

Controle tectonoestratigráfico dos processos de geração, migração e trapeamento do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, na região carbonífera de Santa Catarina

Tectono-stratigraphic control of the generation, migration and trapping process in the Irati-Rio Bonito Petroleum System, Santa Catarina coalfield region

Ivan Soares Loutfi | Egberto Pereira | René Rodrigues | Cássia Lima Cardozo

resumo

O trabalho tem por objetivo a caracterização geológica, em termos estruturais e estratigráficos, do sistema petrolífero responsável pela ocorrência de óleos encontrados na Formação Rio Bonito, na região carbonífera de Santa Catarina, borda leste da Bacia do Paraná, nos municípios de Lauro Muller, Siderópolis e Criciúma – SC. Atualmente, especula-se que estes óleos estão associados à Formação Irati, relacionados a um modelo não convencional de geração, vinculado à maturação térmica por intrusão de diabásio, uma vez que a rocha geradora sofreu um insuficiente soterramento. Como a Formação Irati encontra-se posicionada estratigraficamente acima da Formação Rio Bonito, o sistema petrolífero Irati-Rio Bonito depende da presença de um forte controle estrutural para o modelo de migração. A preparação de um mapa geológico integrado para a área de estudo, envolvendo dados geológicos de campo, dados aeromagnetométricos e informações de furos de sondagem permitiu um entendimento mais

aprofundado do arcabouço tectônico estratigráfico da região. O mapeamento através de seções geológicas indicam a presença de falhas NE-SW, e secundariamente falhas E-W, que colocariam a Formação Irati em contato lateral, ou em um posicionamento abaixo da Formação Rio Bonito. A partir de seções cronoestratigráficas foi possível reconhecer prováveis selos, trapas estratigráficas e estruturais, associados ao sistema petrolífero Irati-Rio Bonito. As análises geoquímicas (biomarcadores) e isotópicas dos óleos coletados na Formação Rio Bonito apontaram que os mesmos estão associados aos folhelhos do Membro Assistência da Formação Irati. O arcabouço estrutural e os óleos estudados na região sugerem migração de sudoeste para o nordeste, ao longo de um sistema de falhas NE-SW encontradas na região, que foram geradas anteriormente ou concomitantemente ao derrame basáltico associado à Formação Serra Geral.

Palavras-chave: Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito | controle tectono-estratigráfico | seções cronoestratigráficas | análises geoquímicas e isotópicas

abstract

The work aims at the geological characterization of the structural and stratigraphic system responsible for the petroleum oils that occurs in Rio Bonito Formation, in the coalfields of Santa Catarina, eastern edge of Paraná Basin, in the municipalities of Lauro Muller, Siderópolis and Criciúma, state of Santa Catarina. Currently, it has been speculated that the geochemical signature of this oil is related to the Irati Formation associated with an unconventional model generation, by the thermal maturation of diabase intrusion, due to source rock insufficient burial. As the Irati is stratigraphically positioned above the Rio Bonito Formation, the system is associated to a strong structural control for the migration model. The preparation of a geological map for the area that includes the geological field data, aeromagnetometry map data and drillhole information has enabled to a deep understanding of tectonic-stratigraphic region. Geological cross-sections showed the presence of faults that caused a system of grabens and horsts related to NE-SW faults and secondarily E-W, mapped in the study area, that may have positioned the Irati Formation alongside or below the Rio Bonito Formation. Chronostratigraphic sections made it possible to recognize seals, structural and stratigraphic traps associated with the petroleum system Irati-Rio Bonito. The geochemical analysis of the oil (biomarkers) and isotopes collected at the Rio Bonito Formation, indicated that they are associated with the Assistência Member shales (Irati Formation). The structural framework and studied oils in the region suggest that the migration occurred from south-west to northeast along the NE-SW fault system that was generated previously the basalt floods associated with the Serra Geral Formation.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: *Irati-Rio Bonito Petroleum System | tectono-stratigraphic control | chronostratigraphic sections | geochemical and isotopic analysis*

introdução

Na região carbonífera de Santa Catarina, borda leste da Bacia do Paraná, vem sendo registradas várias ocorrências de óleo associadas aos arenitos da Formação Rio Bonito. Tais ocorrências despertam interesse em relação à rocha geradora associada, uma vez que há poucas referências na literatura abordando este assunto, e o entendimento dos processos geológicos responsáveis por essas acumulações.

Atualmente, se relaciona a assinatura geoquímica dos óleos destas acumulações à Formação Irati (Triguís, 1986; Mello *et al.*, 1993; Araújo, 2001; Oliveira, 2009). Conforme discutido na literatura, sabe-se que a Formação Irati apresenta-se termicamente pouco evoluída, em função de a mesma ter sofrido um baixo soterramento. Assim, torna-se necessário admitir que a geração de óleo a partir dessa unidade só foi possível através de um modelo não convencional de geração, neste caso vinculado a intrusão de diabásio.

Ressalta-se o fato de que a Formação Irati encontra-se posicionada estratigraficamente acima da Formação Rio Bonito. Assim, o sistema petrolífero observado além de apresentar um caráter não convencional de geração, está associado a um forte controle estrutural para o modelo de migração.

Para o entendimento do sistema petrolífero se faz importante a análise faciológica de detalhe desta unidade, para definir o seu arcabouço deposicional, bem como o estudo dos condicionantes estruturais que controlaram as rotas de migração do óleo gerado e das intrusões, e a caracterização geoquímica das ocorrências observadas.

contexto geológico regional

A evolução tectono-sedimentar da Bacia do Paraná é ainda hoje motivo de discussão entre os diversos estudos já realizados (Cordani *et al.*, 1984; Zalán *et al.*, 1990; Milani *et al.*, 1997; Milani e Ramos 1998). Apesar disso, alguns aspectos parecem se destacar, nos quais alguns pontos em comum podem ser verificados.

Fúlfaro (1982) considera as linhas de fraqueza pré-existentes no embasamento como um dos elementos importantes para a evolução da Bacia do Paraná. Estas foram reativadas durante as fases tectônicas posteriores e foram agrupadas em três grandes lineamentos

tectônicos principais com padrão estrutural diferente: NW-SE, NE-SW e E-W.

As estruturas tectônicas com direção NW-SE estão associadas à ocorrência de grandes diques, devido à forte reativação durante a fase de separação do supercontinente Gondwana no juro-cretáceo, que promoveu o condicionamento de milhares de corpos ígneos intrusivos e a extrusão de lavas da Formação Serra Geral. Este evento foi denominado de reativação Wealdeniana por Almeida (1967), ou evento Sul-Atlântico por Schobbenhaus *et al.* (1984).

Diversos autores (Renne *et al.*, 1992a; Renne *et al.*, 1996 a, b; Turner *et al.*, 1994; Ernesto *et al.*, 1999; Mincato *et al.*, 2003) afirmam que as idades das rochas vulcânicas na Bacia do Paraná revelam um pico de atividade ígnea num curto espaço de tempo. Segundo Corrêa e Pereira (2005), as idades radiométricas baseadas em K-Ar e Ar-Ar deste magmatismo apresentam idades entre 133 e 123 Ma.

Já o padrão estrutural das zonas de falha NE possui uma ausência significativa de diques e é constituída ou por uma única falha ou por uma zona de falhas retilíneas (Zalán *et al.*, 1987).

Os lineamentos E-W são pouco compreendidos na Bacia do Paraná. Zalán *et al.* (1987) afirmam que seu desenvolvimento teve início a partir do Triássico, cujo paralelismo com as zonas de fratura oceânica sugerem uma ligação com o desenvolvimento do Atlântico Sul.

Também são identificadas estruturas N-S de regime rúptil, exclusivamente superficiais, enquanto que os outros padrões estruturais parecem ocorrer em diversos níveis investigados (Freitas *et al.*, 2006).

Segundo Rostirolla *et al.* (2005), as estruturas N-S poderiam estar associadas à evolução cenozóica da Placa Sul-Americana, por serem estruturas frontais às tensões horizontais máximas com direção E-W.

Outra hipótese é que estas estruturas N-S poderiam ter sua geração associada ao rifteamento cretácico, ocorrido durante a abertura do Atlântico Sul, com uma propagação das estruturas distensionais na direção oeste, adentrando a Placa Sul-Americana, conforme Macedo (1989).

materiais e métodos

A confecção do mapa geológico da área de estudo (Loutfi, 2011), resultado da sobreposição dos mapas originais do Projeto Borda Leste (COMPANHIA DE

PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (BRASIL), 1986), e Mapa Aeromagnetométrico (COMPANHIA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1972), serviram como base fundamental para os trabalhos de levantamento de campo (fig. 1).

Na porção mapeada realizou-se o levantamento de seções geológicas para as principais unidades estudadas, a caracterização faciológica, que abrangeu a análise granulométrica e a descrição de estruturas sedimentares, assim como a observação em campo das estruturas tectônicas controladoras das formações Rio Bonito e Irati.

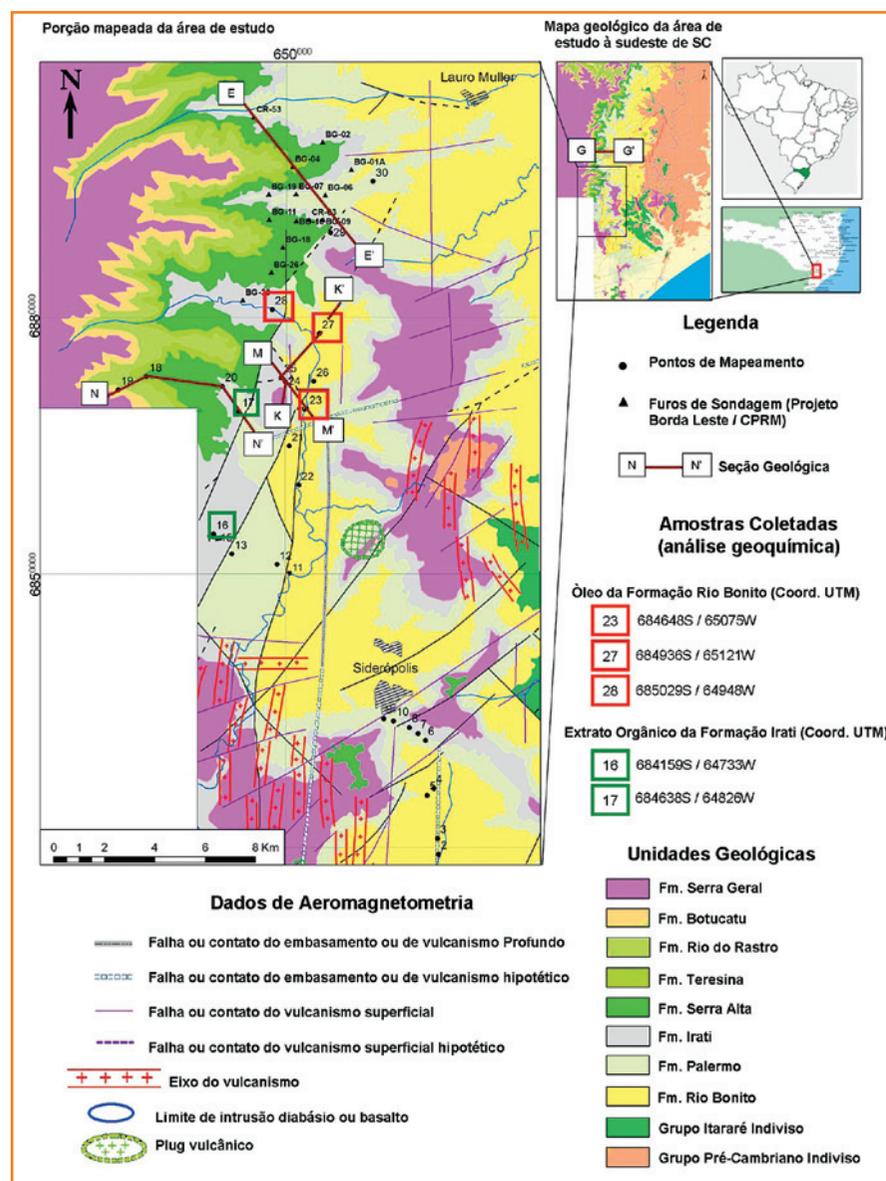
Seções litoestratigráficas foram levantadas com base em afloramentos e mapas topográficos. Dados de poços do projeto Borda Leste foram fundamentais para a construção de seções cronoestratigráficas e a confecção da seção litoestratigráfica EE'.

Figura 1

Mapa Geológico da Área de Estudo (Loutfi, 2011) apresentando o "Mapa da porção mapeada".

Figure 1

Studied area geological map (Loutfi, 2011) showing the "Map of the Mapped Portion".



As coletas de amostras em afloramentos dos folhelhos e de arenitos possivelmente manchados por óleo foram fundamentais para posterior correlação óleo-óleo, óleo-rocha geradora, com base em análises geoquímicas (Carbono Orgânico Total - COT, isótopos e biomarcadores). Os folhelhos que apresentaram COT superiores a 1% e os óleos extraídos dos arenitos com manchas escuras foram encaminhados para a Cromatografia Gasosa – Espectrometria de Massas (equipamento GC-MS, coluna HP-5MS, comprimento 30m x 0,25mm x 0,25µm) e Cromatografia Gasosa com Detector de Chama (equipamento GC-FID coluna HP-5, comprimento 30m x 0,25mm x 0,25µm). Para a análise de isótopos foi utilizado o equipamento Delta-V Advantage, acoplado a um analisador elementar Flash 1112 Series EA.

arcabouço estrutural da área mapeada

A análise do mapa geológico elaborado permitiu a identificação dos seguintes lineamentos estruturais principais: falhas E-W, NE-SW, NW-SE, N-S e eixos efusivos mesozóicos subsuperficiais de direção N-S (Zalán *et al.*, 1987; Zalán *et al.*, 1990; Freitas *et al.*, 2006; Rostirolla *et al.*, 2000; Ramos, 1988; Tankard *et al.*, 1996; Milani 1997).

Os lineamentos estruturais superficiais foram identificados através de mapeamentos geológicos, e os subsuperficiais pela interpretação do mapa aeromagnetométrico, utilizando-se como base o mapa de campo total (COMPANHIA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1972).

A área A, por estar inserida dentro da porção mapeada, possui um estudo mais detalhado das estruturas geológicas presentes, enquanto que as áreas B e C balizaram-se apenas na interpretação de mapas geológicos e aeromagnetométricos (fig. 2).

Nas áreas A e B, as rochas efusivas do mesozóico (basaltos e diabásios) formam um dos elementos marcantes do mapa de campo total. As mesmas apresentam forma alongada e direção preferencial N-S, cujos limites deste vulcanismo aflorante ou subaflorante são nitidamente definidos pelas anomalias magnéticas. De acordo com a interpretação do Mapa Aeromagnetométrico (COMPANHIA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1972), as anomalias magnéticas do

vulcanismo jurássico e cretácico, apesar de serem muito intensas, possuem amplitude variável (entre 150 e 800 gammas), indicando variações de espessura destas rochas e do teor de acidez.

Entre as anomalias magnetométricas atribuídas ao vulcanismo, algumas se apresentam com isogammas bem individualizados, com geometrias semicirculares, definidas como corpos batolíticos e, por isso, sem direção preferencial (fig. 2 (a)).

Apesar do levantamento aeromagnetométrico não cobrir toda área do mapa geológico produzido, nota-se, nitidamente, que grande parte destes diabásios com direção preferencial N-S estendem-se para a borda oeste da área de estudo, onde estão localizados os basaltos da Formação Serra Geral (fig. 2 (b)). Assim sendo, a reativação das falhas superficiais N-S podem estar associadas aos pulsos de magmatismo, que promoveram intrusões e os derrames da Formação Serra Geral, e que funcionaram como verdadeiros diques alimentadores desta formação.

Pelo fato dos corpos de diabásio N-S apresentarem-se seccionados transversalmente por falhas NW-SE, com padrão dextral (fig. 2 (c)), há indícios de que estas falhas superficiais NW-SE foram reativadas posteriormente à intrusão de diques.

Já as falhas NE-SW, apresentam dois momentos principais de reativação em tempos distintos, uma anterior a esta intrusão e outra após a intrusão dos diques no eixo N-S. As falhas NE-SW, que cortam corpos de diabásio N-S, corroboram o conceito da reativação de falhas NE-SW pós-intrusão de diques de diabásio, como ilustrado na fig. 2 (b). Estas falhas são marcadas no mapa por intensos lineamentos NE-SW que interrompem a continuidade dos corpos de diabásio de eixo N-S, promovendo o seu deslocamento. Contudo, o seu padrão dextral e/ou sinistral é dificilmente reconhecido. Inversamente, em algumas regiões da área de estudo (Área C), falhas NE-SW apresentam-se cortada por falhas N-S (fig. 2 (e)), podendo ser consideradas como anteriores ao falhamento N-S, sendo, portanto, formadas antes da intrusão dos diques de diabásio. Localmente, falhas NE-SW, pouco frequentes, apresentam-se intrudidas por diques de diabásio, o que indica que, em algum momento, estas falhas poderiam estar envolvidas com o magmatismo da Formação Serra Geral, como ilustrado na fig. 2 (d).

De forma menos expressiva, as falhas E-W são identificadas como lineamentos estruturais, que estão, eventualmente, associados aos eixos de vulcanismo. Entretanto, não foi possível compreender a relação

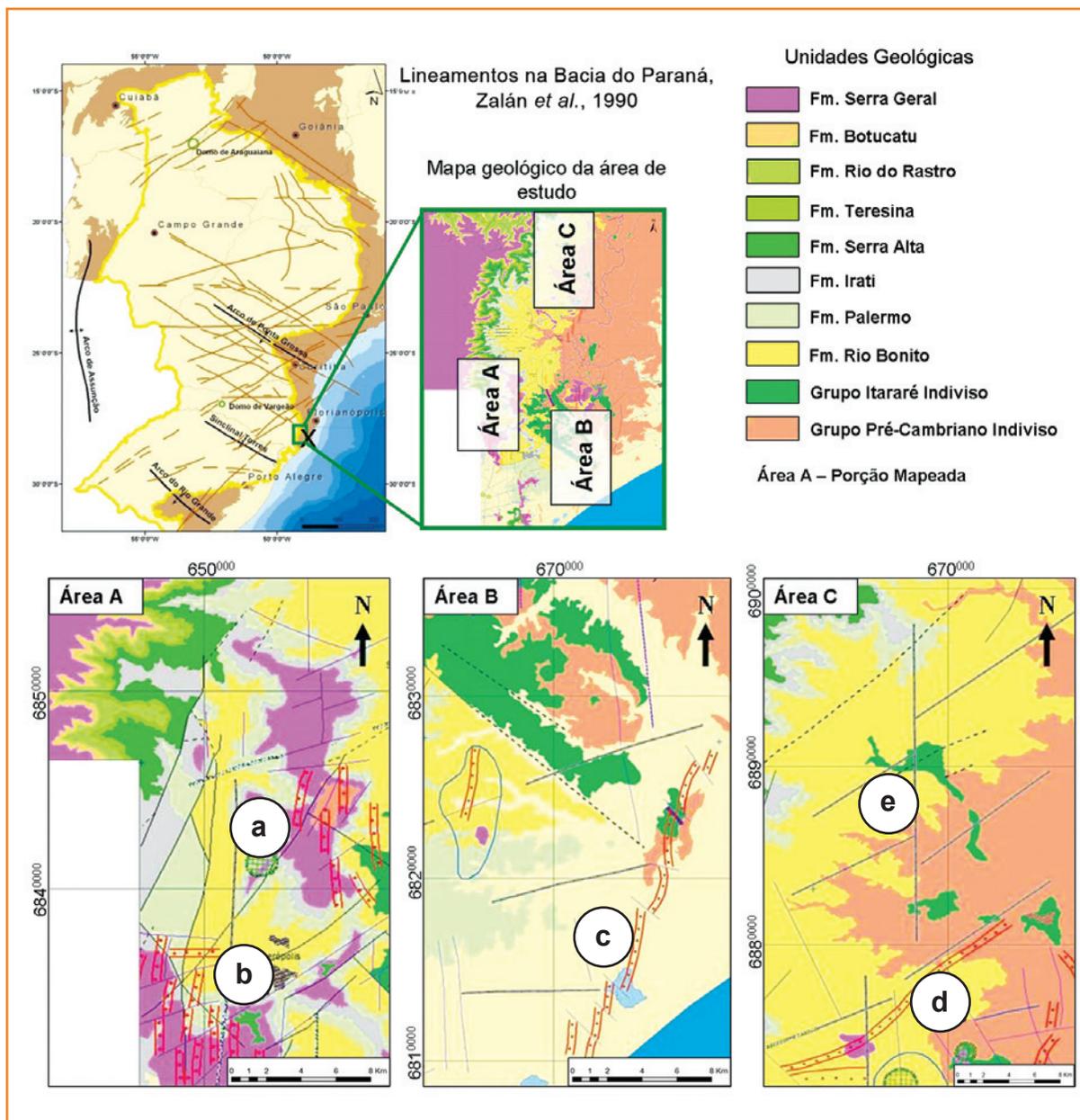


Figura 2

Fragmento do mapa geológico da área de estudo que se encontra à sudeste do mapa de lineamentos da Bacia do Paraná, Zalán et al., 1990. Área A: (a) Batólito, (b) Eixos de Vulcanismo N-S seccionadas por falhas NE-SW na Formação Serra Geral. Área B: (c) Falhas NW-SE seccionando diques de diabásio N-S. Área C: (d) Eixo Vulcânico de direção NE, (e) Falha N-S seccionando falhas NE-SW.

Figure 2

Fragment of the studied area geological map which lies on the southeast part of the map lineaments of the Paraná Basin, Zalán et al., 1990. Area A: (a) Batholith. (b) N-S volcanic axis, sectioned by the NE-SW faults in the Serra Geral Formation. Area B: (c) NW-SE faults sectioning diabase dykes. Area C: (d) volcanic axis in NE direction. (e) N-S fault sectioning NE-SW faults.

das falhas E-W com outras falhas identificadas com base apenas no mapa aeromagnetométrico. Assim sendo, o melhor entendimento das falhas E-W se deu a partir da interpretação de seções geológicas e imagens de satélite, método utilizado também para as demais estruturas.

Seções geológicas traçadas na porção mapeada da área (fig. 1) serviram para entender o arcabouço tectonoestratigráfico da área de estudo. Comparando as imagens de satélite da área com estruturas em escala de afloramento (Roseta apresentada para o ponto 19), observam-se grandes feições geológicas de padrão NW-SE, que cortam toda a serra do Rio do Rastro

(fig. 3), e que podem estar associadas a grandes fraturamentos, nesta mesma direção, que afetaram o terreno após o magmatismo da Formação Serra Geral. Por outro lado, as fraturas NE-SW, medidas no ponto 19, não cortam a Formação Serra Geral. Pelo fato do ponto 19 estar sotoposto à Formação Serra Geral, sugere-se que as fraturas NE-SW poderiam estar abaixo destas rochas ígneas, e por isso sua reativação mais intensa seria anterior ao derrame juro-cretáceo. É importante ressaltar que falhas superficiais NE-SW encontram-se seccionando diques de diabásio de eixo N-S, conforme mencionado anteriormente (fig. 2 (b)); sendo assim, infere-se que falhas superficiais

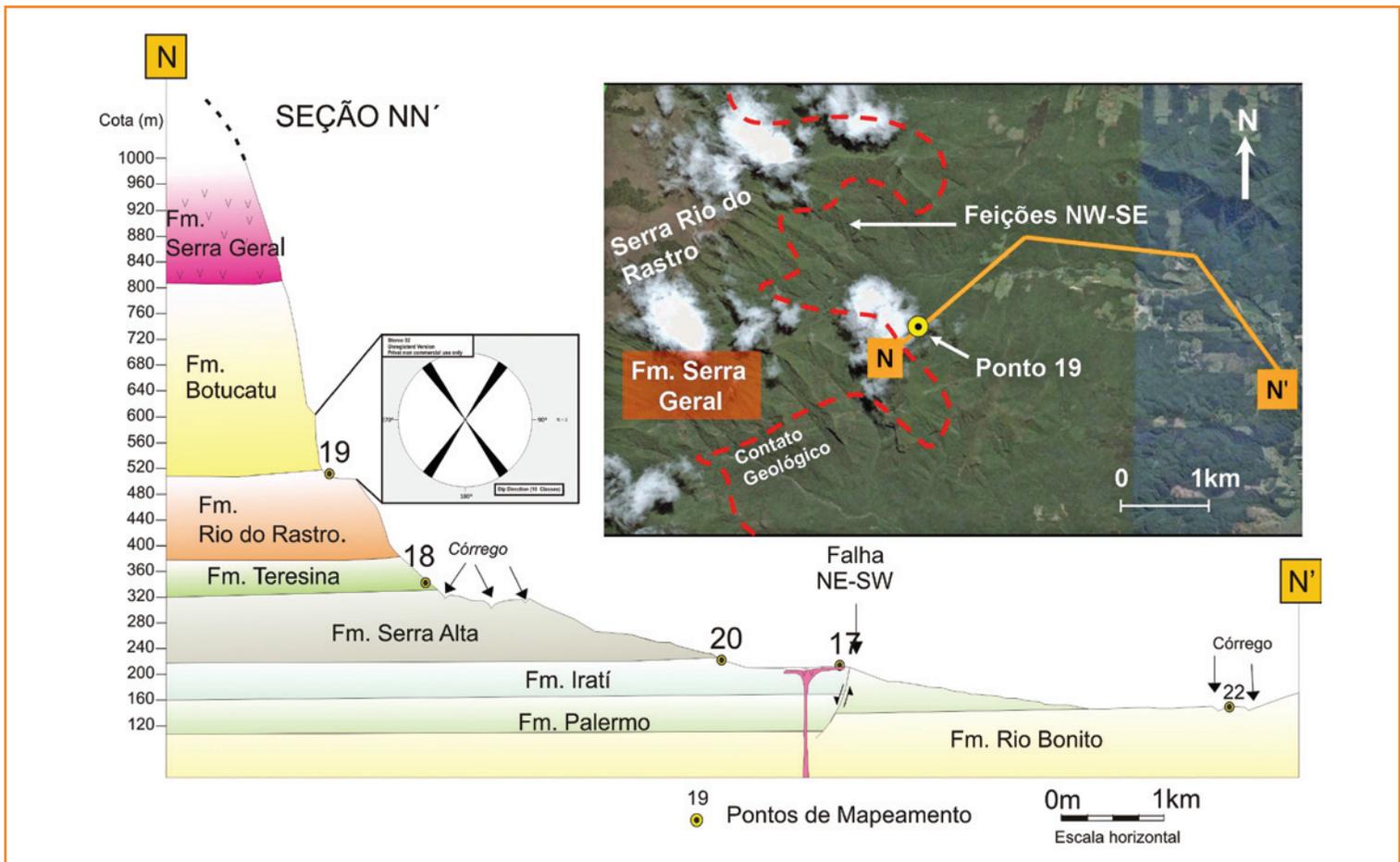


Figura 3
Seção litoestratigráfica NN'. Imagem de satélite mostra que falhas NW persistem na Formação Serra Geral, enquanto que falhas NE, observadas na roseta das estruturas do ponto 19, não são observadas na referida unidade.

Figure 3
Lithostratigraphic Section NN'. Satellite image showing that NW faults persist in the Serra Geral Formation, while NE faults, observed in the rosette structure at point 19, are not observed in this unit.

NE-SW foram reativadas pós-intrusão de diabásio N-S e pré-derrame da Formação Serra Geral.

A seção EE' apresenta um sistema de horsts e grabens condicionado por movimentos verticais e/ou oblíquos das falhas, que são identificados, em imagens de satélite, como grandes lineamentos que ocorrem transversalmente à Serra do Rio do Rastro (fig. 4).

Além das falhas identificadas em imagens de satélite e em seções litoestratigráficas, uma maneira de reconhecer falhas em subsuperfície consiste em comparar seções litoestratigráficas com seções cronoestratigráficas associadas a um datum específico que demonstre a configuração espacial das litologias.

O marco K definido por Daemon e Quadros (1970), constitui uma superfície de grande significado cronoestratigráfico por apresentar o melhor datum bioestratigráfico do Permiano, posicionado temporalmente no Artinskiano (Souza, 2006). Caracteriza-se como um notável marco regional, sendo assinalado nos perfis elétricos de raio gamma por um pico de alto valor de radioatividade, formado por pelitos cinza escuro, na base da Formação Palermo. Esses pelitos possuem

altos valores de COT (Carbono Orgânico Total), os quais são associados à superfície de máxima expansão da bacia (SIM – Superfície de Inundação Máxima).

Com base nestas informações, a comparação de seções litoestratigráficas com as cronoestratigráficas (fig. 4), revelaram um estilo estrutural predominantemente rúptil posterior ao início do Artinskiano (Eopermiano).

Muitas falhas da região, que formam estruturas de fossa e muro, serviram de conduto para a grande quantidade de intrusões de diabásio que ocorrem em todo o distrito carbonífero. Tal fato é ilustrado no dique associado à falha 3 (fig. 4), que possui padrão E-W podendo estar cortado por falhas NE-SW, e que sugerem ter sido reativadas antes ou durante o magmatismo Serra Geral. Índícios de óleos encontrados nos furos de sondagem BG-04 e BG-06 são limitados no topo por soleiras de diabásio (fig. 4). Este óleo expulso da rocha geradora migrou verticalmente pelas fraturas e lateralmente no sentido NE, aproveitando o mergulho regional das camadas no sentido SW, até alcançar os reservatórios que foram trapeados pelas soleiras.

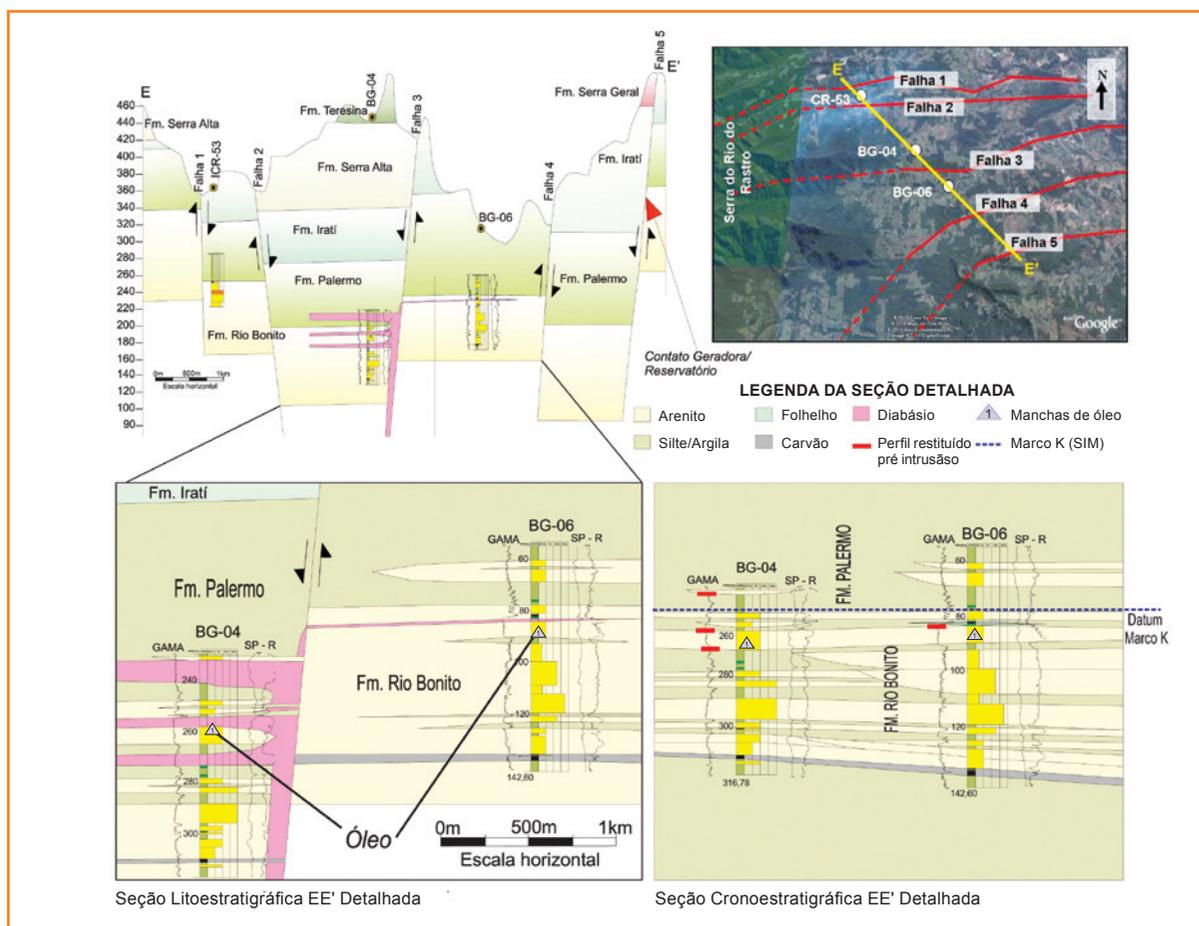


Figura 4
 Comparação da seção litológica EE' e cronoestratigráfica EE' (construída utilizando-se o marco K, definida por Daemon e Quadros (1970), como datum de correlação). Os grandes lineamentos identificados na imagem de satélite foram interpretados como produtos de falhas pós Artinskiano, os quais seccionam a seção EE'.

Figure 4
 Comparison of the Lithologic EE' and Chronostratigraphy EE' sections, (built using the Marco K, defined by Daemon e Quadros (1970), as a correlation datum). The major lineaments identified on the satellite image were interpreted as products of post Artinskian faults, which cross EE' section.

arcabouço estratigráfico da Fm. Rio Bonito na área de estudo

Com os dados estruturais e estratigráficos coletados no campo (fig. 1), foi possível interpretar os diferentes paleoambientes de sedimentação da Formação Rio Bonito para a melhor compreensão do sistema petrolífero Irati – Rio Bonito, na região carbonífera de Santa Catarina.

A Formação Rio Bonito é constituída por depósitos de arenitos e siltitos com alguns depósitos de carvão pouco espessos, cujos ciclos deposicionais são marcados por arranjos com aumento de granulometria para o topo, representados por diversas fácies (fig. 5), dentre as quais destaca-se a fácies sigmoidal. Esta fácies é caracterizada por arenitos grossos a médios com geometria sigmoidal compondo um pacote de espessuras de 40 centímetros a 2 metros e níveis

finos intercalados, exibindo em alguns casos *climbing ripples* e escape de fluidos, podendo estar marcado pela ausência de estratificação interna. A grande maioria dos arenitos da fácies sigmoidal possui cores claras de tons cinza-amarelados, entretanto, algumas porções de cores cinza escuras, identificadas nos afloramentos, sugerem a presença de exsudações de óleo. Estas porções escuras são apresentadas ora em forma de manchas superficiais ora em forma de mancha penetrativa intraestratal. Exemplos de fácies sigmoidal com exsudações de óleo são encontrados na posição estratigráfica associada ao ponto 23 (fig. 5 (b), foto 10) e em demais localidades (pontos 27 e 28) não mencionadas no perfil.

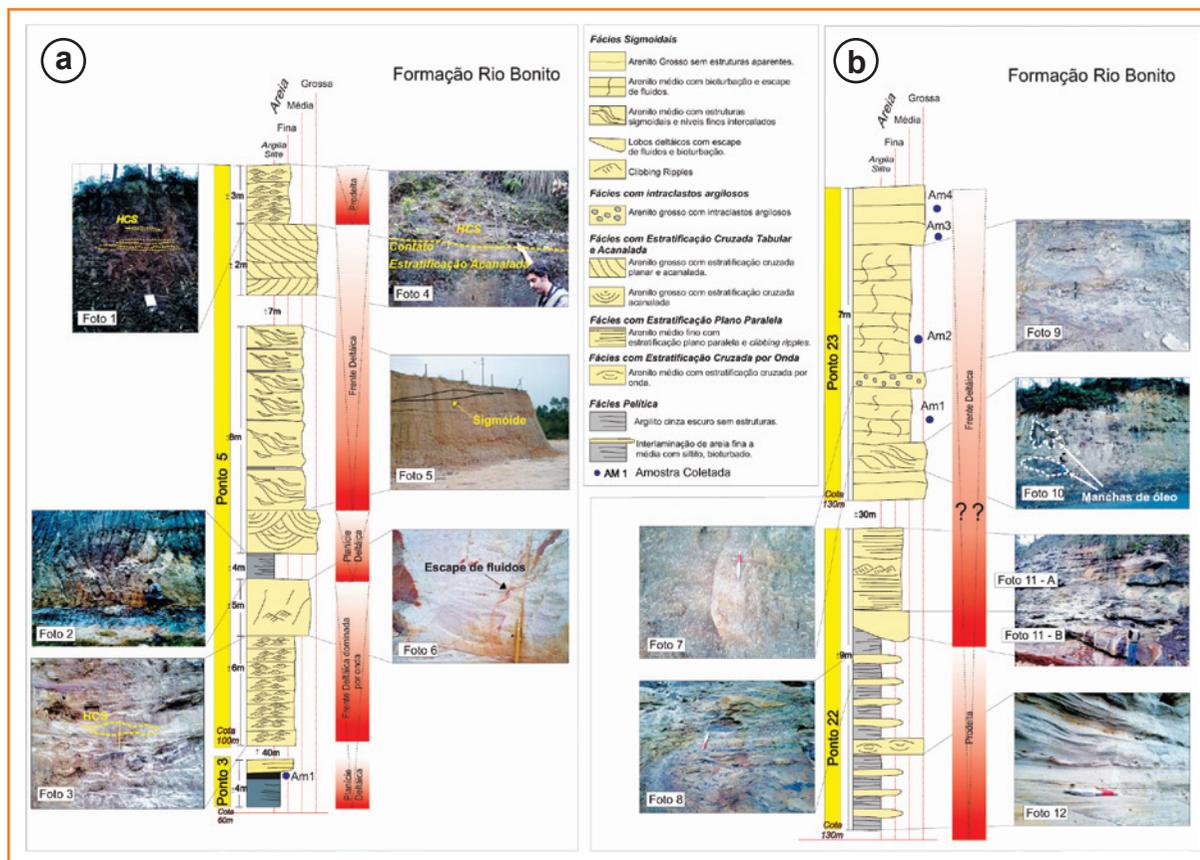
Na porção mediana da coluna estratigráfica referente ao ponto 5 ocorrem pacotes de arenitos grossos com estratificação cruzada acanalada sobre uma fácies pelítica maciça que está associada à deposição em um contexto de baía interdistributária (fig. 5 (a), foto 2). Fácies de areia grossa com estratificação cruzada tabular e acanalada que está sotoposta, e em contato abrupto, com uma fácies de granulometria mais fina e estratificação cruzada por onda (fig. 5 (a), foto 4),

Figura 5

(a) Perfil estratigráfico composto da Formação Rio Bonito mostrando o empilhamento dos pontos 3 e 5. (b) Perfil estratigráfico composto da Formação Rio Bonito mostrando o empilhamento dos pontos 22 e 23. Observa-se arranjos progradaçãois marcados pelo espessamento e engrossamento dos corpos arenosos. As fotos exemplificam as estruturas sedimentares e geometrias observadas no afloramento.

Figure 5

(a) Composite stratigraphic profile of the Rio Bonito Formation showing the stacking of points 3 and 5. (b) Composite stratigraphic profile of the Rio Bonito Formation showing the stacking of points 22 and 23. It is observed progradational arrangements marked by thickening of the sandstone bodies. The photos illustrate the geometry and sedimentary structures observed in outcrop.



marcam uma nítida passagem de um ambiente de frente deltaica para ambiente prodeltaico, caracterizando uma superfície transgressiva.

A fácies pelítica, bastante comum na Formação Rio Bonito, pode apresentar argilito cinza escuro sem estrutura aparente, com níveis argilosos impregnados de material lenhoso, interpretado como ambiente de planície deltaica (fig. 5 (a), Ponto 3); ou na forma rítmica com siltito bioturbado, com interlaminações de areia, relativos à ambiente de prodelta (fig. 5 (b), foto 12).

Para o melhor entendimento do arcabouço tectônico-estrutural dez seções cronoestratigráficas foram interpretadas (Loutfi, 2011), das quais destacamos a seção GG' (fig. 6).

Na seção GG' os arenitos médios a grossos da Formação Rio Bonito representam um contexto deposicional de frentes deltaicas, que são marcadas pelo aumento de granulometria para o topo devido à progradação das fácies arenosas que avançam no sentido sudoeste sobre os prodeltas.

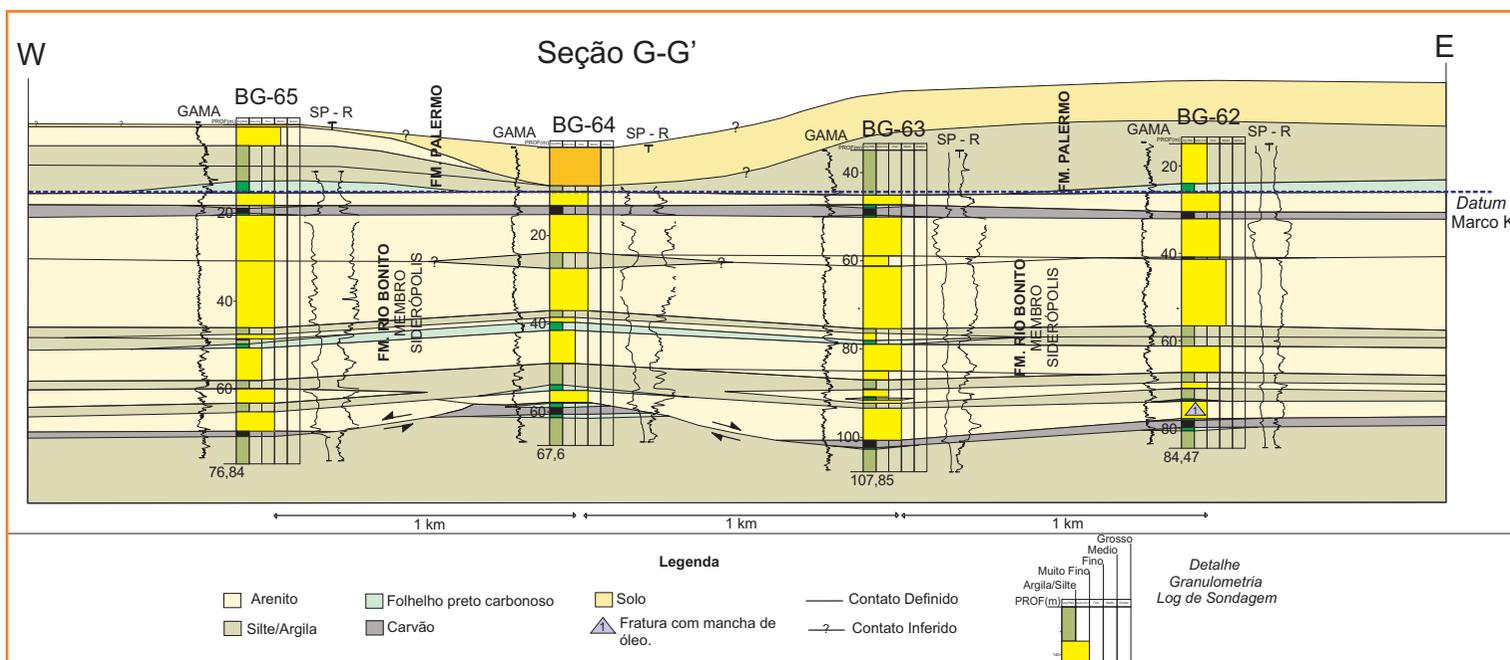
Estas frentes deltaicas são apresentadas como pacotes de espessuras de 2 à 10m de lobos deltaicos que se amalgamam, migrando e acunhando-se lateralmente em direção aos siltitos. Observa-se uma tectônica pouco ativa durante a deposição da

Formação Rio Bonito, exceto presença de algumas falhas de crescimento, encontradas na porção inferior do Membro Siderópolis da Formação Rio Bonito. No ponto 5 do perfil estratigráfico da Formação Rio Bonito, pode-se observar um espaço de acomodação possivelmente gerado por falhas de crescimento, haja visto a existência de leques deltaicos constituído por sigmoides (fig. 5 (a), foto 5) progradando sobre arenitos grossos com estratificação cruzada acanalada em ambiente de planície deltaica.

As fácies pelíticas, já mencionadas, tratam-se das camadas de carvão, siltitos e folhelhos encontrados na Formação Rio Bonito, representados como ambientes onde existem menor energia e depósito de sedimentos em suspensão, em ambientes de prodelta ou interdistributário.

Camadas de folhelhos cinza escuros de grande continuidade lateral marcam ciclos de aprofundamento da bacia.

O contato entre os arenitos da Formação Rio Bonito e os pelitos da Formação Palermo pode dar-se de forma concordante, e marca o início de uma extensa transgressão marinha. Próximo ao contato, a Formação Palermo apresenta uma superfície de inundação de idade Artinskiano (Permiano Inferior),



identificada em perfil elétrico de raios gamma por um pico com altos valores de radioatividade, funcionando como um datum estratigráfico (marco K) para a construção das seções cronoestratigráficas (fig. 6).

Ocorrências de óleo são encontradas na fácies arenosa, mais precisamente na fácies sigmoidal da Formação Rio Bonito, que migra em direção SW. Os dados fornecidos segundo os furos de sondagem descritos CPRM/DNPM, mostram que óleos são encontrados sobre forma de manchas escuras na matriz da rocha ou em fraturas subverticais. Estas fraturas subverticais, podem estar associadas às fraturas NE/SW, já que durante a fase sindeposicional da Formação Rio Bonito, a tectônica era praticamente inexpressiva.

sistema petrolífero proposto para a área de estudo

caracterização da rocha geradora e do óleo

Nos arredores da cidade de Criciúma, alguns afloramentos de arenito associados à Formação Rio Bonito apresentam manchas escuras de cor acinzentada superficiais ou penetrativas aos estratos da rocha (Exemplos: ponto 23 (fig. 7 (a), (b)) e pontos

27 e 28). Estas feições foram investigadas para definir se as mesmas tratavam-se de exsudações de óleo, ou apenas alterações químicas resultante das intempéries do meio, sendo dessa forma necessário a amostragem do material para análise geoquímica.

Como já discutido em diversos trabalhos (Milani, 1997; Corrêa e Pereira, 2005; Araújo *et al.*, 2000), a maturação dos intervalos geradores da Formação Irati está atrelada à presença de intrusões ígneas apoiados em um modelo não convencional de geração. Nos pontos 16 e 17 da área de estudo, foi possível identificar afloramentos de folhelhos do Membro Assistência intrudidos por diques de diabásio (fig. 7 (c), (d)), cuja caracterização geoquímica mostrou valores de COT bastante elevados (19,80 e 9,79 respectivamente), e reflectância de vitrinita na faixa de 0,86 à 1,04, apontando para janela de geração de óleo.

Os resultados da análise geral das assinaturas geoquímicas das amostras de óleo coletadas ao norte (pontos 23, 27 e 28) e dos extratos orgânicos obtidos ao sul (pontos 16 e 17) (fig. 1), demonstraram semelhança entre ambas por meio de alguns parâmetros como: a razão T_s (Trisnorneohopano) / T_m (Trisnorhopano) maior que 1, a ocorrência de gamacerano (fig. 7 (e), (f)), e a presença de isoprenóides pentametilicosano (i-25) e esqualano (i-30). Tais características, segundo Mello *et al.* (1993) nos remete a óleos correlacionáveis com o extrato orgânico do Membro Assistência da Formação Irati. Sendo

Figura 6

Seção cronoestratigráfica G-G' de direção E-W, (construída utilizando-se o marco K, definida por Daemon e Quadros (1970), como datum de correlação). Falhas de crescimento na base do Membro Siderópolis (Formação Rio Bonito). Folhelho preto carbonoso no centro da figura, com grande continuidade lateral, marcando ciclos de aprofundamento da bacia.

Figure 6

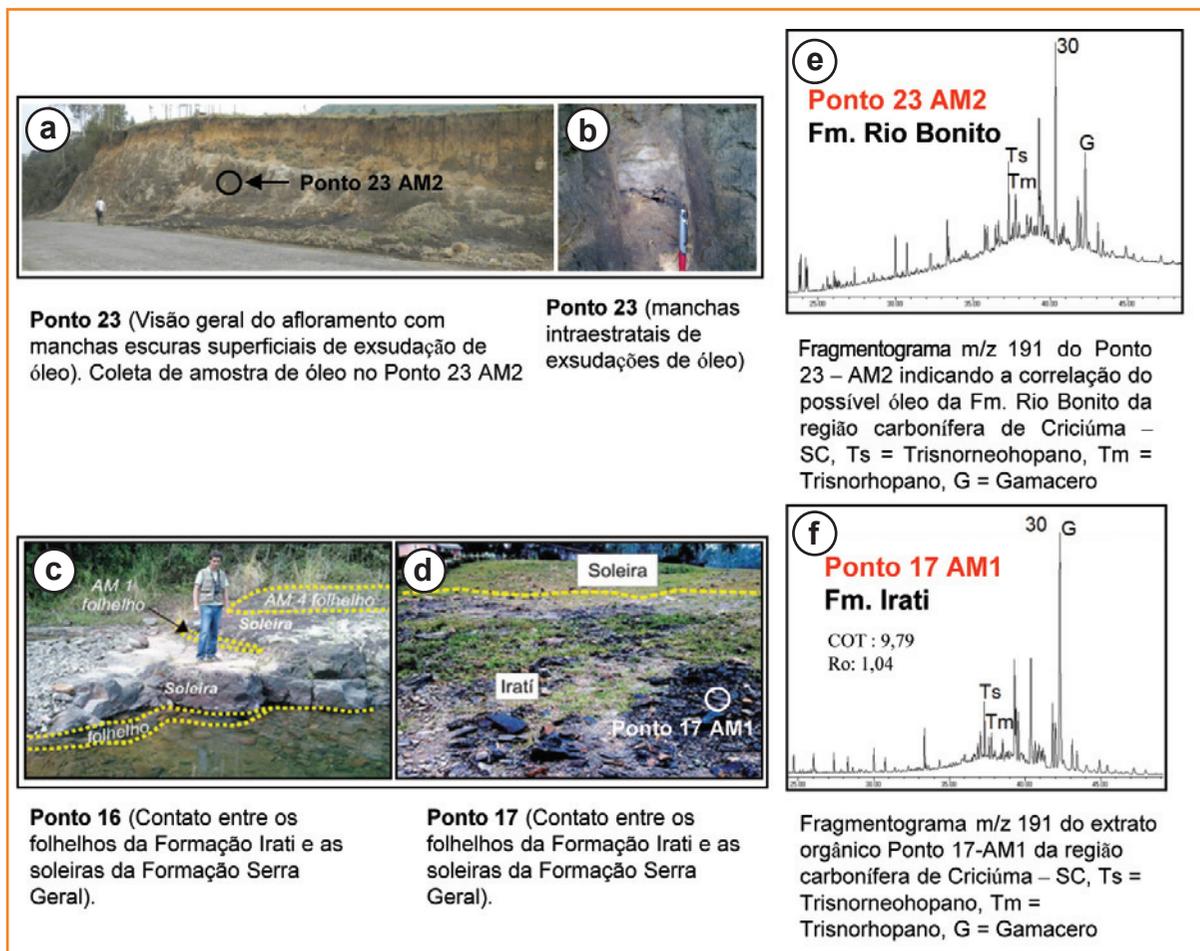
Chronostratigraphic Section G-G' in the direction E-W, (built using the March K, defined by Daemon e Quadros (1970), as a correlation datum). Growth faults in the lower Siderópolis Member (Rio Bonito Formation). Shale in the center of the figure, with great lateral continuity, showing the of basin subsidence cycles.

Figura 7

Exemplo de alguns pontos onde foram feitas coleta de amostras do extrato orgânico (Formação Irati) e do óleo (Formação Rio Bonito) para a correlação óleo-óleo e óleo-rocha geradora identificada através dos fragmentogramas.

Figure 7

Example of some points where the organic extract (Irati Formation) and oil (Rio Bonito Formation) samples were collected for oil-oil and oil-source rock correlations identified through fragmentograms.



assim, as manchas escuras de óleo encontrados na fácies sigmoidal da Formação Rio Bonito estão associadas a uma geração a partir do referido membro.

Os dados isotópicos ($\delta^{13}C_{\text{orgânico}}$ PDB‰) obtidos para os óleos recuperados das exsudações observadas nos arenitos associados à Formação Rio Bonito são compatíveis com aqueles alcançados para os extratos orgânicos extraídos de folhelhos associados ao Membro Assistência da Formação Irati (Tabela 1).

A proximidade destas amostras coletadas com as falhas NE-SW mapeadas em campo (fig. 1), sugerem uma possível rota de migração dos óleos ao longo destas falhas, concordando com o mergulho regional da Formação Rio Bonito para SW revelado pelo mapa de isólitais da região (Oliveira, 2009).

rotas de migração e trapeamento

Seções geológicas confeccionadas na área de estudo revelaram um notável sistema de horsts e grabens com falhas de diferentes famílias, geradas

ou reativadas durante o desenvolvimento da Bacia do Paraná. Falhas NE-SW, e secundariamente E-W, apresentaram rejeitos de mais variadas magnitudes, cujas capas apresentam um rebatimento de tal ordem, que podem ter condicionado o contato da geradora Irati lateralmente ao reservatório Rio Bonito (fig. 8). Essa configuração deve ter controlado a migração lateral direta do óleo da geradora para o reservatório, desde que a formação das falhas tenha ocorrido anterior ou, concomitantemente, ao magmatismo Serra Geral. Estas falhas também podem funcionar como rotas de migração de óleos em maiores distâncias até que o hidrocarboneto encontre uma trapa que o aprisione.

Com base em dados estratigráficos, estruturais e furos de sondagem apresentados na área de estudo, observa-se que as possíveis armadilhas para a retenção de óleo associam-se, principalmente, a trapas estratigráficas.

Conforme ilustrado na seção detalhada EE' (fig. 9 (a)), a migração lateral do óleo em direção à borda da bacia foi barrada, possivelmente, pela presença

Formação	Amostra	$\delta^{13}C$ (‰)	Exsudação	COT (Carbono Orgânico Total)	
Fm. Rio Bonito (Fácies Sigmoidal)	Óleo	Ponto 23-AM4	-25.882	Mancha	---
		Ponto 23-AM3	-24.354	Intraestratal	---
		Ponto 23-AM2	-25.804	Mancha	---
		Ponto 23-AM1	-25.749	Intraestratal	---
		Ponto 27-AM1 B	N.D.	Intraestratal	---
		Ponto 27-AM1 A	-24.506	Intraestratal	---
		Ponto 28	-24.352	Mancha	---
Fm. Irati	Extrato Orgânico	Ponto 16-AM4	-22.573	---	1,25
		Ponto 16-AM1	-23.518	---	19,8
		Ponto 17-AM2	-22.814	---	3,37
		Ponto 17-AM1	-23.010	---	9,79

Tabela 1

Dados de $\sigma^{13}C_{orgânico}$ PDB‰ das exsudações de óleo amostrado na área de estudo na Formação Rio Bonito, e de extrato orgânico obtidos a partir das rochas geradoras da Formação Irati com alto teor de COT. N.D. (Não determinado).

Tabela 1

Data for $\sigma^{13}C_{orgânico}$ PDB‰ sampled from the studied area in the Rio Bonito Formation, and the organic extract obtained from the Irati Formation source rocks with high TOC content. N.D. (Not determined).

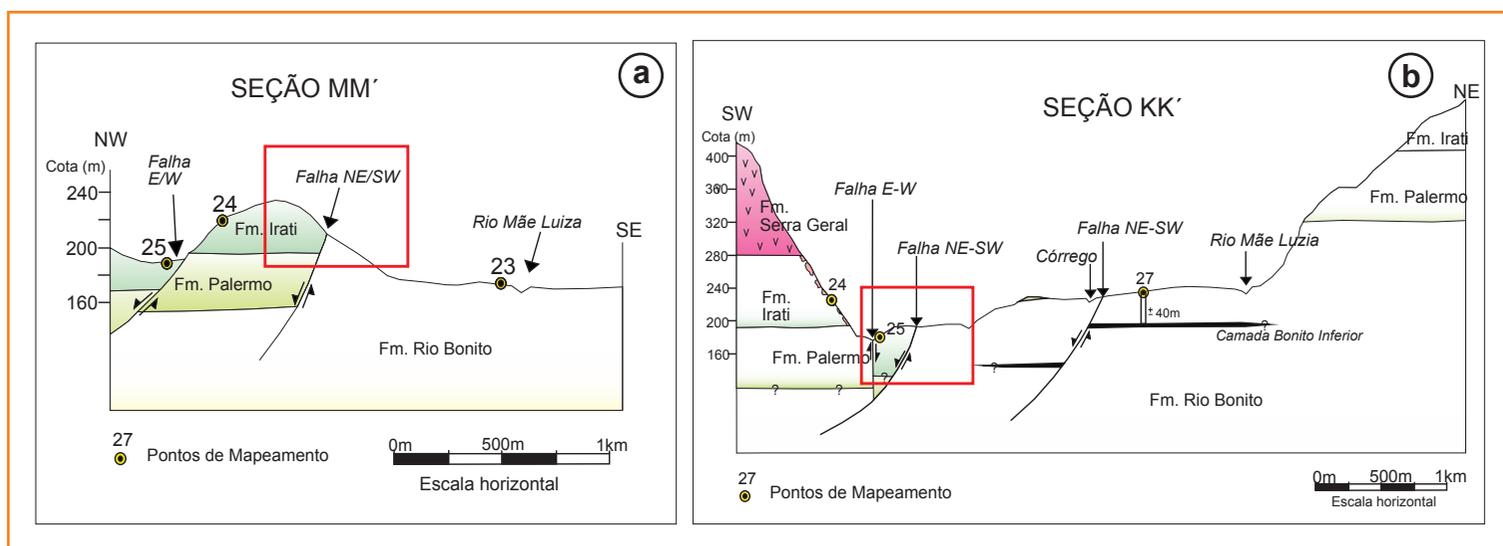


Figura 8 – (a) Seção Litoestratigráfica MM' destacando, no quadrado em vermelho, falha normal NE-SW que posiciona a Formação Irati em contato lateral com a Formação Rio Bonito. No ponto 23 ocorrem exsudações de óleo na Formação Rio Bonito, os quais foram correlacionados geoquimicamente à Formação Irati. (b) Seção Litoestratigráfica KK' destacando, no quadrado em vermelho, graben no ponto 25 que posiciona a Formação Irati em contato lateral com a Formação Rio Bonito. No ponto 27 ocorre exsudação de óleo na Formação Rio Bonito que também geoquimicamente é associada à Formação Irati.

Figure 8 – (a) Lithostratigraphic Section MM' highlighting, in the red square, NE-SW normal fault that places the Irati formation in contact with the Rio Bonito Formation. In the point 23 there is oil exudation in the Rio Bonito Formation, which were correlated geochemically to the Irati Formation. (b) Lithostratigraphic Section KK' highlighting, in the red square, graben in the point 25 which lies the Irati Formation in contact with the Rio Bonito Formation. In the point 27 there is oil exudation in the Rio Bonito Formation that is also geochemically associated with the Irati Formation.

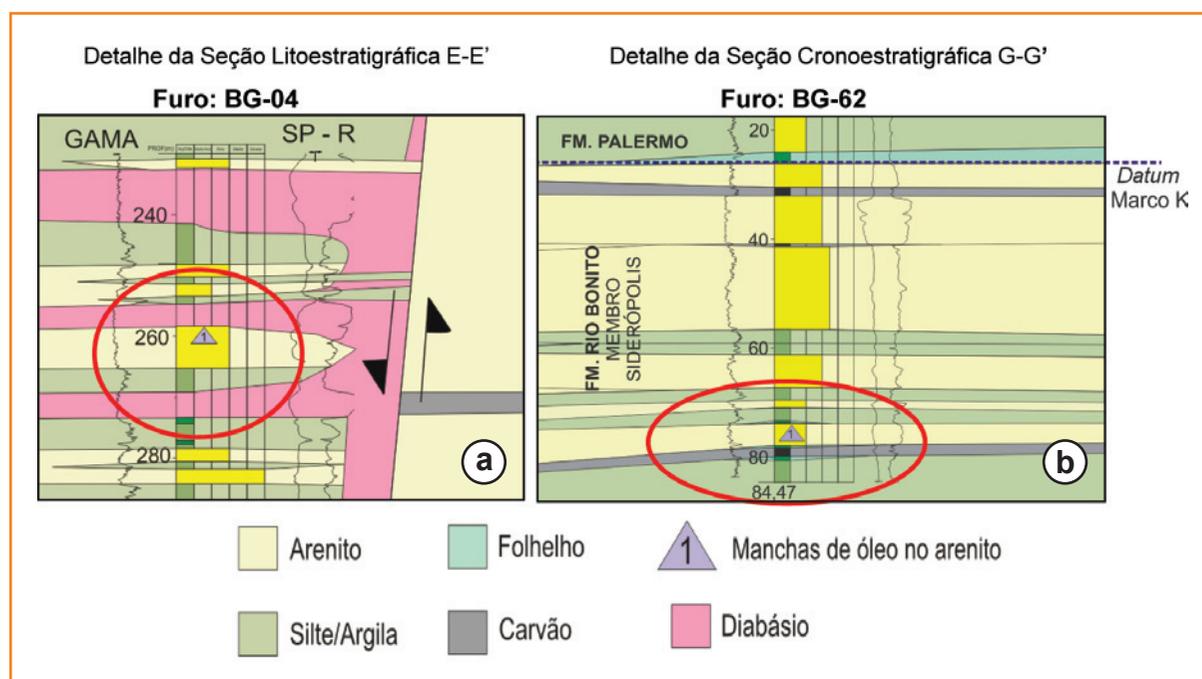
de diques de diabásio, em uma situação geológica análoga à proposta por Thomaz Filho (1982), para explicar a ocorrência dos arenitos asfálticos na região de Anhembi – SP.

A Formação Palermo, também pode ser caracterizada como um selo regional, por possuir horizontes pelíticos (folhelhos e siltitos) que estão sobreposto aos reservatórios da Formação Rio Bonito.

Outros casos de trapeamento estratigráfico relacionam-se à grande variação faciológica e ampla predominância de arenitos com baixa porosidade/permeabilidade dentro da Formação Rio Bonito. Dados de sondagem mostram a presença de óleo trapeados por lentes constituídas por fácies pelíticas da Formação Rio Bonito, tais como folhelho e siltitos (fig. 9 (b)).

Figura 9
Traps estratigráficas na Formação Rio Bonito destacadas no círculo em vermelho das seções litoestratigráfica EE' e cronoestratigráfica GG', visualizadas em detalhe.

Figure 9
Stratigraphic traps in the Rio Bonito Formation highlighted in the red circle of the Lithostratigraphic Section EE' and Chronostratigraphy Section GG', viewed in detail.



evolução tectônica da área de estudo

Na tentativa de estabelecer uma organização dos eventos tectônicos ocorridos na Bacia do Paraná, mais especificamente na região carbonífera de Criciúma – SC, foi confeccionado um bloco diagrama, de cunho estrutural, identificando as principais estruturas atuantes em ordem geocronológica, dividindo-os em 7 fases para efeito didático (fig. 10).

Nota-se que a fase 1 e a fase 2 estão relacionadas às falhas E-W (embasamento) pré-existentes que são deslocadas por falhas NE-SW; tais feições são identificadas em imagens de satélite corroboradas com seções geológicas. Pelo fato destas falhas não apresentarem continuidade na Formação Serra Geral, conforme discutido anteriormente, supõe-se que estas feições sejam anteriores ao derrame que ocorreu no Juro-Cretáceo.

De forma análoga, Rostirolla *et al.* (2000) identificaram no alto estrutural de Quatiguá (nordeste do estado do Paraná) a presença de diques não afetados por falhas sinistrais NE, o que corrobora que estas falhas NE-SW sejam anteriores ao Eocretáceo.

Ramos (1988), Tankard *et al.* (1996) e Milani (1997) afirmam que as falhas NE-SW poderiam estar relacionadas ao reflexo da propagação de tensões

compressionais intraplaca verificada durante a Orogenia La Ventana, causados por uma tensão principal máxima (σ_1) de sul para norte, quando ocorreu a sutura da Patagônia à América do Sul, no limite entre o Permiano e o Triássico.

As fases 3 e 4 tratam-se da geração de falhas N-S seccionando as falhas NE-SW, sendo posteriormente condicionadas por diques. Estas feições são identificadas em mapas aeromagnetométricos confeccionados pelo Projeto Borda Leste – CPRM/DNPM, onde são interpretadas anomalias magnéticas muito bem marcadas de direção N-S.

Segundo Macedo (1989), estruturas N-S poderiam ter sua geração associada ao rifteamento cretácico, ocorrido durante a abertura do Atlântico Sul, com uma propagação das estruturas distensionais na direção oeste, adentrando a Placa Sul-Americana.

No Arco de Ponta Grossa (ao norte da área de estudo), os diques estão associados às estruturas tectônicas com direção NW que se relacionam à forte atividade tectônica também durante a abertura do Atlântico Sul.

A fase 5 trata-se de um segundo evento das falhas NE-SW, em que estas seccionam os diques N-S, conforme ilustrado na porção sudoeste da área de estudo. Como esses diques N-S constituem um prenúncio do grande derrame de lavas associados à Formação Serra Geral, e as falhas NE-SW correspondem a uma tectônica precursora ao derrame, sugere-se um caráter temporal bastante curto para a reativação

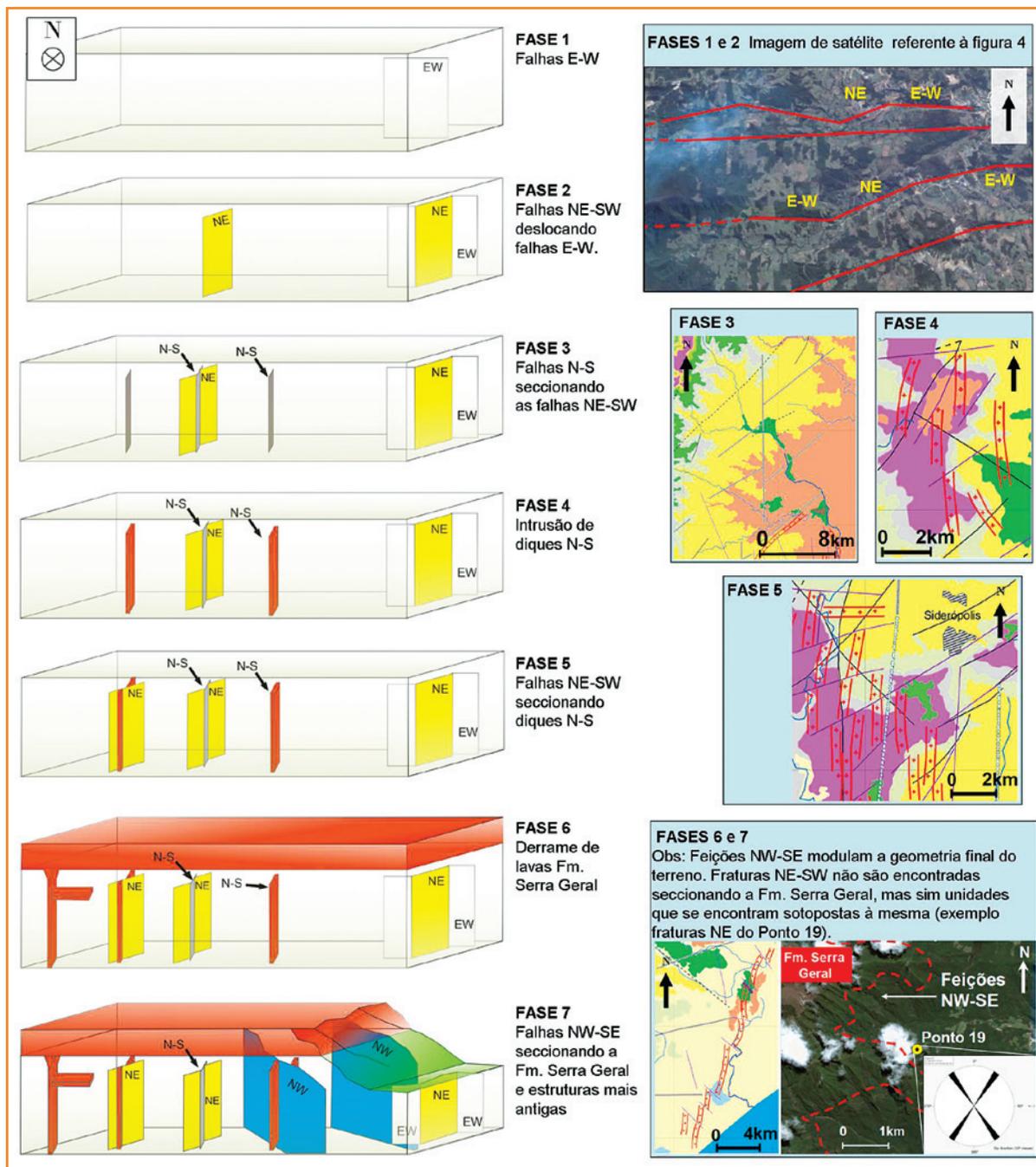


Figura 10
Bloco diagrama apresentando os possíveis eventos tectônicos ocorridos após a deposição de Formação Rio Bonito.

Figure 10
Block diagram showing the possible tectonic events which occurred after the the Rio Bonito Formation deposition.

de falhas NE-SW. No entanto, a presença de alguns diques isolados de direção NE-SW pode indicar certo envolvimento destas falhas durante a atividade magmática, sendo, porém, de forma restrita.

De modo análogo, Rostirolla *et al.* (2000) identificam um segundo evento NE no Alto de Quatiguá, embora o mesmo seja correlacionado a uma história deformacional posterior ao magmatismo, de caráter transcorrente distensivo, por apresentarem diques NW-SE seccionados por pequenas falhas NE-SW.

A fase 7 corresponde à geração de falhas NW-SE que secciona a Formação Serra Geral (fase 6) e estruturas mais antigas. Grandes feições NW-SE foram identificadas em imagens de satélite, podendo ter tido um papel fundamental na geometria final do terreno. Na porção leste da área de estudo, a existência de diques N-S seccionados por falhas NW-SE indicam uma tectônica pós-magmatismo. Diques isolados de direção NW-SE podem, no entanto, caracterizar certo envolvimento destas falhas durante a atividade magmática.

considerações finais

Seções cronoestratigráficas confeccionadas neste trabalho mostram que durante a fase sindeposicional da Formação Rio Bonito, no Eopermiano, a tectônica era praticamente inexpressiva. Entretanto, trapas estratigráficas foram formadas devido à grande variedade faciológica desta formação, com a deposição de sedimentos mais pelíticos em ambientes de planície deltaica e de prodelta, que capearam possíveis reservatórios.

Já possíveis trapas estruturais, não observadas neste trabalho, podem estar relacionados com as falhas da fase 1 e 2, correspondentes à Orogenia La Ventana, e falhas associadas às fases 5 e 6, relacionadas com a abertura do Atlântico Sul (fig. 11).

Ernesto *et al.* (1999) sugeriram dois pulsos magmáticos de idades distintas, para intrusões da porção nordeste da Bacia do Paraná, baseados em dados paleomagnéticos de polaridade normal e reversa de soleira. Com base nos dados estruturais analisados no presente trabalho, foi possível também identificar dois pulsos magmáticos que podem ter contribuído para a geração de óleo durante o Juro-cretáceo. O primeiro relaciona-se à intrusão de diques nas zonas de fraqueza referentes às falhas N-S. Dados de campo e aeromagnetométrico sugerem também a intrusão de diques nas falhas NW-SE, NE-SW e E-W, porém com pouca intensidade. O segundo pulso possivelmente promoveu a formação de soleiras, extravasamento vulcânico, e de forma mais intensa a maturação, bem

como o trapeamento dos óleos relacionados com o sistema petrolífero Irati-Rio Bonito (fig.11).

Rodrigues (1995) afirma que em função do efeito térmico causado pelas intrusões serem geologicamente rápido, existe um curto espaço de tempo para as condições de geração, migração e acumulação neste tipo de sistema não convencional.

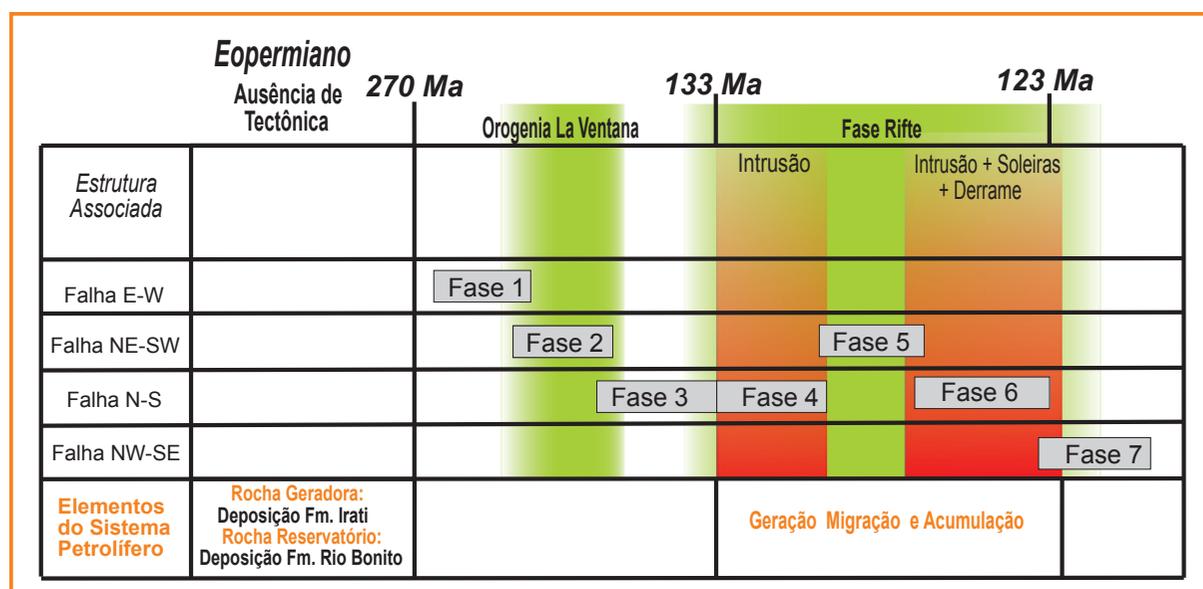
As manchas escuras de cores acinzentadas encontradas em arenitos (pontos 23, 27 e 28) foram caracterizadas como óleo, através da confirmação por meio de análises geoquímicas. Por meio dos trabalhos de campo e da análise faciológica, este óleo exsudado encontra-se na Formação Rio Bonito, preferencialmente, em sua fácies sigmoidal. Esta fácies que migra no sentido SW é constituída por arenitos médios a grossos, bem selecionados, depositados em ambiente de frente deltaica.

Considerando a análise geral das assinaturas geoquímicas das amostras de óleo coletadas e dos extratos orgânicos obtidos a partir de amostras da área de estudo (pontos 16 e 17), a semelhança demonstrada entre ambas por meio de alguns parâmetros como: a razão Ts/Tm maior que 1, a ocorrência de gamacerano, e a presença de isoprenóides pentametileicosano (i-25) e esqualano (i-30) e dados isotópicos, indicam o Membro Assistência da Formação Irati como a rocha geradora do óleo encontrado nos arenitos da Formação Rio Bonito, na região carbonífera de Criciúma.

A migração dos óleos gerados pode ter sido lateral, devido ao posicionamento da rocha geradora da Formação Irati ao lado dos reservatórios da

Figura 11
Gráfico relacionando as estruturas mapeadas e suas relações temporais com as diferentes fases tectônicas descritas. Idades de magmatismo baseadas em Corrêa e Pereira (2005).

Figure 11
Graph relating the structures mapped and their temporal relationships with the different tectonic phases described. Magmatism Ages based on Corrêa and Pereira (2005).



Formação Rio Bonito, ou pode ter percorrido longas distâncias através de falhas NE-SW, gerados nas fases de evolução estrutural 2 e 5 (fig. 11).

Provavelmente, os possíveis locais de acumulações de óleo do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, ocorrem em reservatórios associados às fácies sigmoidal da Formação Rio Bonito, em regiões onde são menos frequentes as falhas NW-SE, trapeado por grandes selos regionais (soleiras de diabásio intrudidas no Membro Assistência, folhelhos da Formação Palermo) e fácies pelíticas da Formação Rio Bonito.

Após o derrame da Formação Serra Geral, a implantação de um sistema de falhas NW-SE pode ter funcionado como zonas de escape de óleo, pelo fato de as mesmas seccionarem todas as estruturas mais antigas, inclusive os possíveis selos. Nas regiões onde estas falhas são menos frequentes pode ter havido preservação de hidrocarbonetos, caso estejam presente as feições selantes descritas neste estudo.

A carta de eventos ilustrada na fig. 12 trata de um resumo da contemporaneidade dos processos geológicos e estruturais observados no Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito, para a região carbonífera de Criciúma – SC.

agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ, INOG, FAPERJ e CAPES que suportaram esta pesquisa e ao geólogo Gilmar Vital Bueno pelo convite para publicar os resultados desta pesquisa no BGP. Egberto Pereira agradece ao CNPQ e FAPERJ pelo suporte de suas atividades de pesquisa.

referências bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M. **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. Rio de Janeiro: DNPM-DGM, 1967. 36 p. (Boletim, n. 241).

ARAÚJO, L. M.; TRIGÜIS, J. A.; CERQUEIRA, J. R.; FREITAS, L. C. S. The atypical permian petroleum system of the Paraná Basin, Brazil. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (Ed.) **Petroleum systems of South Atlantic margins**. Tulsa. 2000. p. 377-402. (AAPG Memoir, n. 73).

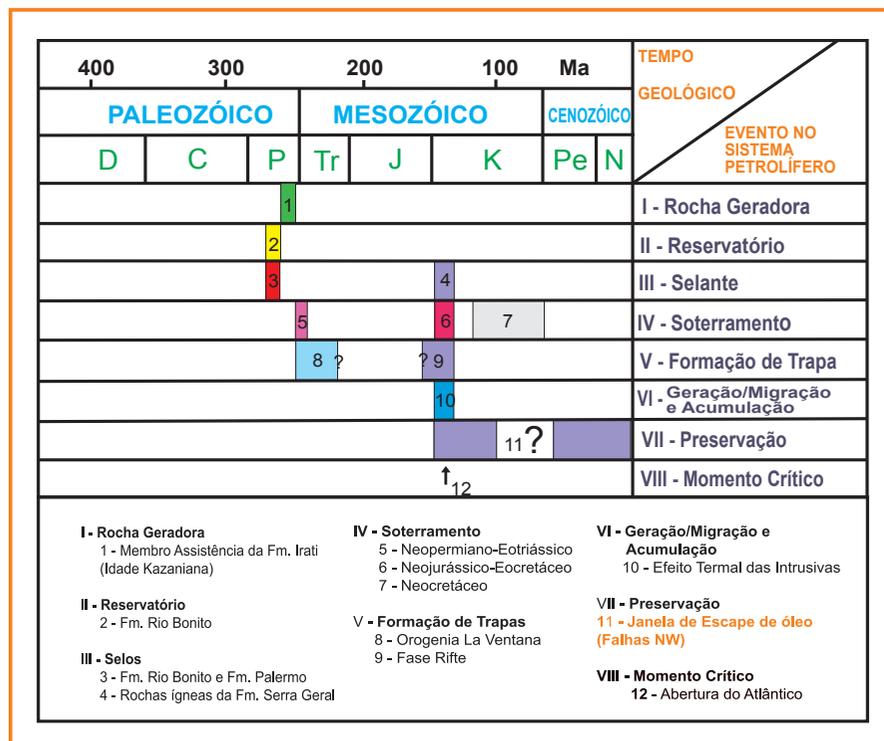


Figura 12

Carta de eventos do Sistema Petrolífero Irati - Rio Bonito, na região carbonífera de Criciúma - SC, baseada em Araújo et al. (2000).

Figure 12

Irati-Rio Bonito Petroleum System Event Chart in the Criciúma coal region - Santa Catarina, based on Araújo et al. (2000).

ARAÚJO, L. M. **Análise da expressão estratigráfica dos parâmetros de geoquímica orgânica e inorgânica nas sequências Irati**. 2v. 301 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2001.

COMPANHIA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA. **Levantamento Aeromagnetométrico Campo Total do Projeto Ponta Grossa-Criciúma**: relatório de interpretação. Rio de Janeiro: MME, 1972.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná**. Rio de Janeiro: CPRM, 1986. Escala: 1:100.000.

CORDANI, U. G.; NEVES, B. B. B.; FUCK, R. A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F. M. B. **Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Rio de Janeiro: Cenpes / SINTEP, 1984. 70 p. (Série Ciência Técnica Petróleo, n. 15).

CORRÊA, L. M. S. A.; PEREIRA, E. Estudo da distribuição das intrusões mesozóicas e sua relação com os sistemas petrolíferos da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 3., 2005, Cabo Frio. **Anais...** Cabo Frio: [s.n.], 2005. v. 1, p. 21-26.

- DAEMON, R. F.; QUADROS, L. P. Bioestratigrafia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24., Brasília, DF, 1970. **Anais...** Brasília, DF: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA, 1970. p. 359-412.
- ERNESTO, M.; RAPOSO, M. I. B.; MARQUES, L. S.; RENNE, P. R.; DIOGO, L. A.; DEMIN, A. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Northeastern Paraná Magmatic Province: tectonic implications. **Journal of Geodynamics**, [S. l.], v. 28, n. 4-5, p.321-340, 1999.
- FREITAS, R. C.; ROSTIROLLA, S. P.; FERREIRA, F. J. F. Geoprocessamento multitemático e análise estrutural no Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p.71-93, 2006.
- LOUTFI, I. S. **Caracterização geológica da ocorrência de óleo na Formação Rio Bonito associada a um modelo não convencional de geração**. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia, Rio de Janeiro, 2011.
- FÚLFARO, 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.590-610, 1982.
- MACEDO, J. M. Evolução tectônica da bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3, p.159-173, 1989.
- MELLO, M. R.; KOUTSOUKOS, E. A. M; SANTOS NETO, E. V.; TELLES JR, A. C. S. **Geochemical and micropaleontological characterization of lacustrine and marine hypersaline environments from Brazilian sedimentary basins**. In: Source rocks in sequence stratigraphic framework. Tulsa: AAPG, 1993. p. 17-34. (AAPG Studies in Geology, n. 37).
- MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. 1997. 255 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 1997.
- MILANI E. J.; FACCINI U. F.; SCHERER, C. M.; ARAÚJO, L. M.; CUPERTINO, J. A. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Parana basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. In: AMOS, A. J. (Ed.) **Sedimentary Basins of South America**. 1997. (in press).
- MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-continental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 4, p.473-484, 1998.
- MINCATO R. L.; ENZWEILER J.; SCHRANK A. Novas idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e implicações na metalogênese dos depósitos de sulfetos magmáticos de Ni-Cu-EGP na Província Ígnea Continental do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA., 9, Belém, 2003. **Boletim de Resumos Expandidos...** Belém, 2003. p. 425-427.
- OLIVEIRA, E. B. **Geração não convencional de hidrocarbonetos na região carbonífera de Santa Catarina**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia, Rio de Janeiro, 2009.
- RAMOS, V. Late Proterozoic - Early Paleozoic of South America: a collisional history. **Episodes**, v. 2, p. 168-174, 1988.
- RENNE, P. R.; ERNESTO, M.; PACCA, I. G.; COE, R. S.; GLEN, J. M.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M. Age of Paraná Flood Volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. **Science**, [S.l.], v. 258, n. 5084, p. 975-979, 1992.
- RENNE, P. R.; DECKART, K.; ERNESTO, M.; FKRAUD, G.; PICCIRILLO, E. M. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Parani flood volcanism. **Earth Planet Science Letter**, 144, 199-212, 1996a.
- RENNE, P. R.; GLEN, J. M.; MILNER, S. C.; DUNCAN, A. R. Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa. **Geology**, 24, 659-662, 1996b.
- RODRIGUES, R. **A geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba**. 1995. 225 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 1995.

ROSTIROLLA, S. P.; ASSINE, M. L.; FERNANDES, L. A.; ARTUR, P. C. Reativação de paleolineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná: o exemplo do alto estrutural de Quatiguá. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 30, n. 4, p.639-648, 2000.

ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; RIGOTTI, A. Reativação de Megalineamentos na Evolução Fanerozóica da Placa Sul-Americana. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 10., 2005, Curitiba. **Boletim de Resumos Expandidos**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia. 2005. v. 1, p. 290-293.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R. ASMUS, H. E. **Geologia do Brasil**: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente, incluindo depósitos minerais. Brasília: DNPM, MME, 1984. Escala 1:2500000.

SOUZA, P. A. Late Carboniferous palynostratigraphy of the Itararé Subgroup, northeastern Paraná Basin, Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, Amsterdam, v.138, p. 9-29, 2006.

TANKARD A. J.; ULIANA M. A.; WELSINK H. J.; RAMOS, V. A.; TURIC, M.; FRANÇA, A.B.; MILANI, E. J.; BRITO NEVES, B. B.; EYLES, N.; SANTA ANA, H.; WIENS, E.; CIRBIAN, M.; LÓPEZ PAULSEN, O.; GERMS, G. J. B.; WIT, M. J.; MACHADA, T.; MILLER, R. M. **Tectonic controls of basin evolution in southwestern Gondwana**. Tulsa. 1996. p. 5-52. (AAPG Memoir, n. 62).

THOMAZ FILHO, A. Ocorrência de arenito betuminoso em Anhembi (SP): cubagem e condicionamento geológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 5. p. 2344-2348.

TRIGUIS, J. A. **An Organic Geochemical Investigation of Heat-Effectuated Sediments in the Paraná Basin**. 1986. Tese (Doutorado) – University of New Castle, England, 1986.

TURNER, S. P.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 121, p. 333-348, 1994.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E. J. (Ed.). **Origem e evolução das bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobras/SEREC/CEM-SUD, 1990. p. 135-168.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987. Curitiba. **Atas...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, 1987. v. 1, p. 441-447.

expanded abstract

The study seeks to characterize the structural and stratigraphic geology of the petroliferous system responsible for the oil that occurs in the Rio Bonito Formation, in the Santa Catarina coalfields. Up to now, it has been speculated that this oil's geochemical signature is related to the Irati Formation, associated with an unconventional generation model, involving the thermal maturation by diabase intrusions, due to the insufficient burial of the source rock. As the Irati Formation is stratigraphically positioned above the Rio Bonito Formation, the petroliferous system is associated with a strong structural control of the migration model.

The geological maps (Loutfi, 2011), produced by superimposing the Borda Leste Project original maps (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1986), and the magnetometry map (Companhia Brasileira de Geofísica, 1972), has led to a more thorough tectonic-stratigraphic understanding of the region. These facilitated the preparation of the main sections, making it possible to identify the following main structural trends: E-W, NE-SW, NW-SE, N-S Faults; and Mesozoic subsurface effusive axes in the NS direction. Consequently, it was possible to organize the tectonic events, dividing them into seven geochronological phases.

Phases 1 and 2, identified in satellite images and geological sections, relate to the E-W pre-existing faults that are displaced by the NE-SW faults. It is assumed that these features occurred before the Jurassic-Cretaceous Serra Geral flows, since they aren't continuous in the Serra Geral Formation. Ramos (1988), Tankard et al. (1996) and Milani (1997) say that the NE-SW faults could be related to the consequences of the compressional intraplate stresses during the La Ventana Orogeny.

Phases 3 and 4 are associated with the N-S faults sectioning the NE-SW faults and subsequently conditioned the N-S dykes, which are well marked by magnetic anomalies.

Phase 5 is a second event of the NE-SW faults that sectioned the N-S dykes. These dykes are predecessors of the great lava flows associated with the Serra Geral Formation, whereas the NE-SW faults correspond to tectonics prior to this continental flood basalt. This suggests a short temporal reactivation of the NE-SW faults. Similarly, Rostirolla et al. (2000) identify a second NE-SW event in the Alto

de Quatiguá region, although it is correlated with a post-magmatic history deformation.

Phase 7 corresponds to the large NW-SE features, which cut the Serra Geral Formation and the older structures seen in satellite images. The existence of N-S dykes sectioned by NW-SE faults also indicates post-magmatism tectonics.

The interpretation of the different Rio Bonito Formation sedimentary paleoenvironments in the Santa Catarina coalfields was made with data collected at certain mapping points. The Rio Bonito Formation consists of sandstone and siltstone deposits with some thin coal deposits. The depositional cycles are marked by coarsening up and are represented by several facies, among which are the sigmoidal facies of a delta front environment, some having a dark gray color that suggests the presence of oil exudation.

Shale outcrops of the Assistência Member (Irati Formation) intruded by diabase dykes were also identified. Geochemical characterization showed very high TOC and vitrinite reflectance in the range of 0.86 to 1.04, calculated from the aromatic hydrocarbons ratio, which points to an oil generation window.

The oil geochemical signature analysis results of samples collected in the north and the organic extracts obtained from the south showed similarity between them, based on parameters such as: T_s ratio = Trisnorneohopane, T_m = Trisnorhopane greater than 1, gammacerane occurrence and the presence of the isoprenoids Pentamethyl Eicosane (i-25) and squalane (i-30), which suggests, according to Mello et al., 1993, the oil is correlated with the Assistência Member (Irati Formation). Thus, the dark patches of oil found in the Rio Bonito Formation sigmoidal facies are associated with a generation within that member.

Isotope data ($\delta^{13}C_{\text{Organic PDB}}\%$) obtained from the oil exudation observed in Rio Bonito Formation sandstones are compatible with those extracts taken from Assistência Member organic shales of the Irati Formation. The proximity of these samples with the NE-SW faults mapped in the field suggests a possible oil migration route along these faults, corroborated by the Rio Bonito Formation regional dip to the SW, as revealed by the region's isolytic map (Oliveira et al., 2009). The oil may have migrated laterally, due to the source rock positioning beside the Rio Bonito reservoir, or it may have traveled longer distances through the NE-SW faults generated in Phase 5. Geological sections show NE-SW faults with large displacements, which built a horst and graben

system, which may have positioned the Irati Formation alongside or below the Rio Bonito Formation.

Chronostratigraphic Sections show that during the Rio Bonito Formation deposition in the Late Permian, tectonic activity was practically insignificant. However, stratigraphic traps were formed due to the wide facies variation of this formation.

The structural traps, not observed in this study, are related to the phase 1 and 2, corresponding to the La Ventana Orogeny, and the faults associated with phases 5 and 6, related to the South Atlantic opening.

Ernesto et al. (1999), based on paleomagnetic data, suggested there were two pulses of magmatic intrusions in the Parana Basin northeast portion. Similarly, the structural research data suggests two

magmatic pulses for oil generation during the Jurassic-Cretaceous. The second, more intense pulse, promoted the formation of sills, volcanic leakage, maturation and oil trapping related to the Irati-Rio Bonito petroleum system.

The oil accumulations in the Irati-Rio Bonito system probably occurred in reservoirs associated with the Rio Bonito Formation sigmoid facies, in regions where the NW-SE faults are less frequent, and were trapped by large regional seals, (diabase sills intruded in the Assistência Member and the Palermo Formation shales) and the pelitic Rio Bonito facies.

After the Serra Geral flood, the development of the NW-SE fault system may have acted as an oil leak zone, since they cut all older structures, including possible seals.

autores



Ivan Soares Loutfi
Universidade do Estado do
Rio de Janeiro (UERJ)
Faculdade de Geologia
Departamento de Estratigrafia
e Paleontologia

e-mail: ivanloutfi@hotmail.com

Ivan Soares Loutfi graduado em Engenharia Geológica pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em 2003 e mestre em Análise de Bacias pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2011. De 2004 a 2009 trabalhou como geólogo de campo na Golder Associates, atuando em diversas províncias geológicas do Brasil. Atualmente é pesquisador do Instituto Nacional de Óleo e Gás (INOG) e membro do Chapter da American Association of Petroleum Geologists (AAPG).



Egberto Pereira
Universidade do Estado do
Rio de Janeiro (UERJ)
Faculdade de Geologia
Departamento de Estratigrafia
e Paleontologia

e-mail: egbertogeologia@gmail.com

Egberto Pereira geólogo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1987. Mestre em Ciências pela UFRJ em 1992 e Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP) em 2000. Desde 1989 é professor da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), onde exerceu os cargos de Chefe do Departamento de Estratigrafia e Paleontologia e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis. É pesquisador do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e Procientista da UERJ. Atua nas áreas de estratigrafia e sedimentologia.



René Rodrigues
Universidade do Estado do
Rio de Janeiro (UERJ)
Faculdade de Geologia
Departamento de Estratigrafia
e Paleontologia

e-mail: rene@uerj.br

René Rodrigues graduado em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (1961) e doutorado em Geologia pela UFRGS (1995). Atuou na Petrobras como geólogo de poço (1962) e responsável pelo laboratório de sedimentologia (1963 a 1971). Iniciou a implantação da Geoquímica Orgânica na Petrobras em 1971 e da Estratigrafia Química em 1995. Aposentado na Petrobras em 2001, passou ao cargo de professor adjunto na Universidade do estado do Rio de Janeiro (UERJ) entre 2002 e 2009. Atualmente, aposentado da UERJ, exerce o cargo de pesquisador visitante do PRH-17, ANP/UERJ.



Cassia Lima Cardozo
Universidade do Estado do
Rio de Janeiro (UERJ)
Faculdade de Geologia
Departamento de Estratigrafia
e Paleontologia

e-mail: cassiacardozo@yahoo.com.br

Cássia Lima Cardozo estudante do 7º período de geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Bolsista da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) do Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, aplicada no estudo da geração de óleo e gás por meio de processos não convencionais, orientada pelo professor Egberto Pereira. Integrante do Instituto Nacional de Óleo e Gás, coordenado pelo professor Doutor René Rodrigues.