

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO ESTRUTURAL DA FORMAÇÃO IRATI
(PERMIANO) APLICADA À MIGRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS NA BACIA DO
PARANÁ, REGIÃO DE RIO CLARO E IPEÚNA(SP)**

Viviane Barbosa Gimenez

Prof. Dr. Norberto Morales

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Rio Claro (SP)

2015

VIVIANE BARBOSA GIMENEZ

CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO ESTRUTURAL DA
FORMAÇÃO IRATI (PERMIANO) APLICADA À
MIGRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS NA BACIA DO
PARANÁ, REGIÃO DE RIO CLARO E IPEÚNA (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora

Norberto Morales (orientador)

Iata Anderson de Souza

João Paulo Picolini

Rio Claro, 23 de dezembro de 2015.

Assinatura da aluna

Assinatura do orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

VIVIANE BARBOSA GIMENEZ

CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO ESTRUTURAL DA
FORMAÇÃO IRATI (PERMIANO) APLICADA À
MIGRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS NA BACIA DO
PARANÁ, REGIÃO DE RIO CLARO E IPEÚNA (SP)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Rio Claro - SP

2015

551.8
G491c Gimenez, Viviane Barbosa
 Caracterização do padrão estrutural da Formação Irati (Permiano)
 aplicada à migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná, região de Rio
 Claro e Ipeúna (SP) / Viviane Barbosa Gimenez. - Rio Claro, 2016
 104 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas + 2 mapas

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual
Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Norberto Morales
Coorientador: George Luiz Luvizotto

1. Geologia estrutural. 2. Alto Estrutural de Pitanga. 3. Fraturas. 4.
Sistema petrolífero. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

*“The Road goes ever on and on
Down from the door where it began
Now far ahead the Road has gone,
And I must follow, if I can,
Pursuing it with eager feet,
Until it joins some larger way
Where many paths and errands meet
And whither then? I cannot say.*

*Still round the corner there may wait
A new road or a secret gate,
And though I oft have passed them by,
A day will come at last when I
Shall take the hidden paths that run
West of the Moon, East of the Sun.”*

J. R. R. Tolkien

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Programa de Recursos Humanos ANP/Petrobras (PRH-05) pelo apoio acadêmico e financeiro para a execução do presente projeto e ao professor, orientador e amigo Dr. Norberto Morales, por todos os dias de campo e de escritório, pelo imenso conhecimento compartilhado, pelos momentos de descontração e por todas as dicas e conselhos sempre fornecidos com muita paciência e serenidade. Agradeço também a toda a equipe e infraestrutura do UNESPetro pela total disponibilidade em me auxiliar quando foi necessário.

Um grande ciclo se encerra com o presente trabalho, e tamanha conquista jamais seria possível não fosse o amor, o apoio e o carinho da minha amada família. Portanto, agradeço imensamente aos meus geólogos preferidos e maiores exemplos de luta e superação na vida, meu pai Daniel e minha mãe Nara. Agradecimentos não menos especiais ao meu irmão Henrique, minha grande referência em companheirismo e amizade, aquele que compartilha de todos os meus medos e inseguranças, mas também dos momentos mais divertidos e felizes. Um menino-homem de coração imenso, cujos passos eu tive e tenho o prazer de acompanhar.

Agradeço de coração ao meu namorado Lucas, que não mediu esforços para me auxiliar na finalização deste trabalho mostrando-se presente a todo o momento, ainda que fisicamente distante. Por sempre acreditar no meu potencial e me dar forças todos os dias, transbordando carinho, amor e compreensão. Um homem exemplar e merecedor de todas as bênçãos do mundo!

Agradeço ao Prof. Dr. Mitsuru Arai pela prontidão em me auxiliar na análise microscópica do material de estudo com muita boa vontade e disposição e ao Prof. Dr. Dimas Brito por todas as ótimas dicas fornecidas nas aulas de Introdução ao Trabalho de Conclusão de Curso, no primeiro semestre deste ano. Dedico também imensa gratidão a todo o corpo docente da UNESP que me acompanhou ao longo de todos os anos de faculdade, por cada aula e por cada palavra ensinada. Obrigada a todos por me tornarem o que sou hoje, por me ensinarem o que agora sei. Deixo também meus sinceros agradecimentos a toda a equipe de trabalhadores da UNESP, por me fornecerem o espaço ideal de desenvolvimento pessoal e intelectual que integram essa universidade.

Aos amigos e colegas das duas turmas com os quais tive o prazer de conviver (especialmente minha turma de ingresso, de 2010), agradeço por cada momento

compartilhado, cada risada, cada tristeza, cada festa e cada hora de desespero nos trabalhos e dias de prova que pareciam intermináveis. Obrigada a todos os meninos da República Noea, ao Danilo e à Raquel (por todas as boas memórias que tenho de vocês), ao Defeito (minha referência quando penso no G1), ao Vinicius e a todos os outros que constituíram partes maiores ou menores da minha história neste lugar. E um obrigada mais que especial ao José Eduardo (Pantoja), pelas muitas horas de diversão acompanhadas de muito trabalho e companheirismo, mas principalmente por não medir esforços em me ajudar quando mais precisei. Queridos amigos que levarei comigo daqui e que terão sempre um espaço reservado em meu coração: obrigada por tudo!

Agradeço a Deus, enfim, por mais essa grande conquista, por mais um passo à frente no caminho da vida, pela dádiva de poder iniciar um novo capítulo da minha história ao lado de pessoas tão especiais.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.2.	Localização da Área de Estudo	3
2.	Geologia Regional	5
2.1.	Contexto Estratigráfico	6
2.1.1.	Grupo Itararé.....	7
2.1.2.	Formação Tatuí.....	8
2.1.3.	Formação Irati.....	9
2.1.4.	Formação Corumbataí	10
2.1.5.	Formação Pirambóia.....	11
2.1.6.	Formação Botucatu.....	12
2.1.7.	Formação Serra Geral e Intrusivas Associadas.....	13
2.1.8.	Formação Itaqueri.....	14
2.1.9.	Formação Rio Claro.....	15
2.2.	Contexto Estrutural.....	15
2.2.1.	Alto Estrutural de Pitanga.....	17
2.2.1.1.	Principais Estruturas.....	18
2.2.1.2.	Gênese e Evolução	18
2.3.	Contexto Geomorfológico	22
3.	Contextualização Teórica.....	25
3.1.	Sistemas Petrolíferos	25
3.2.	Fraturas e Migração de Hidrocarbonetos	29
3.3.	Influência do Magmatismo Básico na Maturação de Hidrocarbonetos	32
3.3.1.	Fazenda Betumita.....	35
3.3.2.	Alto Estrutural de Pitanga	37
4.	Materiais e Métodos	38
4.1.	Levantamento Bibliográfico.....	38
4.2.	Levantamento de Dados.....	38
4.2.1.	Análise Macroscópica	39
4.2.2.	Análise Mesoscópica.....	41

4.2.3. Análise Microscópica.....	42
4.3. Tratamento e Interpretação de Dados Estruturais	43
4.4. Integração dos Dados	44
5. Resultados	45
5.1. Análise Macroscópica.....	45
5.2. Análise Mesoscópica	48
5.2.1. Formas de Ocorrência de Hidrocarbonetos	48
5.2.1.1. Preenchimento de Fraturas	49
5.2.1.2. Preenchimento de Brechas Estruturais.....	51
5.2.1.3. Preenchimento de Cavidades	53
5.2.1.4. Impregnações no Acamamento (em poros)	54
5.2.2. Estereogramas.....	55
5.2.2.1. Fraturas	55
5.2.2.2. Falhas.....	58
5.2.2.2.1. Falhas Normais.....	58
A. Falhas Normais NW-SE	58
B. Falhas Normais NE-SW	60
C. Falhas Normais NW-SE (jovens)	62
5.2.2.2.2. Falhas Inversas	62
A. Falhas Inversas NW-SE	62
B. Falhas Inversas NE-SW.....	63
5.2.2.2.3. Falhas Transcorrentes Dextrais	64
5.3. Análise Microscópica	64
6. Discussões	67
6.1. Falhas Normais NW-SE.....	67
6.2. Falhas Normais NE-SW	70
6.3. Falhas Inversas NW-SE	74
6.4. Falhas Transcorrentes Dextrais NNE-SSW	75
6.5. Falhas Normais NW-SE (jovens)	76
6.6. Falhas Inversas NE-SW (jovens)	77
7. Conclusões	84
8. Referências Bibliográficas.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo, inserida na porção centro-leste do estado de São Paulo. Fontes: (A) Abreu (2006), acesso em 25 Abr 2015 e (B) Google Earth, acesso em 25 Abr 2015.	3
Figura 2: Principais acessos à área de estudo. Fonte: Google Maps, acesso em 25 Abr 2015.	4
Figura 3: Mapa de localização da Bacia do Paraná na América do Sul (SIQUEIRA, 2011).	5
Figura 4: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região do município de Rio Claro (SP), retirada de Perinotto & Zaine (2008), modificado de Soares & Landim (1975). ...	6
Figura 5: Mapa geológico simplificado da região de estudo, mostrando intenso controle estrutural das unidades estratigráficas da bacia (adaptado de ANDRADE & SOARES, 1974 por SIQUEIRA, 2011)	17
Figura 6: Divisão Geomorfológica do Estado de São Paulo (ALMEIDA, 1964), com destaque para a área de estudo inserida na Zona do Médio Tietê (1), Depressão Periférica (III).	22
Figura 7: Esquema básico de um sistema petrolífero e seus principais elementos e processos (modificado de UNDIP, 2011) < https://smiatmiundip.wordpress.com/2011/05/01/basic-petroleum-system/ >	26
Figura 8: Janelas de formação de óleo e gás e principais processos envolvidos (RUBO, 2015). < http://rafaelrubo.esy.es/geologia/petroleo/origem.html >	27
Figura 9: Variação da permeabilidade em falhas de acordo com diferentes estágios de evolução, do menos desenvolvido à esquerda ao mais evoluído à direita (FERNANDES, 2008).	30
Figura 10: Relação entre abertura, espaçamento e condutividade hidráulica em um grupo de fraturas lisas e paralelas (FERNANDES, 2008)	30
Figura 11: Diques afetando rochas geradoras de petróleo, promovendo migração e escape de hidrocarbonetos na superfície (migração terciária) (modificado de MAGOON & DOW, 1994).	33
Figura 12: Idades principais das rochas intrusivas básicas e alcalinas obtidas por datações radimétricas K/Ar e suas relações com o tempo geológico (THOMAZ-FILHO et al. 2008)	33
Figura 13: Principais exsudações de óleo na região do Domo de Anhembi associados a diques de diabásio (THOMAZ-FILHO et al., 2008).	36
Figura 14: Seção geológica e esquema de migração do óleo gerado na Formação Irati para a Formação Pirambóia no Domo de Anhembi (THOMAZ-FILHO et al., 2008)	37

Figura 15: Exemplo de imagem SRTM utilizada na análise macroscópica da área de estudo. Fonte: Embrapa, 2015.	39
Figura 16: Mosaico de imagens Astrium (CNES) na escala 1:25.000 referentes à área de estudo. Fonte: Google Earth.....	40
Figura 17: Imagem de satélite retirada do Google Earth contendo a área de estudo e os 49 afloramentos visitados na região	41
Figura 18: Vista geral da principal cava estudada, Pedreira Bonança (Ipeúna- SP). .	42
Figura 19: Conjunto de seis amostras selecionadas para laminação	42
Figura 20: Mapa de lineamentos na escala 1:250.000 e diagramas de roseta	46
Figura 21: Mapa de lineamentos na escala 1:25.000 e diagramas de roseta	47
Figura 22: Afloramento mostrando contato (em vermelho) entre as sequências basal e superior da pedreira. Atentar para o intenso fraturamento restrito à porção basal, marcado principalmente por fraturas ramificadas (em amarelo). Poucas fraturas se prolongam até a zona superior, cuja reologia permite que a deformação seja acomodada.	49
Figura 23: Fraturas abertas preenchidas por hidrocarbonetos	50
Figura 24: (A) Plano de fratura preenchido por hidrocarbonetos; (B) Fratura semi-aberta preenchida por betume; (C) Rede de fraturas condutoras de material asfáltico (em amarelo) e acumulação local em zonas permo-porosas do calcário (em vermelho).	50
Figura 25: Preenchimento típico de fraturas por material asfáltico (betume)	51
Figura 26: (A) Amostra de brecha com cristais de calcita impregnados por betume; (B, C) Zonas brechadas em afloramentos preenchidas por hidrocarbonetos; (D) Brecha em afloramento (traço em amarelo) mostrando fragmentos de rocha com “manchas” de material orgânico.	52
Figura 27: (A) Bolha de betume aprisionada em cavidade na rocha; (B e C) Cavidades vazias e cavidades preenchidas por material asfáltico, respectivamente; (D e F) Cavidades completamente preenchidas em afloramentos; (E) Cavidades impregnadas por betume em amostra de mão.	53
Figura 28: (A) Impregnação de betume ao longo do acamamento, mostrando feições de exsudação por escorrimento; (B, C, D e E) Acumulações de hidrocarbonetos restritas a zonas de mais alta permo-porosidade nas camadas calcárias.	54
Figura 29: Estereograma total contendo as medidas realizadas em todas as unidades litoestratigráficas da região.	55
Figura 30: Estereogramas com as medidas de fraturas das unidades litoestratigráficas descritas.	56
Figura 31: Estereogramas com as medidas de fraturas das unidades litoestratigráficas descritas.	57

Figura 32: Estereogramas com todas as medidas de fraturas na Formação Irati com as fraturas preenchidas por hidrocarbonetos na mesma unidade.	57
Figura 33: Estereogramas de contorno das falhas normais (63 medidas), falhas inversas (9 medidas) e falhas transcorrente dextrais (3 medidas) descritas na área.	58
Figura 34: Estereograma com dados de falhas normais NW-SE e diagrama de roseta. Direção média: N37W.	59
Figura 35: Estereograma com as direções NW-SE dos quatro diques de diabásio medidos na região estudada	59
Figura 36: Falha normal NW-SE em afloramento da Formação Corumbataí bordejando dique de diabásio, rodovia Ipeúna-Charqueada.	59
Figura 37: Esquema evolutivo de afloramento das Formações Corumbataí, Pirambóia e Rio Claro, evidenciando preenchimento de falha NW-SE por dique de diabásio, Rodovia Ipeúna-Araras.	60
Figura 38: Estereograma com dados de falhas normais NE-SW e diagrama de roseta. Direção média: N46E.	60
Figura 39: (A,B) Estrias de falhas normais NE-SW em afloramentos da Formação Tatuí (direção em amarelo); (C) Planos de falhas normais NE-SW em siltitos da Formação Tatuí (marcados em amarelo).	61
Figura 40: (A) Estrias de falhas em afloramento de diabásio (direção marcada em amarelo), Pedreira Partecal (Assistência-SP); (B) Estrias de falha em amostra de diabásio preenchida por hidrocarbonetos, Pedreira Partecal (Assistência-SP).	61
Figura 41: Estereograma com dados de falhas normais NW-SE jovens e diagrama de roseta. Direção média: N15W.	62
Figura 42: Estereograma com dados de falhas inversas NW-SE e diagrama de roseta. Direção média: N34W.	62
Figura 43: Conjunto de falhas de empurrão afetando soleira de diabásio e as rochas da Formação Irati, Pedreira Partecal (Assistência-SP).	63
Figura 44: Estereograma com dados de falhas inversas NE-SW e diagrama de roseta. Direção média: N56E.	63
Figura 45: Estereograma com dados de falhas transcorrentes NNE-SSW e diagrama de roseta. Direção média: N22E.	64
Figura 46: (A) Falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW em calcários da Formação Irati (destaque em amarelo, Pedreira Bonança (Ipeúna-SP); (B) Plano de falha transcorrente dextral em afloramento da Formação Corumbataí, com estrias marcadas em amarelo e indicando movimentação subhorizontal (rodovia Ipeúna-Charqueada).	64
Figura 47: Mancha esférica de betume impregnado em “vug” de calcita e quartzo (A. foto tirada sob luz branca transmitida; B. foto sob luz azul fluorescente).	65

Figura 48: Microfratura preenchida por hidrocarbonetos (A e B) e gotículas de betume acompanhando veios de calcita (C, D, E e F) (A, C e E. fotos tirada sob luz branca transmitida; B, D e F. fotos sob luz azul fluorescente).....	66
Figura 49: Posição relativa da América do Sul e África durante o período de abertura do Oceano Atlântico Sul e magmatismo toleítico associado (modificado de MISUSAKI et al., 1998; retirado de MISUZAKI & THOMAZ-FILHO, 2004).	68
Figura 50: Junção tríplice do sudeste do Brasil, mostrando traços principais NW-SE para os lineamento associados ao Arco de Ponta Grossa (COUTINHO, 2008).	68
Figura 51: Diagrama de paleotensões para as falhas normais NW-SE associadas aos diques de diabásio na região, indicando distensão ao longo do eixo NE-SW.	69
Figura 52: Arcabouço tectônico da Bacia do Paraná, com enfoque para os lineamentos NE-SW da bacia (MARQUES et al., 1993, extraído de MILANI, 2004).	70
Figura 53: Diagrama de paleotensões para as falhas normais NE-SW, indicando distensão no eixo NW-SE.	71
Figura 54: Esboço paleotectônico dos dois primeiros estágios da evolução do segmento central do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RICCOMINI et al., 2004).	72
Figura 55: Esboço paleotectônico do segundo estágio da evolução do segmento central do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RICCOMINI et al., 2004).	73
Figura 56: Diagrama de paleotensões para as falhas inversas NW-SE, indicando compressão no eixo NE-SW	74
Figura 57: Diagrama de paleotensões para as falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW, indicando compressão ao longo do eixo NE-SW e distensão NW-SE.	75
Figura 58: Esquema mostrando a possibilidade de desenvolvimento de falhas transcorrentes dextrais em um sistema transcorrente sinistral a aproximadamente 30° da direção do SH máximo compressivo.	76
Figura 59: Diagrama de paleotensões para as falhas normais NW-SE mais jovens, indicando distensão ao longo do eixo NE-SW	76
Figura 60: Diagrama de paleotensões para as falhas inversas NE-SW, indicando compressão no eixo NW-SE.	77
Figura 61: Esboço paleotectônico do terceiro estágio da evolução do segmento central do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RICCOMINI et al., 2004).	77
Figura 62: Quadro síntese da evolução tectônica da região estudada em etapas.	76
Figura 63: Tabela de eventos mostrando a relação entre os principais processos e elementos do sistema petrolífero relacionado à Formação Irati na região, bem como o tempo de preservação e o momento crítico associado (na escala de tempo utilizada, o Neógeno (N) inclui o período Quaternário). Baseada em Magoon & Dow (1994).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Síntese evolutiva da região do Alto Estrutural de Pitanga por Riccomini (1995), destacando a importância de esforços tectônicos transcorrentes na estruturação regional, baseada em Siqueira (2011). **20**

Tabela 2: Síntese evolutiva da região do Alto Estrutural de Pitanga por Sousa (2002), destacando a importância de esforços tectônicos extensionais na estruturação regional. **21**

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1: Mapa Geológico da Região (baseado em SOUSA, 2002)..... **103**

APÊNDICE 2: Mapa de Afloramentos..... **104**

RESUMO

A região do Alto Estrutural de Pitanga tem sido alvo de inúmeros estudos geológicos desde 1920, motivados pelo complexo contexto estrutural e sua relação com exsudações naturais de óleo e gás descritas na região desde o final do século XIX. Tal contexto associa-se às sequências paleozoicas (Grupo Itararé, formações Tatuí, Irati e Corumbataí), mesozoicas (formações Pirambóia, Botucatu e intrusivas básicas correlatas da Formação Serra Geral) e cenozoicas (Formação Rio Claro) da Bacia do Paraná, com destaque para os folhelhos pirobetuminosos da Formação Irati que apresentam conteúdo orgânico dos mais elevados já registrados no planeta, alcançando até 23% na porção sul da bacia (MILANI, 2007). Essa condição ressalta sua importância como potencial rocha geradora, fazendo-se necessário o completo entendimento de suas relações com os eventos tectônicos no Alto Estrutural de Pitanga e o papel das estruturas rúpteis na migração de hidrocarbonetos no sistema petrolífero Irati-Pirambóia, um sistema atípico, cuja maturação orgânica depende do calor fornecido pelas intrusivas. Com base nos parâmetros mencionados, foram propostas as seguintes questões: existem direções preferenciais de percolação de hidrocarbonetos na Formação Irati ou esta se dá de forma aleatória? Se existirem, quais suas principais características e o que representam na evolução geológica local? Para responder a estas questões, foi realizada uma análise estrutural detalhada nas escalas macro, meso e microscópica, com enfoque na identificação dos padrões de fraturamento e caracterização dos diferentes conjuntos de estruturas ali presentes (preenchidas ou não por hidrocarbonetos), atentando ainda à existência de trapas estruturais que viabilizem a retenção local de material orgânico.

Sendo assim, foram caracterizadas duas famílias principais de fraturas na região, com direções NW-SE e NE-SW, sendo os lineamentos NW-SE mais importantes em escala macroscópica, associados ao evento Juro-Cretáceo de abertura do Atlântico-sul e intrusão de diques e soleiras. Esperava-se que o evento principal de migração fosse contemporâneo à geração dos hidrocarbonetos, ocorrendo, portanto, ao longo das estruturas NW-SE associadas aos diques; no entanto, foi constatada uma família preferencial de migração NE-SW, provavelmente relacionada aos estágios iniciais de evolução do Sistema de Riftes do Sudeste, do Paleogeno ao Mioceno. O alto número de fraturas NE-SW preenchidas por hidrocarbonetos estaria associado à abertura das estruturas por uma distensão inicial NW-SE, seguida por uma transcorrência sinistral E-W, indicando distensão NW-SE e compressão NE-SW, responsável não apenas pela abertura das estruturas NE-SW, mas também pelo fechamento de grande parte das NW-SE. Constataram-se então dois eventos principais de

migração: um inicial NW-SE, concomitante a geração dos hidrocarbonetos; e um principal NE-SW, associado à abertura das mesmas e fechamento das NW-SE. Foram descritas quatro principais formas de ocorrência de hidrocarbonetos: preenchendo fraturas, brechas estruturais, cavidades e ao longo dos planos de acamamento. No entanto, os principais fatores que limitam o potencial petrolífero do Alto Estrutural de Pitanga como armadilha de hidrocarbonetos correspondem aos baixos gradientes geotérmicos alcançados pela rocha geradora; a contemporaneidade entre geração e migração inicial, que pode ter ocasionado perdas por falta de sincronismo; e a exumação e erosão das rochas do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Alto Estrutural de Pitanga; Formação Irati; migração; fraturas; sistema petrolífero;

ABSTRACT

The region of Pitanga Structural High has been the target of numerous geological surveys since 1920, due to its complex structural settings and its relation to the natural occurrences of oil and gas described in the region since the end of XIX century. This context affects the paleozoic sequences of the Parana Basin (Itarare Group, Tatuí, Irati and Corumbataí formations), as well as the Mesozoic (Pirambóia and Botucatu formations, and the basic intrusions related to the Serra Geral Formation) and Cenozoic (Rio Claro Formation), with special emphasis on the pirobetuminous shales of Irati formation, which present one of the highest organic contents ever described on Earth, even reaching 23% in the southern portions of the basin (MILANI, 2007). This condition reaffirms its importance as a potential source rock and the needs of reaching a complete understanding of its relations to the tectonic events of Pitanga Structural High, as well as the role of ruptile structures on hydrocarbon migration in the Irati-Pirambóia petroleum system, an atypical system in which organic maturation depends on the heat provided by igneous intrusions. Considering the mentioned parameters, the following questions were proposed in this study: are there any preferential trends for hydrocarbon migration on Irati Formation or is it a random process? If it is not, then what are the trend(s) main features and how can it relate with the geological evolution of the area? In order to answer these questions, a detailed structural analysis was conducted in macro, meso and micro-scales, focusing on the identification of fracture patterns and characterization of the various structural trends in the outcrops (filled or not by

hydrocarbons), also attempting to find any signs of structural traps that may have locally retained organic material.

Two main fracture directions were identified in the region, with trends NW-SE and NE-SW, being the NW-SE the most important structural lineaments in macroscopic scale, associated to the Jurassic-Cretaceous event of southern-Atlantic opening and intrusion of dykes and sills in the basin. It was expected that the main migration event was contemporaneous to hydrocarbon generation, therefore occurring along the NW-SE structures related to the dykes; however, the main preferential trend of migration is NE-SW, probably associated to the early stages of evolution of the Continental Rift of Southeastern Brazil, in the Paleogene and Miocene periods. The high number of fractures NE-SW filled with hydrocarbons would be related to the opening of structures due to an initial NW-SE distension, followed by a sinistral transurrence E-W, indicating distension NW-SE and compression NE-SW, responsible not only for the opening of NE-SW structures, but also for closing the NW-SEs. Two main migration events were identified: an initial one NW-SE, synchronous with the hydrocarbon generation event; and one major NE-SW, associated to the opening of these structures and closing of the NW-SE ones. Four main forms of hydrocarbon occurrences were described in the region: filling fractures, in structural breccia, in cavities and along the bedding planes. However, the most relevant factors which limit the potential of Pitanga Structural High as a trap structure in the associated petroleum system correspond to the low geothermal gradients to which the source rocks were exposed; the contemporaneity between generation and initial migration, which may have incurred in losses due to lack of synchronism; and the exhumation and consequent erosion of the rocks in the system.

KEYWORDS: Pitanga Structural High; Irati Formation; migration; fractures; petroleum system;

1. Introdução

A complexa relação entre estruturas tectônicas e geologia do petróleo tem sido amplamente discutida desde a década de 1970, quando Harding (1974) e Harding & Lowell (1979) caracterizaram de forma detalhada diversos mecanismos de migração de hidrocarbonetos por meio de falhas e fraturas, bem como sua retenção em trapas estruturais formadas por associações entre falhas, dobras e estruturas dômicas, por exemplo. Atualmente, tem-se como um consenso que a presença de padrões estruturais é indispensável dentro de um sistema petrolífero bem sucedido no acúmulo de petróleo.

Segundo Milani et al. (2000), os primeiros registros históricos de prospecção de hidrocarbonetos no Brasil datam de 1858, em sua maioria relacionados a betume, carvão e turfa. Nessa época, diversas regiões do país foram selecionadas para pesquisa com base em exsudações de hidrocarbonetos, com alvos importantes nos estados da Bahia, São Paulo, Paraná e Santa Catarina. Entre os anos de 1872 e 1874, foram registradas diversas concessões de áreas potenciais no interior do Estado de São Paulo, nas proximidades da cidade de Rio Claro, nas quais se verificou a presença de exsudações de óleo e gás natural e cuja localização engloba a área de estudo do presente trabalho.

Devido a sua importância histórica no contexto prospectivo de petróleo, tal região concentra uma grande quantidade de estudos estruturais desde a década de 1920, principalmente motivados pela complexidade de seu contexto tectono-estratigráfico relacionado ao domínio do Alto Estrutural de Pitanga. Interpretado inicialmente pela Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo (ALMEIDA & BARBOSA, 1953) como uma estrutura anticlinal no vale do rio Corumbataí, sua origem foi amplamente discutida por diversos autores: Moraes Rego (1930), Oppenheim & Malamphy (1936), Soares (1974), Fulfaro et al. (1982), Riccomini et al. (1991) relacionaram-na a dobras e/ou falhas; Andrade & Soares (1971) definiram-na como resultante dos sistemas de falhas Rio das Pedras-Piracicaba-Ipeúna (direção aproximada N10°W) e Passa Cinco-Cabeças (N45°W); Sousa (1997, 2002) definiu a estrutura como uma feição assimétrica, cujo flanco oeste é marcado por falhas normais e o flanco leste por uma leve inclinação de camadas.

Tal contexto estrutural afeta as sequências da Bacia Sedimentar do Paraná, representadas na região por unidades paleozóicas (Grupo Itararé, formações Tatuí, Irati e Corumbataí) e mesozóicas (formações Pirambóia e Botucatu), associados a rochas básicas intrusivas na forma de diques e sills, correlatos da Formação Serra Geral. Tais unidades

apresentam um intenso controle por falhas, gerando blocos abatidos ou soerguidos que proporcionam a existência de unidades mais jovens ao lado de outras mais antigas (SOUZA & MORALES, 1999).

Inserido no contexto mencionado, destaca-se como objeto de estudo deste trabalho o membro superior da Formação Irati, denominado Membro Assistência (BARBOSA & GOMES, 1958). A unidade é constituída por camadas centimétricas a métricas de calcário dolomítico intercaladas com níveis de folhelhos pretos pirobetuminosos (SCHNEIDER et al., 1974), frequentemente estudados devido a associação entre elevados teores de matéria orgânica quantitativa e a influência térmica local de sills e diques da Formação Serra Geral que permite caracterizá-los como potenciais geradores de hidrocarbonetos (DE SOUZA et al., 2002; DE SOUZA et al., 2004; CARVALHO LISBOA, 2004; COSTA, 2006;).

Considerando a existência de um sistema gerador associado a um complexo contexto estrutural marcado principalmente por falhas e fraturas, espera-se que ocorra migração do material orgânico por meio dos planos estruturais que afetam a região, considerando a alta eficiência de tais estruturas no transporte de hidrocarbonetos para reservatórios potenciais em níveis crustais superiores.

1.1. Objetivos

Com base nos parâmetros mencionados, são propostas, portanto, as seguintes questões: existem direções preferenciais de percolação de hidrocarbonetos ao longo da unidade estudada ou esta se dá de forma aleatória? Se existirem, quais suas principais características e o que representam na evolução geológica local?

As respostas a estas questões constituem os objetivos deste estudo, que visa principalmente à identificação dos padrões de fraturamento locais e a caracterização das diferentes famílias de fraturas ali presentes (preenchidas ou não por hidrocarbonetos), atentando ainda à existência de trapas estruturais que viabilizem a retenção local de material orgânico. Os resultados obtidos por meio de uma análise estrutural detalhada da Formação Irati com ênfase no transporte de hidrocarbonetos apresentam caráter inédito na região de estudo e certamente contribuirão para uma melhor compreensão do contexto tectono-estratigráfico local, bem como dos meios estruturais de migração e acumulação de hidrocarbonetos em sistemas petrolíferos.

1.2. Localização da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na porção centro-leste do estado de São Paulo, na região dos municípios de Rio Claro e Ipeúna (figura 1). Com área aproximada de 300 km², a área abrange os distritos de Assistência e Paraisolândia e é limitada pelas seguintes coordenadas UTM (Zona 23S, Datum WGS84): Vértice NW: 218065 (x) e 7517524 (y); Vértice NE: 238796 (x) e 7517940 (y); Vértice SE: 239333 (x) e 7503725 (y); Vértice SW: 218333 (x) e 7503159 (y).

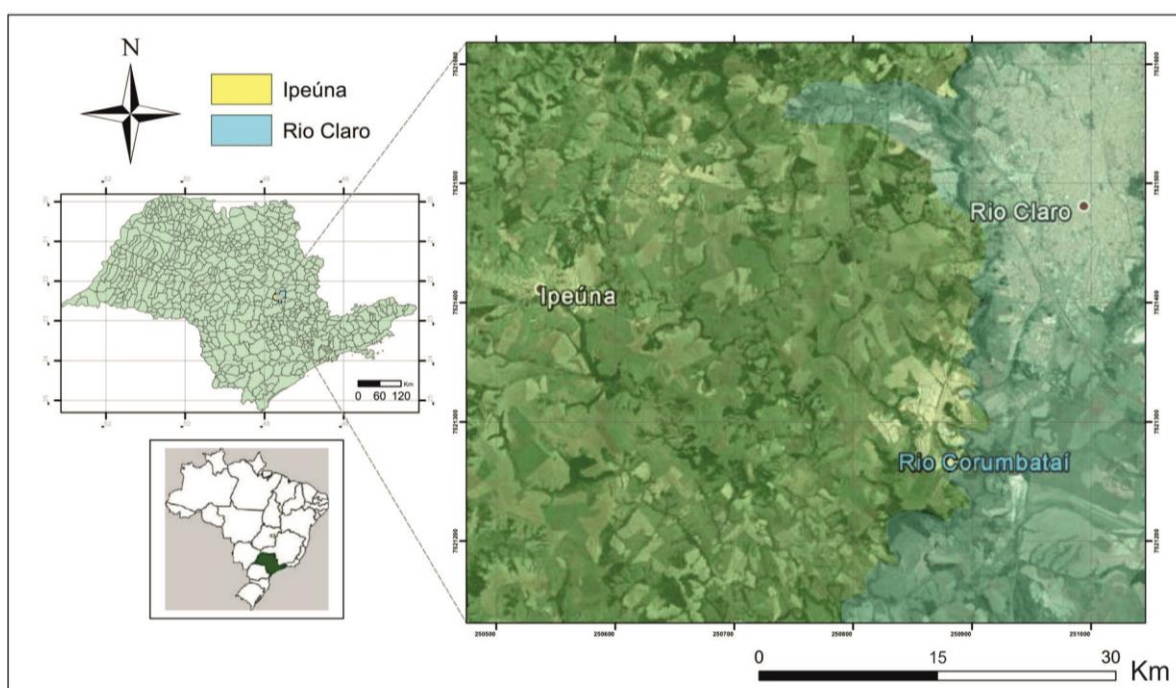


Figura 1: Localização da área de estudo, inserida na porção centro-leste do estado de São Paulo. Fontes: Abreu (2006), acesso em 25 Abr 2015 e Google Earth, acesso em 25 Abr 2015.

A região pode ser facilmente acessada por meio de rodovias a leste pela BR-364 e SP-127 e a oeste pela SP-191 (figura 2), estando ainda servida por diversas estradas de terra espalhadas por toda sua extensão. Com relação à hidrografia da área estudada, destacam-se o Rio Corumbataí e o Rio Passa-Cinco; o Rio das Cabeças encontra-se mais restrito à porção noroeste da área.

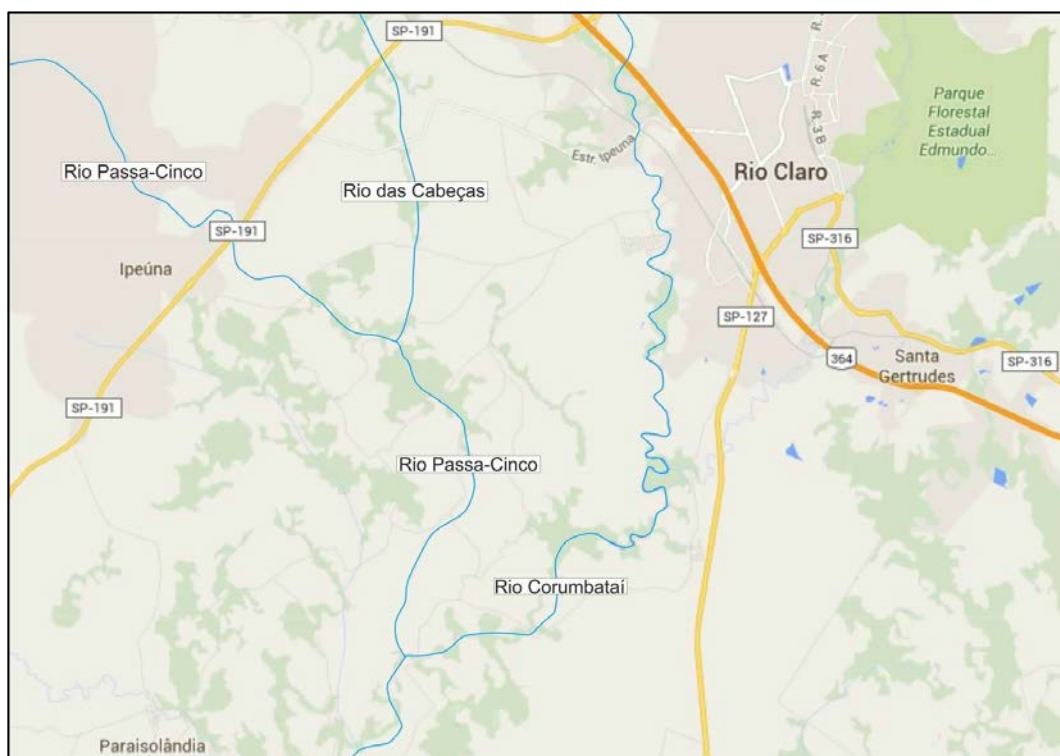


Figura 2: Principais acessos à área de estudo. Fonte: Google Maps, acesso em 25 Abr 2015.

2. Geologia Regional

A Bacia do Paraná corresponde a uma extensa região sedimentar de aproximadamente 1,5 milhão de quilômetros quadrados de área, localizada na porção centro-leste do continente sul-americano e distribuída em quatro países: Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai (figura 3). No Brasil, a Bacia do Paraná abrange os estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI, 2007; ZALÁN et al., 1987).

Corresponde a uma bacia sedimentar do tipo sinéclise intracratônica, geralmente associadas a processos de distensão continental, subsidência térmica e isostasia (KLEIN, 1995) e que em geral apresentam baixa influência de eventos tectônicos relacionados a margens de placa por situarem-se no interior de crátons ou áreas continentais, províncias tectonicamente estáveis. No entanto, tal condição não implica necessariamente um histórico evolutivo menos dinâmico ou complexo (MILANI & RAMOS, 1998). A bacia possui geometria ovalada com eixo maior N-S e é preenchida por cerca de 5.000 metros (alcançando até 7.000 metros, segundo Milani, 2007) de sedimentos paleozoicos, mesozoicos e cenozoicos, além das intrusões básicas associadas a sua evolução (SCHNEIDER et al., 1974).



Figura 3: Mapa de localização da Bacia do Paraná na América do Sul (SIQUEIRA, 2011).

2.1.Contexto Estratigráfico

As unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná aflorantes no estado de São Paulo, especificamente na região de Rio Claro e Ipeúna (SP) correspondem a sequências paleozoicas e mesozoicas cujas nomenclaturas estratigráficas baseiam-se em grande parte nas proposições como Almeida (1967), Schneider et al. (1974), Fulfaro et al. (1980), entre outros, sendo utilizada nesse trabalho a subdivisão de grupos e formações adotadas por Milani (2007). Abrangem as rochas do Grupo Itararé, Formação Tatuí (Grupo Palermo), Formação Irati, Formação Corumbataí, Formação Pirambóia, Formação Botucatu, Formação Serra Geral, Formação Itaqueri (Grupo Bauru) e Formação Rio Claro, bem como as coberturas cenozoicas presentes na região, conforme coluna estratigráfica da figura 4.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NA REGIÃO DE RIO CLARO/LIMEIRA/PIRACICABA (SP)							
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Aprox. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENOZOICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRE. COLUVIÕES
	NEÓGENO						
	PALEÓGENO		ITAQUERI		100	ARENITOS CONGLOMERÁTICOS E ARENITOS SILICIFICADOS / FERRICRETES	CONTINENTAL: LEQUES ALUVIAIS, FLUVIAL E LACUSTRE
MESOZOICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE. DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO	MAGMATISMO FISSURAL
			BOTUCATU		100	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E SEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA	CONTINENTAL: DESÉRTICO
	JURÁSSICO						
	TRIÁSSICO		PIRAMBÓIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS. DIVERSOS NÍVEIS DE LAMITOS	CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	CORUMBATAÍ		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMITICOS E COQUINAS	CONTINENTAL: LACUSTRE TRANSICIONAL: PLANÍCIE DE MARÉ
			IRATI Mb. Assistência Mb. Taquaral		40	FOLHELHOS, SILTITOS, FOLHELHOS PIROBETUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMITICOS	TRANSICIONAL: LAGUNA MARINHO RASO: PLATAFORMA
		ITARARÉ	TATUI		50	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS	TRANSICIONAL: PLANÍCIE COSTEIRA MARINHO RASO: PLATAFORMA
			Grupo ITARARÉ (indiviso no Estado de São Paulo)		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS TILITOS)	CONTINENTAL (GLACIAL): ALUVIAL - LEQUES E FLUVIAL; LACUSTRE TRANSICIONAL: DELTAS MARINHO (GLÁCIO-MARINHO): PLATAFORMAL
	CARBONÍFERO						
Pré-Cambriano			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS	

Figura 4: Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região do município de Rio Claro (SP), retirada de Perinotto & Zaine (2008), modificado de Soares & Landim (1975).

2.1.1. Grupo Itararé

O Grupo Itararé corresponde a uma unidade permo-carbonífera aflorante em uma faixa marginal com cerca de 80 quilômetros de largura no Estado de São Paulo, com destaque para sua exposição na região do Alto Estrutural de Pitanga no fundo dos vales dos rios Passa Cinco e Corumbataí. Possui espessura de aproximadamente 1.400 metros na porção sudoeste do Estado e se adelgaça na direção nordeste (ZAINÉ, 1994).

Constitui a base da coluna estratigráfica da região (figura), além e é representada principalmente por diamictitos, arenitos brancos, avermelhados e arroxeados de granulometria variável de fina a conglomerática, lamitos, folhelhos e ritmitos associados a sistemas glaciais de deposição e que constituem pacotes de grande extensão e espessura passíveis de definição e mapeamento (SCHNEIDER et al., 1974). A presença de seixos, matacões e blocos em geral transportados por geleiras é comum ao longo de todo pacote, bem como camadas de carvão descritas por Saad (1977) e Fulfaro et al. (1980).

A unidade não apresenta registros paleontológicos abundantes, embora possam ocorrer gastrópodos, lamelibrânquios e braquiópodos relacionados ao ambiente marinho; restos vegetais fósseis são descritos com maior frequência na região. Registros de pistas de invertebrados aquáticos bentônicos denominados icnofósseis nos planos de estratificação das rochas são frequentes, encontrados principalmente nos varvitos da região de Itu (ROCHA-CAMPOS, 2000). Em termos de paleoambiente e processos de deposição, tem-se uma primeira fase marcada por deposição glacial continental, de alta energia, evoluindo por meio de incursões marinhas associadas a um ambiente deltaico/plataformar marcado pela presença de fluxos de massa subaquosos e turbiditos (ZAINÉ, 1994).

O primeiro trabalho relacionado à unidade a denominava “Série” Itararé (OLIVEIRA, 1916 apud SCHNEIDER et al., 1974), sendo a mesma considerada um grupo apenas a partir de Gordon Jr. (1947) e Maack (1947, apud SCHNEIDER et al., 1974), embora tal denominação ainda não seja um consenso atualmente. Segundo Schneider (1974), a unidade é subdividida em quatro formações: Campo do Tenente, Aquidauana, Mafra e Rio do Sul; dentre elas, apenas a Formação Aquidauana ocorre localmente no nordeste do estado de São Paulo, mostrando-se interdigitada ou localmente discordante com o restante dos pacotes (ARAÚJO, 2013). É comum a referência ao Grupo Itararé como uma unidade indivisa na região, cuja deposição é posicionada no fim do Carbonífero Superior (entre o Stephaniano e

Westphaliano) ao topo do Permiano Inferior (DAEMON & QUADROS, 1970; SOUZA et al. 1990).

2.1.2. Formação Tatuí

Estendendo-se por uma faixa de afloramentos de até dez quilômetros de largura no estado de São Paulo (LANDIM et al., 1980), a Formação Tatuí apresenta espessura média de 40 metros na região do Alto Estrutural de Pitanga, onde aflora principalmente no baixo vale dos Rios Passa Cinco, Corumbataí e Cabeça (SEPE, 1990). A unidade corresponde à Formação Palermo descrita em Schneider et al. (1974), que considera a espessura máxima da unidade na região de até 50 metros.

A unidade é constituída predominantemente composta por lamitos e siltitos maciços de coloração verde, creme e marrom, podendo ocorrer ainda sequências mais localizadas de arenitos finos a conglomeráticos (ZAINÉ, 1994). É comumente dividida em dois membros (SOARES, 1972); o inferior é marcado por pacotes de coloração vermelha e chocolate, e o superior por sequências cinza e esverdeadas com eventuais lentes carbonosas de cor preta, sugerindo um contato transicional para ambientes mais redutores da base para o topo da unidade. Na região de Ipeúna, os arenitos foram reconhecidos como reservatórios de material orgânico do tipo arenito asfáltico ou betuminoso, em blocos estruturais elevados situados acima dos folhelhos e calcários da Formação Irati (AQUAROLI, 2013; MORALES et al., 2014).

Para Fulfaro et al. (1984) e Perinotto (1987), o paleoambiente de deposição da Formação Tatuí é caracterizado como plataformar marinho costeiro, associado a sistemas de leques deltaicos mais localizados; Schneider (1974) estabelece uma história deposicional em ambiente marinho transgressivo associado a águas rasas, abaixo do nível de ação das ondas.

Apresenta contato basal com o Grupo Itararé geralmente concordante, embora limites discordantes entre as unidades também sejam descritos no estado de São Paulo (SCHNEIDER et al., 1974). O contato superior com a Formação Irati é marcado por níveis de arenitos grossos e conglomeráticos com clastos de sílex usualmente denominados “fácies Ibicatu”, correspondentes a um trato de sistemas de mar alto relacionado à progradação de leques aluviais costeiros sobre uma plataforma marinha dominada por marés (ASSINE et al., 2003). Os principais tipos fósseis encontrados na unidade correspondem a troncos silicificados de *Dadoxylon* sp. e palinóforos (SCHNEIDER et al., 1974).

2.1.3. Formação Irati

A unidade corresponde a um “horizonte-guia” no contexto estratigráfico da Bacia do Paraná, cuja deposição está associada a um período de grande estabilidade tectônica. Dentre as demais unidades da bacia, a Formação Irati é a que apresenta maior identidade e homogeneidade em sua área de ocorrência (GAMA JR et al., 1982), com espessura média próxima a 40 metros (SCHNEIDER et al., 1974). Na região, apresenta exposições importantes próximas ao distrito de Assistência, a sul do município de Rio Claro (SP). É dividida em dois membros, o Membro Taquaral e o Membro Assistência; o primeiro está relacionado a um pacote de folhelhos e siltitos na base da formação, enquanto que o segundo corresponde a intercalações entre folhelhos cinzas, folhelhos pretos pirobetuminosos e bancos de calcário associados (BARBOSA & GOMES, 1958 apud SCHNEIDER, 1974). Schneider (1974) relaciona a unidade ao ápice do evento transgressivo associado ao permo-carbonífero da Bacia do Paraná, marcado por um paleoambiente marinho de águas calmas para a base e marinho plataformar de águas rasas no topo. Já Perinotto (1991) apresenta outra hipótese, considerando as sequências da Formação Tatuí e Membro Taquaral como representantes do ápice da transgressão marinha no período em vez da Formação Irati como um todo.

A Formação Irati constitui junto a Formação Corumbataí o Grupo Passa Dois (MENDES, 1967) na região e foi inicialmente descrita por White (1908 apud SCHNEIDER, 1974) como a “sequência de folhelhos com restos do réptil *Mesosaurus brasiliensis* que aflora na cidade homônima do Paraná”. *Mesosaurus brasiliensis* e *Stereosternum tumidum* correspondem aos principais registros fósseis do Membro Assistência, enquanto que no Membro Taquaral são comuns os restos de peixes, de crustáceos do gênero *Clarkecaris* e da flora *Dadoxylon* (SCHNEIDER et al., 1974). Daemon & Quadros (1970) estabeleceu idade Permiano Superior (Kanzaniano) para a sedimentação da Formação Irati por meio de análises palinológicas. No entanto, estudos mais recentes baseados em datações geocronológicas de zircões em cinzas vulcânicas encontradas na unidade mostram idade neo-Artinskiana para a mesma (SANTOS et al., 2006).

O Membro Taquaral está presente ao longo de toda a bacia, apresentando um conjunto de folhelhos e siltitos acinzentados, frequentemente marcados por laminações paralelas e espessura média de 10 a 20 metros. O contato inferior com a Formação Tatuí mostra-se concordante em grande parte da bacia (SCHNEIDER et al., 1974); no estado de São Paulo, porém, uma sequência discordante composta por arenitos grossos e conglomerados

associados à transgressão da linha de costa na bacia marca a zona de contato e é informalmente denominado “fácies Ibicatu” (ASSINE et al., 2003). Segundo Fulfaró et al. (1984) e Stevaux et al. (1986), sua gênese está associada a um trato deposicional formado por leques deltaicos originados no Alto de Ibicatu a norte, gradando lateralmente para barras de maré (depósitos litorâneos) e sequências plataformais com sedimentação pelito-carbonática a sul. Já Assine et al. (2003) propõe associar o nome “Ibicatu” apenas aos depósitos conglomeráticos e arenitos grossos do topo da Formação Tatuí, restringindo tal denominação aos conglomerados relacionados ao evento transgressivo que culminou na deposição da Formação Irati. O contato superior do Membro Taquaral com o Membro Assistência é concordante em toda a região (SCHNEIDER et al., 1974). De maneira geral, os processos deposicionais do membro estão associados a um paleoambiente marinho de águas calmas, abaixo do nível de atuação das ondas.

O Membro Assistência também se mostra presente em toda a bacia, apresentando espessura média de 30 metros na região e constituindo uma sequência de folhelhos cinza e folhelhos pretos pirobetuminosos relacionados a bancos calcários frequentemente dolomíticos do topo da Formação Irati (SCHNEIDER et al., 1974). Intercalações centimétricas a métricas entre camadas de folhelho e calcário são características do membro; em termos de estruturas deposicionais, os folhelhos apresentam frequentes laminações paralelas, enquanto que nos calcários são comumente descritas marcas ondulares, oólitos, brechas intraformacionais, laminações cruzadas, convolutas e algálicas. Ambos os contatos inferior com o Membro Taquaral e superior com a Formação Corumbataí são concordantes (SCHNEIDER et al., 1974), embora o superior seja frequentemente marcado por níveis de arenitos ferruginosos na região do Alto Estrutural de Pitanga. O paleoambiente deposicional é interpretado como marinho de águas rasas, associado a períodos de restrição na bacia que propiciaram a deposição dos folhelhos pirobetuminosos com elevados teores orgânicos principalmente na zona plataformal correspondente ao Estado de São Paulo (SCHNEIDER et al., 1974).

2.1.4. Formação Corumbataí

Descrita inicialmente por Pacheco (1927 apud SCHNEIDER et al., 1974) baseada em exposições no vale do Rio Corumbataí na região estudada, a unidade constitui a porção superior do Grupo Passa Dois na Bacia do Paraná e apresenta cerca de 130 metros de

espessura. Na região sul do estado de São Paulo até os arredores do município de Piracicaba (SP), corresponde às formações Serra Alta e Teresina (GAMA JR, 1979).

A unidade apresenta uma sequência de siltitos, argilitos e folhelhos acinzentados na base e siltitos/argilitos arroxeados e avermelhados com intercalações de níveis areníticos e carbonáticos no topo. As sequências silto-argilosas da formação apresentam importante uso econômico para indústrias cerâmicas da região na fabricação de cerâmica vermelha (ZAINÉ, 1994). Nas camadas pelíticas, são frequentes estratificações plano-paralelas, laminações cruzadas, laminações tipo *flaser*, *marcas ondulares* e fendas de ressecamento; nos calcários oolíticos, são frequentes estruturas estromatolíticas; os níveis areníticos são marcados por estratificações cruzadas de pequeno porte e laminações onduladas (SCHNEIDER et al., 1974).

Segundo estudos palinológicos de Daemon & Quadros (1970), a deposição da unidade ocorreu ao fim do Permiano Superior (Kanzaniano), embora a Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná atribua idades referentes ao Wordiano e Capitaniano à Formação Teresina, correlata da Formação Corumbataí (MILANI, 2007). O registro fóssil é definido principalmente pela ocorrência de lamelibrânquios, ostracodes, restos de peixes, restos vegetais e palinomorfos (SCHNEIDER et al., 1974). O contato inferior com a Formação Irati é geralmente concordante, embora seja comum a ocorrência de arenitos ferruginosos marcando um limite discordante nessa transição; já o contato superior com a Formação Pirambóia é marcado por uma importante discordância (SCHNEIDER et al., 1974), relacionada ao limite Permo-Triássico da bacia.

Segundo Gama Jr. (1979), o paleoambiente deposicional é marcado por planícies de maré, apresentando eventualmente depósitos “*offshore*” e uma passagem gradual de condições mais continentais e oxidantes da base para o topo da unidade. Dessa forma, infere-se um paleoambiente marinho redutor cada vez mais raso na base da sequência, enquanto que no topo supõe-se uma deposição marinha de águas rasas altamente influenciada por marés, associada a condições mais oxidantes e a cunhas de progradação litorânea (SCHNEIDER et al., 1974).

2.1.5. Formação Pirambóia

A denominação Pirambóia foi utilizada pioneiramente por Pacheco (1927 apud SCHNEIDER et al., 1974) para caracterizar os arenitos fluviais expostos nas proximidades de

Pirambóia, região de Piracicaba (SP). A unidade integra o Grupo São Bento da Bacia do Paraná, juntamente com as formações Botucatu e Serra Geral, que configuram depósitos sedimentares mesozoicos exclusivamente continentais controlados por um clima árido a semiárido e marcados por uma fase de intenso magmatismo basáltico relacionado à fragmentação do supercontinente Gondwana, denominada por Almeida (1967) de Reativação Wealdeniana. Apresentam espessura máxima de 270 metros em superfície no estado de São Paulo (SCHNEIDER et al., 1974). Corresponde a uma das unidades de mais ampla ocorrência na porção centro-leste do estado de São Paulo (LANDIM et al., 1980).

A formação é predominantemente constituída por arenitos finos a médios amarelados e avermelhados, subarredondados, mostrando intercalações silto-argilosas e porções conglomeráticas na base da unidade. As principais estruturas sedimentares encontradas correspondem a estratificações cruzadas planar e acanalada nos arenitos e plano-paralelas nas porções mais pelíticas.

Embora apresente conteúdo fóssilífero restrito, são descritos fragmentos de conchostráceos e ostracodes de água doce, bem como de restos vegetais na Formação Pirambóia. O contato inferior com a Formação Corumbataí é discordante; já o superior com a Formação Botucatu é frequentemente descrito como concordante (SCHNEIDER et al., 1974), embora possa também relacionar-se a uma discordância marcada por um nível conglomerático na base da Formação Botucatu (VIEIRA & MAINGUE, 1972).

O contexto estratigráfico da unidade está associado a uma sedimentação continental fluvial, marcada por depósitos de rios meandantes e lagos relacionados a condições oxidantes (SCHNEIDER et al., 1974); pode apresentar influência eólica ao longo de toda a sequência, sendo esta mais característica no topo da unidade (BRIGHETTI, 1994). Em função de suas relações estratigráficas com a Formação Corumbataí (datada do Permiano Superior) e Formação Botucatu (idade Juro-Cretácica), geralmente é estabelecida idade Triássica à Formação Pirambóia (SCHNEIDER et al., 1974), embora a Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná atribua o início de sua sedimentação à época lopingiana, no Neopermiano (MILANI, 2007).

2.1.6. Formação Botucatu

A unidade integra o Grupo São Bento da Bacia do Paraná e apresenta ocorrência geral em toda a bacia, mostrando espessuras raramente superiores a 100 metros. O termo Botucatu

foi primariamente citado por Campos (1889 apud SCHNEIDER et al., 1974) para caracterizar os arenitos presentes na serra de Botucatu, no estado de São Paulo, incluindo na classificação as sequências da Formação Pirambóia. As principais exposições da unidade na região de estudo ocorrem na Serra do Santana e em morros testemunhos associados (ZAINÉ, 1994).

Os principais depósitos da formação incluem arenitos avermelhados, friáveis, geralmente finos a médios, mostrando grãos foscos e arredondados; na porção basal da unidade, podem ocorrer arenitos mal selecionados com matriz argilosa, além de uma camada de arenito conglomerático associado a um contato discordante com a Formação Pirambóia presente no estado do Paraná (SCHNEIDER et al., 1974). As principais estruturas sedimentares presentes nos arenitos da unidade correspondem a estratificações cruzadas tangenciais na base e de grande porte, definidas por grande cunhas de sedimentação geralmente associadas à paleodunas; estratificações plano-paralelas e acanaladas também mostram-se frequentes na unidade.

Infere-se então uma sedimentação predominantemente eólica em paleoambiente desértico, com baixa influência fluvial restrita às porções basais da sequência e lacustrina ao longo de todo o pacote sedimentar (SCHNEIDER et al., 1974). Segundo Assine et al. (2004), o paleodeserto Botucatu representa a transição de condições mais úmidas relacionadas ao paleoambiente da Formação Pirambóia para um clima mais árido. Os registros paleontológicos são ínfimos na unidade, restringindo-se a eventuais pegadas e pistas fósseis. O contato inferior da formação mostra-se discordante em relação ao embasamento da bacia, bem como às demais unidades paleozoicas da mesma; o contato basal com a Formação Pirambóia é frequentemente discutido e contestado na literatura, embora seja considerado concordante por grande parte dos trabalhos publicados; já o contato superior com a Formação Serra Geral apresenta-se geralmente discordante. Com base nas relações estratigráficas com unidades sub e sobrejacentes, é atribuída idade Juro-Cretácea à Formação Botucatu (SCHNEIDER et al., 1974), considerando uma possível contemporaneidade entre o topo da mesma e a Formação Serra Geral sugerido por um limite transicional entre elas na região (ZAINÉ, 1994).

2.1.7. Formação Serra Geral e Intrusivas Associadas

Descrita inicialmente por White (1908 apud SCHNEIDER, 1974), a unidade tem sua seção tipo no município de São Joaquim (SC) e apresenta uma sequência de lavas basálticas,

de caráter toleítico, textura afanítica, amigdaloidal no topo, de coloração cinza a preta e associada a um intenso faturamento vertical e horizontal. Na base da unidade são encontradas rochas vulcânicas ácidas e a ocorrência deste magmatismo hoje é descrito como uma grande província magmática, A Província Mágmatíca Paraná – Etendeka (LIP – Large Igneous Province; PEATE, 1997). No topo, A base da unidade mostra frequentes intercalações com arenitos finos a médios, portando estratificações cruzadas tangenciais (SCHNEIDER et al., 1974) e usualmente denominados “intertrapianos”.

A unidade está presente em toda a extensão da bacia e apresenta espessuras variáveis, atingindo um máximo de 1529 metros no município de Presidente Epitácio (SP). O contato basal com a Formação Botucatu é discordante; em relação às demais unidades e embasamento da bacia, têm-se discordâncias associadas às intrusões; o contato superior com o Grupo Bauru mostra-se também discordante (SCHNEIDER et al., 1974). Os afloramentos da unidade associam-se principalmente ao relevo de cuevas e a faixas ao longo dos rios da região (SILVA et al., 1990). Segundo Renne *et al.* (1992), a Formação Serra Geral tem idade aproximada de 133 Ma.

O evento tectônico relacionado à extrusão de lavas basálticas e intrusão de corpos de diabásio na bacia é associado a um expressivo vulcanismo fissural associado à separação do supercontinente Gondwana no Mesozoico e à primeira fase da Reativação Wealdeniana descrita em Almeida (1967). Associadas à unidade, encontram-se os numerosos diques e soleiras de diabásio que afetam toda a sequência estratigráfica da bacia. Dentre os principais locais de afloramento, tem-se o Horto Florestal no município de Rio Claro (SP) e o leito dos rios Passa Cinco e Corumbataí, nos quais as rochas intrusivas ora sustentam níveis elevados do relevo, ora correspondem ao nível de base erosivo da região. Embora sejam cronocorrelatas à Formação Serra Geral, tais corpos intrusivos não são englobados em sua definição (ZAINÉ, 1994).

2.1.8. Formação Itaqueri

A unidade aflora principalmente nos altos topográficos nos arredores de Itaqueri da Serra, a oeste do município de Ipeúna (SP). Embora seu posicionamento estratigráfico seja controverso, elementos estratigráficos e estruturais analisados em Barcellos et al. (1983) sugerem sua integração ao Grupo Bauru da Bacia do Paraná. Interpretada como de idade referente ao Paleoceno-Eoceno (apesar de alguns autores a posicionarem como pertencente

ao final do Cretáceo, cronocorrelata à base do Grupo Bauru), dispõe-se de forma discordante sobre as formações Serra Geral e Botucatu (MELLO, 1995), na forma de morrotes sustentados por arenitos silicificados com crostas ferruginosas, níveis conglomeráticos e lamitos que alcançam espessuras de em média 125 metros na região. O paleoambiente de deposição da unidade apresenta alta energia, controlado por sistemas de leques aluviais influenciados por condições climáticas áridas a semiáridas (ZAINÉ, 1994). Os principais registros fossilíferos presentes na Formação Itaqueri correspondem a gastrópodes, bivalves, conchostráceos, ostracodes e restos vegetais (MEZZALIRA, 1989).

2.1.9. Formação Rio Claro

Na região estudada, ocorrem coberturas significativas, porém descontínuas, sobre superfícies de relevo suave e aplainado frequentemente associadas à Formação Rio Claro (ZAINÉ, 1994). Descrita inicialmente por Bjornberg e Landim (1966), a Formação Rio Claro tem sua seção tipo localizada nos arredores do município de Rio Claro (SP), onde apresenta espessura máxima de aproximadamente 40 metros e cobertura descontínua na região. Corresponde a sequências compostas por arenitos arcossianos, avermelhados e mal consolidados, além de níveis de arenitos conglomeráticos, ambos intercalados por frequentes camadas argilosas; em relação às estruturas sedimentares presentes, têm-se estratificações cruzadas, feições de preenchimento e ressecamento.

O paleoambiente deposicional é associado a condições de clima semi-árido, sendo frequentemente descrito como continental mostrando consideráveis influências fluviais ao longo da sequência. Os principais registros fósseis da Formação Rio Claro correspondem a restos vegetais, a cujos depósitos atribui-se idade neo-cenozóica. As relações de contato com as demais unidades da Bacia do Paraná e o embasamento mostram-se discordantes (SCHNEIDER et al., 1974), assim como as diversas coberturas cenozoicas presentes na região.

2.2.Contexto Estrutural

As estruturas resultantes das atividades tectônicas associadas à evolução da Bacia do Paraná na região estudada têm sido alvos constantes de investigação por inúmeros trabalhos desde o pioneiro Washburne (1930 apud SOARES, 1974), que enfatizou a importância da

região do ponto de vista da geologia do petróleo por meio da análise de diversas estruturas anticlinais como a estrutura da Pitanga, da Boa Esperança (Pau D'Alho), de Artemis, do Serrote, de Charqueada, de Jibóia, etc, embora tenha dado pouca importância às numerosas falhas presentes.

Uma série de discussões acerca dos principais mecanismos de deformação da região se deu a seguir, com trabalhos ora ressaltando a relevância dos anticlinais e das estruturas dobradas, ora colocando as falhas como protagonistas nesse contexto. Dessa forma, Oppenheim e Malanphy (1934 apud SOARES, 1974) consideraram as falhas como as principais estruturas da região, enquanto que Almeida & Barbosa (1953) tornaram a destacar a importância das estruturas dobradas e dômicas nas proximidades de Piracicaba e Rio Claro em detrimento das falhas. No entanto, diversos trabalhos posteriores evidenciaram novamente o papel determinante dos falhamentos na bacia, como Fulfaro et al. (1967), Bjornberg et al. (1971), Andrade & Soares (1971), Soares et al. (1973), Soares (1974), Riccomini et al. (1991), Sousa & Morales (1999), Sousa (2002).

Andrade & Soares (1971) descreveu a existência de um grande número de falhas de gravidade e dobras descontínuas na região, resultantes de esforços verticais. Soares (1974) sugeriu que ambas as estruturas podem apresentar relevância semelhante na história evolutiva da área, sendo frequente a presença e associação entre falhas isoladas, estruturas em *horsts* e *grábens*, sistemas de falhas, domos e flexuras. Sousa & Morales (1999) ressaltam a importância do traçado das falhas na distribuição das unidades litoestratigráficas (figura 5: Grupo Itararé, Formação Tatuí, Irati, Corumbataí, Pirambóia e intrusivas básicas) de modo a soerguer e abater blocos permitindo o afloramento de sucessões mais antigas no centro justapostas a outras mais jovens.

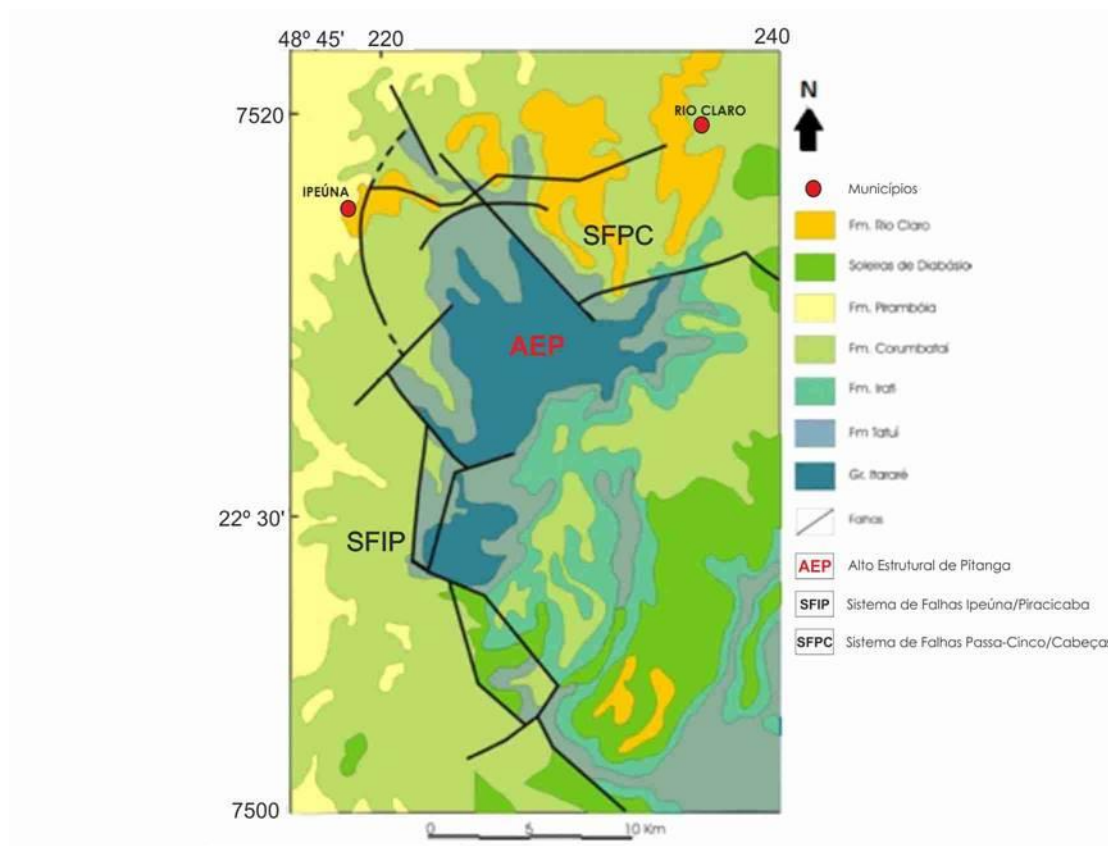


Figura 5: Mapa geológico simplificado da região de estudo, mostrando intenso controle estrutural das unidades estratigráficas da bacia (modificado de SIQUEIRA, 2011, adaptado de ANDRADE & SOARES, 1974).

Tais arranjos apresentam em geral camadas ligeiramente inclinadas, com mergulhos variando entre 2° a 5°, podendo alcançar até 75° em zonas controladas por falhas; são frequentes ainda as associações entre dobras de pequeno porte, falhas, juntas e intrusões básicas na região que muitas vezes se aproveitam dos planos estruturais de fraqueza nas rochas para ascenderem na forma de diques e soleiras (SOUSA & MORALES, 1999).

2.2.1. Alto Estrutural de Pitanga

A Estrutura Anticlinal de Pitanga (ou Domo de Pitanga ou ainda Alto Estrutural da Pitanga) constitui uma estrutura localizada no baixo vale do rio Corumbataí e afeta diretamente o arcabouço estrutural e as sucessões sedimentares paleozoicas e mesozoicas dispostas em Rio Claro e Ipeúna (SP). Apresenta geometria alongada na direção NW, extensão do eixo maior correspondente ao dobro do menor e uma leve assimetria, mostrando mergulhos mais elevados em seu flanco oeste, que localmente alcançam 12°, embora sejam

mais comuns valores próximos à 2° na região (SOARES, 1974). A borda da estrutura apresenta-se intensamente falhada, rebaixando consideravelmente blocos na porção oeste e ocasionando a omissão de unidades litoestratigráficas devido à atuação de processos erosivos (SOUSA, 2002).

2.2.1.1. Principais Estruturas

O sistema de falhas Passa Cinco-Cabeças configura o sistema mais importante no contexto estrutural do Alto da Pitanga, ocorrendo principalmente na região de Ipeúna ao longo do rio Passa Cinco até a intersecção do mesmo com os rios Cabeça e Corumbataí. Apresenta conjuntos de falhas normais com orientação NW-SE, além de falhas isoladas orientadas para N-S e NNE-SSW, com predomínio de blocos abatidos a NE (SOUSA, 2002).

O sistema de falhas Ipeúna-Piracicaba consiste em feixes de falhas normais que apresentam *trends* principais NW-SE, NE-SW e outras falhas isoladas orientadas segundo N-S e E-W. Possui ocorrência menos expressiva na região em comparação com o sistema Passa Cinco-Cabeças, presente em localidades próximas à Paraisolândia, Recreio e ainda ao longo do rio Corumbataí e córrego Tamandupá. Emolduram a parte oriental do Alto da Pitanga, apresentando sistematicamente blocos abatidos a SW-W (SOUSA, 2002).

2.2.1.2. Gênese e Evolução

Dos primeiros trabalhos a abordarem sua existência e características, destacam-se Washburne (1930 apud SOARES, 1974), Oppenheimer e Malanphy (1934 apud SOARES, 1974), Almeida & Barbosa (1953) e Barbosa & Gomes (1958). Diversas hipóteses foram elencadas a respeito da gênese da estrutura ao longo do tempo; no entanto, ainda não há consenso entre a comunidade científica sobre o tema. Oppenheimer e Malanphy (1934 apud SOARES, 1974) propôs inicialmente uma formação relacionada a um sistema escalonado de falhas que moldariam a estrutura anticlinal; já Almeida & Barbosa (1953) relacionaram a feição a uma dobra periclinal com inclinação para oeste. Barbosa & Gomes (1958) concluíram por meio de análise estrutural que a estrutura constitui uma feição dômica, com fechamento de aproximadamente 25 metros e eixo curvo, ora mergulhando para SW-NE a sul, ora para NS.

Sucessivos mapeamentos estratigráficos e estruturais permitiram a Andrade & Soares (1971) confirmar a hipótese de Barbosa & Gomes (1958), além de retratar um quadro mais amplo da estrutura relacionando-a com as intrusivas básicas da bacia e principalmente com os sistemas de falhas Rio das Pedras-Piracicaba-Ipeúna a oeste e Passa Cinco-Cabeças a norte. Mais recentemente, Riccomini (1992) associou a gênese da estrutura de Pitanga há pelo menos seis fases de deformação relacionadas a eventos mais antigos de distensão, compressão e transcorrência, bem como indícios de atividade neotectônica na região. Os trabalhos de Sousa & Morales (1999) e Sousa (2002) apresentam importantes considerações a respeito dos sistemas de falhas associados ao domo, marcados principalmente por controles estruturais ao longo dos rios Passa Cinco e Corumbataí (ANDRADE & SOARES, 1971), além de fornecerem um extenso acervo de informações detalhadas sobre feições locais e observações de campo essenciais para uma melhor compreensão do domo; a ocorrência de reativações neotectônicas associadas a tais sistemas é comum e foram descritas em Sousa (2002) por meio da análise de estrias de falhas e sentido de movimento, bem como feições de drenagem e relevo.

A expressiva quantidade de corpos intrusivos básicos presentes na região induziu a elaboração de uma hipótese já antiga acerca da gênese do Alto Estrutural da Pitanga, colocando soleiras como possíveis elementos de sustentação do domo. No entanto, Barbosa & Gomes (1958) e Soares (1974) posicionaram-se contra tal hipótese, demonstrando sua fragilidade por meio de dois poços perfurados pela Petrobras na região. Verificou-se por meio deles que no centro da estrutura a espessura de diabásio era consideravelmente inferior à espessura na borda; já as unidades sedimentares não apresentaram grandes variações de espessura, invalidando também quaisquer hipóteses relacionadas à formação da estrutura por compactação diferencial de paleo-relevos recobertos.

Segundo Riccomini (1995), a formação do Alto Estrutural de Pitanga está diretamente associada a movimentos transcorrentes (tabela 1). Considerado um braquianticlinal, o domo seria resultado de uma reativação de lineamentos estruturais antigos da bacia por meio de um sistema de esforços horizontais com vetor máximo orientado para WNW-ESE e mínimo na direção NNE-SSW.

Evento	Idade	Estruturas	SH Máx
1	Permiano-Triássico	Diques clásticos na Formação Corumbataí e falhas transcorrentes sin-sedimentares na Formação Pirambóia	NE-SW
2	Eocretáceo	Diques de diabásio correlatos à Formação Serra Geral	NW-SE
3	Pós- Eocretáceo	Falhas transcorrentes destrais e sinistrais, estruturas em flor e dobras escalonadas encontradas no vale do rio passa Cinco e arredores do município de Paraisolândia	WNW-ESE
4		Reativação de falhas transcorrentes destrais e sinistrais	NE-SW
5	Neotectônica	Falhas normais encontradas no vale do rio Passa Cinco	NE-SW
6		Reativação com caráter inverso de falhas normais encontradas no vale do Rio Passa Cinco	NW-SE

Tabela 1: Síntese evolutiva da região do Alto Estrutural de Pitanga por Riccomini (1995), destacando a importância de esforços tectônicos transcorrentes na estruturação regional, baseada em Siqueira (2011).

Embora trabalhos renomados como Bjornberg et al. (1971), Resende (1972) e Riccomini (1992;1995) também considerem esforços horizontais associados a uma tectônica transcorrente como determinantes na gênese e evolução do Alto Estrutural de Pitanga, Soares (1973b), Soares (1974), Sousa & Morales (1999) e Sousa (2002) mostram-se categóricos quanto a baixa importância desses esforços no contexto estrutural estudado, ressaltando a importância dos falhamentos normais representados pelos sistemas já descritos e resultantes de esforços predominantemente extensionais na crosta. Sendo assim, a sequência evolutiva adotada no presente trabalho é a de Sousa (2002), que descreve a evolução tectônica da região por meio de quatro episódios evolutivos principais (tabela 2).

Evento	Idade	Estruturas	Orientação
1	Permiano	Falhas sin-sedimentares da Formação Tatuí	NW-SE
2	Jurássico-Cretáceo	Diques de diabásio correlatos à Formação Serra Geral	NW-SE
3	Cretáceo-Mioceno	Falhas normais sin-sedimentares da Formação Rio Claro	NE-SW
4	Neógeno	Falhas normais e inversas deformadoras da Fm Rio Claro	NW-SE NE-SW

Tabela 2: Síntese evolutiva da região do Alto Estrutural de Pitanga por Sousa (2002), destacando a importância de esforços tectônicos extensionais na estruturação regional.

O primeiro evento corresponde ao conjunto de estruturas mais antigas, relacionadas à Formação Tatuí e a fácies “Ibicatu” que integra o topo da mesma e consiste em um sistema de falhas normais com orientação principal NW-SE. Previamente reconhecido por Morales et al. (1997), o conjunto apresenta-se comumente associado a prismas rotacionais, prismas de sedimentação em blocos abatidos, antiformes de volteio erodidos no topo e discordâncias. O controle estrutural por falhas na sedimentação da Formação Tatuí foi descrito em Mochizuki (2001) e baseia-se principalmente na pouca espessura da unidade na região do Alto Estrutural de Pitanga, indicando uma possível atuação do mesmo na compartimentação regional desde o Permiano.

O segundo evento tectônico consiste na intrusão dos diques e soleiras de diabásio correlatos à Formação Serra Geral de idade Juro-Cretácea, que ascenderam principalmente por meio de lineamentos pré-existent da bacia, preenchendo falhas, fraturas e juntas de espessuras variadas. Pode-se dizer então que esse é o principal evento de deformação da bacia, relacionado à ocorrência de falhas normais e diques com trend principal NW-SE, indicando uma direção preferencial de extensão NE-SW associada à abertura das fraturas posteriormente preenchidas pelas intrusivas. Estruturas distensivas como *grábens* e *horsts* mostraram-se de fundamental importância na evolução estrutural do domo e compartimentação tectônica da bacia.

O terceiro quadro evolutivo é marcado por falhas normais com direção NE-SW que afetam as coberturas cenozoicas da bacia na região de estudo, correspondendo, portanto a falhas sindeposicionais associadas à deposição das sequências sedimentares da Formação Rio

Claro. Dessa forma, um novo evento distensivo de orientação principal NW-SE relacionado ao final do Mesozóico ao Terciário Superior (Mioceno) mostra-se atuante na região, associado possivelmente a abertura do Oceano Atlântico e consequente propagação das falhas em direção ao continente diretamente relacionados a origem do Rift Continental do Sudeste do Brasil descrito em Riccomini (1989) e a formação de bacias isoladas no continente.

O quarto evento corresponde aos conjuntos de falhas normais orientadas NW-SE e inversas NE-SW condicionam a morfologia regional ao longo do Vale do Rio Passa-Cinco e deformam sedimentos fluviais, indicando deformação mais recente, associada possivelmente ao Quaternário e, com isso, indicando movimentação neotectônica (HASUI, 1990; SOUSA, 98, 2002; MORALES, 2005).

2.3.Contexto Geomorfológico

Almeida (1964) compartimentou o relevo do Estado de São Paulo em cinco províncias geomorfológicas: Planalto Atlântico (I), Província Costeira (II), Depressão Periférica (III), Cuestas Basálticas (IV) e Planalto Ocidental (V). A região estudada encontra-se inserida na Depressão Periférica, que por sua vez é dividida em três zonas: Zona do Médio Tietê (1), Zona do Paranapanema (2) e Zona do Moji Guaçu (3). A região de estudo encontra-se inserida na Depressão Periférica, Zona do Médio Tietê, muito próxima ao limite das Cuestas Basálticas (figura 6).

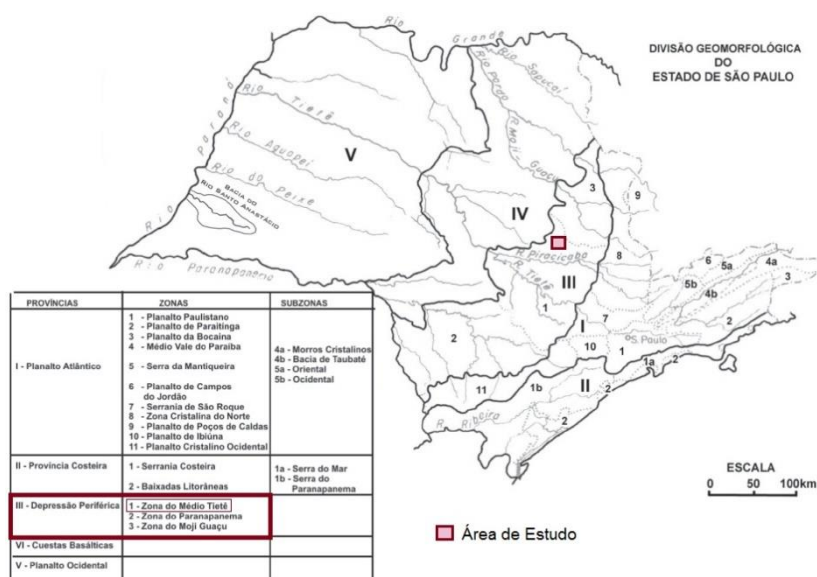


Figura 6: Divisão Geomorfológica do Estado de São Paulo (ALMEIDA, 1964), com destaque para a área de estudo inserida na Zona do Médio Tietê (1), Depressão Periférica (III).

O termo Depressão Periférica foi introduzido por Moraes Rego (1932 apud ALMEIDA, 1964) e definido como região consideravelmente rebaixada devido à atuação de processos erosivos, localizada entre as áreas elevadas do Planalto Atlântico e as cristas altas referentes às Cuestas Basálticas. Para Dias & Perez Filho (2012), apresenta geometria de meia lua, mostrando topografia colinosa com cerca de 50 quilômetros de largura. A Zona do Médio Tietê compreende cerca de 15.200 km² e é marcada pela presença de sequências sedimentares fortemente impactadas pela intrusão de soleiras e diques básicos determinantes na construção do relevo da região.

Os pacotes sedimentares do Grupo Itararé e Formação Tatuí apresentam em geral alto mergulho para NW, enquanto que nos arenitos da Formação Pirambóia e nas intrusões básicas associadas o mergulho é menos acentuado. Essa direção preferencial e acentuada de mergulho das camadas nos grupos litológicos mais resistentes à erosão implica maior destaque destas no relevo paulista por meio de cuestas. Além disso, estruturas relacionadas à falhamentos, por exemplo, também apresentam papel importante na configuração da paisagem. Sousa & Morales (1999) estabelecem o sistema de falhas Ipeúna-Piracicaba como determinante nesse sentido, apresentando falhas normais com direções preferenciais NW-SE e NE-SW que condicionam principalmente o curso do rio Corumbataí e afluentes e indicam, portanto, possíveis reativações neotectônicas associadas a esses conjuntos.

De maneira geral, a topografia de toda a região é pouco acidentada, mostrando desníveis raramente superiores a 200 metros; predominam colinas suaves, separadas por vales recentes, com planícies aluviais em geral pouco expressivas e associadas à união dos perfis convexos das vertentes. As redes de drenagem apresentam em geral morfologia dendrítica, embora respondam diretamente às propriedades dos tipos litológicos sobre os quais correm (ALMEIDA, 1967).

Dias & Perez Filho (2012) aprofundaram a análise geomorfológica da região realizada pelos trabalhos clássicos de Almeida (1964), Ab'Saber (1969) e Penteado (1968), salientando três superfícies importantes na evolução do relevo: superfície de Cimeira, Neogênica I e Neogênica II. Segundo Penteado (1968), a superfície de Cimeira está presente na borda do Planalto Ocidental, localiza-se na bacia de Rio Claro e está associada a cuestas regionais dispostas a cotas de 950 e 1.000 metros. Sua formação está ligada a um período de aplainamento entre os períodos Eoceno e Mioceno que originou a escavação da bacia de Rio Claro (PENTEADO, 1968; AB'SABER, 1969).

A “superfície de erosão do Médio Tietê”, descrita em Almeida (1964) está relacionada a uma fase de aplainamento provavelmente anterior a essa, datada aproximadamente do Cretáceo superior ou Paleogeno Inferior, a partir da qual as principais drenagens da bacia passaram a seguir os principais eixos da mesma promovendo um entalhamento das mesmas em vales soerguidos na região (PENTEADO, 1968).

Seguiu-se então um extenso período de seca responsável por induzir processos de pediplanação que afetaram todo o relevo, principalmente regiões elevadas a cerca de 700-750 metros, denominada por Penteado (1968) de superfície de pediplanação Neogênica I. Alterações climáticas para condições mais úmidas desencadearam uma nova fase erosiva ao fim do Neogeno e limite do Quaternário, a partir do qual se desenvolveu um novo período de seca relacionada à glaciação do Pleistoceno Inferior, que marcou de forma contundente os níveis interplanálticos e interflúvios da paisagem e foi associado à superfície de pediplanação Neogênica II. É representada na região pela Superfície de Rio Claro, disposta em cotas de 600 a 650 metros (PENTEADO, 1968).

Após essa fase, alterações climáticas menos expressivas contribuíram para a construção da paisagem atual, moldando, por exemplo, os terraços elevados do Rio Corumbataí. Pode-se dizer então que a Depressão Periférica paulista atual tem sua evolução geomorfológica relacionada a importantes superfícies de aplainamento intensamente afetadas por alterações climáticas e atividades tectônicas (DIAS & PEREZ FILHO, 2012).

3. Contextualização Teórica

Dentre os principais temas relacionados ao presente trabalho, faz-se necessária a abordagem de determinados conceitos, definições e estudos de caso necessários para otimizar a discussão e promover maior compreensão dos resultados obtidos. Pretende-se então abordar de forma resumida os principais elementos que definem um sistema petrolífero, bem como a importância das estruturas rúpteis na migração de hidrocarbonetos ao longo deste sistema. A importância de eventos magmáticos associados a bacias potencialmente geradoras de petróleo também será discutida nesta seção por meio de um estudo de caso diretamente relacionado ao tema deste trabalho.

3.1. Sistemas Petrolíferos

O conceito de sistema petrolífero foi introduzido por Dow (1972) sob a denominação de “*oil system*”, estabelecendo correlações essencialmente estratigráficas entre rochas geradoras, reservatórios e selantes. Com o avanço dos estudos científico-exploratórios no tema, diversos autores incorporaram novos elementos à definição (PERRODON, 1980; PERRODON & MASSE, 1984; MEISSNER et al., 1984; ULMISHEK, 1986), sendo da autoria de Magoon & Dow (1994) o principal trabalho de compilação e caracterização detalhadas dos sistemas petrolíferos. Tais trabalhos foram desenvolvidos a partir da análise das principais acumulações mundiais de petróleo, a partir das quais se concluiu que podem estar associadas a modelos genéticos correlacionáveis e que envolvem a ocorrência de fatores geológicos específicos de forma sincrônica no tempo geológico. O termo **sistema petrolífero** descreve a ocorrência natural dos elementos citados, sendo nomeado através de suas unidades geradoras e reservatório (como o sistema Irati/Pirambóia, por exemplo) e cuja principal função é aprimorar e sistematizar o conhecimento científico e prover diretrizes exploratórias de modo a minimizar os fatores de risco envolvidos. São classificados em dois tipos principais: os sistemas típicos, nos quais a energia térmica para maturação da matéria orgânica decorre do grau geotérmico regional, variando conforme a profundidade; e os sistemas atípicos, desenvolvidos por meio de fontes externas de calor geralmente relacionadas a intrusões de corpos ígneos (MAGOON & DOW, 1994).

Os elementos principais dos sistemas petrolíferos são controlados principalmente pelos contextos estratigráfico e estrutural da bacia, por sua extensão geográfica e pela

evolução cronológica a eles associados. Seus componentes primordiais compreendem as rochas geradoras, rochas reservatório, rochas selantes e as rochas de cobertura (“overburden rocks”), englobando os processos de geração, migração e acumulação de petróleo em trapas ou armadilhas que devem estar adequadamente dispostos no tempo e espaço para que a cronologia dos processos permita a acumulação de hidrocarbonetos (figura 7). O período no tempo geológico que melhor representa a geração-migração-acumulação de petróleo em uma bacia é denominado momento crítico, em geral ocorrendo em um curto espaço de tempo (na ordem de poucos milhões de anos). Tão importante quanto os processos que levam à acumulação do petróleo é o chamado tempo de preservação, responsável pela preservação, modificação ou completa destruição dos hidrocarbonetos em um sistema petrolífero, associado principalmente à profundidade de soterramento do mesmo ao longo do tempo e consequente exposição a processos de biodegradação. Tais processos podem ser intensificados pela atuação de processos erosivos e percolação de água meteórica no sistema (MAGOON & DOW, 1994).

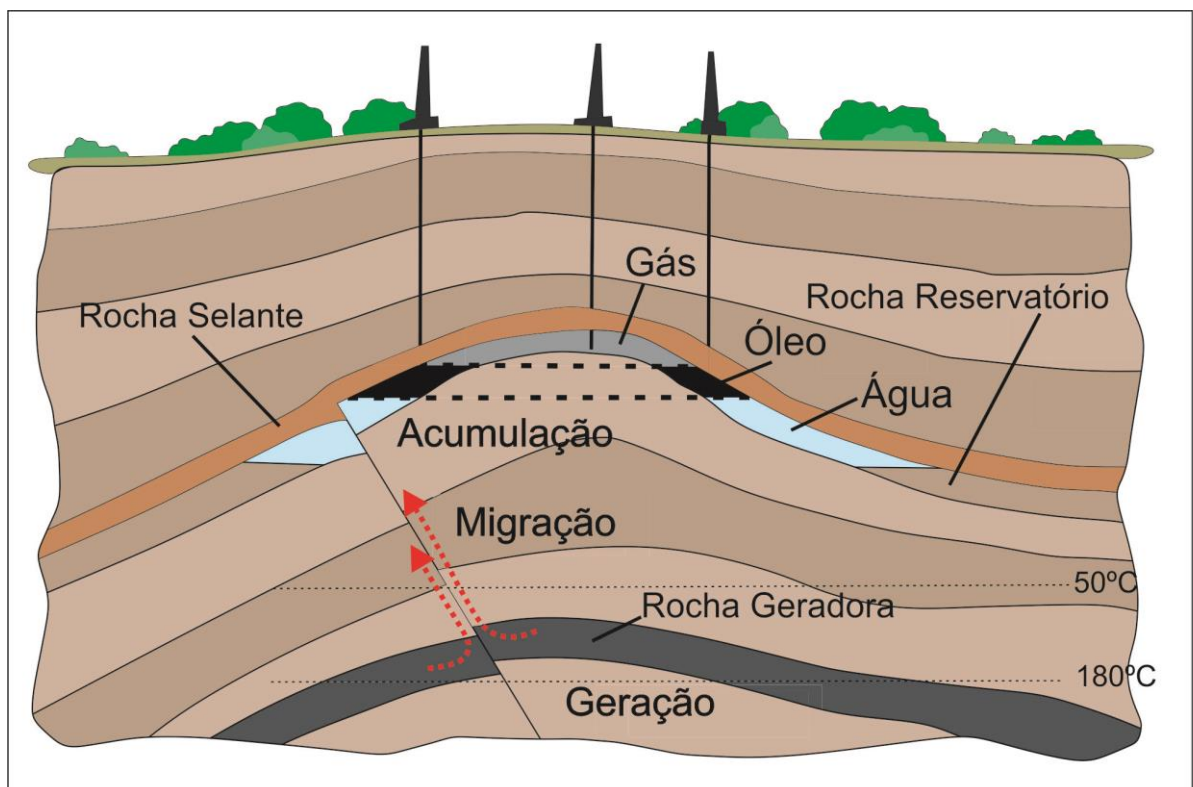


Figura 7: Esquema básico de um sistema petrolífero e seus principais elementos e processos (modificado de UNIP, 2011). <<https://smaatmiundip.wordpress.com/2011/05/01/basic-petroleum-system/>>.

As rochas geradoras são os elementos de maior importância em um sistema petrolífero, correspondendo principalmente a argilitos, folhelhos e calcilutitos formados em ambiente redutor e mostrando com elevados teores de matéria orgânica, atingindo níveis médios de Carbono Orgânico Total (COT) entre 2 a 8%, sendo muito raros os picos de até 24% (como é o caso da Formação Irati; MILANI, 2007). As propriedades físico-químicas do petróleo gerado dependem tanto da matéria orgânica presente na rocha geradora quanto da temperatura de geração; vegetais mais evoluídos são mais associados a depósitos de gás, enquanto que zooplânctons e fitoplânctons marinhos ou lacustres tendem a gerar óleo (MILANI et al., 2001). A transformação do querogênio em óleo inicia-se em torno de 60°C de temperatura (óleo pouco maduro e muito viscoso), atingindo um pico de geração de óleo e gás próximo aos 90°C e gerando um material progressivamente mais fluido e rico em voláteis até os 120°C. A partir desse limite, cessa a geração de óleo e apenas gás é produzido até aproximadamente os 150°C (figura 8), momento a partir do qual o carbono passa a sofrer metamorfismo.

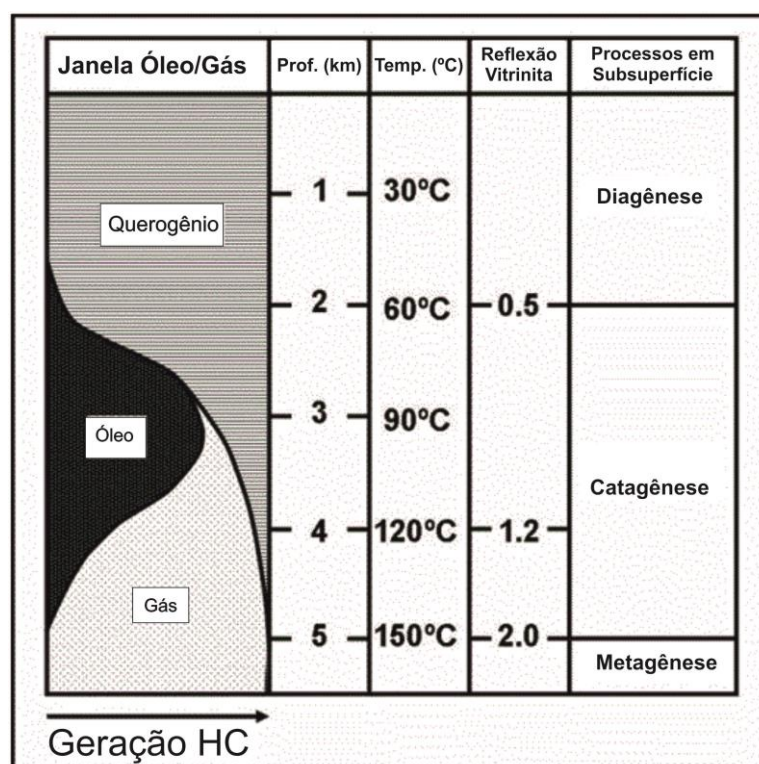


Figura 8: Janelas de formação de óleo e gás e principais processos envolvidos (RUBO, 2015).

<<http://rafaelrubo.esy.es/geologia/petroleo/origem.html>>.

As rochas reservatório correspondem a rochas de permeabilidade e porosidade elevadas, variando de 5 a 35%, cujos espaços porosos podem ser intergranulares (arenitos ou conglomerados variados), relacionados ao intenso fraturamento de rochas ígneas ou formados por dissolução (carbonatos). No entanto, destacam-se os arenitos associados a depósitos de dunas, rios, deltas, praias, ondas, marés e correntes de turbidez, com valores de porosidade de 15 a 30%. Além da função principal de armazenar petróleo, essas rochas podem comportar-se como “*carrier beds*”, fornecendo rotas alternativas para a migração de hidrocarbonetos (MILANI et al., 2001).

Para que a acumulação de petróleo seja efetiva e não haja perdas para a superfície, é necessário que existam rochas selantes sobrejacentes ao longo de todo o sistema. Tais unidades devem, portanto, apresentar permeabilidade consideravelmente baixa em relação aos reservatórios, correspondendo principalmente a rochas de granulometria fina (folhelhos, calcilutitos, siltitos), além dos evaporitos e rochas ígneas. A presença de estruturas seladas (falhas e fraturas) e ocorrência de processos diagenéticos (cimentação, por exemplo) também podem funcionar como importantes selantes para acumulações petrolíferas. As rochas de cobertura (“*overburden rocks*”) também devem estar presentes por cima de todo o pacote, de modo a promover o soterramento adequado do sistema para que o grau geotérmico necessário para a maturação do querogênio seja atingido (MILANI et al., 2001).

O aumento da pressão confinada nas rochas geradoras com a transformação de querogênio em petróleo cria uma situação de supersaturação e um fraturamento hidráulico que induzem a migração primária de hidrocarbonetos para fora da rocha fonte. A partir de então, a presença de fraturas e das “*carrier beds*” apresenta papel fundamental no transporte dos fluidos até eventuais trapas nas rochas reservatório, configurando processos de migração secundária que iniciam-se nas chamadas “*kitchens*” (“cozinhas de geração”) até seu local de acumulação. Em zonas que não apresentam rochas selantes, pode ocorrer migração terciária, que consiste no escape e consequente perda de fluidos petrolíferos para a superfície (MILANI et al., 2001).

As chamadas trapas ou armadilhas de petróleo são classificadas principalmente em estratigráficas e estruturais, consistindo em zonas cuja geometria das rochas reservatório e selante favoreçam o aprisionamento e acumulação de hidrocarbonetos. Trapas estratigráficas podem ser representadas pelo acunhamento de camadas que geram barreiras diagenéticas (zonas de baixa permo-porosidade) (MILANI et al., 2001); trapas estruturais mostram-se mais

comuns, sendo originalmente definidas por Harding & Lowell (1979) e correspondentes a altos estruturais, domos salinos, ápice de dobras anticlinais, falhas, entre outros.

A sincronia dos sistemas petrolíferos é essencial para a acumulação de quantidades satisfatórias de petróleo, correspondendo ao momento do tempo geológico no qual há coexistência de todos os elementos quando do início da geração-migração- acumulação de hidrocarbonetos. Sendo assim, os componentes estratigráficos do sistema, os caminhos de migração e as trapas já devem estar formadas e prontas para receber, conduzir e acumular os fluidos. A presença de todos os elementos dentro de um sistema não necessariamente indica a presença de acumulações na região; se não houve sincronismo na ordem de formação dos componentes, o potencial de geração pode ser completamente desperdiçado (MILANI et al. 2001).

3.2. Fraturas e Migração de Hidrocarbonetos

As fraturas representam descontinuidades físicas e mecânicas que afetam pacotes de rochas e sedimentos que podem estar relacionadas a esforços internos ou externos da Terra. Formam-se a partir do momento em que as estruturas atômicas dos materiais atingem valores máximos de resistência à ruptura sob um regime de deformação predominantemente rúptil, típico de baixas profundidades na crosta. As fraturas de origem tectônica constituem o foco principal deste trabalho, sendo elas classificadas em dois tipos principais: as fraturas extensionais (Tipo I) e de cisalhamento (Tipos II e III). No contexto da migração secundária de hidrocarbonetos, as fraturas do Tipo I mostram-se extremamente relevantes por resultarem de esforços distensivos perpendiculares às suas direções principais, que podem resultar em fraturas abertas e, portanto mais suscetíveis à percolação de fluidos (FOSSEN, 2010). Segundo Aydin (2000), zonas de fratura com componentes cisalhantes são também muito efetivas nesse sentido, aumentando tanto a conectividade vertical e lateral entre as fraturas, quanto à abertura das mesmas, parâmetro este considerado o mais importante nesse contexto.

Gudmundsson et al. (2003) estabeleceram que a importância das fraturas de cisalhamento no transporte de fluidos mostra-se ainda mais elevada quando as mesmas evoluem a partir de grupos de fraturas extensionais; Tirén (1991) estendeu essa relação para todos os tipos de fraturas, concluindo que as estruturas mais eficientes para a migração de fluidos são aquelas associadas a eventos de deformação rúptil e dúctil geralmente resultantes de um histórico tectônico longo e complexo (figura 9).

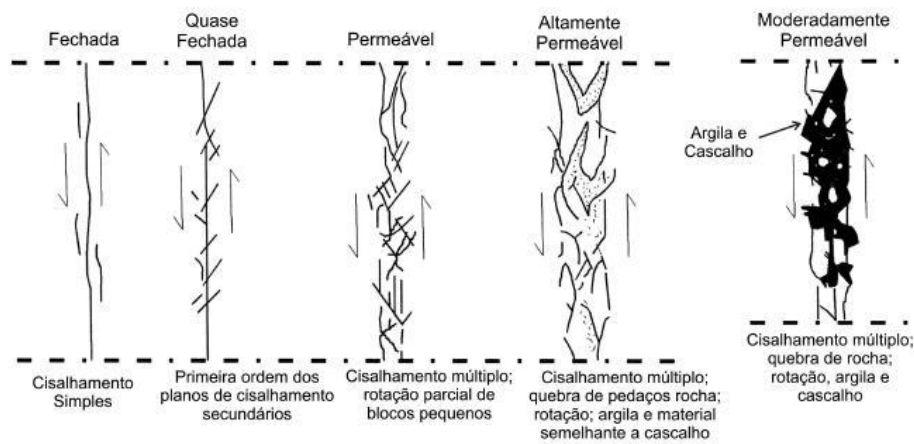


Figura 9: Variação da permeabilidade em falhas de acordo com diferentes estágios de evolução, do menos desenvolvido à esquerda ao mais evoluído à direita (FERNANDES, 2008).

Por sua vez, os principais elementos relacionados à abertura de fraturas e falhas correspondem à alta pressão de fluidos nas rochas geradoras de petróleo, a justaposição de estruturas, dilatação térmica e tipo de litologia afetada. Outros parâmetros como magnitude do rejeito das falhas, taxas de cimentação ou precipitação de minerais e tensão confinante nas fraturas também são importantes para o desenvolvimento de permo-porosidade nas mesmas (AYDIN, 2000). A lei cúbica relacionada à determinação da condutividade hidráulica de um material foi utilizada por Fernandes (2008) para comprovar a elevada importância da abertura das fraturas, mostrando-se um parâmetro ainda mais relevante que a densidade das fraturas por área (figura 10).

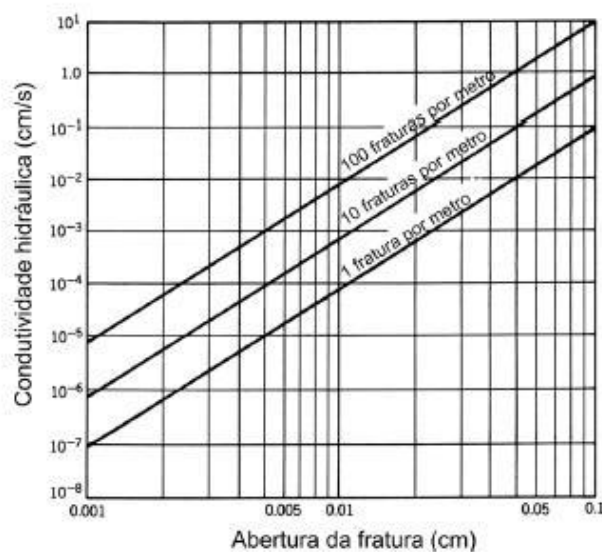


Figura 10: Relação entre abertura, espaçamento e condutividade hidráulica em um grupo de fraturas lisas e paralelas (FERNANDES, 2008).

Dessa forma, com base em simulações, modelos hidráulicos conceituais e estudos de caso, Aydin (2000) classificou as fraturas e falhas em quatro categorias principais quanto a sua capacidade de transmissão de fluidos:

- (1) Fraturas/falhas transmissoras, que apresentam extrema importância na migração de fluidos;
- (2) Fraturas/falhas seladas, relevantes apenas como estruturas selantes ou trapas;
- (3) Fraturas/falhas verticalmente transmissoras e lateralmente seladas, importantes apenas na migração vertical de fluidos ou como barreiras horizontais de fluxo;
- (4) Fraturas/falhas transmissoras intermitentes, cuja atuação é variável ao longo do tempo e depende de processos externos às propriedades da estrutura, sendo, portanto pouco confiáveis.

A principal dificuldade na análise de falhas e fraturas corresponde à elevada complexidade das estruturas no que se refere a sua contribuição na migração e acumulação de hidrocarbonetos em sistemas petrolíferos, já que as mesmas são controladas por diferentes processos geodinâmicos, parâmetros geométricos (dimensão, orientação, espaçamento, distribuição) e apresentam gêneses específicas (AYDIN, 2000).

Considerando o contexto estudado, pode-se dizer que a presença de camadas de folhelhos intercaladas com carbonatos induz uma compartimentação do potencial migratório, pois o caráter mais dúctil do folhelho implica em maior absorção dos esforços e consequentemente um fraturamento menos intenso comparado ao comportamento rúptil dos carbonatos. Dessa forma, a repetição de camadas mais e menos fraturadas promove a formação de zonas isoladas de percolação, reduzindo a velocidade do fluido e limitando os caminhos de migração (COOKE et al., 2006). Nesses casos, as fraturas mostram-se confinadas às camadas mais rúpteis, estendendo-se até o limite estratigráfico com as sequências mais dúcteis (UNDERWOOD et al., 2003). No entanto, sequências sedimentares carbonáticas espessas tendem a apresentar fraturas mais longas e contínuas, promovendo caminhos de migração mais efetivos em relação às estruturas confinadas e pouco expressivas (TSANG, 1984).

Ambas as situações ocorrem no Membro Assistência da Formação Irati, merecendo atenção especial, portanto, os pacotes exclusivamente carbonáticos que possam vir a apresentar fraturas mais eficientes quanto à migração de hidrocarbonetos para as sequências

superiores. Outro elemento importante nesse contexto é a associação da unidade com intrusões de diabásio, permitindo a ocorrência de modificações texturais dos carbonatos, aumentando localmente sua granulação de tal forma a elevar também sua capacidade de armazenar e transportar fluidos (AMARAL, 1967).

3.3. Influência do Magmatismo Básico na Maturação Química de Hidrocarbonetos

A ocorrência de rochas magmáticas em sistemas petrolíferos ígneo-sedimentares foi considerada durante décadas como um problema em termos de produção e exploração de petróleo. Acreditava-se que a intrusão e extrusão de corpos magmáticos promoviam a degradação da matéria orgânica nas rochas geradoras, redução da permo-porosidade nos reservatórios e deterioração de trapas de petróleo já formadas. No entanto, sua relevância em sistemas petrolíferos tem se mostrado cada vez mais notável, passando a ser alvo de discussões em diversos trabalhos no mundo todo (CHEN et al., 1999; ORCHUELA et al., 1989) e no Brasil (ALVES E RODRIGUES, et al., 1985; SCHIUMA, 1988; MIZUSAKI, 1989; BENDER et al., 2001; ARAUJO et al., 2006; THOMAZ-FILHO et al., 2008; SOUZA et al. 2008). Sua importância é frequentemente relacionada à ocorrência de cinzas vulcânicas como marcos estratigráficos, rochas-reservatório magmáticas, rochas ígneas selantes, formação de trapas estruturais associadas às intrusões e principalmente à maturação termoquímica de hidrocarbonetos, relacionada ao calor fornecido por um evento magmático que inclusive pode em alguns casos compensar baixos fluxos térmicos na bacia (EIRAS & WANDERLEY FILHO, 2003).

Segundo classificação de Magoon & Dow (1994), sistemas petrolíferos cuja maturação da matéria orgânica está relacionada ao calor promovido por intrusões magmáticas são denominados *sistemas atípicos*. Nesse contexto, soleiras e diques relacionados a sequências sedimentares potencialmente geradoras de hidrocarbonetos podem induzir o processo de maturação térmica, geração de petróleo e migração primária, secundária ou terciária no sistema (figura 11).

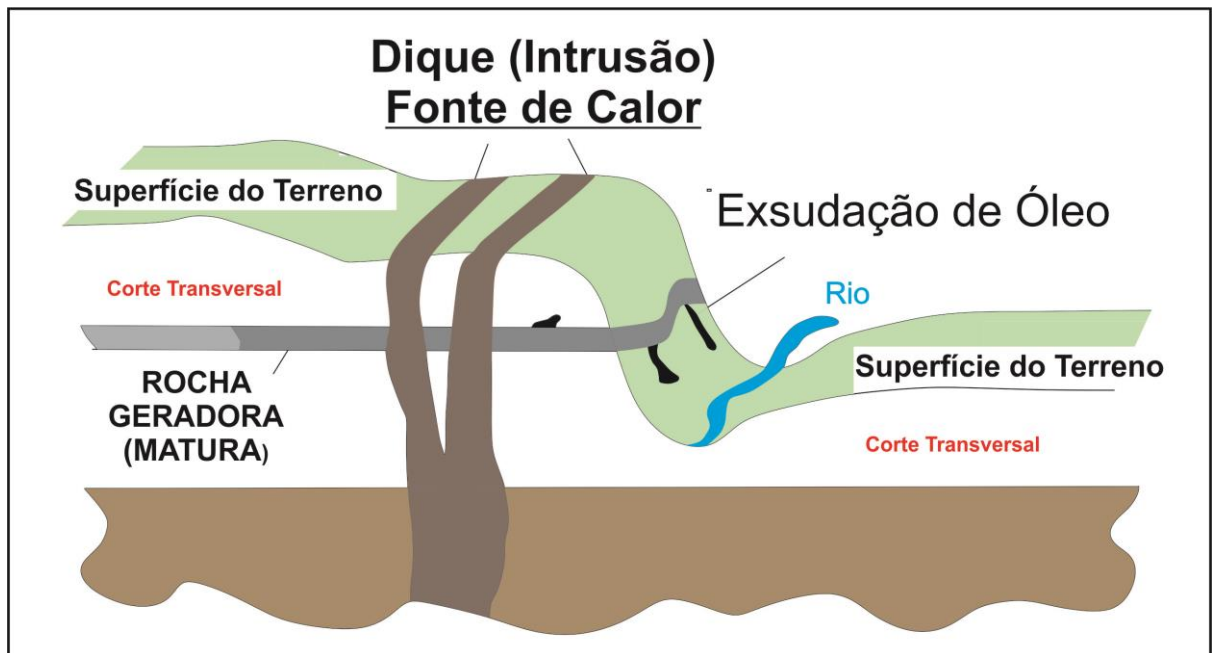


Figura 11: Diques afetando rochas geradoras de petróleo, promovendo migração e escape de hidrocarbonetos na superfície (migração terciária) (modificado de MAGOON & DOW, 1994).

Os principais eventos magmáticos que afetaram as bacias sedimentares brasileiras correspondem a seis principais picos (figura 12), sendo dois relacionados à magmatismo toleítico (um primeiro por volta de 215 Ma, no Triássico e outro em torno de 180 Ma, no Jurássico); dois associados a intrusões básicas a intermediárias (um terceiro ao redor de 130 Ma no Eocretáceo e outro próximo a 80 a 90 Ma, no Santoniano/Turoniano); e duas manifestações de caráter intermediário a alcalino (com maior relevância entre 40 a 60 Ma, no Eoceno e por volta de 50 Ma, do Eoceno ao Recente) (THOMAZ-FILHO et al., 2008).

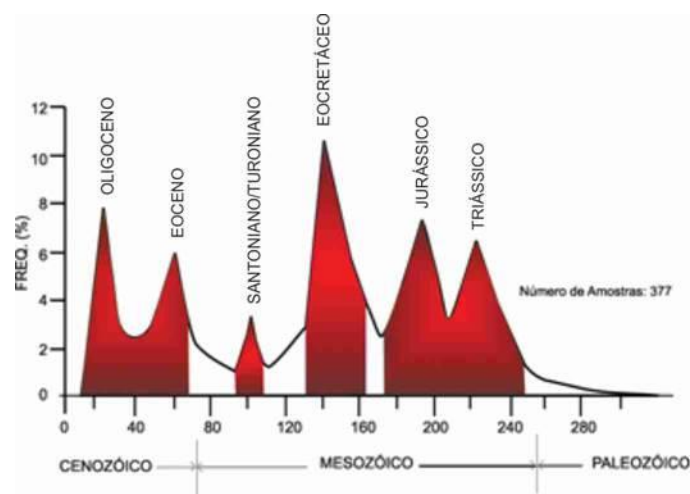


Figura 12: Idades principais das rochas intrusivas básicas e alcalinas obtidas por datações radimétricas K/Ar e suas relações com o tempo geológico (THOMAZ-FILHO et al. 2008).

Os eventos magmáticos ativos no Triássico e Jurássico apresentam amplo registro nas bacias sedimentares paleozoicas do Solimões e do Amazonas, enquanto que os episódios referentes ao Triássico, Jurássico e Eocretáceo mostram-se importantes na Bacia do Parnaíba. Na Bacia do Paraná, o evento eocretácico apresenta fundamental importância em função de sua relação com os expressivos derrames básicos da Formação Serra Geral e intrusivas associadas. A ocorrência de magmatismo em escala continental deve-se principalmente aos diferentes contextos tectônicos do período de formação, aos quais são associados três principais picos da figura THOMAZ-FILHO et al., 2008). O primeiro deles tem relação com a separação completa entre a América do Sul e África, datada do Santoniano/Turoniano (em torno de 90 Ma). Já os outros dois estão associados à ação de magmatismos pontuais, os chamados “*hot spots*”, resultantes da deriva da América do Sul para oeste e consequente afastamento em relação à África (THOMAZ-FILHO et al., 2008). Destacam-se então os picos do Eoceno (próximo a 50 Ma) e do Oligoceno (cerca de 10 Ma), sendo o primeiro atuante na margem sudeste do país, em regiões como Cabo Frio (RJ) e Arquipélago de Abrolhos (ES) e o segundo fruto da deriva continental que persiste até hoje (THOMAZ-FILHO et al., 2008). Coutinho (2008) relaciona o evento precursor à abertura do Atlântico-sul (131+2Ma) a um sistema de diques dispostos em junção-tríplice, cujo eixo central localiza-se na zona costeira do estado do Paraná. Na porção sul, as intrusões alojaram-se ao longo dos trends N-S (litoral de Santa Catarina), mostrando direções NW-SE na região do arco de Ponta Grossa e NE-SW próximo à costa dos estados de São Paulo e Paraná.

No que se refere ao contexto geotectônico da Bacia do Paraná, destaca-se principalmente o evento magmático datado do Eocretáceo (há 132 Ma, segundo MARQUES & ERNESTO, 2004), cuja importância associa-se ao efeito termal gerado pelas intrusões nas unidades sedimentares da bacia (THOMAZ-FILHO et al., 2008). Tal efeito mostra-se ainda mais relevante quando associado às sequências de topo da Formação Irati (Membro Assistência), reconhecida pelos elevados teores de material orgânico e potencial unidade geradora de petróleo. Com base em estudos semelhantes nas bacias do Parnaíba e Amazonas, Alves & Rodrigues (1985) e Rodrigues (1995) determinaram relações entre as intrusões e os pacotes sedimentares por elas afetados, sendo verificada que a zona de efeito da intrusão nas encaixantes é geralmente equivalente à espessura do corpo intrusivo. Verificou-se que este efeito tende a ser potencializado quando ocorrem pulsos magmáticos múltiplos associados. Em termos de calor transmitido, estabeleceu-se também que quanto maior a profundidade de alojamento da intrusão, maior é a energia térmica fornecida às rochas da bacia. Souza et al.

(2008) destaca também a importância da temperatura dos corpos intrusivos, bem como da profundidade em que se alojam e ainda da condutividade térmica das rochas encaixantes (relacionadas principalmente à composição mineralógica e orgânica, permo-porosidade e presença de fluidos nas mesmas). Foi descrita também a ocorrência de três zonas principais relacionadas à maturação das rochas, variando respectivamente de acordo com sua proximidade às intrusões: zonas supermatura, matura e imatura, sendo apenas a zona matura potencial para eventuais ocorrências de petróleo.

Considerando o fato de a Formação Irati não ter atingido profundidades associadas a graus geotérmicos suficientemente elevados para que houvesse a devida maturação dos folhelhos orgânicos, a entrada dos corpos intrusivos foi de extrema importância para o estabelecimento de um sistema petrolífero efetivo na região (ARAÚJO et al., 2000). Além do fornecimento de calor, os diques e soleiras básicos também podem ter atuado como rochas selantes e/ou associados a trapas, impedindo a migração terciária do petróleo e favorecendo sua acumulação em maiores quantidades. As ocorrências de hidrocarbonetos na região da Fazenda Betumita, localizada a cerca de 70 quilômetros da área estudada, merecem destaque em função das expressivas exsudações de material asfáltico relacionadas às estruturas do Domo de Anhembi e associadas ao sistema petrolífero acima descrito.

3.3.1. Fazenda Betumita

A efetividade da Formação Irati como rocha geradora já havia sido descrita em trabalhos pioneiros como Moraes Rego (1930 apud AMARAL, 1969) e Oppenheim (1934 apud AMARAL, 1969), sendo comprovada em trabalhos como Araújo et al. (2006), Mateus et al. (2014) e Lisboa (2006), com teores de matéria orgânica quantitativa dos mais elevados do mundo e que podem alcançar até os 23% (MILANI, 2007).

A região do Domo de Anhembi, região leste do estado de São Paulo (figura 13) compreende grandes exsudações de óleo associadas ao sistema petrolífero Irati-Pirambóia. Estas ocorrências foram estudadas por Thomaz-Filho et al. (1982) e posteriormente detalhadas por Araújo et al. (2000), Araújo et al. (2006) e Thomaz-Filho et al. (2008) por meio de análises geoquímicas dos folhelhos orgânicos da Fm. Irati, testemunhos de sondagens, estudos de relevo, perfilagem de raios gama, resistividade e potencial espontâneo e reconhecimentos de campo.

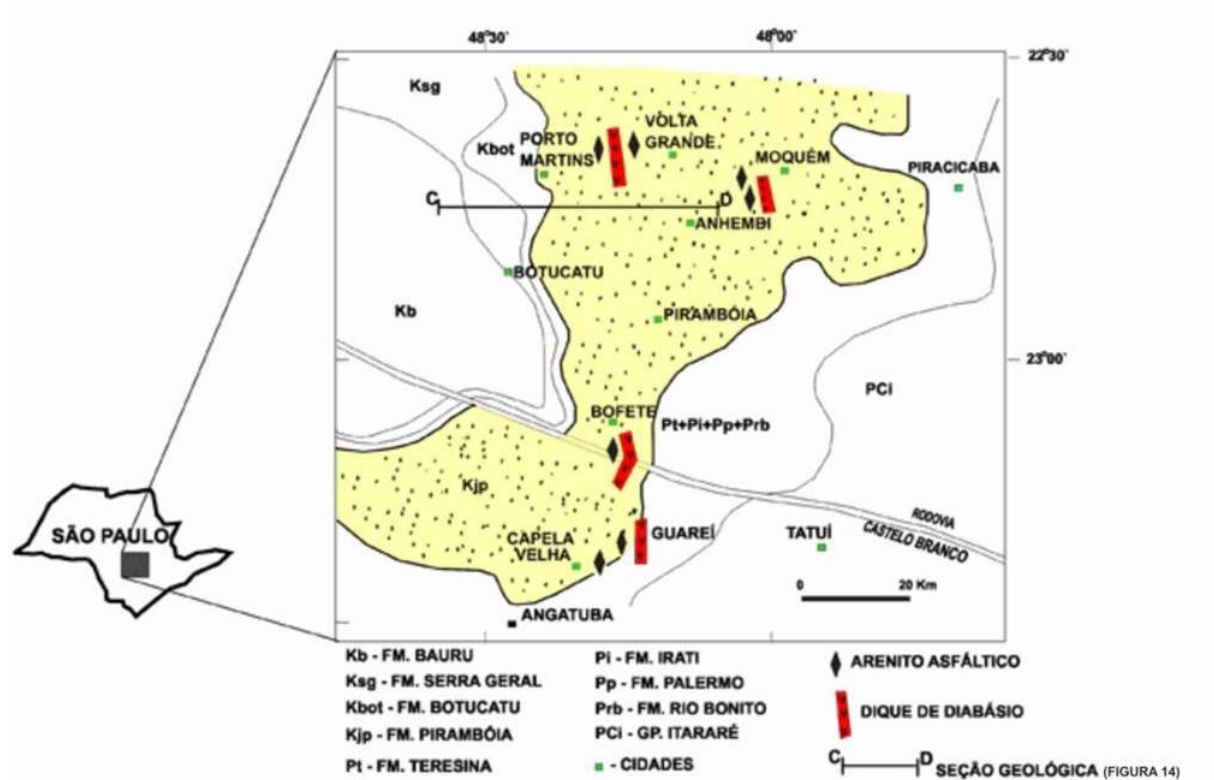


Figura 13: Principais exsudações de óleo na região do Domo de Anhembi associados a diques de diabásio (THOMAZ-FILHO et al., 2008).

Araújo et al. (2000) definiram os hidrocarbonetos gerados como “óleo imaturo e pesado”, cuja maturação resultou da energia térmica fornecida pelas intrusões associadas ao Eocretáceo da Bacia do Paraná. Nessa localidade, diques de orientação N-S podem ter atuado ainda como rochas selantes, impedindo a migração lateral de petróleo para fora da bacia. Considerando a existência de rochas geradoras, rocha reservatório (arenitos da Fm. Pirambóia), rochas selantes, trapa estrutural relacionada ao Domo de Anhembi e migração de óleo por meio de fraturas associadas aos corpos intrusivos, Araújo et al. (2000) caracterizou a existência de um sistema petrolífero atípico que apresenta uma sincronia adequada entre maturação, migração e acumulação de hidrocarbonetos na região (figura 14). Pode-se dizer que de forma análoga à área estudada no presente trabalho, as ocorrências de hidrocarbonetos na Fazenda Betumita apresentam elevado controle estrutural principalmente associado aos altos estruturais e expressivos eventos intrusivos.

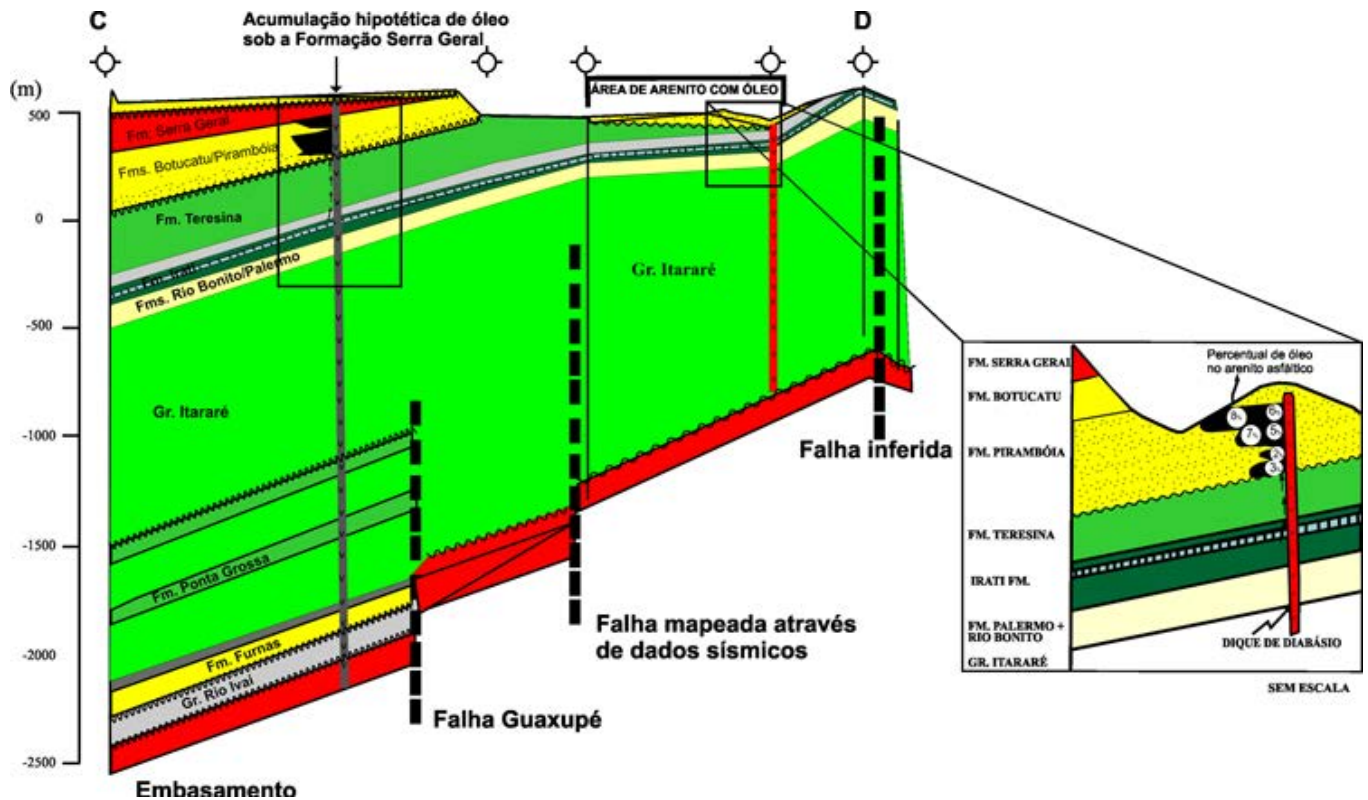


Figura 14: Seção geológica e esquema de migração do óleo gerado na Formação Irati para a Formação Pirambóia no Domo de Anhembi (THOMAZ-FILHO et al., 2008).

3.3.2. Alto Estrutural de Pitanga

Mesmo representando em pequenas proporções em relação à Fazenda Betumita, mas caracterizando importante controle estrutural, Aquaroli (2013) reconheceu algumas ocorrências localizadas nas proximidades de Ipeúna e Charqueada, no contexto do Alto Estrutural de Pitanga. Os hidrocarbonetos ocorrem em arenitos da Formação Tatuí, localizados em blocos elevados por falhas direcionadas NW-SE, alçados em relação à Formação Irati. Os diques de rochas básicas preenchendo fraturas e algumas das falhas teriam sido responsáveis pela maturação da matéria orgânica, e as fraturas e falhas teriam servido de rotas de migração para os hidrocarbonetos.

4. Materiais e Métodos

Os materiais de estudo do presente trabalho englobam principalmente as estruturas presentes em afloramentos, amostras e lâminas relacionadas às intercalações de folhelhos e calcários do Membro Assistência da Formação Irati nas regiões de Rio Claro e Ipeúna (SP), associados ao importante contexto tectono-estratigráfico do Alto Estrutural da Pitanga. Para a caracterização do padrão estrutural da Formação Irati na região, a obtenção das possíveis direções preferenciais de migração de hidrocarbonetos em fraturas e falhas e um maior entendimento do sistema petrolífero relacionado a esse contexto, foram elaboradas as seguintes etapas e metodologias: levantamento bibliográfico, levantamento de dados, tratamento e interpretação de dados estruturais e integração dos dados.

4.1. Levantamento Bibliográfico

A reunião de trabalhos previamente realizados na região de estudo consiste em uma etapa fundamental para estabelecer o contexto geológico dentro do qual a pesquisa será realizada. Dessa forma, fez-se um levantamento detalhado acerca dos principais trabalhos, desde os pioneiros do início do século XX até os mais recentes, envolvendo desde um quadro mais amplo associado à Bacia do Paraná até o contexto regional marcado pelo arcabouço tectônico do Alto Estrutural de Pitanga. Foi realizada também uma contextualização teórica relacionada aos principais temas abordados no trabalho, abrangendo conceitos ligados a sistemas petrolíferos, a fraturas como meios importantes de transporte de fluidos e ainda a importância das intrusões ígneas como agentes de maturação da matéria orgânica e consequente geração de hidrocarbonetos.

4.2. Levantamento de Dados

Para fornecer um maior detalhamento ao tema e atingir aos objetivos propostos pelo trabalho, estabeleceu-se um sistema de coleta de dados em três escalas de estudo: macroscópica, mesoscópica e microscópica.

4.2.1. Análise Macroscópica

A análise macroscópica da região baseou-se no desenvolvimento de um banco de dados georreferenciados através do software ArcGIS, versão 10.1, abrangendo cartas topográficas, imagens SRTM e imagens de satélite (Astrium/CNES). A partir desse grupo de informações, foi possível a obtenção dos mapas de lineamento em duas escalas diferentes: 1:250.000, abrangendo as principais estruturas regionais; 1:25.000, mostrando os traços mais evidentes localmente na área de estudo.

O mapa de lineamentos na escala 1:250.000 foi baseado no Modelo Digital de Terreno (MDT) obtido a partir do conjunto de dados da missão espacial SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) da Nasa (figura 15), com resolução espacial aproximada de 90 metros no Brasil e adquiridos por meio da interferometria entre dados relacionados a um mesmo ponto na superfície obtidos a partir de duas posições distintas. Os dados brasileiros de relevo encontram-se disponíveis no site da Embrapa (<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>). O traçado dos lineamentos seguiu diferentes posições de iluminação passíveis de serem combinadas na imagem, aplicando contrastes e ressaltando determinadas direções em função de outras até que todas fossem igualmente traçadas.

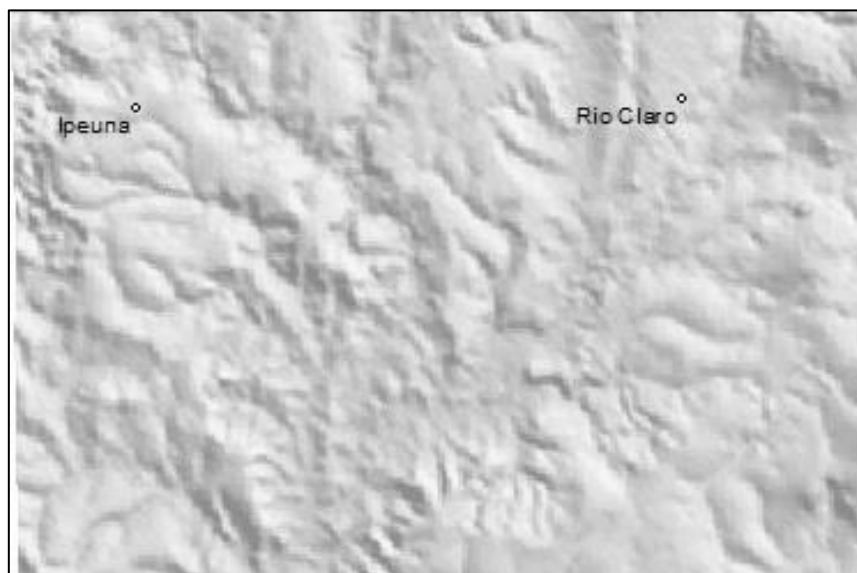


Figura 15: Exemplo de imagem SRTM utilizada na análise macroscópica da área de estudo. Fonte: Embrapa, 2015.

Já o mapa de lineamentos na escala 1:25.000 foi realizado com base em imagens de satélite Astrium (CNES) da área de estudo, com data de aquisição de 09 de agosto de 2014 e disponíveis gratuitamente no software Google Earth (figura 16). O traçado dos lineamentos também foi realizado diretamente no computador, através do software ArcGIS, versão 10.1, e sua interpretação por meio dos diagramas de roseta seguiu os mesmos procedimentos acima descritos.



Figura 16: Mosaico de imagens Astrium (CNES) na escala 1:25.000 referentes à área de estudo. Fonte: Google Earth.

Os traços dos lineamentos foram realizados diretamente em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) sobre as imagens escolhidas, seguindo os conceitos de Soares & Fiori (1976) com relação aos elementos texturais de relevo e drenagem, considerando que zonas de fraturamento geralmente estão associadas ao desenvolvimento de anomalias e padrões retilíneos de drenagem, por exemplo. As análises de direção e comprimento dos lineamentos deu-se por meio de diagramas de roseta, gerados com intervalos de 10° a partir da conversão dos lineamentos traçados no ArcGIS (versão 10.1) em *polylines* compatíveis com o software AutoCAD 2014, interpretados através da rotina *roseta.lisp* carregada no mesmo software. Os layouts finais dos mapas foram confeccionados no software Corel Draw, versão 17.1. A análise de falhas e lineamentos regionais, bem como da extensão dos afloramentos da Formação Irati foi realizada com base no mapa geológico de Sousa (2002) (APÊNDICE 1).

4.2.2. Análise Mesoscópica

Com base no quadro estrutural regional obtido a partir da análise macroscópica e seleção dos principais pontos a serem investigados, foram organizadas as etapas de campo, as quais possibilitaram estudos fundamentais para o presente trabalho, sendo eles: a coleta de dados estruturais na Formação Irati e nas unidades sobre e suprajacentes; análise das formas de ocorrência de hidrocarbonetos; estudo das relações tectono-estratigráficas entre as intrusivas básicas e a Formação Irati; confecção de esquemas em afloramentos; e documentação fotográfica. Foram visitados 49 afloramentos principalmente ao longo do eixo NW-SE da área (figura 17, APÊNDICE 2), que coincide com a zona de afloramentos da Formação Irati e com a principal direção dos lineamentos analisados na etapa anterior.



Figura 17: Imagem de satélite retirada do Google Earth contendo a área de estudo e os 49 afloramentos visitados na região.

As etapas de campo focaram, portanto, na identificação e descrição das principais estruturas associadas ao quadro tectônico da Formação Irati e seu potencial em gerar, transportar e por vezes armazenar hidrocarbonetos.

A coleta de dados estruturais ocorreu de forma sistemática, procurando-se obter um número de medidas representativo para cada afloramento analisado, atentando para critérios como espaçamento e abertura das fraturas e falhas observadas. De forma semelhante,

prosseguiu-se a coleta de amostras para análises futuras e laminação. A grande maioria das amostras foi obtida na Pedreira Bonança (município de Ipeúna- SP) (figura 18), pelo fato de apresentar excelentes exposições da unidade estudada, além de níveis visivelmente ricos em material orgânico nas rochas.



Figura 18: Vista geral da principal cava estudada, Pedreira Bonança (Ipeúna- SP).

Sendo assim, a pedreira foi dividida em dez setores, de modo a dinamizar a análise e organizar a coleta de dados, permitindo que houvesse de fato uma amostragem sistemática e representativa no local. Amostras isoladas foram coletadas em outros afloramentos visitados, sendo, no entanto menos relevantes ao estudo apresentado. Após a conclusão das etapas de campo, foram selecionadas duas amostras para a realização de análises químicas.

4.2.3. Análise Microscópica

A partir do conjunto de dados coletados em campo, foram selecionadas cinco amostras representativas dos principais setores analisados da Pedreira Bonança (Ipeúna- SP), bem como uma amostra do afloramento VG-7 para laminação (figura 19).

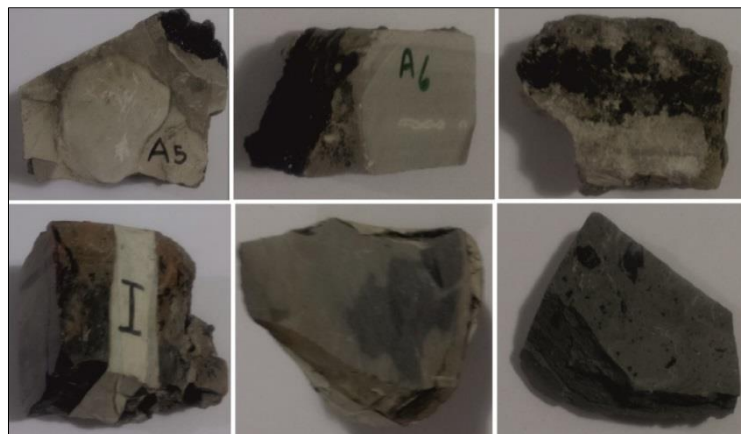


Figura 19: Conjunto de seis amostras selecionadas para laminação.

A partir das amostras selecionadas, foram confeccionadas seis lâminas delgadas pelo Laboratório de Laminação do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da UNESP, sendo uma lâmina para cada amostra. As lâminas delgadas foram descritas e analisadas no âmbito do Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo (UNESPetro) em microscópio ótico Leica DM 2500P, e as fotografias foram obtidas por meio do aparato fotográfico Leica DFC 310FX acoplado ao microscópio utilizado. A análise petrográfica em luz branca transmitida e luz azul incidente (fluorescente) utilizou-se de dois principais aumentos (10X e 20X) e contou com o auxílio do Prof. Dr. Mitsuru Arai e teve como enfoque principal a identificação de microestruturas passíveis de conter hidrocarbonetos, bem como de indícios da presença deles em poros e estruturas diagenéticas da unidade. A descrição petrográfica geral das rochas em lâmina foi baseada nas classificações de Folk (1962).

A microscopia de luz branca transmitida permitiu a identificação dos minerais constituintes da lâmina, bem como microestruturas e material orgânico impregnado. Já a microscopia de luz azul incidente baseia-se na propriedade da fluorescência que determinados materiais apresentam, que consiste na emissão de radiação com maiores comprimentos de onda quando estimuladas por feixes de radiação com baixos comprimentos de onda. Tal processo está relacionado à excitação dos elétrons das substâncias, que se elevam a orbitais de maior energia e ao retornarem a sua posição inicial, liberam energia na forma de fótons (comprimentos de onda mais longos) e resultam em uma coloração geralmente verde-amarelada sob o microscópio (MENDONÇA FILHO & MENEZES, 2002).

4.3. Tratamento e Interpretação de Dados Estruturais

Os dados estruturais foram tratados por meio do software OpenStereo, a partir do qual foram elaborados estereogramas na forma de projeções ciclográficas e/ou polares projetadas sempre no hemisfério inferior do círculo. Conceitos teóricos relacionados a construção de estereogramas podem ser encontradas em Carneiro (1996). Os diagramas de paleotensão foram elaborados através do software WinTensor e alimentados com os dados de falhas coletados em campo.

4.4. Integração dos Dados

A base cartográfica utilizada na geração dos mapas de afloramento e geológico foi obtida a partir da digitalização das cartas topográficas de Rio Claro e Piracicaba, fornecidas pelo IBGE na escala 1:50.000 através do software ArcGIS, versão 10.1. O mapa geológico foi baseado nos trabalhos de Sousa (2002) e Aquaroli (2013) e apresenta modificações de acordo com os dados coletados nos trabalhos de campo.

Os resultados das análises nas três escalas foram integrados, permitindo a identificação do hidrocarboneto presente nas rochas, bem como seu modo de ocorrência e as direções preferenciais de fraturas pelas quais é transportado. A discussão acerca dos eventos tectônicos que afetaram a região mostrou-se imprescindível tanto com relação ao sincronismo necessário para o desenvolvimento do sistema petrolífero quanto para a identificação dos principais controles estruturais de migração dos hidrocarbonetos.

5. Resultados

Os principais resultados obtidos correspondem a análise macroscópica, por meio do quadro estrutural regional presente nos mapas de lineamentos, montado com base em imagens aéreas; análise mesoscópica, que inclui dados de afloramentos relacionados a medidas estruturais das unidades litoestratigráficas, esquemas, imagens e principalmente a identificação das formas de ocorrência de hidrocarbonetos na região, com enfoque para a migração por meio de fraturas; e análise microscópica, com enfoque na presença de hidrocarbonetos em microestruturas descritas em lâminas delgadas confeccionadas a partir de amostras de calcário.

5.1. Análise Macroscópica

O quadro estrutural macroscópico da região foi analisado em duas etapas, sendo a primeira relacionada ao estudo do mapa geológico na escala 1:100.000 elaborado por Sousa (2002) (APÊNDICE 1), a partir do qual foram observadas principalmente falhas normais, por vezes encaixadas em vales fluviais (principalmente ao longo do Rio Passa Cinco), ou seguindo grandes feições lineares do relevo. Constatou-se que a direção marjoritária das falhas regionais é NW-SE, um total de treze falhas seguindo esse *trend* principal, enquanto apenas três apresentam direção NE-SW. Pôde-se observar ainda a distribuição da Formação Irati na área de estudo (coloração cinza no mapa), concentrando-se principalmente na porção centro-sul da área e apresentando intenso controle por falhas. Outro elemento importante a ser destacado no mapa geológico são os diques de diabásio alinhados a falhas regionais de orientação NW-SE.

A segunda etapa de análise consistiu na confecção de dois mapas de lineamentos, sendo um na escala 1:250.000, traçado a partir de imagens SRTM e cujo objetivo é a obtenção de um quadro mais amplo e geral da área; e outro na escala 1:25.000, realizado com base em imagens Landsat 7 que conferem uma análise mais local em termos dos principais padrões estruturais da área estudada. A partir do mapa de lineamentos na escala 1:250.000 (figura 20), foram gerados diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados, a partir dos quais pôde-se observar que os lineamentos mais extensos na área correspondem aos NW-SE (principalmente N50W) e secundariamente aos NE-SW (N40E). Quanto às estruturas mais frequentes, tem-se uma ampla concentração de medidas ao longo do *trend* NW-SE.

Lineamentos com direções N-S também estão presentes, embora menos expressivos e mais localizados.

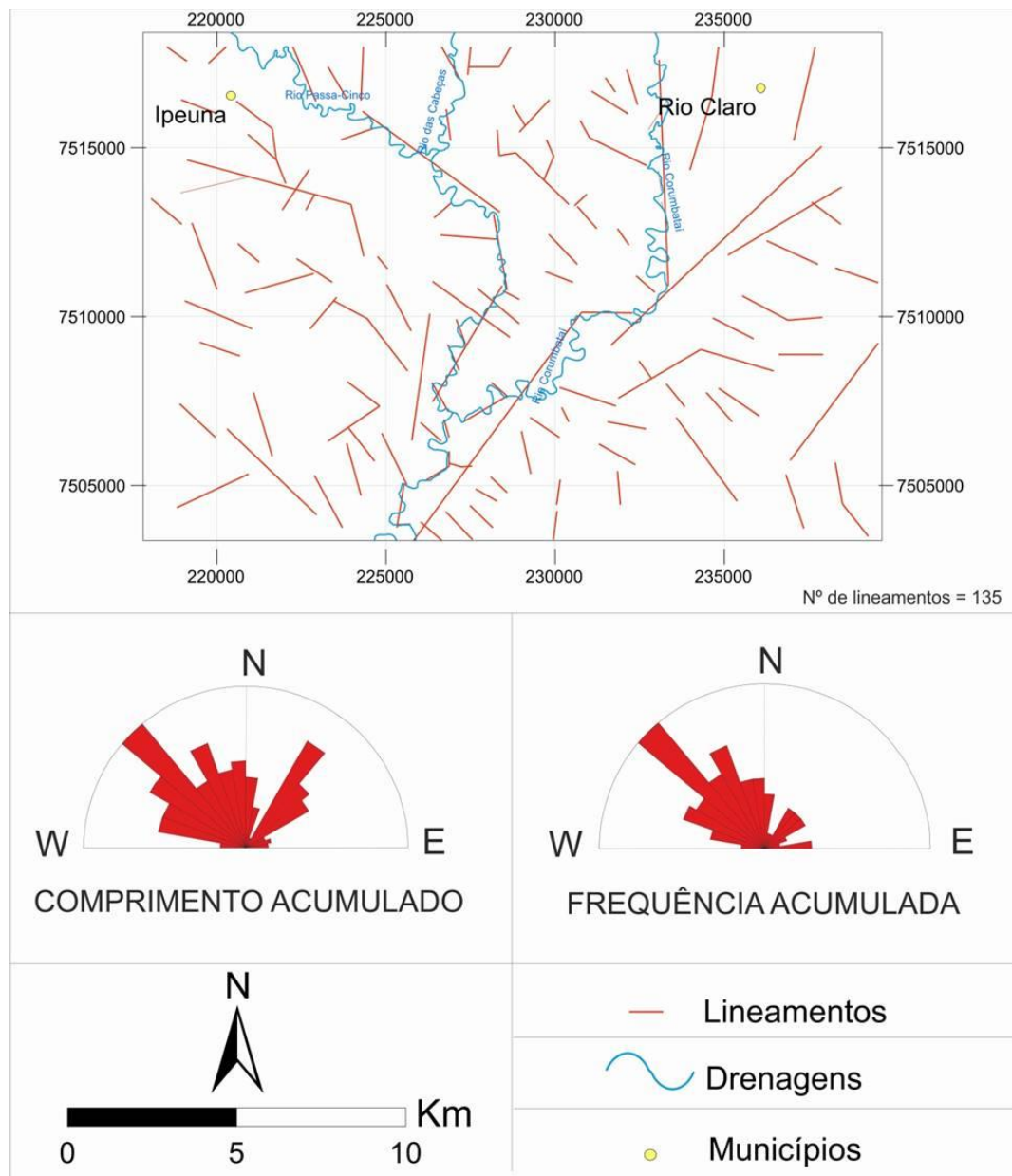


Figura 20: Mapa de lineamentos na escala 1:250.000 e diagramas de roseta.

O mapa de lineamentos na escala 1:25.000 apresentado na figura 21 também foi analisado a partir das rosetas de comprimento e frequência acumulados, que mostraram lineamentos mais extensos principalmente nas direções NW-SE (N50W e N60W), e secundariamente nas direções NE-SW (N40E e N50E). Direções N-S também foram observadas em menores proporções. Em termos de frequência, tem-se uma mais ampla gama

de direções, sendo as principais ainda NW-SE (principalmente N50W), seguida pelas NE-SW (N40E, N50E). Direções N10W e N20W, mais próximas à N-S mostraram-se mais frequentes em relação ao mapa de lineamentos na escala 1:250.000.

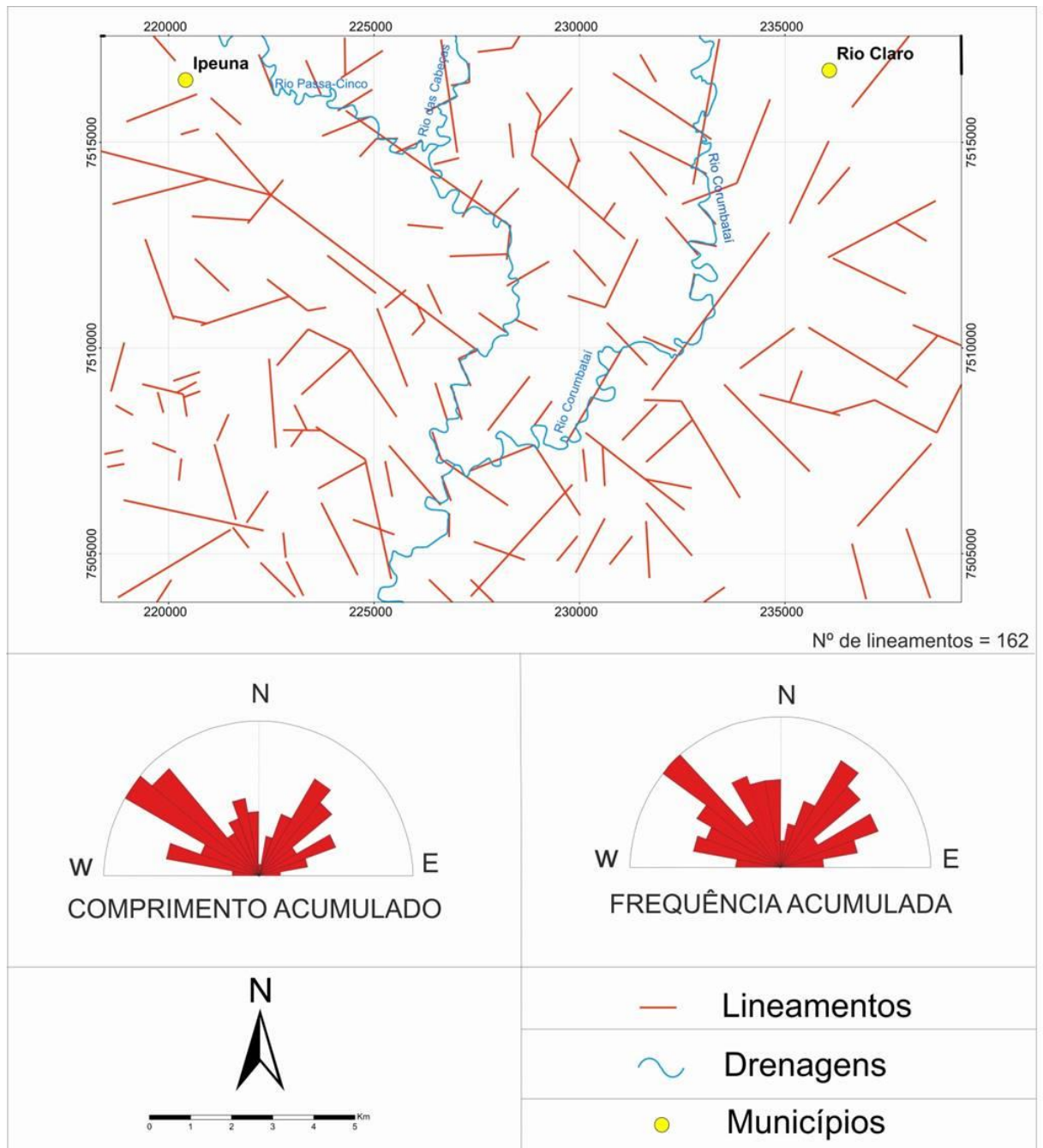


Figura 21: Mapa de lineamentos na escala 1:25.000 e diagramas de roseta.

5.2. Análise Mesoscópica

Corresponde principalmente a análise dos dados estruturais por meio de estereogramas, bem como das formas de ocorrência de hidrocarbonetos na região e principais estruturas relacionadas à migração desse material.

5.2.1. Formas de Ocorrência de Hidrocarbonetos

Foram identificadas quatro formas principais de ocorrência de hidrocarbonetos na região: preenchendo fraturas, brechas estruturais, cavidades e dispersos ao longo do acamamento (associados a zonas de alta permo-porosidade nos carbonatos).

Na Pedreira Bonança (Ipeúna-SP), local onde foi coletada a maioria dos dados de ocorrência de hidrocarbonetos, há um contato nítido entre dois blocos com reologias distintas; um basal, com aproximadamente doí a cinco metros de altura; e um de topo, com cerca de dez metros de altura. Na sequência basal, não há intercalações com folhelhos e o calcário tende a se comportar de forma mais rúptil frente à deformação, mostrando frequentemente fraturas com espaçamento variável (desde alguns centímetros a um metro), em sua maioria abertas e pervasivas nos afloramentos. Fraturas ramificadas preenchidas ou não por hidrocarbonetos também são frequentes nesse pacote. A sequência superior apresenta intercalações centimétricas de calcários e folhelhos, cuja plasticidade confere a mesma uma resposta mais dúctil à deformação acomodando os esforços de modo a muitas vezes não alcançar os limites de ruptura do maciço.

Dessa forma, pôde-se observar que poucas fraturas marcantes do pacote basal mostram-se evidentes na sequência superior (figura 22) que tende a apresentar fraturas com baixo espaçamento (centimétrico), geralmente confinadas às camadas de calcário.

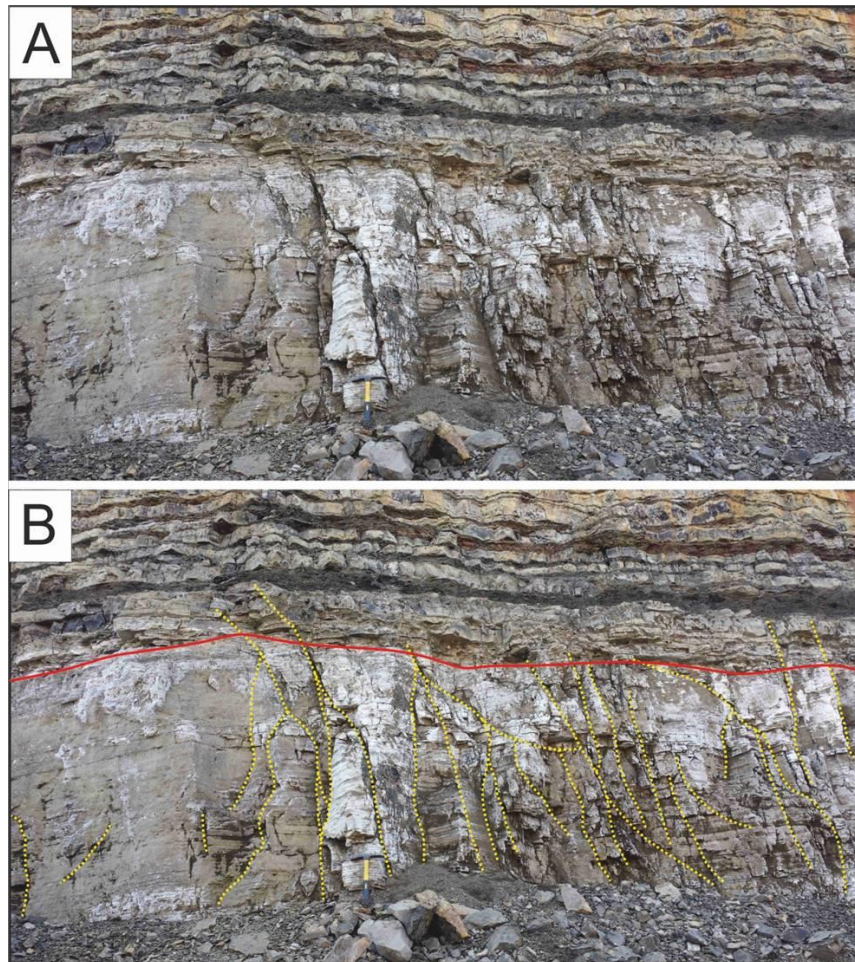


Figura 22: Afloramento mostrando contato (em vermelho) entre as sequências basal e superior da pedreira. Atentar para o intenso fraturamento restrito à porção basal, marcado principalmente por fraturas ramificadas (em amarelo). Poucas fraturas se prolongam até a zona superior, cuja reologia permite que a deformação seja acomodada.

5.2.1.1. Preenchimento de Fraturas

De maneira geral, constataram-se preenchimentos consideráveis por hidrocarbonetos em fraturas de aberturas centimétricas (figura 23), sendo menos comum a ocorrência em aberturas milimétricas, quase fechadas (foto B, figura 24). Os hidrocarbonetos estão presentes na forma de uma cobertura de coloração preta, maleável quando exposto ao sol, com odor característico de material asfáltico (betume), por vezes iridescentes ao longo dos planos de fraturas analisados (figura 25).

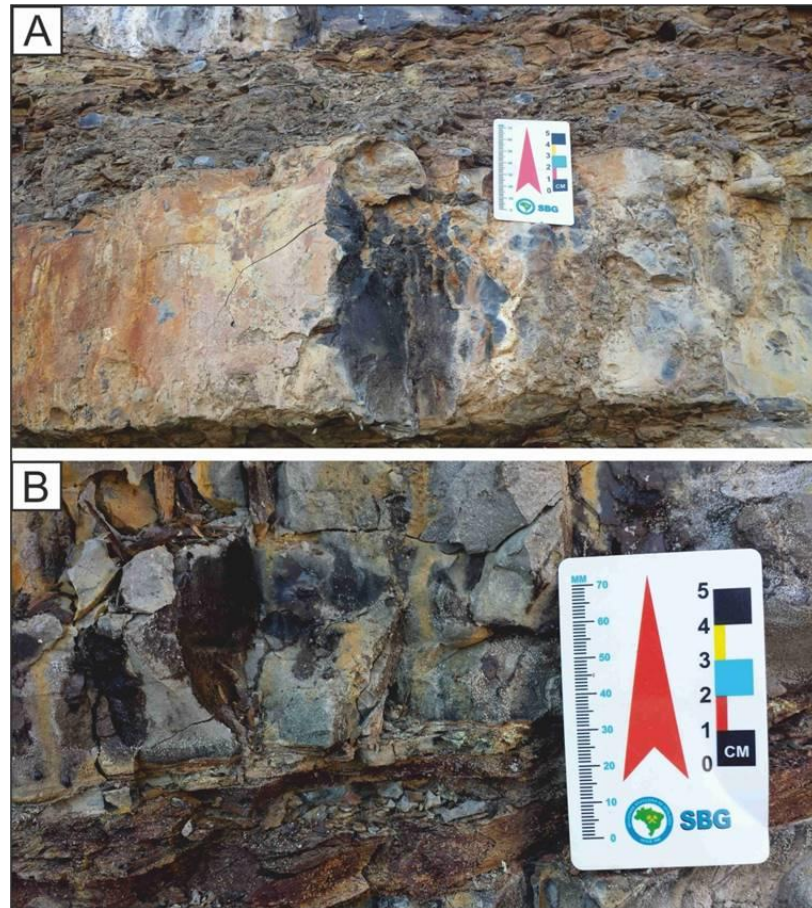


Figura 23: Fraturas abertas preenchidas por hidrocarbonetos.

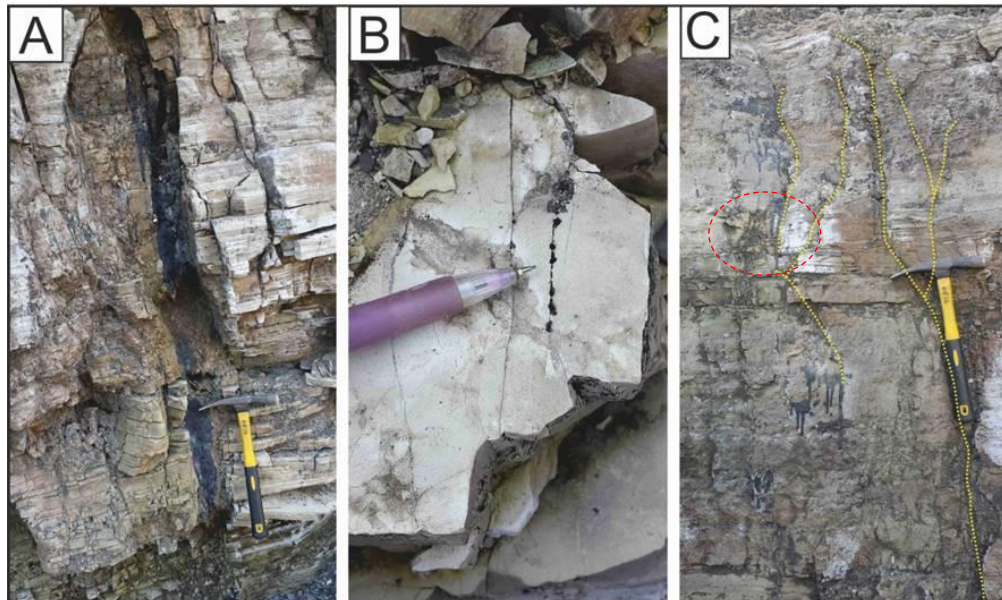


Figura 24: (A) Plano de fratura preenchido por hidrocarbonetos; (B) Fratura semi-aberta preenchida por betume; (C) Rede de fraturas condutoras de material asfáltico (em amarelo) e acumulação local em zonas permo-porosas do calcário (em vermelho).

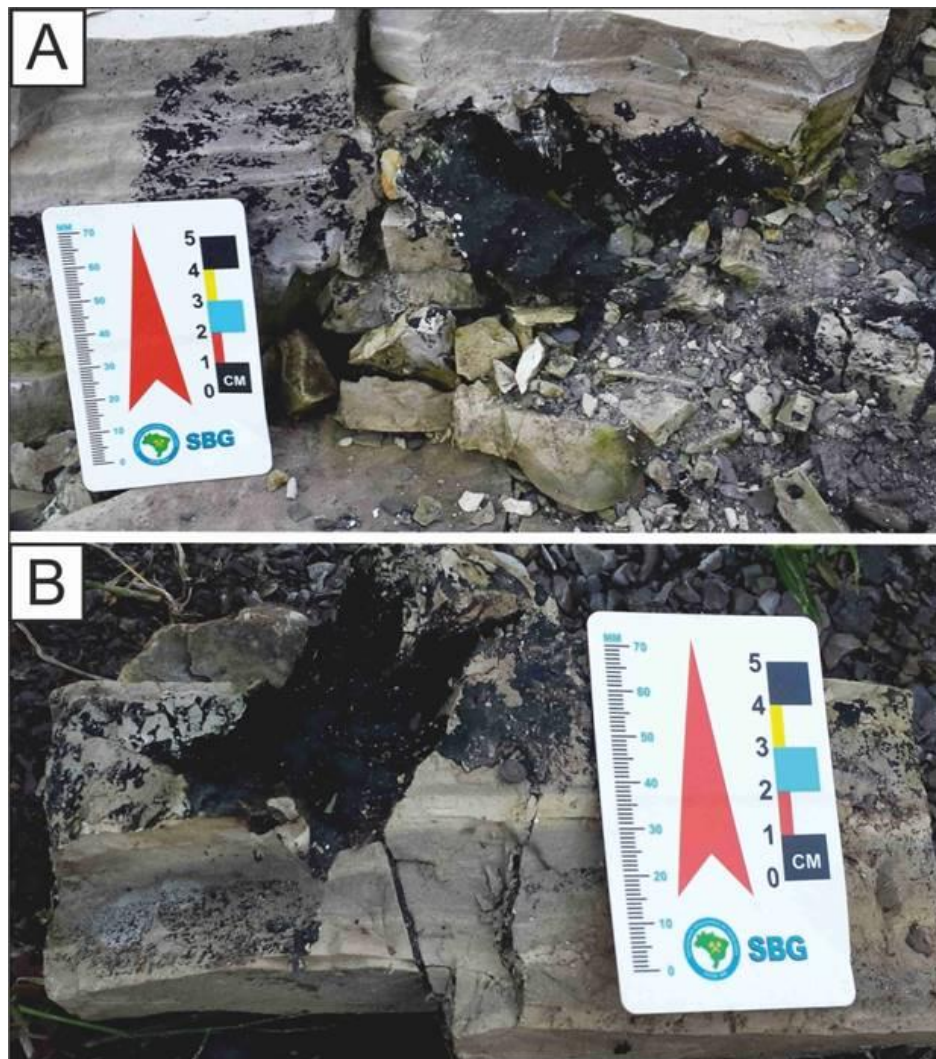


Figura 25: Preenchimento típico de fraturas por material asfáltico (betume).

5.2.1.2. Preenchimento de Brechas Estruturais

Próximo a zonas de intenso falhamento, foram descritas zonas de brechas marcadas por sobrecrecimento de cristais de calcita e fragmentos calcários, frequentemente preenchidas por material orgânico (figura 26). Esse preenchimento está associado ao aumento de permo-porosidade da rocha induzida pela fragmentação da mesma devido a sua proximidade a zonas de falhas, aumentando assim o espaço para a percolação de fluidos.

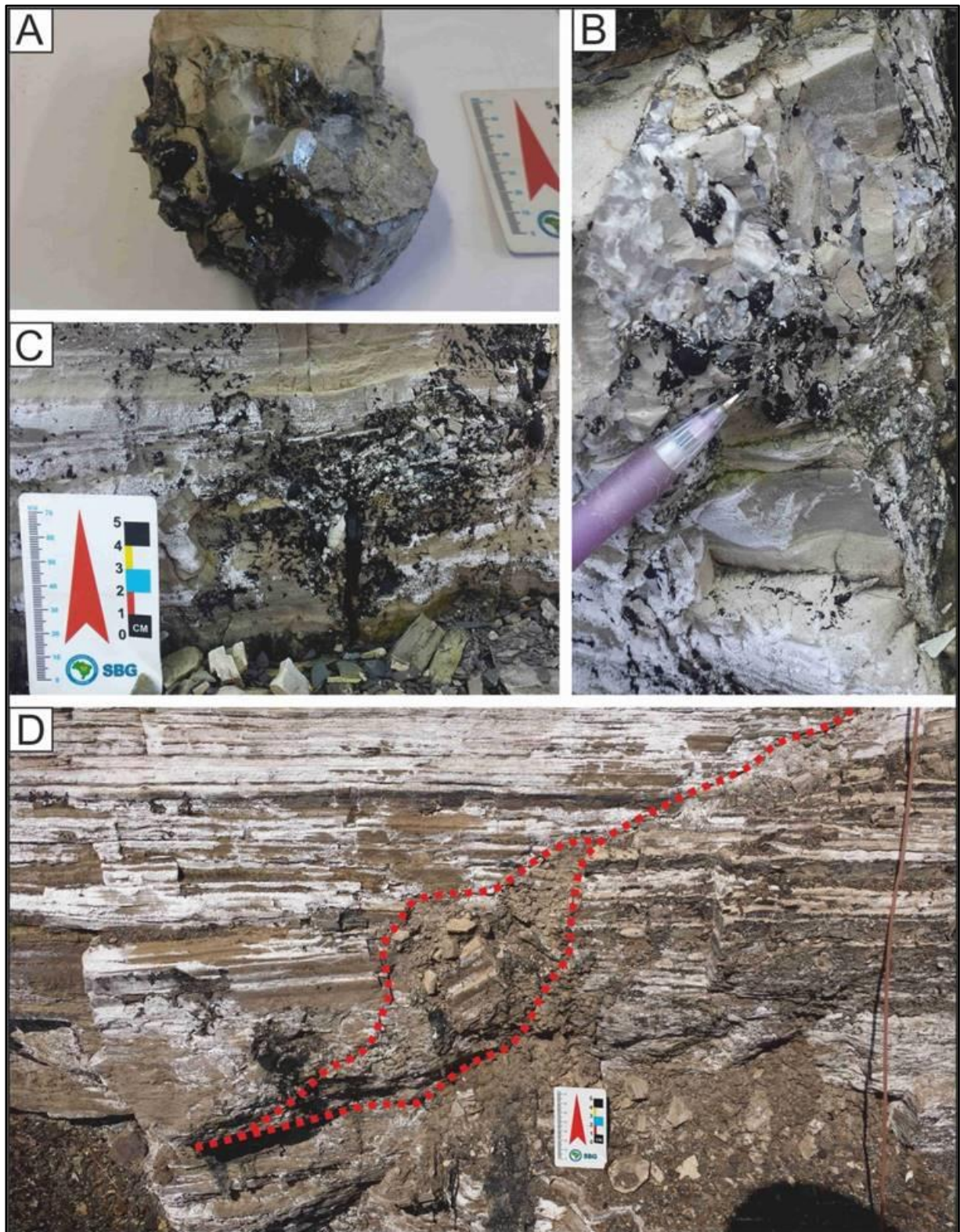


Figura 26: (A) Amostra de brecha com cristais de calcita impregnados por betume; (B, C) Zonas brechadas em afloramentos preenchidas por hidrocarbonetos; (D) Brecha em afloramento (traço em amarelo) mostrando fragmentos de rocha com “manchas” de material orgânico.

5.2.1.3. Preenchimento de Cavidades

Foram descritas cavidades de dimensões milimétricas a centimétricas no calcário, provavelmente associadas à dissolução local dos minerais carbonáticos que o constituem. Ocorrem de forma dispersa ao longo das rochas, podendo apresentar ou não preenchimento por hidrocarbonetos (figura 27).

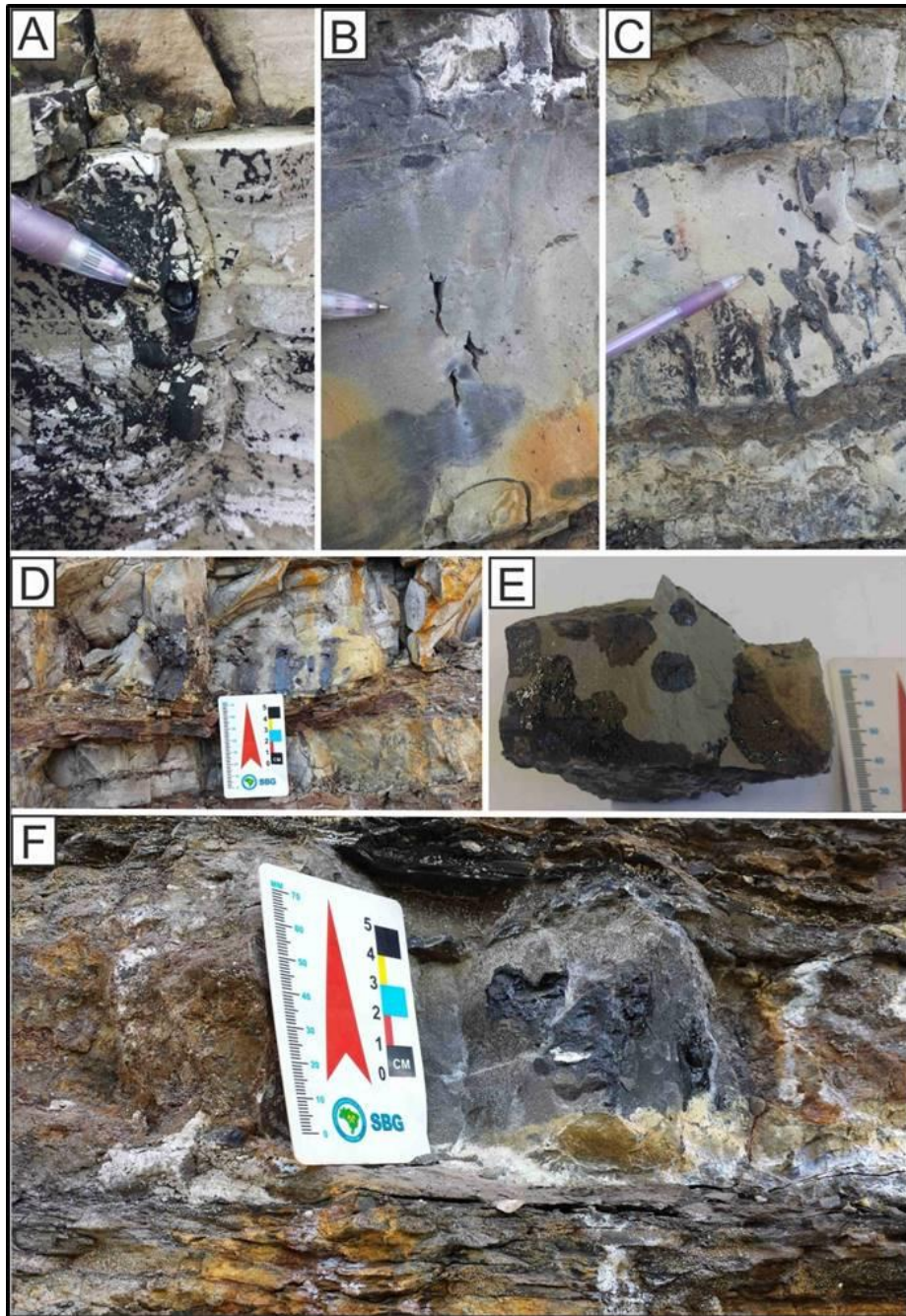


Figura 27: (A) Bolha de betume aprisionada em cavidade na rocha; (B e C) Cavidades vazias e cavidades preenchidas por material asfáltico, respectivamente; (D e F) Cavidades completamente preenchidas em afloramentos; (E) Cavidades impregnadas por betume em amostra de mão.

5.2.1.4. Impregnações no Acamamento (em poros):

A presença de hidrocarbonetos ao longo do acamamento mostrou-se frequente nos afloramentos da pedreira, estando provavelmente associados a zonas de mais alta permo-porosidade nos calcários. Tais ocorrências resultam em grandes manchas de coloração preta, geralmente restritas a níveis estratigráficos restritos e frequentemente associadas a fraturas também preenchidas que podem ter sido responsáveis pelo transporte dos hidrocarbonetos até determinado nível (figura 28). Podem ser observadas também feições de escorrimento de betume ao longo do afloramento, em função das elevadas quantidades de material orgânico armazenado nessas zonas porosas do calcário.

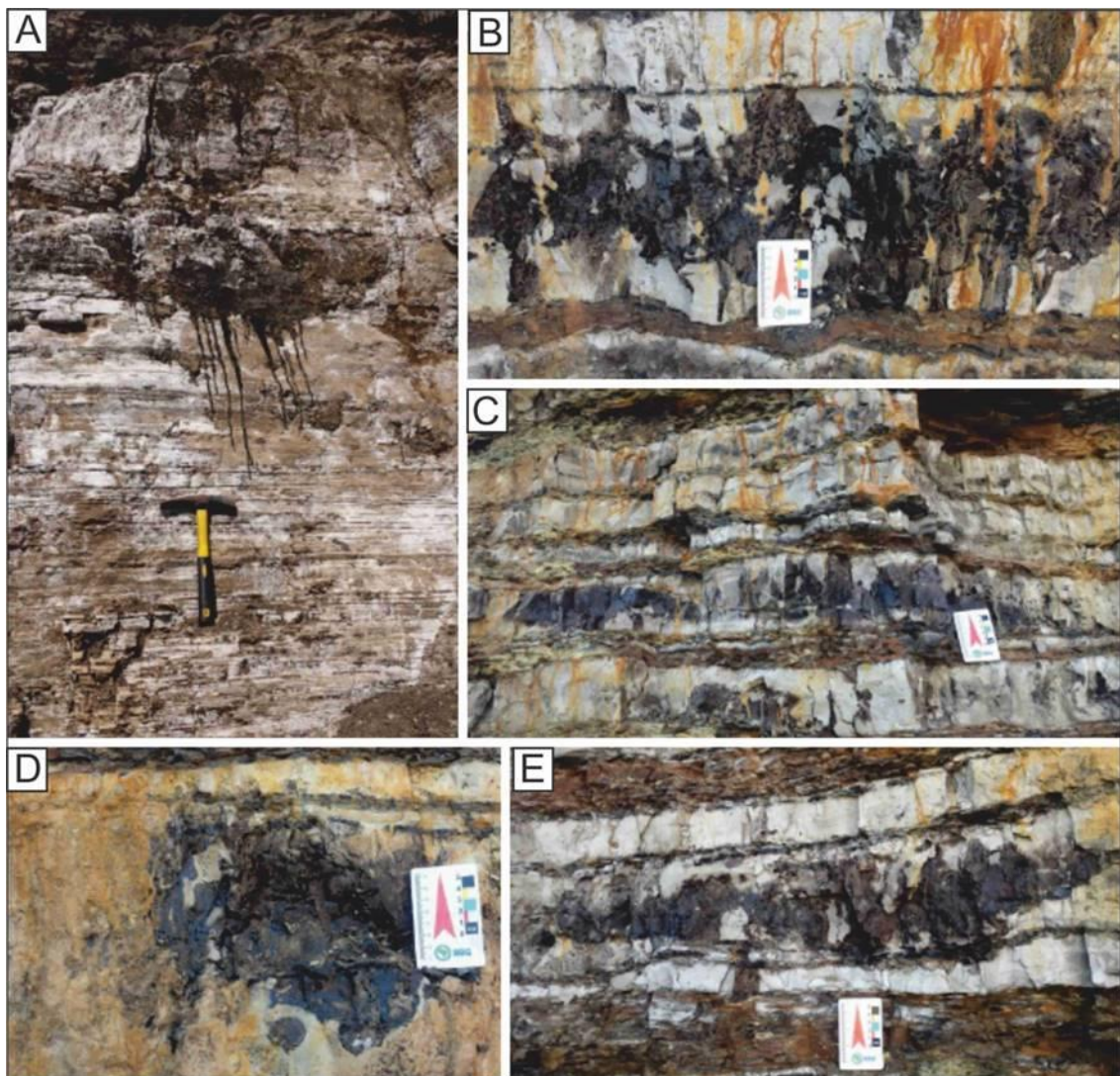


Figura 28: (A) Impregnação de betume ao longo do acamamento, mostrando feições de exsudação por escorrimento; (B, C, D e E) Acumulações de hidrocarbonetos restritas a zonas de mais alta permo-porosidade nas camadas calcárias.

5.2.2. Estereogramas

Embora o foco principal do estudo seja a Formação Irati, o quadro do fraturamento regional associado ao contexto do Alto Estrutural de Pitanga é de fundamental importância na identificação das principais famílias de estruturas e a persistência de cada uma delas ao longo das unidades estratigráficas que afloram na área.

5.2.2.1. Fraturas

Durante as etapas de campo foi coletado um total de 929 medidas de fraturas e planos de falha, sendo 12 referentes ao Grupo Itararé, 142 à Formação Tatuí, 522 na Formação Irati, 154 na Formação Corumbataí, 9 na Formação Pirambóia, 79 nas rochas intrusivas correlatas da Formação Serra Geral e 11 na Formação Rio Claro. A partir da análise do estereograma contendo todas as medidas realizadas (figura 29), verificou-se a predominância de duas famílias principais, sendo uma NW-SE (aproximadamente 310/80) e outra NE-SW (próximo a 236/80).

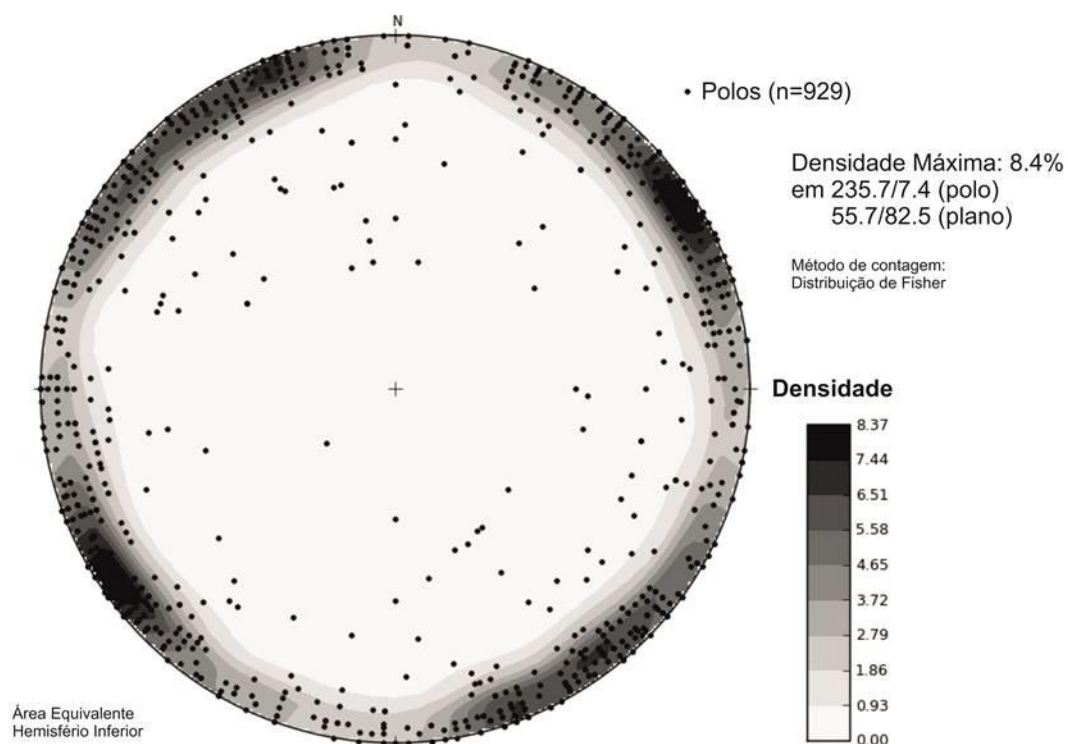


Figura 29: Estereograma total contendo as medidas realizadas em todas as unidades litoestratigráficas da região.

Nas figuras 30 e 31 encontram-se os estereogramas para cada unidade litoestratigráfica, evidenciando um padrão de fraturamento marcado pelas duas direções mencionadas e persistente em todas as unidades estudadas.

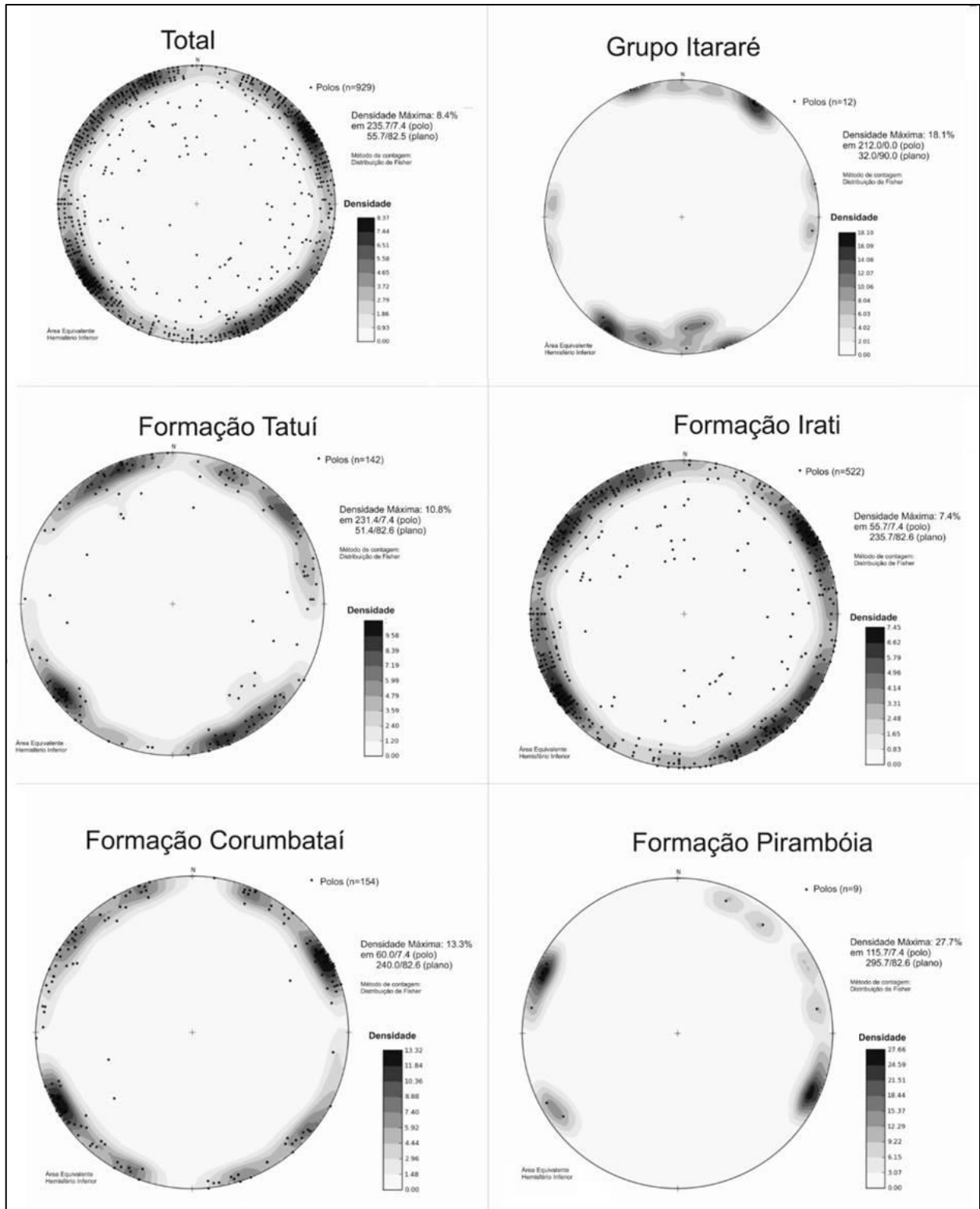


Figura 30: Estereogramas com as medidas de fraturas das unidades litoestratigráficas descritas.

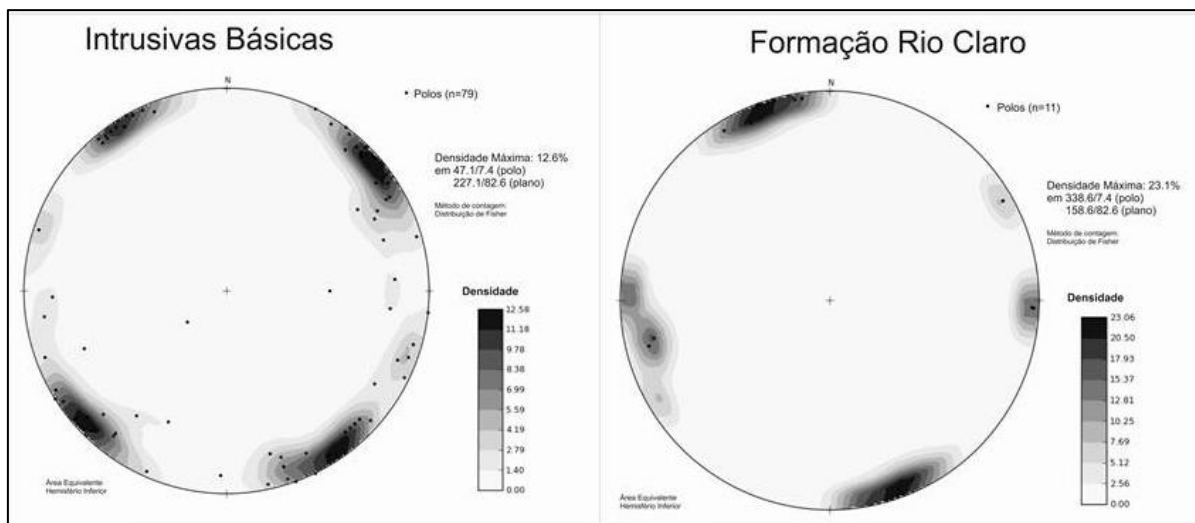


Figura 31: Estereogramas com as medidas de fraturas das unidades litoestratigráficas descritas.

Dentre o conjunto de medidas relacionadas à Formação Irati, encontram-se também as fraturas nas quais foi observado preenchimento por hidrocarbonetos, totalizando 73 medidas (figura 32) coletadas principalmente em exposições nas cavas de pedreiras da região.

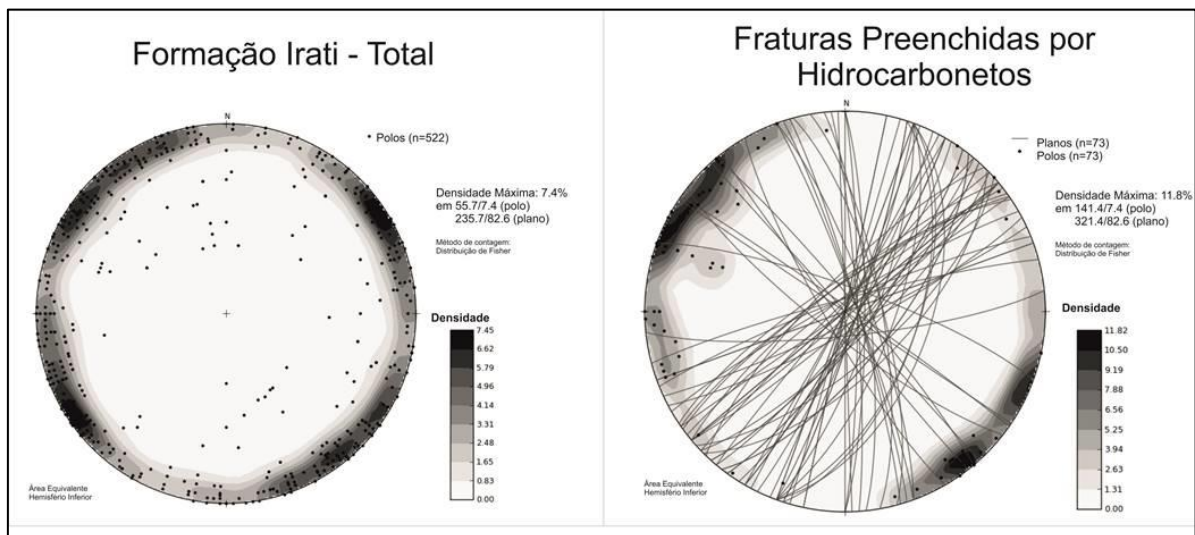


Figura 32: Estereogramas com todas as medidas de fraturas na Formação Irati com as fraturas preenchidas por hidrocarbonetos na mesma unidade.

A análise dos estereogramas acima indica que há uma direção preferencial de migração de hidrocarbonetos ao longo do *trend* NE-SW; as direções NW-SE também estão presentes nesse contexto, embora tenha apresentado importância secundária.

5.2.2.2. Falhas

Com relação aos tipos de falhas encontrados na região, foram coletadas 75 medidas estruturais, sendo 63 referentes a falhas normais, 9 a falhas inversas e 3 a falhas transcorrentes dextrais (figura 33).

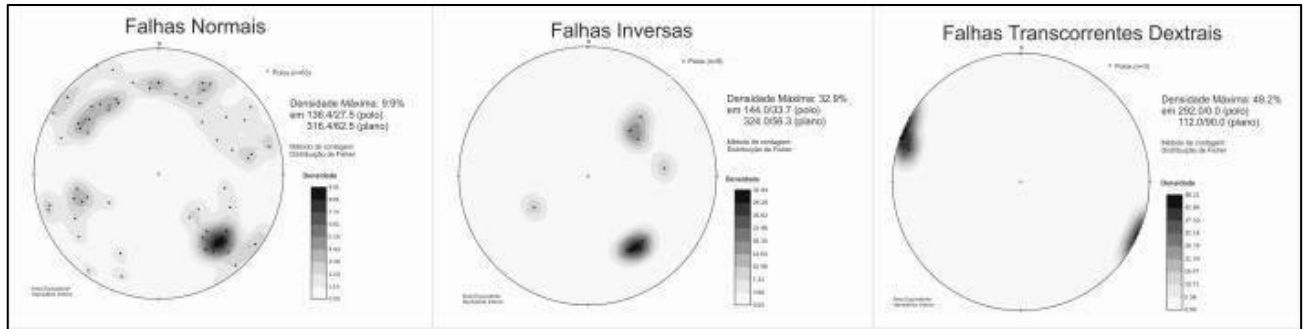


Figura 33: Estereogramas de contorno das falhas normais (63 medidas), falhas inversas (9 medidas) e falhas transcorrente dextrais (3 medidas) descritas na área.

5.2.2.2.1. Falhas Normais

Os estereogramas das falhas normais na região apontaram a predominância de duas direções principais de falhas, sendo um NE-SW e outro NW-SE. As descrições dos afloramentos a partir dos quais os dados foram obtidos permitiu a caracterização dessas falhas em três grandes conjuntos, com base principalmente nas unidades litoestratigráficas as quais estão relacionadas: falhas NW-SE, falhas NE-SW e falhas NW-SE (mais jovens).

A. Falhas Normais NW-SE

As falhas normais NW-SE (figura 34) se encontram frequentemente relacionadas a diques de diabásio que afetam toda a sequência sedimentar paleozoica e a Formação Pirambóia na região. Foram obtidas medidas das direções de quatro diques de diabásio na região (figura 35) bordejados por falhas normais NW-SE (figura 36) e mostrando-se geralmente brechados nas proximidades dos planos de falha. Outro exemplo foi descrito em afloramento na rodovia que liga os municípios de Ipeúna e Araras, apresentando uma falha NW-SE responsável pelo abatimento da Formação Pirambóia em relação à Formação Corumbataí preenchida por um dique de diabásio. O esquema evolutivo desse afloramento elaborado em campo pode ser observado na figura 37.

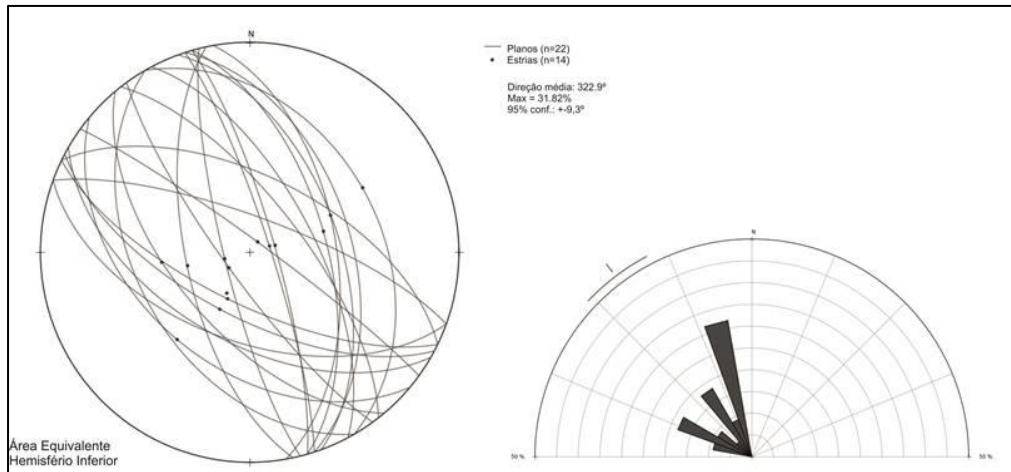


Figura 34: Estereograma com dados de falhas normais NW-SE e diagrama de roseta. Direção média: N37W.

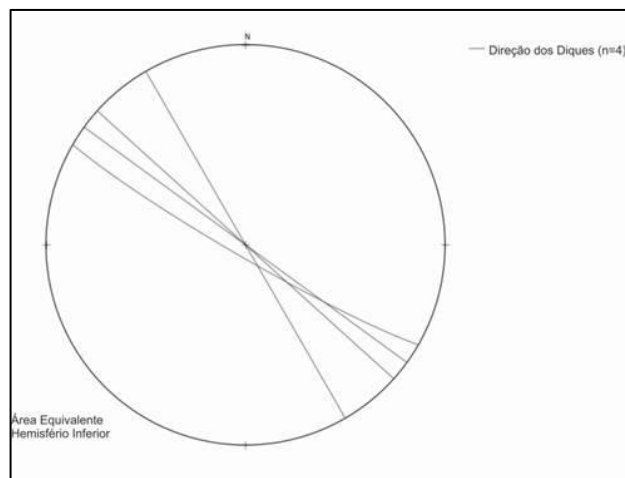


Figura 35: Estereograma com as direções NW-SE dos quatro diques de diabásio medidos na região estudada.



Figura 36: Falha normal NW-SE em afloramento da Formação Corumbataí bordejando dique de diabásio, rodovia Ipeúna-Charqueada.

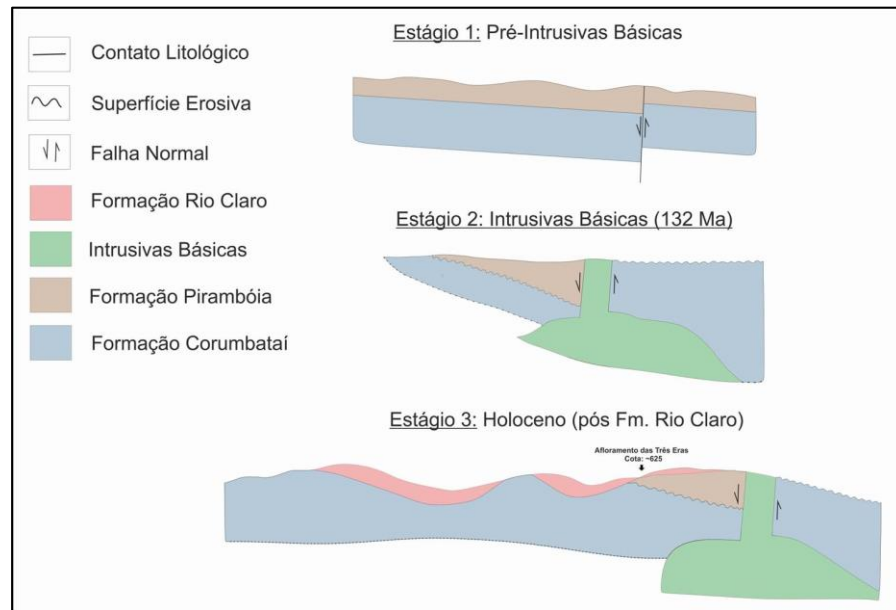


Figura 37: Esquema evolutivo de afloramento das Formações Corumbataí, Pirambóia e Rio Claro, evidenciando preenchimento de falha NW-SE por dique de diabásio, Rodovia Ipeúna-Araras.

B. Falhas Normais NE-SW

As falhas normais NE-SW (figura 38) afetam as sequências paleozoicas e mesozoicas da região, incluindo diques e soleiras de diabásio. Grande parte dos dados foi coletada em afloramentos da Formação Tatuí nas margens do rio Passa Cinco, correspondendo a falhas normais de direção NE-SW que afetavam apenas a unidade mencionada (figura 39), não se propagando ao longo dos depósitos de paleoterraço do rio. As estruturas ainda foram descritas em afloramentos da Formação Irati na Pedreira Partecal (figura 40), além de em outros pontos esparsos na área. Fraturas abertas NE-SW, frequentemente preenchidas por hidrocarbonetos, também foram associadas a esse conjunto.

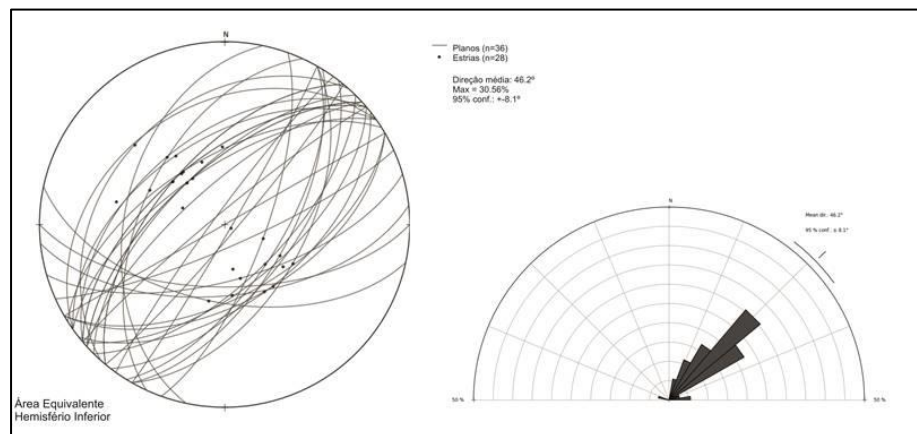


Figura 38: Estereograma com dados de falhas normais NE-SW e diagrama de roseta. Direção média: N46E.

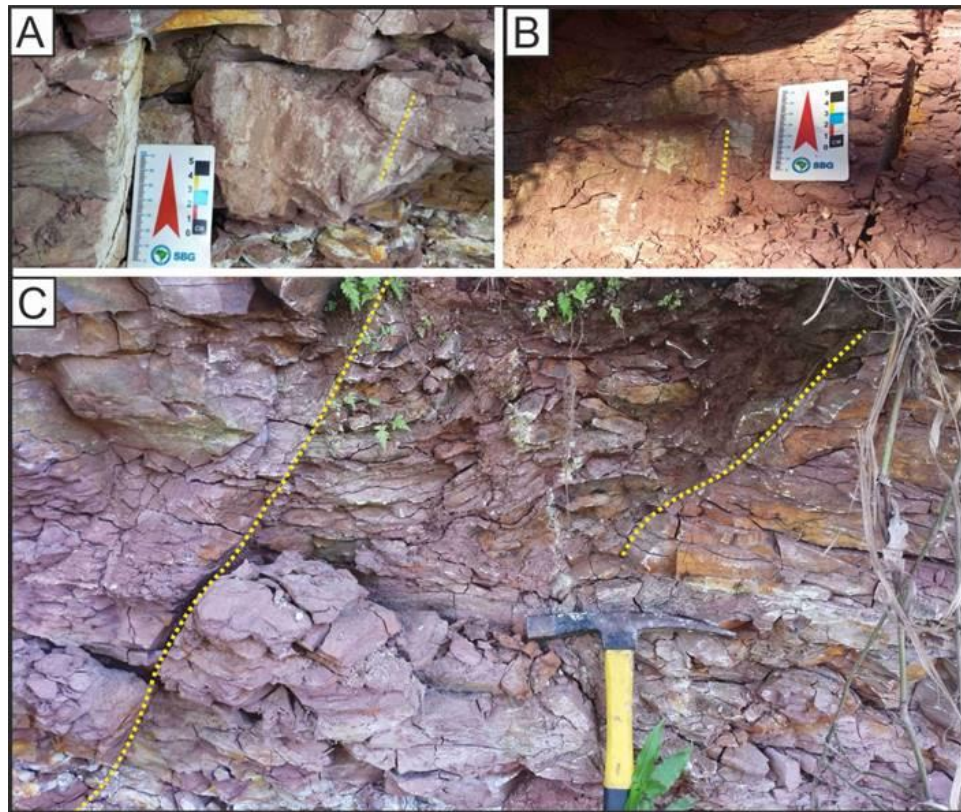


Figura 39: (A,B) Estrias de falhas normais NE-SW em afloramentos da Formação Tatuí (direção em amarelo); (C) Planos de falhas normais NE-SW em siltitos da Formação Tatuí (marcados em amarelo).

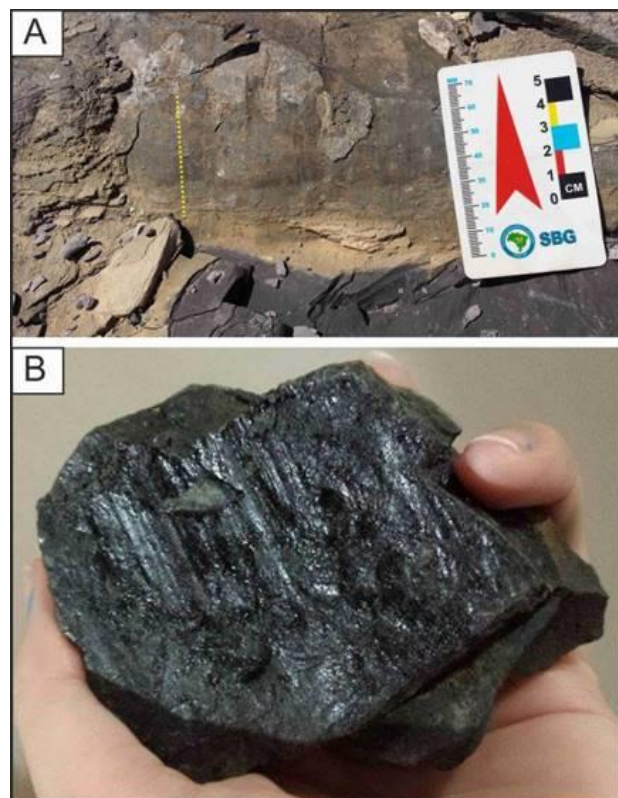


Figura 40: (A) Estrias de falhas em afloramento de diabásio (direção marcada em amarelo), Pedreira Partecal (Assistência-SP); (B) Estrias de falha em amostra de diabásio preenchida por hidrocarbonetos, Pedreira Partecal (Assistência-SP).

C. Falhas Normais NW-SE (jovens)

As falhas normais NW-SE caracterizadas como mais jovens (figura 41) correspondem ao conjunto de estruturas que afetam toda a coluna estratigráfica da região, incluindo os sedimentos associados ao paleoterraço do rio Passa Cinco.

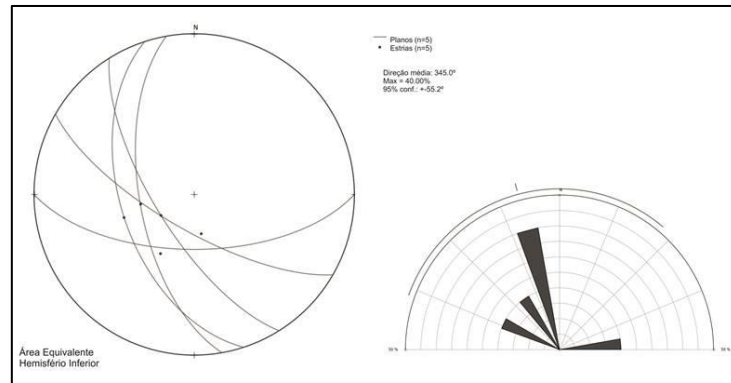


Figura 41: Estereograma com dados de falhas normais NW-SE jovens e diagrama de roseta. Direção média: N15W.

5.2.2.2. Falhas Inversas

As falhas inversas descritas na região foram divididas em dois conjuntos principais: falhas NW-SE e as falhas NE-SW.

A. Falhas inversas NW-SE

As falhas inversas NW-SE (figura 42) foram descritas principalmente na Pedreira Partecal, afetando afloramentos da Formação Irati associados a uma soleira de diabásio (figura x). Nas proximidades do local foram observados planos de falha estriados no diabásio, possivelmente relacionados a essas estruturas (figura 43).

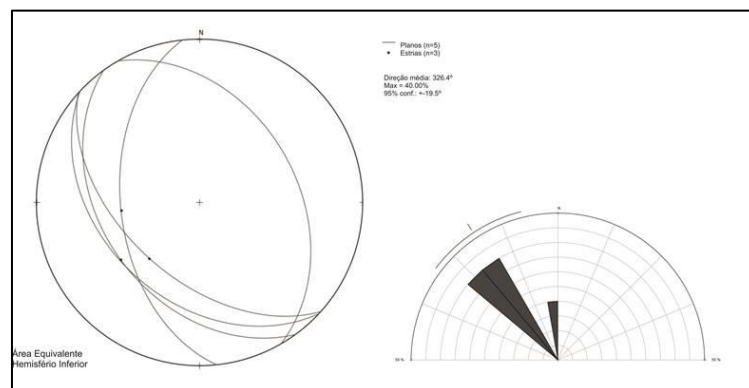


Figura 42: Estereograma com dados de falhas inversas NW-SE e diagrama de roseta. Direção média: N34W.

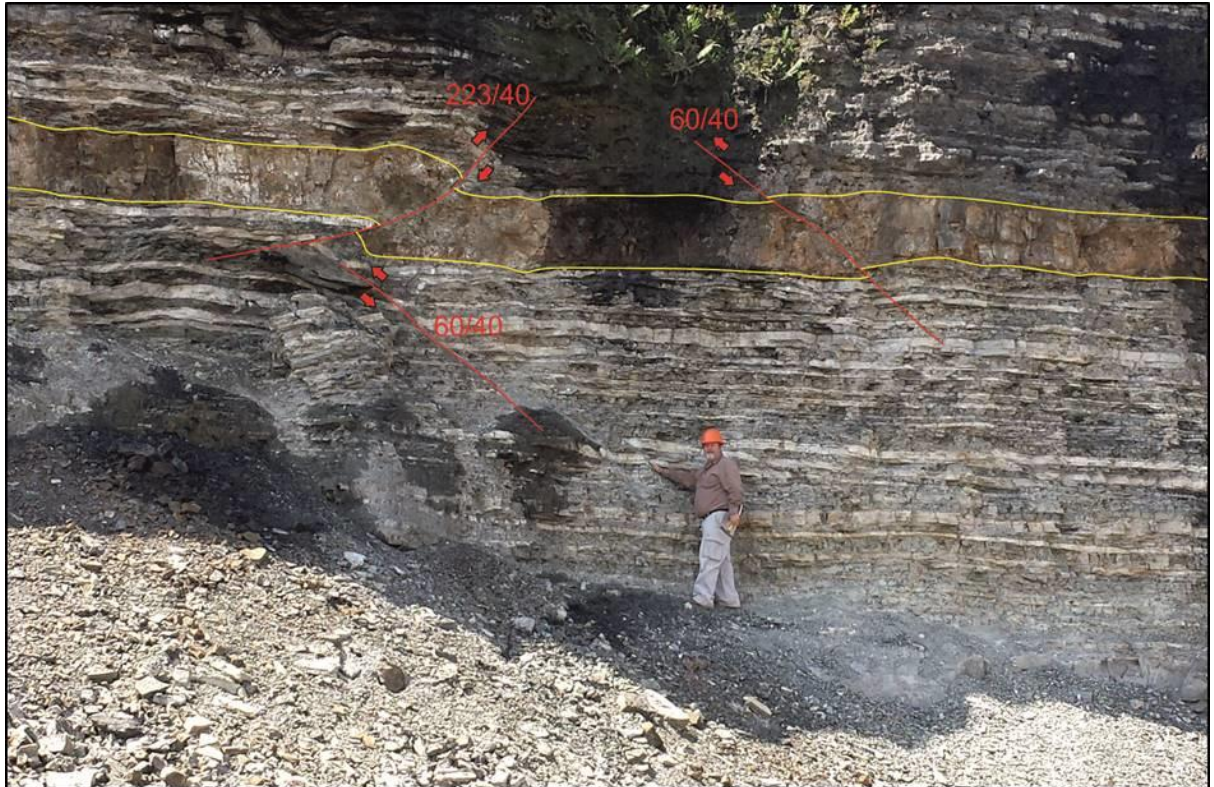


Figura 43: Conjunto de falhas de empurrão afetando soleira de diabásio e as rochas da Formação Irati, Pedreira Partecal (Assistência-SP).

B. Falhas Inversas NE-SW (jovens)

As falhas inversas NE-SW (figura 44) da região foram caracterizadas como mais jovens e descritas principalmente nas margens do rio Passa Cinco, afetando tanto as rochas da Formação Tatuí quanto os depósitos de paleoterraço do rio.

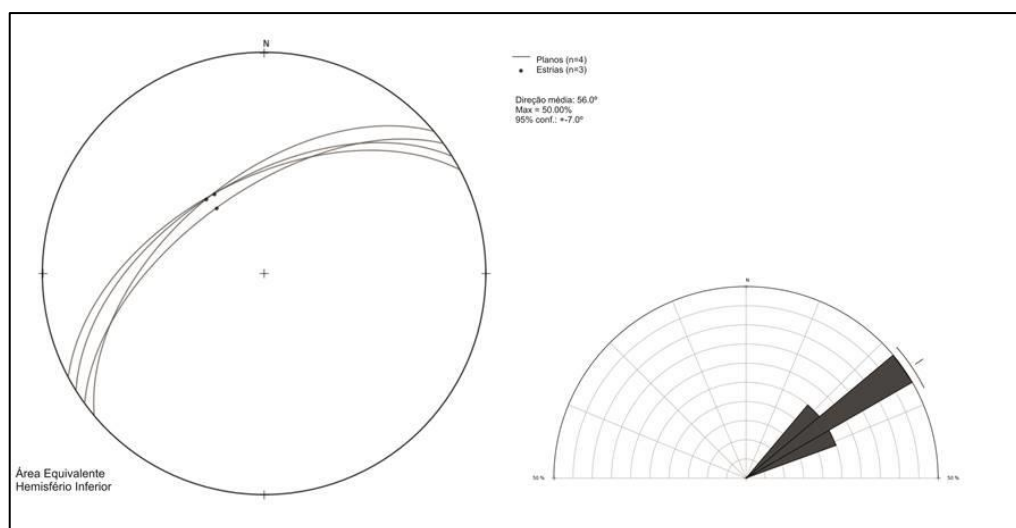


Figura 44: Estereograma com dados de falhas inversas NE-SW e diagrama de roseta. Direção média: N56E.

5.2.2.2.3. Falhas Transcorrentes Dextrais

As falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW (figura 45) presentes na área foram descritas principalmente em afloramentos da Formação Irati na Pedreira Bonança, bem como em corte de estrada na rodovia Ipeúna-Charqueada associadas ao deslocamento sub-horizontal do contato entre um dique de diabásio e a Formação Corumbataí (figura 46).

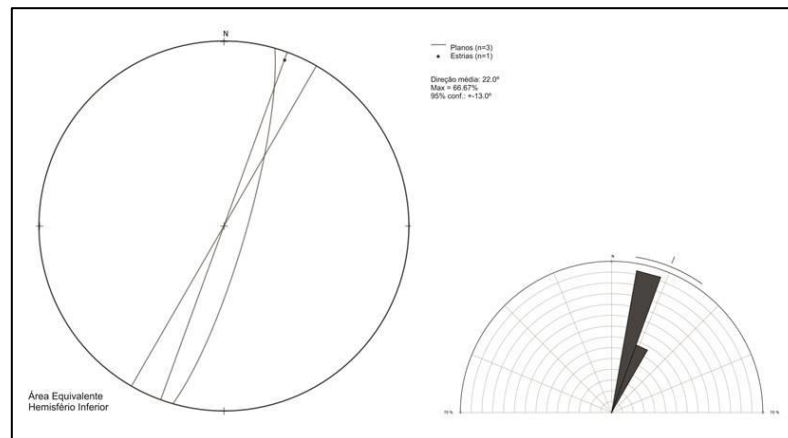


Figura 45: Estereograma com dados de falhas transcorrentes NNE-SSW e diagrama de roseta. Direção média: N22E.

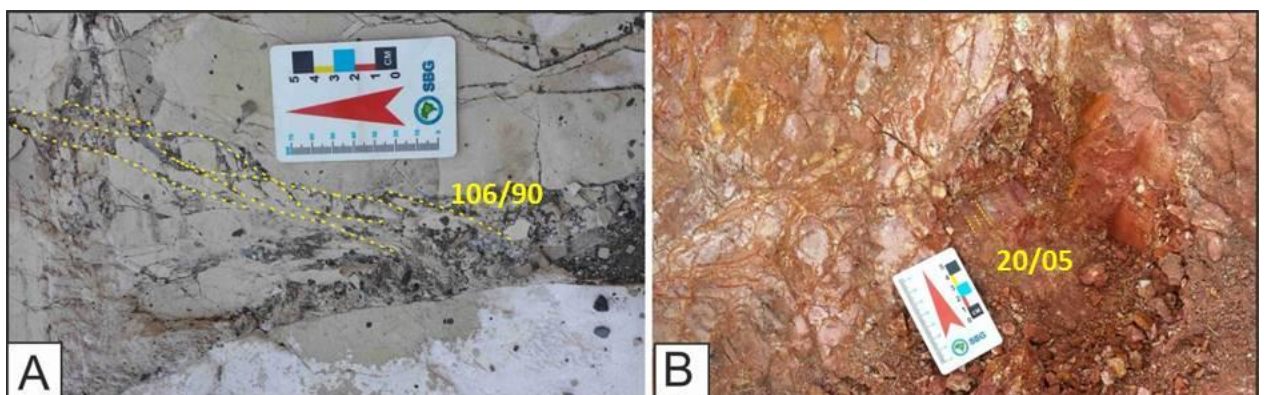


Figura 46: (A) Falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW em calcários da Formação Irati (destaque em amarelo, Pedreira Bonança (Ipeúna-SP); (B) Plano de falha transcorrente dextral em afloramento da Formação Corumbataí, com estrias marcadas em amarelo e indicando movimentação subhorizontal (rodovia Ipeúna-Charqueada).

5.3. Análise Microscópica

As lâminas delgadas analisadas apresentam constituição predominantemente micrítica, composta por minerais carbonáticos (calcita e dolomita), grãos de quartzo e opacos (principalmente pirita, devido ao hábito característico dos cristais). Em lâmina de amostra

coletada logo abaixo de uma soleira de diabásio, verificou-se grandes quantidades de muscovita, grãos de quartzo e minerais opacos associados. Em algumas lâminas, foram descritos indícios de desmicritização, correspondentes a zonas mostrando cristais visíveis e bem formados de calcita. Conteúdos fossilíferos também foram encontrados na forma de carapaças esféricas e estruturas orgânicas fluorescentes dispersas em algumas lâminas. Dentre as microestruturas presentes nas lâminas, destacam-se as microfraturas e os veios de calcita.

De maneira geral, o hidrocarboneto na forma de betume ocorre nas lâminas como gotículas e manchas de coloração alaranjada, marrom e preta em luz branca, e marrom a levemente fluorescente em luz azul fluorescente, apresentando relevo mais alto que os demais constituintes da lâmina. Ocorrem em geral de duas formas principais: preenchendo ou acompanhando fraturas e associados a "vugs" de calcita e quartzo. Os chamados "vugs" correspondem a zonas desenvolvidas por alívio de pressão e marcadas pelo crescimento de cristais de calcita e quartzo proporcionalmente maiores que os restantes da lâmina. Correspondem geralmente à zonas de maior permo-porosidade, podendo aprisionar portanto gotículas de hidrocarbonetos dentro da microestrutura (figura 47). Os hidrocarbonetos leves e não-degradados apresentam em geral fluorescência mais elevada que a calcita, por exemplo. No entanto, as análises de fluorescência das lâminas desse estudo permitiram a caracterização dos hidrocarbonetos como pesados e altamente biodegradados, por apresentarem fluorescência muito baixa em relação a calcita.

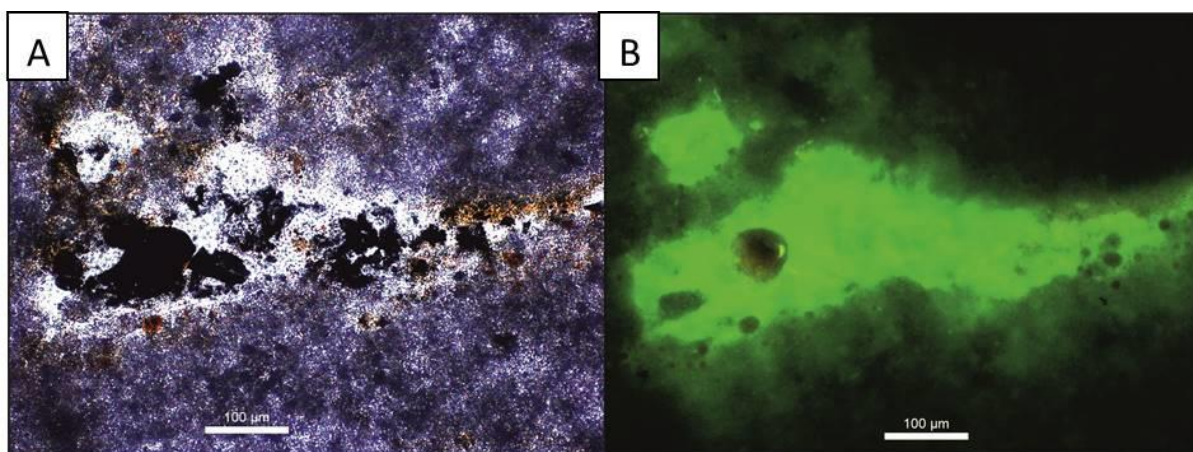


Figura 47: Mancha esférica de betume impregnado em "vug" de calcita e quartzo (A. foto tirada sob luz branca transmitida; B. foto sob luz azul fluorescente).

Na figura 48, é possível observar a ocorrência de hidrocarbonetos preenchendo microfratura (A, B), bem como acompanhando as zonas de maior permo-porosidade associadas à instalação dos veios de calcita altamente fluorescentes (C, D), por vezes bifurcados (E, F).

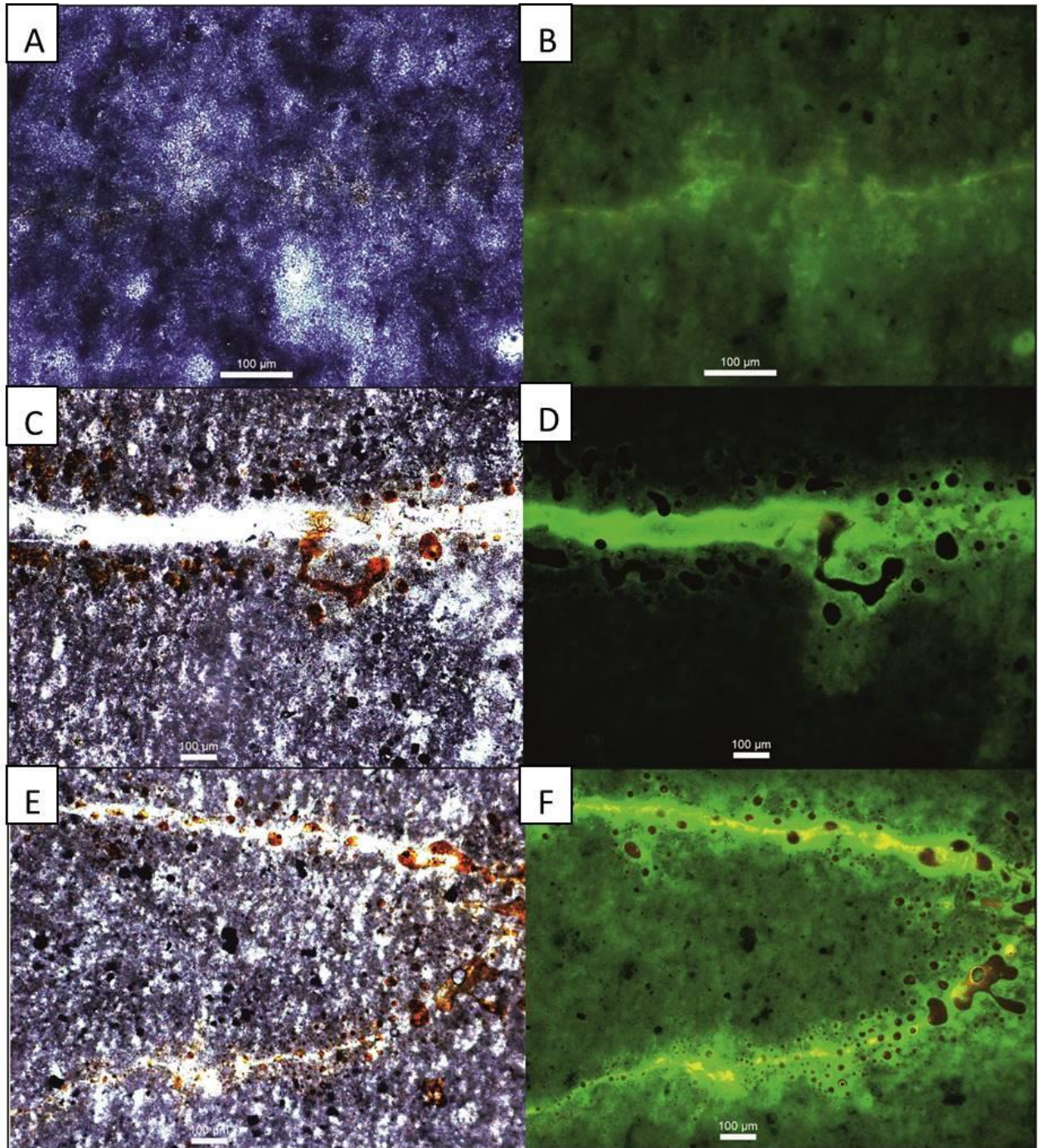


Figura 48: Microfratura preenchida por hidrocarbonetos (A e B) e gotículas de betume acompanhando veios de calcita (C, D, E e F) (A, C e E. fotos tirada sob luz branca transmitida; B, D e F. fotos sob luz azul fluorescente).

6. Discussões

O reconhecimento da direção NE/SW como mais importante no contexto da migração local de hidrocarbonetos aponta para uma necessária análise dos eventos de deformação identificados nas rochas da região, bem como a relação entre esses eventos e suas respectivas orientações dos eixos de paleotensão e direções principais dos esforços atuantes. A integração dos resultados obtidos nas diversas escalas de estudo permitiu caracterizar os lineamentos e falhas de direção NW-SE como mais importantes em escala macroscópica, enquanto que em escala de afloramento as fraturas e falhas NE-SW mostraram-se mais relevantes ao tema de estudo do presente trabalho. A compreensão dos regimes tectônicos ativos na região foi elaborada desde o período de fraturamento e intrusão das rochas básicas correlatas à Formação Serra Geral. Para tanto, a partir dos dados estruturais levantados e da cronologia relativa entre a unidade litológica deformada, foram elaborados diagramas de eixos de paleotensões para cada conjunto de falhas caracterizado, de modo a elevar a compreensão acerca da cronologia entre eventos e sua influência no potencial condutivo de cada sistema de fraturas. Para cada um dos sistemas reconhecidos e analisados, foram buscados regimes evolutivos regionais, buscando integrar o quadro local com a evolução geológica da Bacia do Paraná. Sendo assim, a sucessão dos principais eventos tectônicos que afetaram o Alto Estrutural de Pitanga são apresentados a seguir e na ordem de acontecimentos reconhecida.

6.1. Falhas Normais NW-SE

Segundo os quadros evolutivos de Riccomini (1995) e Sousa (2002), as estruturas NW-SE associadas à intrusão dos diques de diabásio são resultantes do primeiro grande evento tectônico que afetou a região, sendo o principal responsável pela estruturação e formação do Alto Estrutural de Pitanga por meio de sucessivos abatimentos de blocos falhados. Relaciona-se ao evento distensivo associado à fragmentação do supercontinente Gondwana durante o Juro-Cretáceo, período em que se deu início um intenso magmatismo toleítico na Bacia do Paraná (figura 49). Tal evento é expresso na região pelas rochas básicas da Formação Serra Geral e intrusivas associadas (MARQUES & ERNESTO, 2004; THOMAZ-FILHO et al., 2008; COUTINHO, 2008). Apesar do regime distensivo mais importante estar relacionado ao processo de ruptura do Gondwana e separação entre Brasil e África, com distensão NW-SE e formação de falhas normais principais direcionadas NE-SW,

o braço não evoluído da junção tríplice do sudeste do Brasil (COUTINHO 2008) tem direção NW-SE (figura 50), com direção de abertura NE-SW.

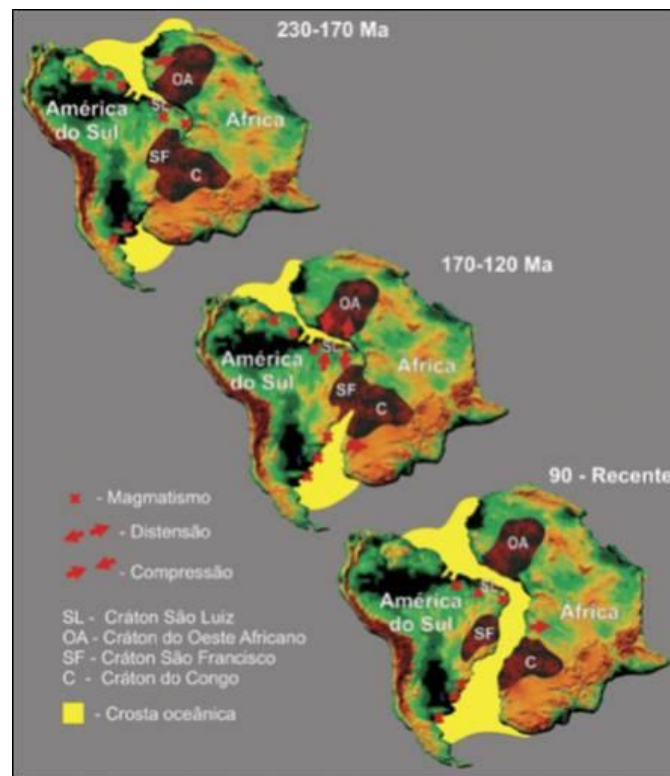


Figura 49: Posição relativa da América do Sul e África durante o período de abertura do Oceano Atlântico Sul e magmatismo toleítico associado (modificado de MISUSAKI et al., 1998; retirado de MISUZAKI & THOMAZ-FILHO, 2004).



Figura 50: Junção tríplice do sudeste do Brasil, mostrando traços principais NW-SE para os lineamentos associados ao Arco de Ponta Grossa (COUTINHO, 2008).

Algumas das falhas normais NW-SE encontradas na área ocorrem associadas a diques de diabásio e podem ser enquadradas nesse evento tectônico, que se manifesta claramente na forma de grandes lineamentos de relevo, drenagem e falhas regionais relacionados aos sistemas de falhas Passa Cinco-Cabeças e Ipeúna-Piracicaba (SOUSA, 1998, 2002). A partir da análise do diagrama de paleotensões para as falhas descritas nesse conjunto, foi caracterizado um sigma 1 vertical, sigma 2 sub-horizontal NNW-SSE e sigma 3 ENE-WSW, resultando em um arranjo de SH_{MAX} distensivo, com direção NW-SE e SH_{MIN} também distensivo com direção NE-SW (figura 51). Esse evento promoveu, portanto, a abertura de estruturas NW-SE em toda a região, que se portaram como caminhos iniciais para a intrusão dos diques de diabásio.

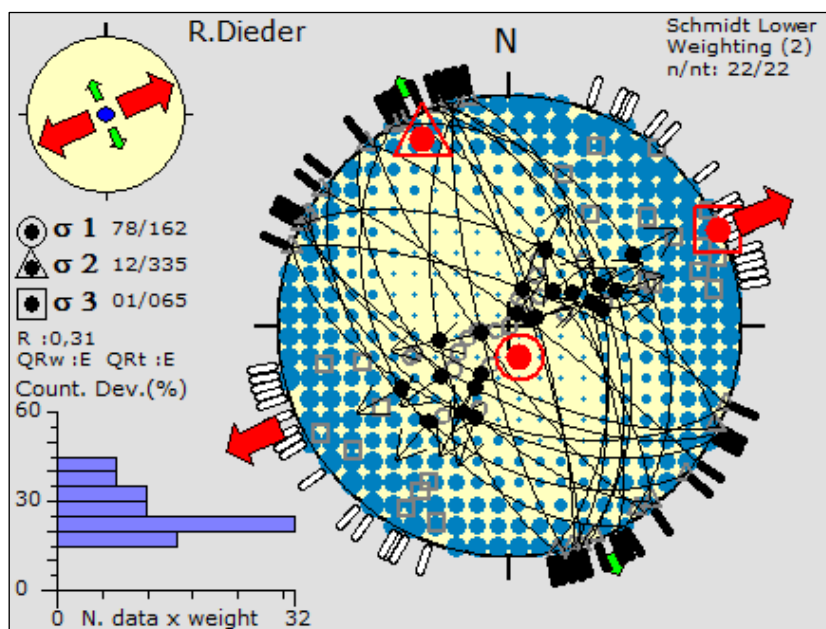


Figura 51: Diagrama de paleotensões para as falhas normais NW-SE associadas aos diques de diabásio na região, indicando distensão ao longo do eixo NE-SW.

As intrusões que aproveitaram planos de fraqueza NW-SE para ascender permitiram a geração e migração de hidrocarbonetos no sistema, fornecendo calor para maturação da matéria orgânica e condutos de migração seja pelas falhas e fraturas NW-SE abertas naquele evento, ou por meio de zonas de porosidade secundária nos carbonatos a elas associados. Pelo fato de ser este o evento tectônico melhor caracterizado e mais marcante na região e diretamente associado a um primeiro evento de migração de hidrocarbonetos, esperava-se no início do presente estudo que os principais caminhos migratórios mostrassem direção preferencial NW-SE, motivo provável pelo qual Thomaz-Filho et al. (2008) assumiu toda a migração de hidrocarbonetos no Domo de Anhembi consonante com essa mesma direção dos

diques. No entanto, embora tenham sido descritas fraturas condutoras associadas à direção NW-SE, verificou-se que a direção preferencial de migração é NE-SW, associada, portanto, a eventos tectônicos posteriores.

6.2. Falhas Normais NE-SW

Segundo Riccomini (1995), as estruturas NE-SW encontradas na região do Alto Estrutural de Pitanga correspondem a eventos de reativação na forma de movimentos transcorrentes sinistrais e dextrais ao longo do pós-Eocretáceo ao Quaternário. Já Sousa (2002) definiu esse conjunto como “falhas sin-sedimentares da Formação Rio Claro”, atuantes durante o Neógeno. No entanto, nenhum dos trabalhos faz uma clara associação das estruturas com algum grande evento atuante na região durante o período mencionado.

A análise dos paleolineamentos do embasamento cristalino da região (figura 52) ressalta a importância das estruturas NE-SW, especialmente na plataforma centro-leste de São Paulo, circundada pela região classificada por Riccomini et al. (2004) como rifte central, a noroeste do estado e por extensos lineamentos a sudeste, marcantes em toda a região Sul do país.

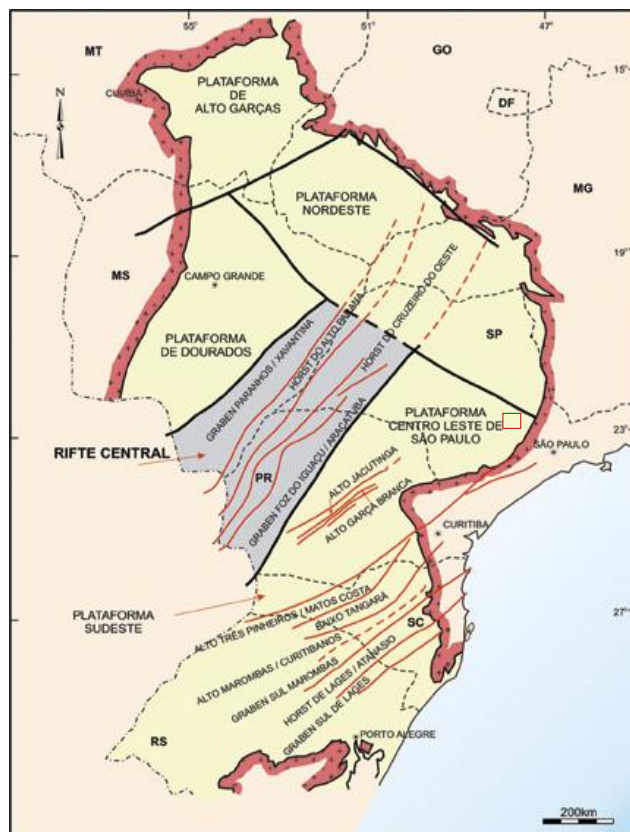


Figura 52: Arcabouço tectônico da Bacia do Paraná, com enfoque para os lineamentos NE-SW da bacia (MARQUES et al., 1993, extraído de MILANI, 2004).

A análise de paleotensões realizada com base nos dados estruturais de falhas normais NE-SW na área de estudo (figura 53) permitiu a identificação de um sigma 1 vertical associado a um sigma 2 sub-horizontal NE-SW e sigma 3 também sub-horizontal, NW-SE. O arranjo dinâmico aponta para um SH_{MIN} distensivo com direção NW-SE, promovendo a abertura de estruturas NE-SW em toda a região.

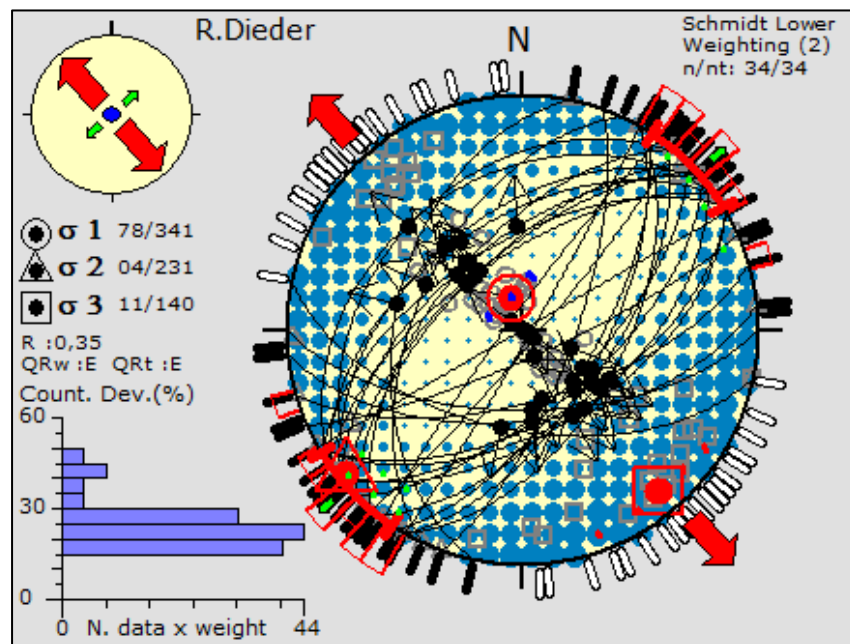


Figura 53: Diagrama de paleotensões para as falhas normais NE-SW, indicando distensão principal ao longo do eixo NW-SE.

Dessa forma, pode-se relacionar esse grande evento distensivo no início do Paleógeno a importantes reativações de paleolineamentos NE-SW do embasamento que bordejam o estado e cuja influência na estruturação do Alto Estrutural de Pitanga ainda não se mostrava completamente compreendida. Assim, propõe-se a integração da região de estudo ao contexto evolutivo do Sistema de Riftes do Sudeste caracterizado por Riccomini (1989) e Riccomini et al. (2004), de modo que a reativação das estruturas NE-SW esteja relacionada a distensão NNW-SSE no Paleógeno (Eoceno a Oligoceno) ou ainda a falhas normais associadas ao sistema transcorrente sinistral com distensão NW-SE e compressão NE-SW atuante no Neógeno (Mioceno) (figura 54). Segundo Riccomini et al. (2004) essas reativações ao longo de zonas de cisalhamento já existentes estariam associadas a evolução da margem continental, explicadas por modelos de basculamento termomecânico (RICCOMINI, 1989), compensação isostática (ASMUS & FERRARI, 1978) ou deslizamento gravitacional (ALMEIDA, 1976).

do Alto Estrutural de Pitanga. Godoy (2006) verificou por meio dos traços de fissão de apatita em rochas do Grupo Itararé do centro da estrutura uma anomalia térmica previamente identificada por Ribeiro et al. (2005) e associada a reativação de paleolineamentos associados a borda da bacia e aos alinhamentos do Rio Tietê, do rio Mogi-Guaçu e de Jacutinga. A reativação de lineamentos no Neogeno foi descrita por Riccomini (1992) e por Fernandes & Araújo et al. (2002), que caracterizou duas fases principais de reativação do Alto Estrutural de Pitanga: a primeira delas entre o Cretáceo e o Paleoceno, e outra no Neógeno, provavelmente associada ao evento de compressão NE-SW e distensão NW-SE no Mioceno caracterizada por Riccomini (1992) e Riccomini et al. (2004). Artur & Soares (2008) também constataram a importância dessas reativações no contexto evolutivo da Bacia do Paraná a partir da análise de lineamentos gravimétricos e morfoestruturais em toda a extensão da mesma.

Esse evento que mostra um eixo compressivo NE-SW e distensivo NW-SE atuante no Mioceno encontra-se relacionado a uma tectônica transcorrente sinistral (RICCOMINI et al., 2004) de direção principal E-W (figura 55), gerando, portanto, quatro tipos de estruturas associadas a essa fase: falhas normais NE-SW, falhas inversas NW-SE, falhas transcorrentes sinistrais ENE-WSW e falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW.

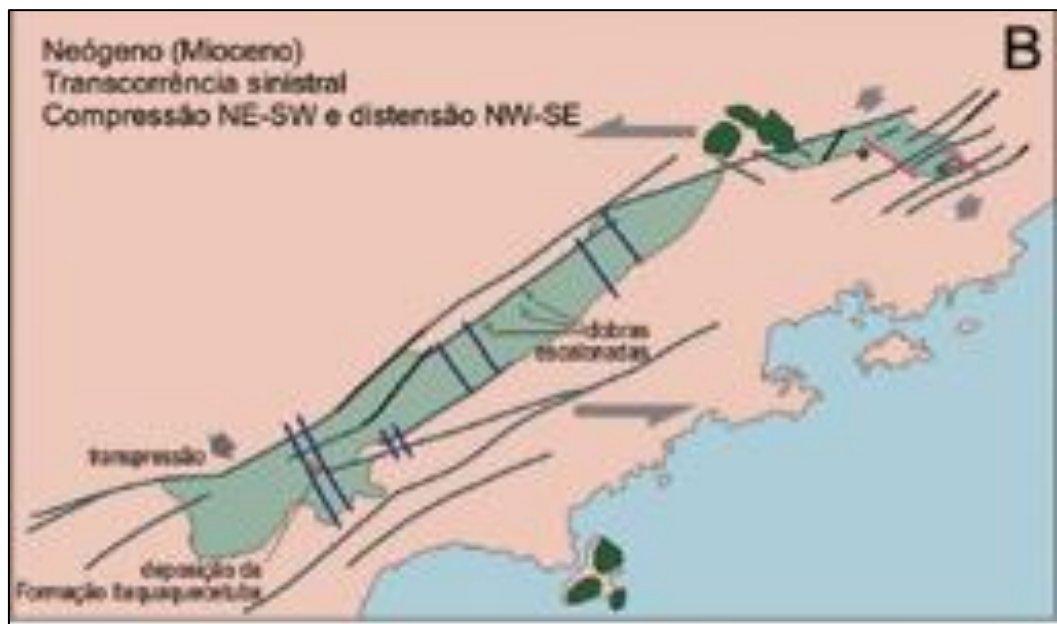


Figura 55: Esboço paleotectônico do segundo estágio da evolução do segmento central do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RICCOMINI et al., 2004).

6.3. Falhas inversas NW-SE

Associadas a esta etapa e marcadoras de um regime compressivo, foram reconhecidas falhas inversas e falhas transcorrentes. As falhas afetam os diques de rochas básicas, denunciando sua cronologia mais recente. A análise dos diagramas de paleotensões gerados a partir dos dados de falhas de empurrão NW-SE coletadas na área (figura 56) apresenta-se congruente com o contexto tectônico acima descrito, mostrando sistema de eixos de paleotensões caracterizado por sigma 1 sub-horizontal NE-SW, sigma 2 NW-SE, também sub-horizontal, e sigma 3 subvertical, resultando em um SH_{MAX} compressivo com direção NE-SW. As falhas afetam tanto as sequências paleozoicas da Formação Irati quanto intrusivas básicas mesozoicas na Pedreira Partecal (distrito de Assistência-SP), sendo, portanto, posteriores a intrusão dos diques na região.

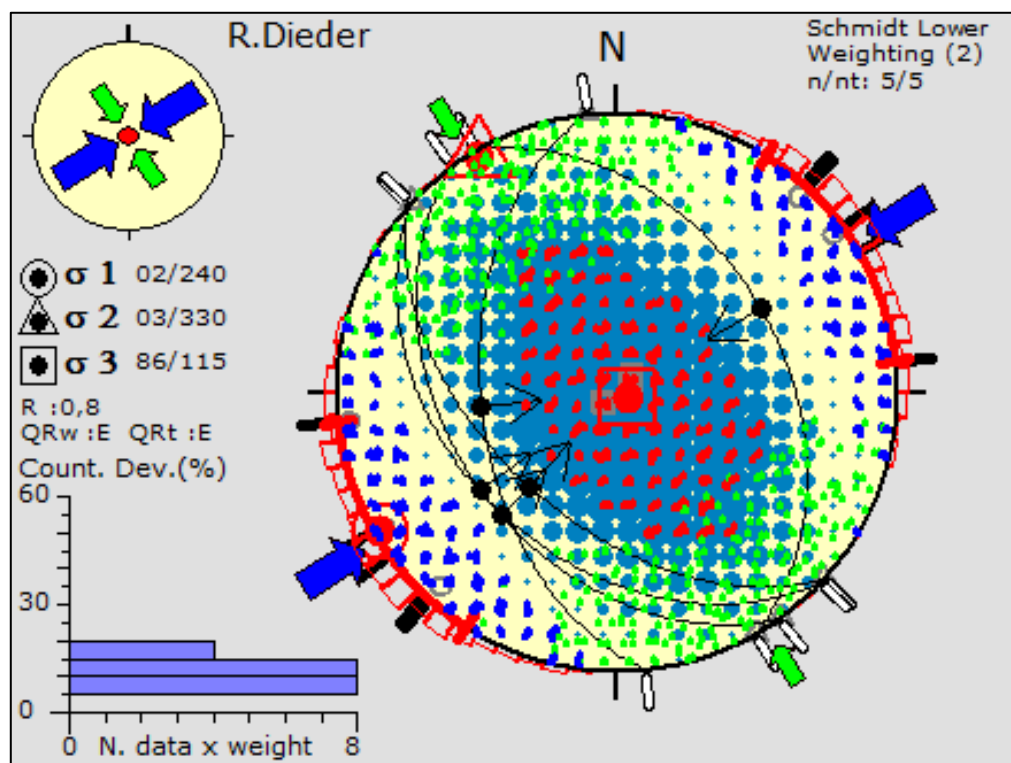


Figura 56: Diagrama de paleotensões para as falhas inversas NW-SE, indicando compressão no eixo NE-SW.

6.4. Falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW

A análise de paleotensões realizada a partir das falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW descritas na região (figura 57) é consistente com o quadro tectônico do Mioceno, mostrando a posição de um SH_{MAX} compressivo ENE-WSW e um SH_{MIN} distensivo NNW-SSE.

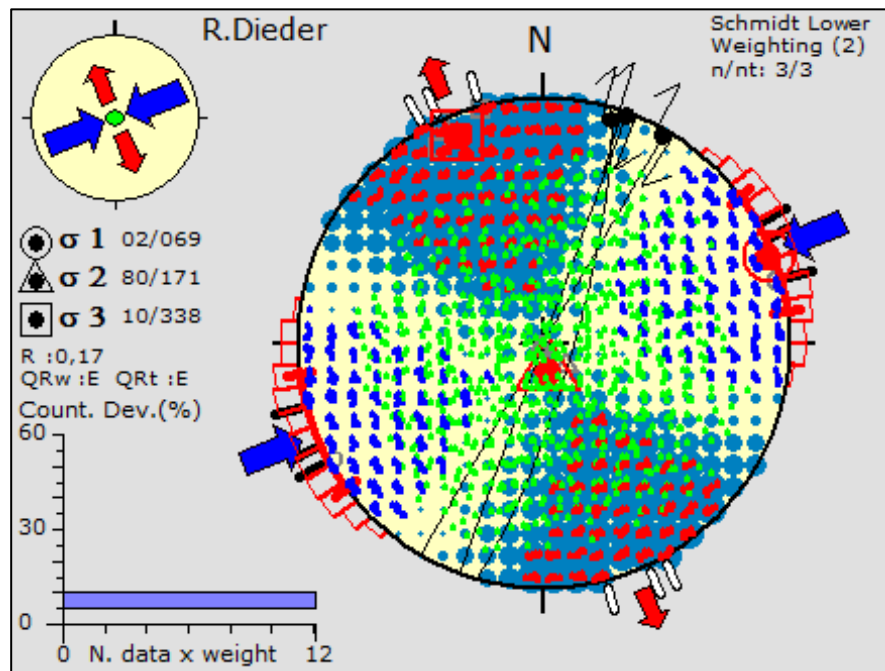


Figura 57: Diagrama de paleotensões para as falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW, indicando compressão ao longo do eixo NE-SW e distensão NW-SE.

Nesse contexto, as falhas transcorrentes dextrais NNE-SSW podem se encaixar perfeitamente em um sistema transcorrente sinistral E-W, desde que dispostas a aproximadamente 30° do eixo SH máximo compressivo de direção aproximada N50E, conforme figura 58. As falhas analisadas apresentam atitude média N20E, estando, portanto, adequadas ao contexto estrutural proposto.

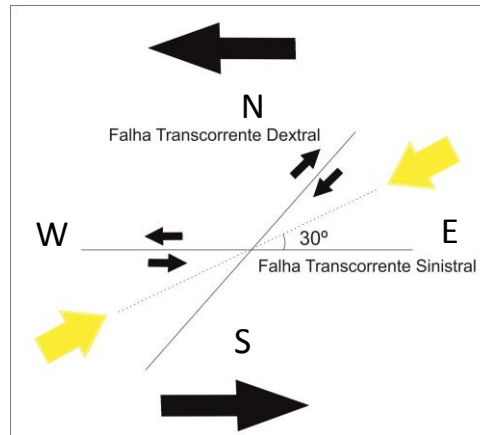


Figura 58: Esquema mostrando a possibilidade de desenvolvimento de falhas transcorrentes dextrais em um sistema transcorrente sinistral a aproximadamente 30° da direção do SH máximo compressivo.

6.5. Falhas normais NW-SE (jovens)

As falhas normais orientadas principalmente segundo NW-SE e descritas na área afetando sedimentos de paleoterraço do rio Passa-Cinco correspondem a reativações recentes associadas ao quadro de evolução neotectônica regional (HASUI, 1990; SOUSA, 97, 2002; MORALES, 2005). A análise do diagrama de paleotensões indica um regime distensivo marcado por um sigma 1 subvertical, sigma 2 NW-SE sub-horizontal e sigma 3 NE-SW, também sub-horizontal, resultando numa projeção de SH_{MAX} distensivo, com direção NW-SE e SH_{MIN} NE-SW (figura 59).

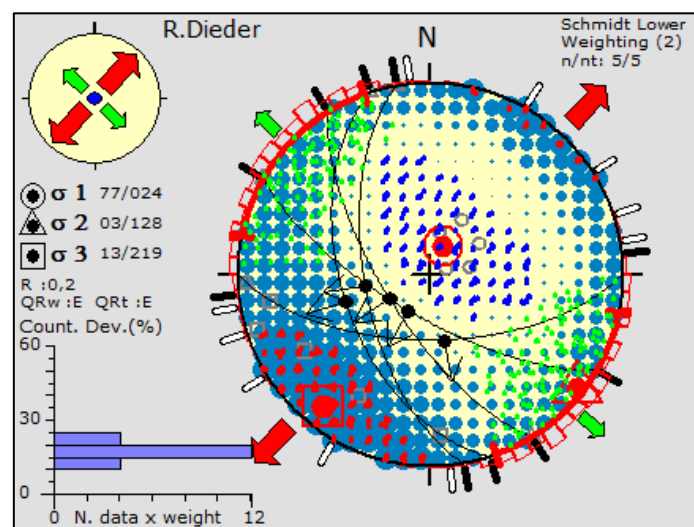


Figura 59: Diagrama de paleotensões para as falhas normais NW-SE mais jovens, indicando distensão principal ao longo do eixo NE-SW.

6.6. Falhas Inversas NE-SW (jovens)

As falhas inversas NE-SW caracterizadas como recentes por afetarem os depósitos de paleoterraço do rio Passa Cinco também enquadram o contexto neotectônico proposto por Hasui (1990), Sousa (97, 2002) e Morales (2005). O diagrama de paleotensões elaborado para as estruturas descritas aponta para sigma 1 NW-SE, sigma 2 horizontal NE-SW e sigma 3 subvertical, apontando para projeção de SH_{MAX} compressivo NW-SE (figura 60).

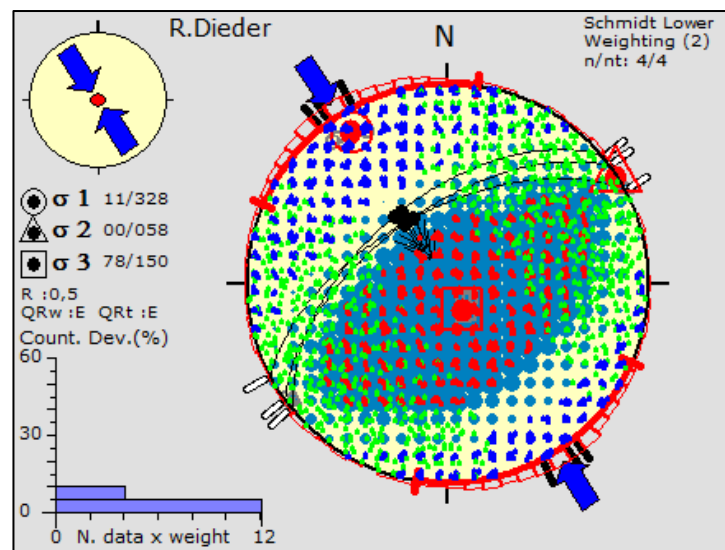


Figura 60: Diagrama de paleotensões para as falhas inversas NE-SW, indicando compressão no eixo NW-SE.

Segundo o contexto evolutivo do Sistema de Riftes do Sudeste proposto por Riccomini (1992) e Riccomini et al. (2004), o período do final do Neógeno até o Quaternário é marcado por uma transcorrência dextral que implica um eixo compressivo de direção NW-SE e um distensivo NE-SW (figura 61), também compatíveis com os dados obtidos para as falhas normais e inversas caracterizadas como recentes nesse trabalho.

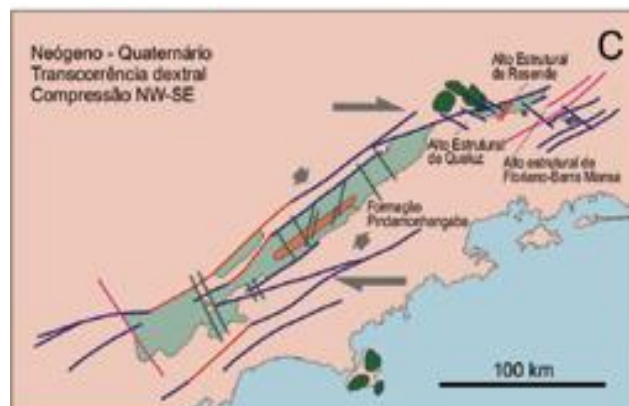


Figura 61: Esboço paleotectônico do terceiro estágio da evolução do segmento central do Sistema de Riftes Continentais do Sudeste do Brasil (RICCOMINI et al., 2004).

O quadro síntese dos eventos que compõem a evolução tectônica das unidades litoestratigráficas aflorantes na região do Alto Estrutural de Pitanga encontra-se na figura 62.

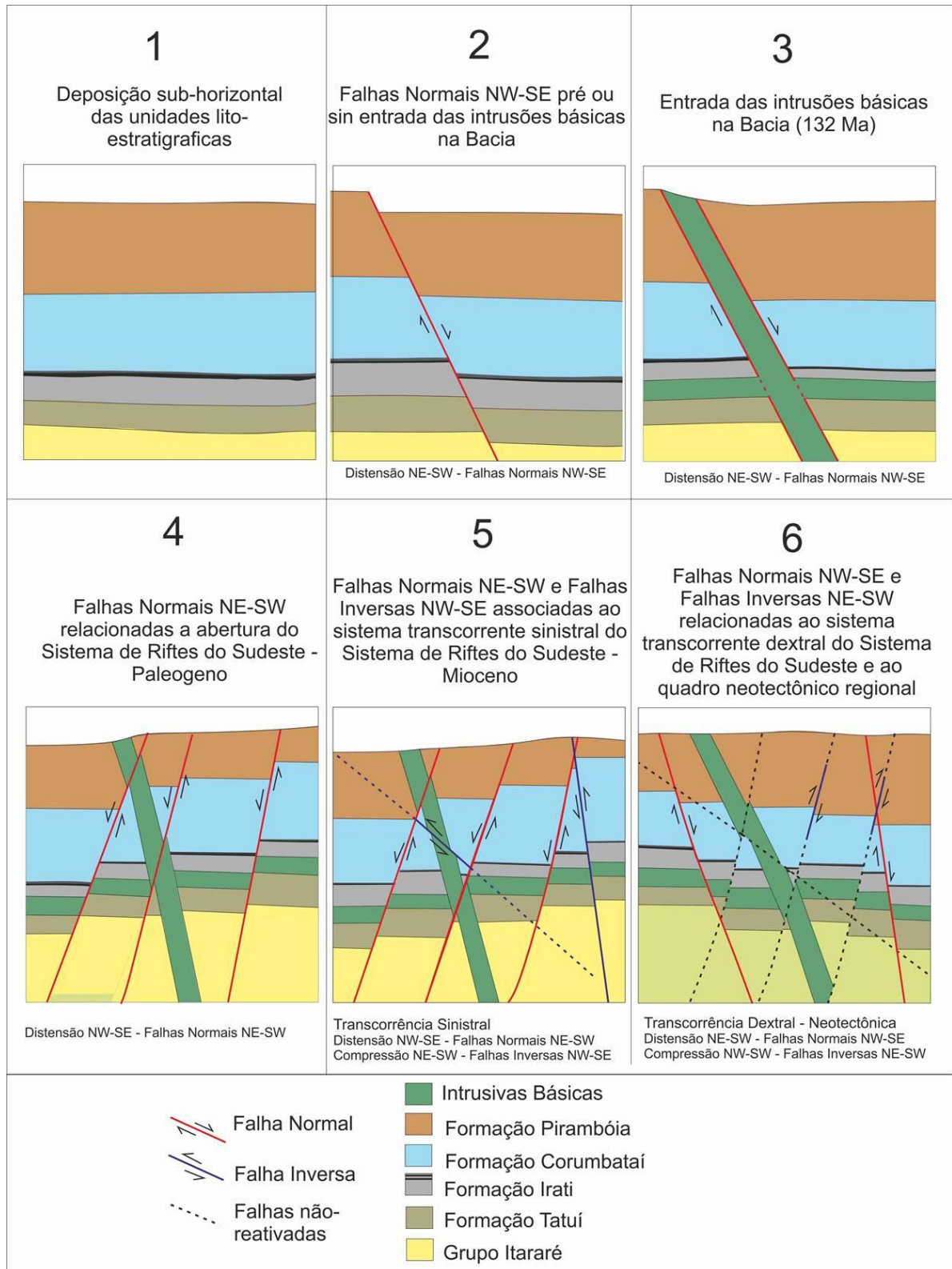


Figura 62: Quadro síntese da evolução tectônica da região estudada em etapas.

Com base no panorama evolutivo da região, é possível afirmar que a principal direção de migração de hidrocarbonetos na região estudada está relacionada aos eventos de distensão NW-SE associadas aos estágios iniciais do desenvolvimento do Sistema de Riftes do Sudeste durante o Paleogeno até o Mioceno, quando o SH_{MAX} passou a ser compressivo e com direção NE-SW. Essa disposição dos esforços favoreceu ainda mais a abertura de fraturas NE-SW e o fechamento de grande parte das estruturas NW-SE, anteriormente responsáveis pela migração inicial (sin-magmatismo básico) de hidrocarbonetos ao longo do sistema. O magmatismo alcalino que acompanhou o desenvolvimento do Sistema de Riftes do Sudeste com picos de atuação entre 60 a 40 Ma (Eoceno) e em idades inferiores a 50 Ma (Eoceno ao Recente) (THOMAZ-FILHO et al., 2008) é frequentemente associado à ação de “hot spots” resultantes da evolução de grandes plumas mantélicas (ALMEIDA, 1986; MIZUSAKI et al., 2002) e relacionados a deriva do continente sul-americano para oeste. O pico magmático no Eoceno, (há cerca de 50 Ma) corresponde a um importante evento atuante na margem sudeste brasileira nas regiões de Cabo Frio (RJ), Bacia de Campos e Arquipélago de Abrolhos (ES), indicando um aquecimento anômalo da crosta na borda leste da bacia. Em contrapartida, análises termocronológicas de Godoy (2006) indicam que nessa época ocorria um evento de resfriamento na região do Alto Estrutural de Pitanga iniciado em 60 Ma, responsável pelo soerguimento e erosão de unidades paleozoicas da bacia e possivelmente associado à deposição da Formação Itaqueri na região. A junção desses eventos com a reativação de paleolineamentos, abertura e fechamento de determinadas direções de fraturas podem ter induzido uma nova fase de migração de hidrocarbonetos na região marcada pela remobilização dessa migração inicial que ocorreu segundo as estruturas NW-SE para as NE-SW, caracterizada como principais condutos na área de estudo.

A importância da estruturação do Alto Estrutural de Pitanga na migração de hidrocarbonetos tem sido alvo de estudos desde o início do século XX e é quase um consenso no âmbito da geologia do petróleo, tendo sido também discutida em Godoy (2006) que destacou a importância dos picos de temperatura cretáceos na maturação e migração do material orgânico. Em contrapartida, Siqueira (2011) considera o período de formação do Alto Estrutural de Pitanga como posterior a entrada dos diques na bacia, e, portanto, ao evento inicial de geração e migração de hidrocarbonetos, descartando qualquer possibilidade do mesmo comportar-se como armadilha petrolífera do sistema Irati-Pirambóia. No entanto, a ocorrência de reservatórios locais de hidrocarbonetos em arenitos da Formação Tatuí associados a zonas de falha e abatimento da Formação Irati (unidade geradora) descarta essa

hipótese, já que essa acumulação só seria possível com a pré-existência da estruturação do Alto Estrutural de Pitanga, ou no máximo com a formação da estrutura concomitante ao evento de geração de hidrocarbonetos (AQUAROLI, 2013). Segundo Araújo (2008), a migração é tardia em relação à formação da estrutura (embora estejam associados ao mesmo evento), ou seja: os hidrocarbonetos alcançam os reservatórios após a instalação dos diques (ARAÚJO, 2008). Além disso, a migração nesse caso ocorreu através das estruturas NW-SE (AQUAROLI, 2013; MORALES et al., 2014), sugerindo que tenha ocorrido antes da incursão dos esforços tectônicos que abriram as estruturas NE-SW. Nomura et al. (2009) caracterizou a ocorrência de hidrocarbonetos na Formação Teresina (correlata da Formação Corumbataí) no estado de São Paulo, também associados a um forte controle estrutural por falhas e fraturas atuando como meios de migração. Bernardes (2005) identificou ainda uma paragénese hidrotermal em rochas da Formação Corumbataí associadas a intrusivas básicas, indicando temperaturas próximas a 70-90°C, compatíveis com a janela de geração de petróleo.

A análise microscópica das lâminas sob luz azul fluorescente permitiu a caracterização dos hidrocarbonetos como um material denso, “pesado”, provavelmente submetido a altas taxas de biodegradação devido à baixa (por vezes ausente) fluorescência do mesmo em relação à calcita, por exemplo. Análises químicas orgânicas para determinação do conteúdo de carbonato e carbono orgânico total, pirólise de Rock-Eval, cromatografia líquida, e cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM) da fração de hidrocarbonetos saturados foram realizadas por trabalhos como Lisboa (2006) e Costa (2006) em amostras coletadas na região de estudo, indicando que o conteúdo orgânico da rocha geradora mostrava-se pouco evoluído, abaixo da zona maturada quando distantes das intrusões. Esse resultado já era esperado, dado o fato de a Formação Irati não ter alcançado condições suficientes de profundidade para que houvesse a devida maturação de hidrocarbonetos na região e se comportasse como um sistema petrolífero atípico (ARAÚJO et al., 2000). Oliveira (2012) identificou ainda a ocorrência de inclusões fluidas de hidrocarbonetos em amostras de calcita espática e veios de quartzo da Formação Irati, indicando presença de óleo leve e relativamente maturo. Tais análises sugerem que o óleo altamente viscoso e de baixo grau API encontrado em afloramentos da unidade geradora, bem como em reservatórios (arenitos asfálticos, por exemplo) correspondem de fato a um produto de biodegradação orgânica. Por fim, uma síntese acerca do sistema petrolífero principal da região (Irati-Pirambóia) foi elaborada com base nos preceitos de Magoon & Dow (1994)

através de um quadro cronológico com os principais eventos e elementos associados, conforme mostrado na figura 63.

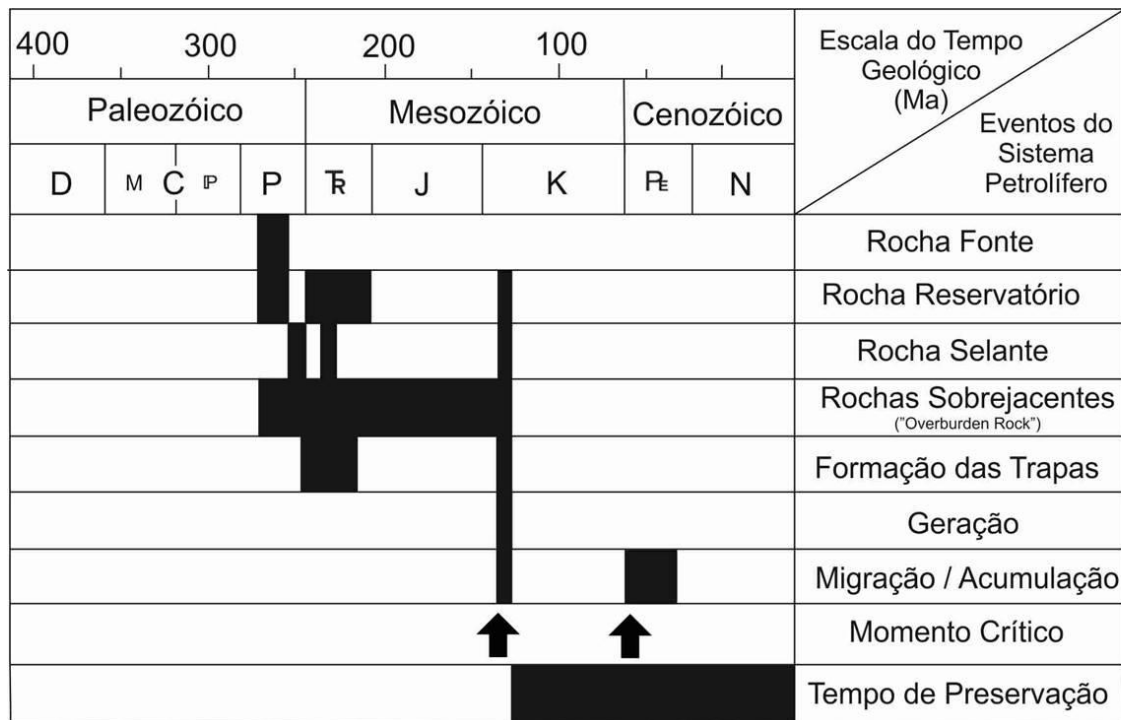


Figura 63: Tabela de eventos mostrando a relação entre os principais processos e elementos do sistema petrolífero relacionado à Formação Irati na região, bem como o tempo de preservação e o momento crítico associado (na escala de tempo utilizada, o Neógeno (N) inclui o período Quaternário). Baseada em Magoon & Dow (1994).

A rocha fonte referente ao período Permiano corresponde aos folhelhos pirobetuminosos da Formação Irati, enquanto que as rochas reservatório listadas consistem principalmente das formações Tatuí e Irati (Permiano), além de intrusivas básicas fraturadas em escala local (ARAÚJO, 2008) e Pirambóia (Triássico) em escala regional. As principais rochas selantes elencadas correspondem aos siltitos e argilitos da Formação Corumbataí (Permiano), exclusivamente com relação aos reservatórios das formações Tatuí e Irati); as fácies e lentes argilosas da Formação Pirambóia e as intrusivas básicas da região, que consistem em importantes barreiras verticais (diques) e horizontais (soleiras) para a passagem de hidrocarbonetos (ARAÚJO, 2008). O pacote de rochas sobrejacentes ("overburden rock") consiste de toda a sequência permiana, triássica e juro-cretácica que se encontrava sobre a rocha geradora no período em que há geração de hidrocarbonetos ao longo do sistema. Com relação às trapas ou armadilhas, foram consideradas trapas estratigráficas associadas à Formação Pirambóia e às intrusões básicas, bem como trapas estruturais relacionadas aos

próprios corpos intrusivos (exemplo: “jump” de diabásio na Pedreira Partecal, distrito de Assistência (SP), formando estrutura anticlinal potencialmente acumuladora) e à própria estruturação do Alto Estrutural de Pitanga, conforme já caracterizado no presente trabalho.

A análise da evolução tectônica da região associada a migração de hidrocarbonetos permitiu a identificação de um evento de geração e dois eventos principais de migração e acumulação de material orgânico. O evento de geração é contemporâneo em relação ao primeiro evento de migração/acumulação, com duração aproximada de 10 Ma e correspondente ao período de intrusão de diques e soleiras de diabásio na região, durante a Ativação Juro-Cretácea (ARAÚJO, 2008). No entanto, essa contemporaneidade entre os eventos pode ter ocasionado perda de hidrocarbonetos por migração terciária devido à falta de sincronismo entre os elementos do sistema petrolífero quando atingido o momento crítico. O segundo evento de migração/acumulação refere-se ao Paleogeno-Mioceno, induzido por meio da reativação de zonas de falhas pré-existentes e resultante na evolução do Alto Estrutural de Pitanga nesse período, comprovada por Godoy (2006) por meio de análises termocronológicas na região. O tempo de preservação corresponde ao período de formação das sequências sobrejacentes ao sistema petrolífero e consequentemente o tempo de acumulação e/ou escape de hidrocarbonetos para profundidades mais baixas ou para a superfície, ocasionando perda por biodegradação e/ou exsudação, como ocorreu no Alto Estrutural de Pitanga. Grande parte do potencial petrolífero da região (que já é considerado escasso por ser um sistema atípico e de profundidade crustal insuficiente) foi perdido devido a exumação e erosão das unidades litoestratigráficas superiores e potenciais reservatórios, especialmente no centro da estrutura. No entanto, o processo denudacional também é fundamental para a exposição dessas ocorrências, já que não existem evidências de ocorrência de hidrocarbonetos em rochas terciárias ou quaternárias (ARAÚJO, 2008).

O sistema petrolífero Irati-Pirambóia corresponde, portanto, a um sistema de alta impedância e drenagem (migração) predominantemente vertical por meio de falhas (ARAÚJO, 2008), caracterizado principalmente pela ocorrência de acumulações sobrejacentes ou próximas à rocha geradora, com migração lateral restrita a no máximo 30 quilômetros de distância da mesma (DEMAISON & HUIZINGA, 1994). A migração lateral ou horizontal ocorre ao longo dos planos de estratificação e acamamento (ARAÚJO, 2008), conforme descrito nas ocorrências de hidrocarbonetos na Pedreira Bonança, município de Ipeúna (SP). A existência de um arcabouço estrutural com lineamentos NE-SW e NW-SE em forma de “x” mostrou-se favorável ao aumento de conectividade entre as duas famílias de

fraturas (ARTUR & SOARES, 2008) durante o segundo evento de migração/acumulação, permitindo que a maior parte do material orgânico acumulado nas direções NW-SE passasse a migrar ao longo das estruturas NE-SW. Segundo Gartrell et al. (2003), a intersecção desses lineamentos resultam em áreas com tensões cisalhantes relativamente baixas e, portanto, mais passíveis de conduzir hidrocarbonetos. O abatimento e basculamento de blocos associados a altos e baixos estruturais presentes no Alto Estrutural de Pitanga permitem uma maior proximidade entre rocha geradora e reservatório; sendo assim, espera-se que haja acumulação de hidrocarbonetos em direção ao topo da estrutura, na porção central (ARAÚJO, 2008).

Com relação aos três tipos de migração descritos no Capítulo 3 (Contextualização Teórica), pode-se afirmar que a migração primária (expulsão dos hidrocarbonetos da rocha geradora) iniciou-se a partir do intenso fraturamento dos folhelhos pirobetuminosos da Formação Irati (ARAÚJO et al., 2000), enquanto que a migração secundária ocorreu justamente por meio de zonas de falhas e zonas de fraturas em dois períodos principais propostos pelo presente trabalho (uma inicial no Jurássico/Cretáceo, aproveitando fraturas e diques NW-SE e a principal no Paleogeno/Mioceno, por meio de estruturas NE-SW). A migração terciária para a superfície está relacionada à erosão diferencial do terreno e abertura das cavas de exploração mineral, expondo afloramentos entre altos e baixos estruturais associados à configuração do Alto Estrutural de Pitanga.

7. Conclusões

O estudo do fraturamento da Formação Irati na região de Rio Claro e Ipeúna (SP), associado à análise estrutural das unidades litoestratigráficas associadas permitiu uma contribuição ao entendimento do contexto tectônico associado ao Alto Estrutural de Pitanga e de sua intrínseca relação com a migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná.

Foram caracterizadas quatro principais formas de ocorrência de hidrocarbonetos na região: associada ao preenchimento de fraturas, a brechas estruturais, cavidades e ao longo dos planos de acamamento, em zonas de alta permo-porosidade nos carbonatos. As principais direções de fraturamento na região correspondem às NW-SE e NE-SW, sendo que os lineamentos regionais de relevo e drenagem mais importantes estão associados aos *trends* NW-SE. Em escala de afloramento, ambas as direções mostraram-se proeminentes, embora as estruturas NE-SW mereçam destaque devido a grande quantidade de falhas com essa direção, além de numerosas fraturas preenchidas por hidrocarbonetos.

Foi constatado, portanto, que existe uma família preferencial de migração de material orgânico na área de estudo, correspondente às falhas e fraturas NE-SW. Os poucos registros de migração por meio de fraturas NW-SE estão associados a uma primeira etapa de migração contemporânea ao período de geração e migração de hidrocarbonetos, no período Juro-Cretáceo, há cerca de 132 Ma (MARQUES & ERNESTO, 2004). Essa fase corresponde ao momento crítico do sistema petrolífero Irati-Pirambóia e está relacionado ao magmatismo toleítico resultante do sistema distensivo NW-SE associado à fragmentação do Gondwana e abertura do Atlântico Sul, representado pelas intrusivas básicas que forneceram calor para a maturação dos folhelhos pirobetuminosos da Formação Irati e geração de hidrocarbonetos na região de estudo.

Já a segunda e principal etapa de migração correspondente às estruturas NE-SW relaciona-se aos estágios iniciais da evolução do Sistema de Riftes do Sudeste, proposta por Riccomini (1998) e Riccomini et al. (2004). A análise de paleotensões da época permitiu a caracterização de um grande evento distensivo no Paleogeno, com eixo principal NW-SE, responsável pela abertura de estruturas NE-SW em toda a região. Esse evento foi sucedido por um sistema transcorrente sinistral no Mioceno, associado a uma compressão NE-SW e distensão NW-SE, que favoreceu ainda mais a migração de hidrocarbonetos através da abertura de estruturas NE-SW e fechamento das famílias NW-SE.

O sistema petrolífero associado ao Alto Estrutural de Pitanga consiste, portanto, de um sistema atípico associado à interação entre intrusivas básicas e folhelhos orgânicos potencialmente geradores da Formação Irati que apresentou condições plenas de armazenamento de hidrocarbonetos em caráter local (arenitos da Formação Pirambóia e Tatuí e carbonatos da Formação Irati), além de unidades selantes eficientes e armadilhas estratigráficas e estruturais importantes. No entanto, o baixo gradiente geotérmico alcançado pelo sistema na região limitou muito sua capacidade de geração; conforme verificado nas análises microscópicas, os hidrocarbonetos encontrados na região mostram baixa maturidade, densidade elevada e alta suscetibilidade à biodegradação, fato esse que pode estar associado aos eventos de exumação e erosão que afetaram toda a região e permitiram a exposição do sistema petrolífero na superfície. Além disso, outro fator limitante do potencial petrolífero no Alto Estrutural de Pitanga é a própria contemporaneidade entre o momento crítico de geração e a formação das trapas estruturais associadas ao alto estrutural e a intrusão dos diques e soleiras, que pode ter ocasionado perdas significativas de hidrocarbonetos para a superfície naquele período.

8. Referências Bibliográficas

- ABREU, R. L. **Mapa de localização do Município de Rio Claro no Estado de São Paulo, Brasil**. 2006. Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SaoPaulo_Municip_RioClaro.svg> Acesso em 25 abr 2015;
- AB'SABER, A.N. Pedimentos e Bacias Detríticas Pleistocênicas em São Paulo. **Geomorfologia**. São Paulo, n.9,p. 1-12. 1969b;
- ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. São Paulo. **Instituto Geográfico e Geológico, Boletim**, 41, p.: 169-263. 1967;
- ALMEIDA, F. F. M. The System of Continental Rifts Bordering the Santos Basin, Brazil. **In: Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 48 (Suplemento), p. 15-26. 1976;
- ALMEIDA, F. F. M. Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil. **In: Revista Brasileira de Geociências**, vol. 16(4): 325-349. 1986;
- ALMEIDA, F. F. M. & BARBOSA, O. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. **Bol. DNPM/DGM**. 143:96p. 1953;
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R.; MELO, M.S.; BISTRICHI, C.A. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo (escala 1:500.000)**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 126 p. e mapa. 1981;
- ALVES, D.B. & RODRIGUES, R. Influência das intrusões ígneas nos folhelhos devonianos da Bacia do Baixo Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências**, 15(2):110- 115. 1985;
- AMARAL, S. **Geologia e Petrografia da Formação Irati (Permiano) no Estado de São Paulo**. Tese de Livre Docência. Bol. Inst. Geocienc. Astron. USP). 1967;

- ANDRADE S. M. & SOARES, P. C. 1971. **Geologia de semi-detálhe do centro-leste do Estado de São Paulo. Ponta Grossa**, PETROBRAS/ DESUL, Relatório interno, 407 p. 1971;
- ARAÚJO, B. C. **Análise Estratigráfica do Grupo Itararé no Sul de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Jose Alexandre de Jesus Perinotto. 2013;
- ARAÚJO, L.M.; TRIGUIS, J.A.; CERQUEIRA, J.R.; FREITAS, L.C. da S. The atypical Permian Petroleum System of the Paraná Basin, Brazil. In M.R. Mello & B.J. Katz (eds.) *Petroleum systems of South Atlantic margins*. AAPG Memoir **73**:377-402. 2000;
- ARAÚJO, C.C. de, YAMAMOTO, J.K., ROSTIROLLA, S.P. Arenitos Asfálticos na Bacia do Paraná: Estudo das Ocorrências no Alto Estrutural de Anhembi. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 14(1):47-70. 2008;
- ARTUR, P. C. & SOARES, P. C. Paleoestruturas e petróleo na Bacia do Paraná, Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, 32(4), 433-448. 2008;
- ASMUS, H.E. & FERRARI, A.L. Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na região sudeste do Brasil. **Projeto REMAC**. 4, p.75-88. 1978;
- ASSINE, M. L.; ZACHARIAS, A. A.; PERINOTTO, J. A. P. Paleocorrentes, paleogeografia e seqüências deposicionais da Formação Tatuí, centro-leste do Estado de São Paulo. *Brazilian Journal of Geology*. 33.1: 33-40. 2003.
- ASSINE M. L., PIRANHA J. M., CARNEIRO, C. D. R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito– Neves B.B. orgs. 2004. **Geologia do Continente Sul-Americano**: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Ed. Beca. p.77-93. (Cap. 5). 2004;

- AQUAROLI, L. H. S. **Papel da tectônica rúptil na possível migração de hidrocarbonetos: estudo da porção noroeste da estrutura de Pitanga, região central do estado de São Paulo.** Trabalho de Conclusão de Curso. UNESP. 2013;
- AYDIN, A. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. **Marine and Petroleum Geology**, 17(7), 797-814. 2000;
- BARBOSA, O. & GOMES, F. **Pesquisa de petróleo na bacia do Rio Corumbatai**, Estado de São Paulo. Rio de Janeiro, DNPM/DGM. 40 p. (Boletim 171). 1958;
- BARCELOS, L.; SOUZA FILHO, E. E.; FULFARO, V.; LANDIM, P.; COTTAS, L.; WU, F.; GODOY, A. A Formação Itaqueri: um exemplo de tectofácies. **Simpósio Regional de Geologia**. 4(1983). p245-252. 1983;
- BENDER, A. A.; EIRAS, J. F.; WANDERLEY FILHO, J. R.; BARBOSA FILHO, C. M. Quantificação 3D da evolução termal da Bacia do Solimões e suas implicações petrolíferas. **Simpósio de Geologia da Amazônia**, 7, Belém : SBG, nov, 2001;
- BERNARDES, E. S.; **Diagênese da Formação Corumbataí na Mina Partezani, Rio Claro - SP.** Tese (Doutorado em Geociências); IGCE/UNESP; Rio Claro. 127p. 2005;
- BJÖRNBERG, A.J.S. & LANDIM, P.M.B. Contribuição ao estudo da Formação Rio Claro (Neoceno-zóico). **Boletim Sociedade Brasileira Geologia**, 15 (4): 43-67. 1966;
- BJÖRNBERG, A.J.S.; GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A.B. Basculamentos tectônicos modernos no Estado de São Paulo. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, São Paulo, **Anais**, 2:159-174. 1971;
- BRIGHETTI, J.M.P. **Faciologia dos sedimentos da Formação Pirambóia na região de Rio Claro (SP).** Rio Claro, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP. 124p. 1994;

- CAMPOS, L. F. G. de. Seção Geológica: São Paulo. **Relatório de Comunicação Geográfica e Geológica da Província de São Paulo**. p.21-34. 1889;
- CARNEIRO, C.D.R. **Projeção estereográfica para análise de estruturas. Programas Stereonet e Trade. Fundamentos teóricos, exercícios e aplicações em microcomputador, laboratório e campo**. São Paulo: Universidade de Campinas/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (UNICAMP/CPRM/IPT). 1996;
- CARVALHO LISBOA, A.; AZEVEDO, D. A.; GONÇALVES, F. T. T.; LANDAU, L.; **Aplicação da Geoquímica Orgânica no Estudo dos Folhelhos Oleígenos Neopermianos da Formação Irati - Borda Leste da Bacia do Paraná – São Paulo, Brasil**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, 3o Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). 2004;
- CHEN, Z.; YAN, H.; LI, J.; ZHANG, G.; ZHANG, Z.; & LIU, B. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China. **AAPG bulletin**, 83(6), 1004-1014. 1999;
- COOKE, M. L.; SIMO, J. A.; UNDERWOOD, C. A.; RIKJEN, P. Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. **Sedimentary Geology**, 184(3), 225-239. 2006;
- CORDANI, U. G. & VANDOROS, P. Basaltic rocks of the Paraná Basin. **Problems in Brazilian Gondwana Geology**, 207-231. 1967;
- COSTA, A. C.; **Avaliação do Metamorfismo Orgânico do Membro Assistência da Formação Irati, da Bacia do Paraná, na Região de Rio Claro – SP**; Monografia de Conclusão de Curso, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia – CCT. 2006;
- COUTINHO, J.M.V. Dyke Swarms of the Paraná Triple Junction, Southern Brazil. **Geologia USP: Série Científica** 8: (2): 29-52. 2008;

- DAEMON R.F. & QUADROS, L.P. de. **Bioestratigrafia e Palinologia do Paleozóico Superior da Bacia do Paraná. Ponta Grossa.** PETROBRÁS/DESUL. 1 v.; Relatório Interno nº 384. 1969;
- DEMAISON, G. & HUIZINGA, B.J. **Genetic classification of petroleum systems using three factors: charge, migration, and entrapment**, in L.B. Magoon and W.G. Dow, eds., *The Petroleum System—From Source to Trap: AAPG Memoir* 60, p. 73–89. 1994;
- DE SOUZA, I. V. A. F.; MENDONÇA FILHO, J. G.; MENEZES, T. R.; **Determinação dos Parâmetros de Maturação Térmica em uma Seção da Formação Irati, para Caracterização do Processo de Geração de Hidrocarbonetos**; 2o Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, DEGEO/IGEO/UFRJ;CENPES, PETROBRAS. 2002;
- DE SOUZA, I. V. A. F.; MENDONÇA FILHO, J. G., MENEZES, T. R.; **Avaliação da Influência Térmica das Intrusivas Ígneas no Principal Horizonte Potencialmente Gerador da Bacia do Paraná: Formação Irati.** Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, 3o Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Departamento de Geologia, IGEO, CCMN, UFRJ. 2004;
- DIAS, R. L.; PEREZ FILHO, A. Geocronologia e Análise Geomorfológica da Depressão Periférica Paulista. **IX SINAGEO - 9º Simpósio Nacional de Geomorfologia - "Geomorfologia e Eventos Catastróficos: passado, presente e futuro"**. Vol. 1, pp.1-4, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012;
- DOW, W. G. Application of Oil Correlation and Source-Rock Data to Exploration in Williston Basin: Abstract. **AAPG Bulletin**, 56(3), 615-615. 1972;
- EIRAS, J. F.; WANDERLEY FILHO, J. R. Sistemas petrolíferos ígneo-sedimentares. **II Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás**, 2, CR-rom, 6 p. Rio de Janeiro: ANP/PRHs. 2003;
- EMBRAPA, 2015. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em 08 abr 2015;

- FERNANDES, L. A. **Estratigrafia e Evolução Geológica da Parte Oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)**. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo 216p. 1998;
- FERNANDES, A. J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, 29(1-2), 49-72. 2008;
- FERNANDES, A. J.; AMARAL, G. Cenozoic Tectonic Events at the Border of the Paraná Basin, São Paulo, Brazil. In: **Journal of South American Earth Sciences**, 14 (2002). pp. 911-931. 2002;
- FOLK, R. L. **Spectral subdivision of limestone types**. p. 62-84. 1962;
- FOSSEN, H. **Structural geology**. Cambridge University Press. 2010;
- FULFARO, V.J.; LANDIM, P.M.B.; ELLERT, N. A tectônica das serras de Santana e São Pedro (Serra Geral). **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, 26. p.57 (resumo das comunicações). 1967;
- FULFARO, V. J.; SAAD, A. R.; SANTOS, M.V.; VIANNA, R. B. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v.12, n.4. p.233-256. 1982;
- FÚLFARO, V. J.; STEVAUX, J. C.; SOUZA FILHO, E. E.; BARCELOS, J. H. A Formação Tatuí (P) no Estado de São Paulo. SBG, **Congresso Brasileiro de Geologia**. Vol. 33, pp. 711-723. 1984;
- GAMA JR, E.G. A sedimentação do Grupo Passa Dois (exclusive Formação Irati): um modelo geomórfico. **Revista Brasileira de Geociências**, 9 (2): 1-16. 1979;

- GAMA JUNIOR., E.; BANDEIRA JÚNIOR., A. N.; FRANÇA, A. B. Distribuição espacial e temporal das unidades litoestratigráficas paleozóicas na parte central da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.12, n. 4, p. 578 – 589, 1982;
- GARTRELL, A.; ZHANG, Y.; LISK, M., DEWHURST, D. **Enhanced hydrocarbon leakage at fault intersections: an example from the Timor Sea, Northwest Shelf, Australia**. J. Geochem. Explor. p.78-79; p. 361-365. 2003;
- GODOY, D. F. **Termotectônica por Traços de Fissão em apatitas dos altos estruturais de Pitanga, Pau d'Álho e Jiboia - Centro do Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 128 p. 2006;
- GOOGLE. Software Google Earth;
- GORDON JR., M. Classificação das Formações Gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Notas Prelim. Est. Div. Geol. Mineral. Dep. Nac. Prod. Min., Rio de Janeiro, n. 38. 20 p. 1947;
- GUDMUNDSSON, A.; GJESDAL, O.; BRENNER S.L.; FJELDSKAAR, I. Effects of linking up of discontinuities on fracture growth. **Hydrogeology Journal**, 11(1):84-99. 2003;
- HARDING, T., & LOWELL, J. D. Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces. **AAPG bulletin**, 63(7), 1016-1058. 1979;
- HARDING, T. P. Petroleum traps associated with wrench faults. **AAPG bulletin**, 58(7), 1290-1304. 1974;
- HASUI, Y. *Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil*. In: **Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozoica Continental no Sudeste Brasileiro**, 1. Belo Horizonte. *Boletim*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia. p. 1-31, n. 11. 1990;

- HASUI, Y.; HARALYI, N. L. E.; MIOTO, J. A. et al. **Compartimentação estrutural e evolução tectônica do Estado de São Paulo**. São Paulo. (IPT, Relatório nº 27.394). 1989;
- LANDIM, P. M. B.; SOARES, P. C. ; GAMA JÚNIOR, E. G. **Estratigrafia do NE da Bacia Sedimentar do Paraná**. Rio Claro: UNESP. Curso de Especialização-Convênio IPT-UNESP. 1980;
- LISBOA, Á. C. **Caracterização Geoquímica Orgânica dos Folhelhos Neo-Permianos da Formação Irati – Borda Leste da Bacia do Paraná, São Paulo**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006;
- MAACK, R. **Breves notícias sobre a geologia dos estados do Paraná e Santa Catarina**. Arq. Biol. Tecnol., Curitiba, (2): 63-154. 1947b;
- MAGOON, L. B., & DOW, W. G. The petroleum system. **The petroleum system - From source to trap: AAPG Memoir**, 60, 3-24. 1994;
- MARQUES, A.; ZANOTTO, O. A.; FRANÇA, A. B.; ASTOLFI, M. A. M.; PAULA, O. B. **Compartimentação tectônica da bacia do Paraná**. Curitiba: PETROBRAS/NEXPAR. 87p. 1993;
- MARQUES, L. S. & ERNESTO, M.: **O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná**. *In: Geologia do Continente Sul-Americano*, Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves, B.B. Beca Produções Culturais Ltda, 2004;
- MATEUS, A.; RICCOMINI, C.; FERREIRA, E. J.; TASSINARI, C. C. Permian-Triassic maturation and multistage migration of hydrocarbons in the Assistência Formation (Irati Subgroup), Paraná Basin, Brazil: implications for the exploration model. **Brazilian Journal of Geology**, 44(3), 355-360. 2014;
- MEISSNER, F. F.; WOODWARD, J.; CLAYTON, J. L. **Stratigraphic relationships and distribution of source rocks in the greater Rocky Mountain region**, in J. Woodward, F. F. 1984;

- MELO, M. S. D. **A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenozóica na Depressão Periférica Paulista**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo). 1995;
- MENDES, J. C. The Passa Dois Group (The Brazilian Portion of the Paraná Basin). In J. J. Bigarella, R. D. Becker, & I. D. Pinto (Eds.), **Problems in Brazilian Gondwana Geology. International Symposium on the Gondwana Stratigraphy and Palaeontology**. Vol. 1, pp. 119-166. 1967;
- MENDONÇA FILHO, J. G; CARVALHO, M. A.; MENEZES, T. R. Palinofácies. **Técnicas e procedimentos de trabalho com fósseis e formas modernas comparativas**. Editora Unisinos. p.20-24. 2002;
- MEZZALIRA, S. **Os fósseis do Estado de São Paulo**. São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente/Instituto Geológico. 2.ed. Série Pesquisa. 142p. 1989;
- MILANI, E. J. (Coord.). **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS. p. 135-168. 1990;
- MILANI, E. J. Comentários Sobre a Origem e a Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. **In: Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**; Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito-Neves, B. B. B. – ed. Beca – p265-291. 2004;
- MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 2 v. Tese Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1997;
- MILANI, E. J., BRANDÃO, J. A. S. L., ZALÁN, P. V., & GAMBOA, L. A. P. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Brazilian Journal of Geophysics**, 18(3), 351-396. 2000;

- MILANI, E.J., MELO, J.H.G., SOUZA, P.A., FERNANDES, L.A., FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. Cartas Estratigráficas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. v.15. n. 2. 2007;
- MIZUSAKI, A. M. P. A. Formação Macau na porção submersa da Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. n. 3, p. 191-200. 1989;
- MIZUSAKI, A. M. P. & THOMAZ-FILHO, A. O magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *In*: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.). **Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Beca, p. 471-486. 2004;
- MIZUSAKI A. M. P.; THOMAZ-FILHO, A.; CESERO, P. de. Ages of the Magmatism and the Opening of the South Atlantic Ocean. **Pesquisas**, 25(2):47-57. 1998;
- MIZUSAKI, A. M. P.; THOMAZ-FILHO, A.; MILANI, E. J.; CESERO, P. de. Mesozoic and Cenozoic Igneous Activity and its Tectonic Control in Northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 15:183-198. 2002;
- MOCHIZUKI, A.H. **Arquitetura estratigráfica e reservatórios do Grupo Guatá (Eopermiano) na margem aflorante leste de São Paulo**. IGCE/UNESP, Rio Claro, Trabalho de Formatura. 42p. 2001;
- MORAES REGO, L. F. **A geologia do petróleo no Estado de São Paulo**. Bol. Serv. Geol. Min., DNPM, 46. p 1-110. 1930;
- MORALES, N.; **Neotectônica em ambiente intraplaca: exemplos da região sudeste do Brasil**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Livre Docência, 201 p. 2005;
- MORALES, N.; PERINOTTO, J. A. J.; D’AFFONSECA, F. M. Evidências de tectônica distensiva sindeposicional à Formação Tatuí na região de Limeira - SP. *In*: SBG, Simp. Geol. Sudeste, 5, Itatiaia, **Resumos**, 60-61. 1997;

- MORALES, N.; AQUAROLI, L. H. S.; SOUZA, I.A.; GIMENEZ, V.B. **Ocorrência de arenitos asfálticos na Formação Tatuí, no Alto Estrutural de Pitanga, borda leste da Bacia do Paraná.** In: 47º Congresso Brasileiro de Geologia, 2014, Salvador - BA. *Anais.* Salvador - BA: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Bahia – Sergipe. 2014;
- NOMURA, S. F.; SAWAKUCHI, A. O.; BELLO, R. M.; DANTAS, M. S. S.; **Caracterização de ocorrência de hidrocarbonetos da Formação Teresina, Bacia do Paraná no Estado de São Paulo.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 45, *Boletim de Resumos*, Belém. SBG. 2010;
- OLIVEIRA, A. F. **Paleotemperaturas e paleofluidos da Formação Irati na borda leste da Bacia do Paraná: implicações para a geração e migração de hidrocarbonetos.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012;
- OLIVEIRA, E.P. de. **Geologia do estado do Paraná.** B. Minist. Agric. Indust. Com., Rio de Janeiro, nº 5. p.67-143. 1916;
- OPPENHEIM, V. Sobre a bacia sedimentária gonduanica na Republica do Uruguay. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 3(6):143-155. 1934;
- OPPENHEIM, V. & MALAMPHY, M. C. **Notas sobre a tectônica da área São Pedro-Xarqueada.** Rio de Janeiro, SFPM, Rio de Janeiro, 12 p. (Avulso 7). 1936;
- ORCHUELA, I. A.; ARTEAGA, M.; PALADE, S. E. Reservorios en rocas ígneas de yacimientos gasíferos en Cuenca Neuquina. **Yacimientos Petrolíferos Fiscales, Buenos Aires, Boletín de Informaciones Petroleras**, 114-124. 1989;
- PACHECO, J. **Relatório elucidativo do esboço geológico da região compreendida entre o meridiano 40, rio Itararé e os paralellos 23º 34' e 24º 38'.** Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo, Exploração da região compreendida pelas folhas topográficas Sorocaba, São Paulo. p. 9-12. 1927;

- PEATE, D. **The Paraná-Etendeka Province**. In: Mahoney, J.J. & Coffin (Coordenadores), Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism editors, Geophysical Monograph Series, 100: p.217-245. 1997;
- PENTEADO, M. M. Implicações tectônicas na gênese das cuestas da bacia de Rio Claro. **Notícia Geomorfológica**. 8(15):19-41. 1968;
- PERINOTTO, J. A. J. **Análise estratigráfica da seqüência portadora de carvão de Cerquilho (SP)**. São Paulo. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências/USP). 76p. 1987;
- PERINOTTO, J. A. J. **Análise estratigráfica da Formação Palermo (P) na Bacia do Paraná, Brasil. Rio Claro, SP**. 2v. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP). 1992;
- PERRODON, A., **Geodynamique petroliere. Genese et repartition des gisements d'hydrocarbures: Paris, Masson-Elf Aquitaine**, 381 p. 1980;
- PERRODON, A. & MASSE, P. Subsidence, sedimentation and petroleum systems. **Journal of Petroleum Geology**. 7(1), 5-25. 1984;
- RENNE, P. R.; ERNESTO, M.; PACCA, I. G.; COE, R. S.; GLEN, J. M.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. **Science**, 258:975-979;
- REZENDE, W M. Post Paleozoic Neotectonics of South America Related to Plate Tectonics and Continental Drift. **Anais do XXVI Congr. Bras. de Geol.** p.205-210. Belém. 1972;
- RIBEIRO, L. F. B.; HACKSPACHER, P. C.; RIBEIRO, M. C. S.; HADLER NETO, J. C.; TELLO, S. C. A.; IUNES, P. J.; FRANCO, A. O. B.; GODOY, D. F. Thermotectonic and Fault Dynamic Analysis of Precambrian Basement and Tectonic with the Paraná Basin. In: **Radiation Measurements**. 39 p.669-673. 2005;

- RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo.** Tese de doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. p.256. 1989;
- RICCOMINI, C. Evidências geológicas de atividade neotectônica no Estado de São Paulo e regiões adjacentes. **Boletim IG-USP.** Publ. Esp. nº12. 1992;
- RICCOMINI, C. **Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e área vizinhas.** Livre Docência. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. p.100. 1995;
- RICCOMINI, C.; MANCINI, F.; HASEBE, F.K.; RIDENTE JR, J.L.; SANTANNA, L.G.; FAMBRINI, G.L. Evidências de neotectonismo no vale do Rio Passa Cinco, Domo de Pitanga, Bacia do Paraná, SP. **Simpósio de Geologia do Sudeste, Atas... São Paulo, SBG.** p.27-28. 1991;
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. *In:* Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Neves B.B.B. (orgs.) **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** São Paulo, Editora Beca, p. 383-405. 2004;
- ROCHA-CAMPOS, A. C. **Varvito de Itu, SP: Registro clássico da glaciação neopaleozóica.** 2000;
- RODRIGUES, R. **A Geoquímica Orgânica na Bacia do Parnaíba.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS. 225p. 1995;
- RUBO, R. **Petróleo.** 2015. Disponível em: <<http://rafaelrubo.esy.es/geologia/petroleo/origem.html>>. Acesso em: 16 set 2015;
- SAAD, A.R. **Estratigrafia do Subgrupo Itararé no centro e sul do Estado de São Paulo.** São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da USP. 107p. 1977;

- SANTOS, R. V.; SOUZA, P. A.; ALVARENGA, C. J. S.; DANTAS, E. L.; PIMENTEL, M. M.; OLIVEIRA, C. G.; ARAÚJO, L. M. **Shrimp U-Pb Zircon dating and palinology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil**. *Gondwana Research*, Osaka, v. 9, p. 456-463, 2006;
- SCHIUMA, M. F. **Reservorios de hidrocarburos en rocas ígneas fracturadas**. BIP. p. 35-45. 1988;
- SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre. Anais do... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 41-65. 1974;
- SILVA, R.B.; ETCHEBEHERE, M.L.D.C.; SAAD, A.R.; ZAINÉ, J.E.; RAMOS, R.G.N. O Alto Estrutural de Vera Cruz - Garça, Estado de São Paulo. **Geociências**, UNESP, São Paulo, **176** (nºesp.). p.279-298. 1990;
- SIQUEIRA, L. F. S., **Tectônica Deformadora em Sinéclises Intracratônicas: a Origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná**, SP. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo. 2011;
- SOARES, P.C. Nota sobre a tectônica moderna na Depressão Periférica Paulista. **Notícia Geomorfológica**. Campinas. 13 (25): 75-81. 1973;
- SOARES, P. C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e gênese. Congresso Brasileiro de Geologia, 28, Porto Alegre. Anais do... Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia. v. 4, p.107-121. 1974;
- SOARES, P.C. e LANDIM, P.M.B. Comparison between the tectonic evolution of the intracratonic and marginal basins in South Brazil. **An. Acad. Bras. Ciênc.** v. 48 (supl.). p.313-324. Rio de Janeiro. 1975;

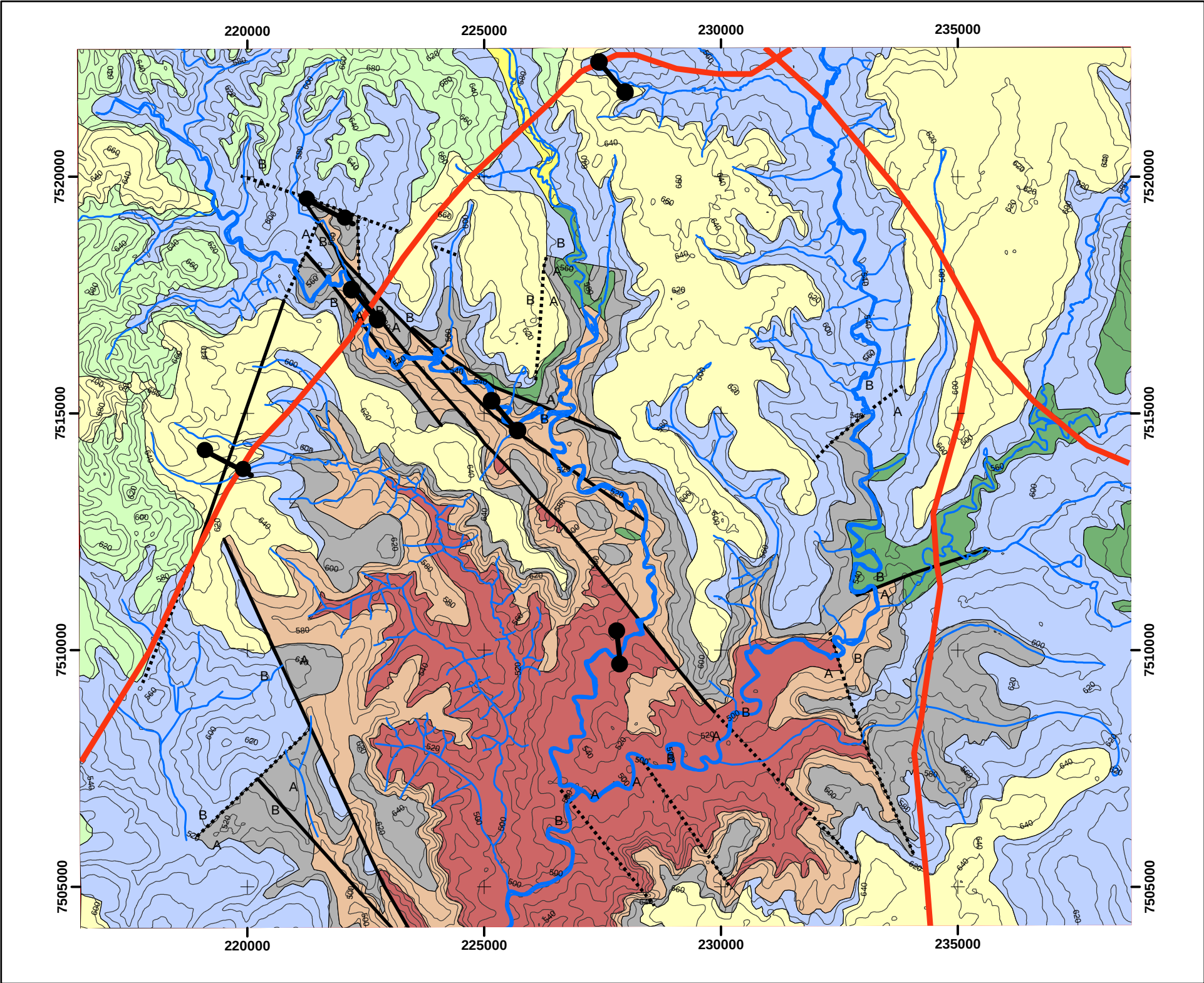
- SOARES, P. C., & FIORI, A. P. **Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia**. Campinas–São Paulo. p.71-140. 1976;
- SOUSA, M. O. L. **Caracterização Estrutural do Domo de Pitanga – SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 116 f. 1997;
- SOUSA, M. O. L. **Evolução Tectônica dos Altos Estruturais de Pitanga, Artemis, Paud'Alho e Jibóia: Centro do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geologia Regional). Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2002;
- SOUSA, M.O.L. & MORALES, N. **Evolução Tectônica do Alto Estrutural de Pitanga - SP**. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos (SNET), 7, Lençóis - BA, Sessão 4, p.: 40 – 42. 1999 ;
- SOUZA, I. V. A. F. MENDONÇA-FILHO; MENEZES, T. R. Avaliação do efeito térmico das intrusivas ígneas em um horizonte potencialmente gerador da Bacia do Paraná: Formação Irati. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 38, n. 2 (suplemento); p.138-148. 2008;
- STEVAUX, J. C.; SOUZA-FILHO, E. E.; FÚLFARO, V. J. Trato deposicional da Formação Tatuí (P) na área aflorante do NE da Bacia do Paraná, Estado de São Paulo. SBG, **Congr. Bras. Geol**, 34, 219-229. 1986;
- THOMAZ-FILHO, A. Ocorrência de Arenito Betuminoso em Anhembi (SP) – Cubagem e Condicionamento Geológico. Congresso Brasileiro de Geologia. 32. Salvador. **Anais**. p.2344-2348. 1982;
- THOMAZ-FILHO, A., MIZUZAKI, A. M. P.; ANTONIOLI, L. Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo. **Revista Brasileira de Geociências**. 38(2). p128-137. 2008;
- TIRÉN, S. A. Geological setting and deformation history of a low-angle fracture zone at Finnsjön, Sweden. **Journal of Hydrology**. 126(1). p17-43. 1991;

- TSANG, Y. W. The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture. **Water Resources Research**. 20(9). p1209-1215. 1984;
- ULMISHEK, G. Stratigraphic aspects of petroleum resource assessment. D. D. Rice, ed., **Oil and gas assessment-methods and applications: AAPG Studies in Geology**. 21. p59-68. 1986;
- UNDERWOOD, C. A.; COOKE, M. L.; SIMO, J. A.; MULDOON, M. A. Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian dolomite, northeastern Wisconsin. **AAPG bulletin**. 87(1). 121-142. 2003;
- UNDIP, I. **Basic Petroleum System**. 2011. Disponível em: <https://smiatmiundip.wordpress.com/2011/05/01/basic-petroleum-system/>>. Acesso em: 15 set 2015;
- VIEIRA, A. J. & MAINGUE, E. Geologia de semi-detálhe do centro e nordeste do Paraná e centro sul de São Paulo. **Geologia de semi-detálhe do centro e nordeste do Paraná e centro sul de São Paulo**. PETROBRAS/DESUL. 1972;
- WASHBURN, G. Geologia do Petróleo do Estado de São Paulo. **Boletim da Comissão Geográfica e Geológica**. n.22. 1930;
- WHITE, I.C. **Geologia do sul do Brasil**. (Geology of South Brazil). Trad. Manuel I. Ornellas. B. Direct. Agric. Viação Ind. Obras Publ., Salvador, 8 (6). p582-86. 1906;
- ZAIN, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP)**. Dissertação de Mestrado em Geociências. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 1994;
- ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; VIEIRA, I. S.; ASTOLFI, M. A. M.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. A. Divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo. v. 17, n. 3. p.242-252. 1987;

- ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; SANTOS NETO, E. V.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J. (Ed.). Interior cratonic basins. **Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, AAPG. Memoir, 51).** p.681-708. 1987.

APÊNDICE 1

Mapa Geológico da Região (baseado em SOUSA, 2002)



Unidades Lito-Estratigráficas

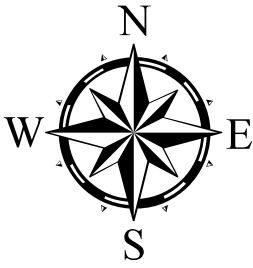
- Cobertura Aluvionar
- Formação Rio Claro
- Intrusivas Básicas
- Formação Pirambóia
- Formação Corumbataí
- Formação Irati
- Formação Tatuí
- Grupo Itararé

Convenções Topográficas

- Rodovias
- Drenagens
- Curvas de Nível

Estruturas

- Falha Definida
- Falha Inferida
- Bloco Alto (A) e Bloco Baixo (B)
- Dique de Diabásio



0 2 4 Km

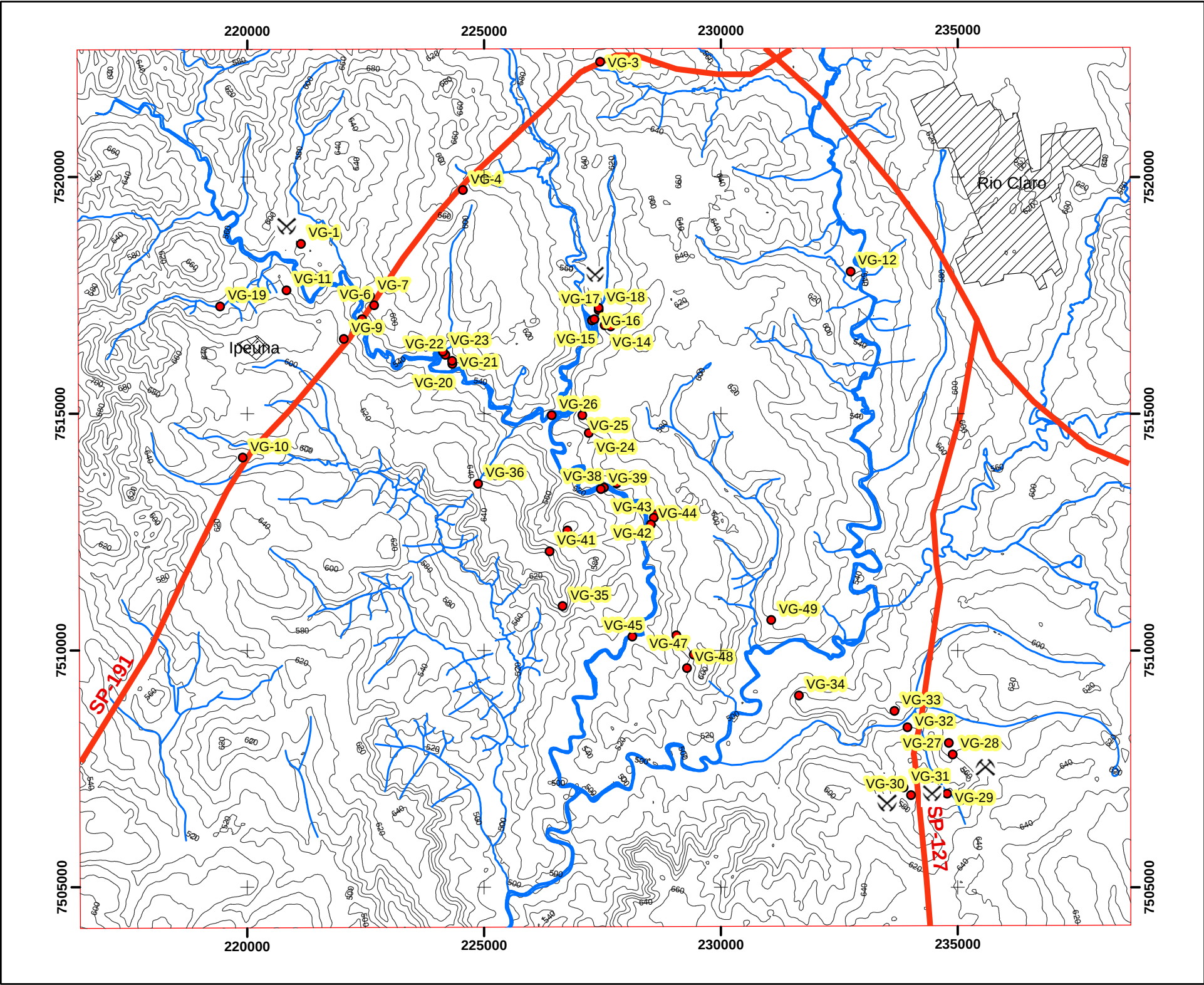
1:100.000

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 84
Zona 23S

	MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO Baseado em SOUSA, 2002
	Trabalho de Conclusão de Curso Viviane Barbosa Gimenez Orientador: Norberto Morales Coorientador: George Luiz Luvizotto

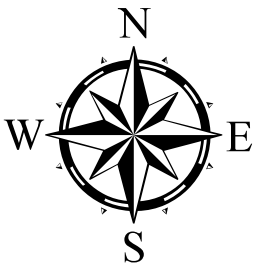
APÊNDICE 2

Mapa de Afloramentos



Convenções Topográficas

- Pontos
- Rodovias
- Drenagens
- Curvas de Nível
- Município de Ipeúna
- Município de Rio Claro
- Pedreira em Atividade
- Pedreira Abandonada



0 2 4 Km

1:100.000

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum WGS 84
Zona 23S



MAPA DE AFLORAMENTOS	
Trabalho de Conclusão de Curso	
Viviane Barbosa Gimenez	
Orientador: Norberto Morales	
Coorientador: George Luiz Luvizotto	