontinuidades do tipo fratura, o espaçamento das fraturas, o qual pode estimar a porosidade média do meio fraturado de determinada área.

O espaçamento das fraturas de cada família é fator importante para a caracterização do potencial de armazenamento de um reservatório com porosidade por fratura.

O espaçamento das fraturas se define como a distância entre os planos de descontinuidade de uma mesma família de juntas sistemáticas, na direção perpendicular destes planos. Normalmente este valor se refere ao espaçamento médio dos valores medidos, para as descontinuidades de uma mesma família (Ferrer, 1999).

A medida do espaçamento é feita com uma trena métrica. A trena deve ser colocada perpendicularmente aos planos, registrando-se a distância entre descontinuidades adjacentes, ver figura 22.

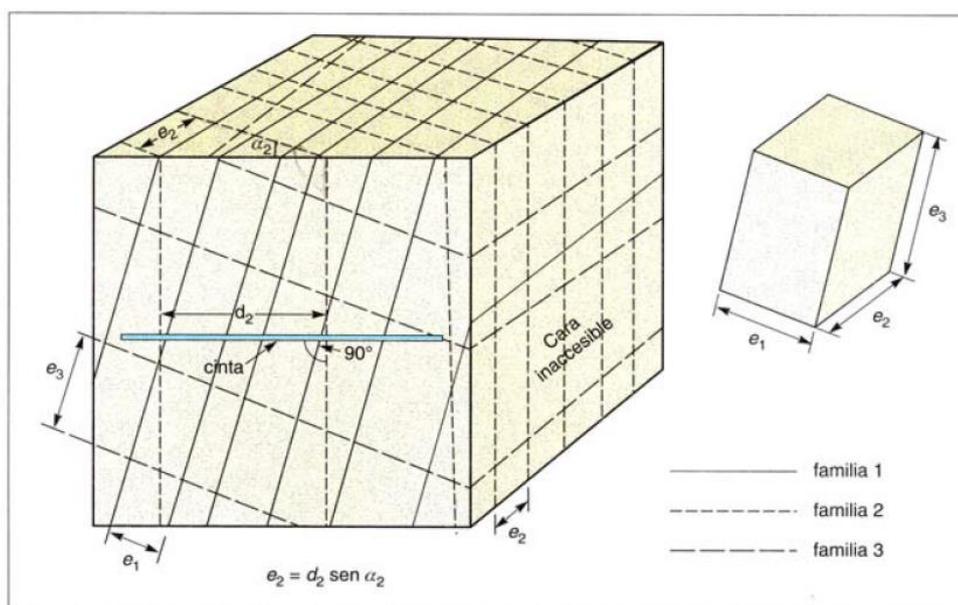


Figura 22 – Bloco diagrama explicativo da medida da distância de famílias de juntas em afloramento: Fonte: Ferrer, 1999.

Em geral, as superfícies expostas dos afloramentos não permitem realizar as medidas do espaçamento na direção perpendicular às superfícies, e o que se mede são espaçamentos aparentes, por isto, deve-se fazer correções para obter o espaçamento real. A figura 22 apresenta a face de um afloramento ideal, em que se pode medir os espaçamentos aparentes de famílias de juntas ao longo da face exposta do afloramento. Colocando a trena perpendicular aos traços dos planos de cada família de fratura, se mede a distância (**d**) que deve ser corrigida para calcular o espaçamento real (**e**): $e = d \cdot \sin a$, onde (**a**) é o ângulo entre a linha de medida e a orientação da diaclase no afloramento, figura 22.

Na área de estudo foi selecionado um afloramento onde foi possível medir o espaçamento perpendicularmente à direção de uma família de juntas verticais correspondente a reativação da zona de fraturas, Dorsal de Canguçu (N70°E), figura 23.

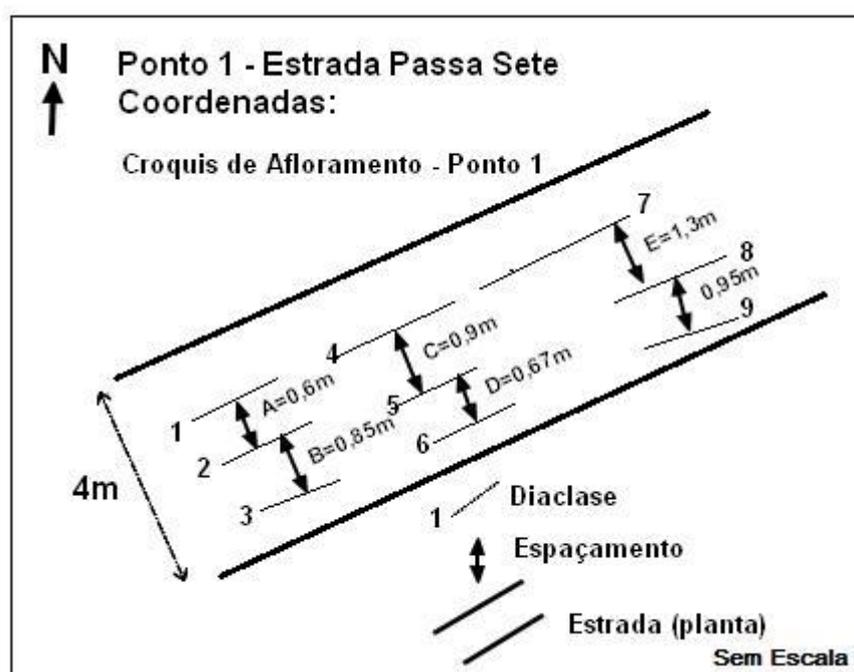


Figura 23 – Croquis do afloramento do ponto 1 conforme figura 17 (estrada Passa Sete secundária a rodovia RS400) com medidas dos espaçamentos das diaclases associadas à direção estrutural Dorsal de Canguçu. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Espaçamento médio
Família N70E
Ponto1-Estrada
Passa sete

Diaclases	Espaçamento
1-2	A=0,60m
2-3	B=0,85m
4-5	C=0,90m
5-6	D=0,67m
7-8	E=1,30m
8-9	F=0,95m
Média=0,87m	

Quadro 2 – Apresentação da tabulação dos dados e resultado do valor médio do espaçamento das diaclases da família N70E, 0,87m.

9.5 Análises microscópicas:

Os derrames ainda apresentam microfraturamento, feição considerada importante para o desenvolvimento do sistema permoporoso, e já identificado anteriormente nas rochas ígneo-básicas do Campo de Badejo da Bacia de Campos (Mizusaki, 1986) e na própria Formação Serra Geral (Reis, 2013). As microfraturas foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) e formam uma rede (Fig. 24). Nos blocos morfotectônicos, esta rede de microfraturamento auxilia não só o incremento da porosidade, mas também a permeabilidade. As microfraturas permitem a circulação e acumulação de fluidos na porção "maciça" dos derrames. Outro ponto importante é que as microfraturas oferecem a permeabilidade entre as discontinuidades maiores (falhas, fraturas...). De uma forma geral, pode-se dizer que os derrames básicos são mais microfraturados quando comparados aos derrames de composição ácida.

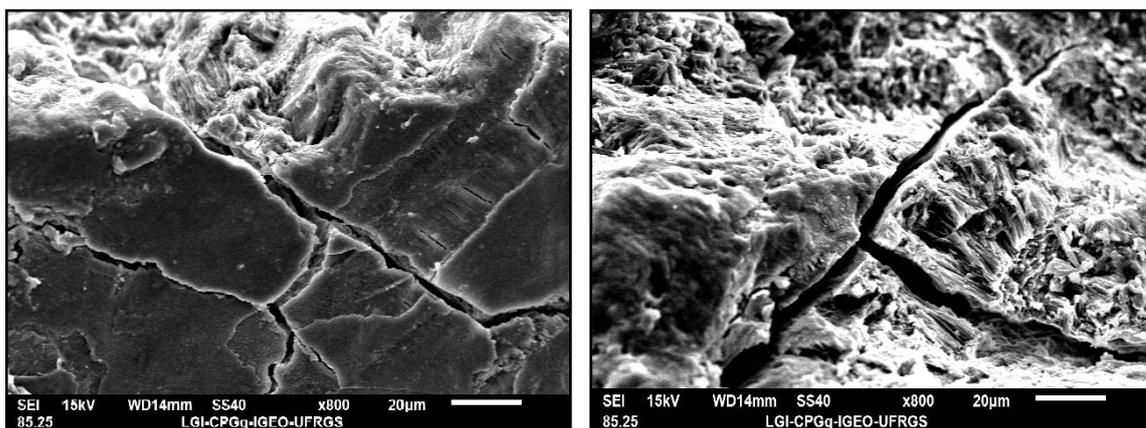


Figura 24 – Detalhe ao microscópio eletrônico de varredura (ES, 800X), de amostras da porção maciça dos derrames, exemplificando as microfraturas. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

10 CONCLUSÃO:

Através do estudo e delimitação dos lineamentos principais encontrados na área de estudo, foi possível delimitar três blocos morfoestruturais que para este estudo foram denominados de A, B e C. Cada um desses blocos apresentam características estruturais diferentes entre si.

O bloco A possui grande densidade de lineamentos, que por sua vez são em sua maioria estruturas de pequeno porte e direção predominante W – NW. Esse fraturamento se reflete também em escala microscópica através de microfraturas. O que pode ser traduzido como um bom potencial de porosidade por fratura. Com base nestes dados torna-se um bom análogo para um reservatório não convencional de hidrocarbonetos.

O bloco B, por sua vez, apresenta uma densidade média a baixa de lineamentos de pequeno porte. As direções destes lineamentos são igualmente distribuídas entre nordeste e noroeste. Verificou-se também que a densidade de lineamentos é baixa e conseqüentemente uma baixa porosidade por fratura. Foram observadas microfraturas em análise de microscopia eletrônica de varredura, contudo não foi possível quantificá-las.

Dentre os três blocos, o C possui a maior densidade de lineamentos, estruturas de médio e pequeno porte. Este bloco está provavelmente associado com a zona de falha do Lineamento Rio Pardo. Por apresentar maior porosidade por fratura este bloco tem um melhor potencial como análogo de reservatório de hidrocarboneto da área de estudo.

No quadro 3 é possível ver a comparação dos dados obtidos nos três blocos deste trabalho.

Características	Bloco A	Bloco B	Bloco C
Densidade dos lineamentos	Alta	Baixa	Alta
Dimensões (médias) dos lineamentos	Pequeno porte	Pequeno porte	Médio e pequeno porte
Microfraturas	Presentes	Presentes (?)	Presentes
Porosidade p/fratura	Alta	Baixa	Alta
Potencial como reservatório de hidrocarboneto	Bom	Ruim	Bom

Quadro 3 – Características principais dos blocos A, B e C, como análogos para reservatório não convencional de hidrocarbonetos. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

Como contribuição para futuros trabalhos de detalhe, um afloramento foi selecionado por apresentar condições ideais para medir discontinuidades do tipo fratura. O espaçamento entre fraturas é um parâmetro muito importante para a determinação da porosidade média do meio fraturado. No exemplo medido o valor resultante foi de 0,87 m para esta área.

Conclui-se ainda que a Formação Serra Geral, é um bom modelo análogo da porosidade por fratura para reservatórios vulcânicos fraturados das bacias marginais brasileiras.

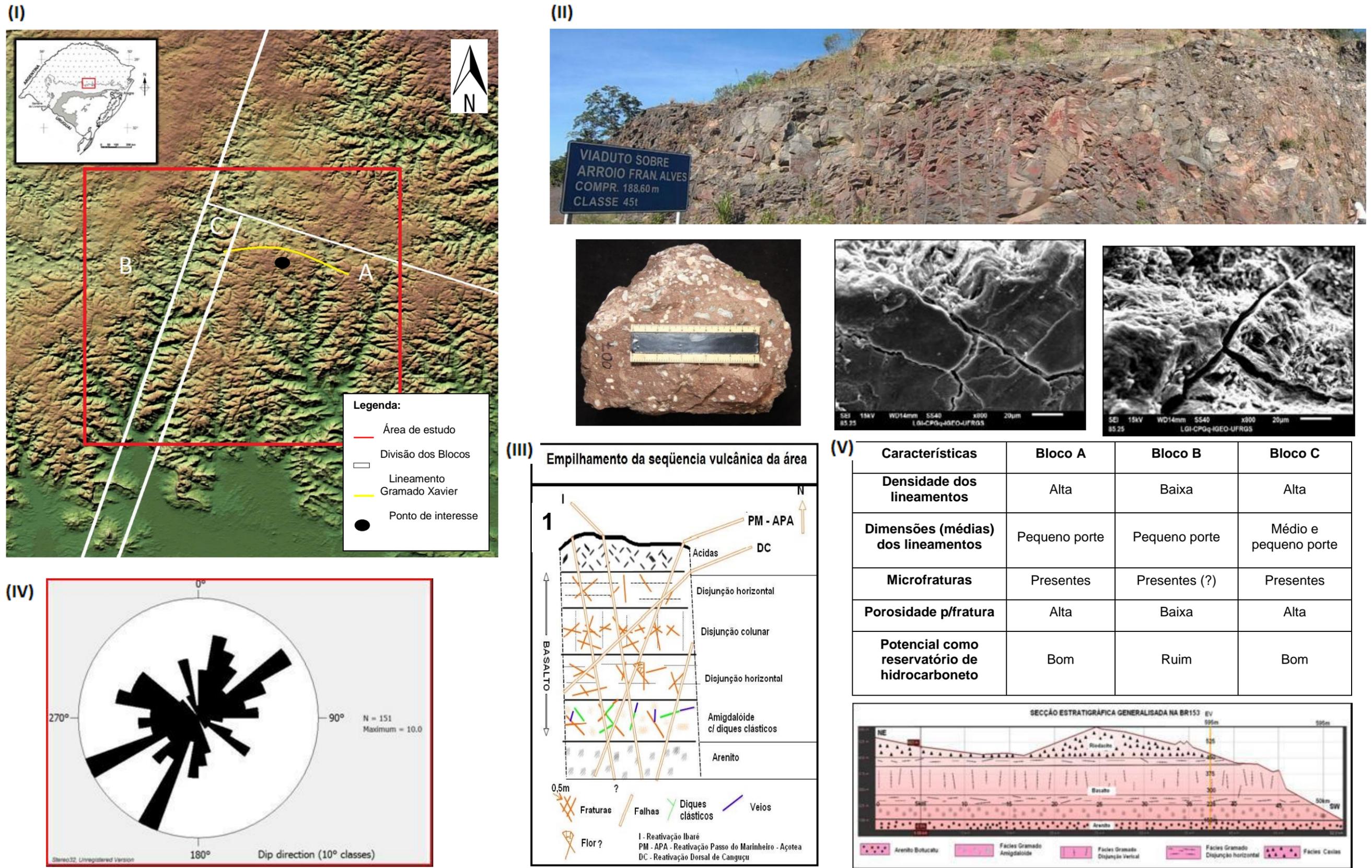


Figura 25 – Modelo integrado da área estudada. Fonte: Dados da Pesquisa (2015). No canto superior esquerda (I), área selecionada para o estudo, evidenciada pelo quadrado vermelho, com destaque para a divisão proposta dos blocos A, B e C, no canto superior direito (II) imagem de um dos afloramentos da área (Ponto 01), e suas amostras macro e MEV, no centro (III) Perfil estratigráfico esquemático da área pesquisada, no canto inferior esquerdo (IV) diagrama de roseta com as direções preferenciais de toda área pesquisada, no canto inferior direito, tabela das características dos Blocos propostos e perfil estratigráfico generalizado dos afloramentos da BR153. Fonte: Dados da Pesquisa (2015).

11 REFERÊNCIAS

- 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.
- 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.
- Artur, P.C., Soares, P.C. (2002). Paleoestruturas e petróleo na Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4):433-448.
- Attewell, P. B.; Woodman, J. P. (1969) Stability of Discontinuous Rock Masses Under Polyaxial Stress Systems In 13th Symposium on Rock Mechanics, Stability of Rock Slopes. ASCE, New York, p. 665 -683.
- Barton , C.A.; Zoback , M.D.; Moos, D. (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, 23(8): 683-686.
- 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, 117p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Blöcher, G., Cacace, M., Lewerenz, B., and Zimmermann, G. (2010). Three dimensional modelling of fractured and faulted reservoirs: Framework and implementation, *Chemie der Erde – Geochemistry*, 70, 145-153.
- Comin-Charamonti, P., Bellieni, G. & Piccirillo, E.M. (1988). Classification and petrography of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná basin (Brazil): petrogenetic and geophysical aspects. In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (Eds.). *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo, USP, p. 47-92.
- CPRM Mapa Geológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000. Serviço Geológico Brasileiro, Brasília, 2006, CD-Rom.
- Demek, J.; Kirchner, K.; Mackovèin, P.; Slavík, P. (2007). The map of morphostructures of the Czech Republic. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7:5-14.
- Demek, J. (1972). *Manual of detailed geomorphological mapping*. Prague Academie, 344 p.
- Ferrer, M. Y González de Vallejo, L., Eds. (1999). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. IGME. ISRM
- Fookes, P.G. and Parrish, D.G. (1969): "Observation of small-scale structural discontinuities in the London Clay and their relationship to regional geology," *Quarterly Journal of Engineering geology*, Vol.1, pp.217-240.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge. 463 pp.
- Frasca, A. A. & Lisboa, N. A., (1993). Contribuição do sensoriamento remoto na compartimentação morfotectônica e morfoestrutural da Bacia do Paraná, Grupo São Bento, RS. e suas relações com as estruturas regionais do embasamento. In: *Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto*, 7, Curitiba. Anais, v. 3, p. 211-220.

Gerasimov, I.P. (1946). Opyt geologičeskogo strojenija SSSR. Problemy fizičeskoj geografii.,12: 33-46.

Gerasimov, I.P.; Mescerjakov, J.A. (1967). Reljef Zemli (morfostruktura i morfoskulptura). Nauka, Moskva, p.1-311.

Giardin A. ; Faccini U. F. (2002). Heterogeneidades faciológicas e hidroestratigrafia do Aquífero Guarani na região central do Rio Grande do Sul: abordagem metodológica e resultados preliminares. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais, CD-ROM.

Gold, D. P.(1980). Structural geology. In: Siegal, Barry; Gillespie, Alan. Ed. remote Sensing in geology. New York: John Willey & Sons Inc. Cap. 13, P. 419-484.

Goodman, R. E. (1976). Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks,.West, St Paul.

Goudie (2004). Encyclopedia of Geomorphology.Routledge, London and New York.International Association of Geomorphologists. 1156p.

Gu, L., Zuowei, 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.

Gudmundsson, A., Berg, S.S., Lyslo, K.B., Skurtveit, E., (2001) . Fracture networks and fluid transport in active fault zones. J. Struct. Geol. 23, 343–353.

IBGE. (1986). Levantamento dos recursos naturais, geomorfologia, v.33, p.313- 388.

Kerr, P. F. (1977). Optical mineralogy. 4.ed. New York : Mcgraw-Hill, 1977. 492 p. : il.

Klein, C. & Dutrow, B. (2012). Manual de Ciências dos Minerais. 23ª ed

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.

Lisboa, N.A (1996). Fácies, estratificação hidrogeoquímica e seus controladores hidrogeológicos, em unidades hidrogeológicas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Paraná, Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Lisboa N. A.; Castro J. W. (1998). A Morfoestrutura Anelar do Lajeado Grande: Provável Foco de Extrusões Ácidas da Bacia do Paraná. In: Simpósio Sobre Vulcanismo e Ambientes Associados. Gramado, v.1 p. 9-9

Luca, P. H. V. ; Basilicli, G. (2008). Análogos de reservatórios de rampa de água profunda: sistemas ricos em lama (unidade de Apiúna-SC) e em areia (Formação Punta Negra, Pré-Cordilheira Argentina). Rev. bras. geociências., São Paulo, v. 38, n. 1,sup/1, pp 140-158.

Machado, J. L. F.. (2005). Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Magri, F., Akar, T., Gemici, U., Pekdeger, A., (2010). Deep geothermal groundwater flow in the Seferihisar–Balcova area, Turkey: results from transient numerical simulations of coupled fluid flow and heat transport processes. *Geofluids*.

Maliska AM. (2010). Microscopia eletrônica de varredura. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Materiais, Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens.

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, USP, p 1-13

Michelin, C. R.L (2014). *Ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (Rio Grande do Sul, Brasil) uma caracterização com base em técnicas estratigráficas, petrográficas, geoquímicas e isotópicas*. Tese de Doutorado – UFRGS.

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-ocidental*. 1997. 2 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

Milani, E. J. et al. (2007). Bacia Do Paraná. *Boletim de Geociências Da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, maio/nov.

Miranda, E. E. (2010). *Brasil em Relevô. Embrapa, monitoramento por satélite*.

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., 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.

Moeck, I., Schandelmeier, H., Holl, H.G. (2008). The stress regime in a Rotliegendes reservoir of the Northeast German Basin. *International Journal of Earth Sciences*, Online first.

Nanni, A. S.(2008). *O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico*. Tese de Doutorado em Geociências, Programa de Pós Graduação em geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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.

O'Leary, D.W., Friedman, J.D. ; Pohn, H.A. (1976). Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society American Bulletin*, 87: 1463-1469.

P'an, C. H. (1983). Petroleum in basement rocks. *AAPG Bulletin*, 66(10):1597-1643.

- Picada R.S. (1971). Ensaio sobre a tectônica do Escudo Sul-riograndense. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, São Paulo, Anais, 1:167-191.
- 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.
- Priest, S. D. (1975). Geotechnical Aspects of Tunnelling in Discontinuous Rock with Particular Reference to The Lower Chalk, Ph.d. Thesis. University of Durham, Durham, UK.
- Reis,G.S. (2013). A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) - como análogo para os reservatórios ígneo- básicos da margem continental brasileira (Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências).
- Reis, G. S. ; Mizusaki, A. M. P. ; Roisenberg, Ari ; Rubert, R. (2014). Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. Pesquisas em Geociências (UFRGS. Impresso), v. 41, p. 155-168.
- 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.
- Scheck-Wenderoth, M.; Krzywiec, P.; Maystrenko,Y.; ZÜHLKE, R., Froitzheim, N. (2008). Permian to Cretaceous tectonics of Central Europe. In: McCann, T.(Ed.), Geology of Central Europe, vol.2. Geological Society Special Publication, London, p.999–1030.
- 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.
- 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, SpecialPublication 68, p.181-185.
- 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.
- 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.
- Strugale, M., Rostirolla, S. P.; Mancini, F., Portela Filho, C. V. (2004). Compartimentação Estrutural das Formações Pirambóia e Botucatu na Região de São Jerônimo da Serra, Estado do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, vol. 34, p.303-316.
- 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.

Zalan, 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. In: Interior Cratonic Basins. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, Memoir 5 I, p.681-707.

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.

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.

Zalan, P.V.; Wolff, S.; Conceição, J.C.J.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T.; Zanotto, O. A.; Marques, Q. (1988). Tectonics and sedimentation of the Paraná basin. in: Simpósio do Gondwana, Anais. São Paulo.