



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Diego Felipe Bezerra da Costa

O papel das intrusões de soleiras e diques de diabásio na gênese de rotas de migração e armadilhas de hidrocarbonetos, em área de ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia, região de Guareí-SP, Bacia do Paraná

Rio de Janeiro

2015

Diego Felipe Bezerra da Costa

O papel das intrusões de soleiras e diques de diabásio na gênese de rotas de migração e armadilhas de hidrocarbonetos, em área de ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia, região de Guareí-SP, Bacia do Paraná

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

C837 Costa, Diego Felipe Bezerra da.
O papel das intrusões de soleiras e diques de diabásio na gênese de rotas de migração e armadilhas de hidrocarbonetos, em área de ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia, região de Guareí - SP, Bacia do Paraná / Diego Felipe Bezerra da Costa. – 2015.
147 f. : il.

Orientador: Sérgio Bergamaschi.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geologia estratigráfica – Paraná, Rio, Bacia – Teses. 2. Bacias Sedimentares – Paraná, Rio, Bacia – Teses. 3. Petrologia – Paraná, Rio, Bacia – Teses. 4. Arenitos – Guareí (SP) – Teses. 5. Hidrocarbonetos – Guareí-(SP) – Teses. I. Bergamaschi, Sérgio. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. III. Título.

CDU 551.3.051(815.6)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7: 5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Diego Felipe Bezerra da Costa

O papel das intrusões de soleiras e diques de diabásio na gênese de rotas de migração e armadilhas de hidrocarbonetos, em área de ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia, região de Guareí-SP, Bacia do Paraná

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias

Aprovada em 26 de maio de 2015 .

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi (Orientador)

Faculdade de Geologia - UERJ

Prof. Dr. Egberto Pereira

Faculdade de Geologia - UERJ

Dr. Edison José Milani

Petróleo Brasileiro S.A.

Rio de Janeiro

2015

RESUMO

COSTA, Diego Felipe Bezerra da. *O papel das intrusões de soleiras e diques de diabásio na gênese de rotas de migração e armadilhas de hidrocarbonetos, em área de ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia, região de Guareí-SP, Bacia do Paraná*. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

O trabalho consiste na análise das ocorrências de arenitos asfálticos da região de Guareí-SP, em sua maioria da Formação Piramboia e localmente da Formação Rio Bonito (Triássico e Permiano da Bacia do Paraná, respectivamente) na tentativa de definir um arcabouço tectono-estratigráfico, bem como os processos e sincronismo que possibilitaram as suas acumulações, enfatizando a migração e a formação de trapas associadas a presença de intrusivas. Para tanto, utilizou-se como base várias escalas de observação que vão desde a análise de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) e sensoriamento remoto (imagens SRTM) até a escala de afloramento, passando por interpretação sísmica de linhas 2D, análise de mapas geológicos e correlação de poços e furos de sondagem. Aplicaram-se conceitos de sistemas petrolíferos não convencionais e de metodologias há muito aplicadas em bacias da Noruega, Reino Unido e África do Sul, que vinculam geneticamente a implantação de soleiras e diques ígneos a estruturas associadas na formação e/ou potencialização de caminhos de migração e armadilhas de hidrocarbonetos. Foram distinguidas sismofácies para as soleiras de diabásio segundo as classificações de Planke *et al.* (2005) e Hansen *et al.* (2004), que revelam uma emaranhada rede de soleiras (compostas e na forma de complexos) que intrudem toda a estratigrafia local, além do reconhecimento e mapeamento das estruturas que ocorrem associadas, como dobramentos forçados e falhas em padrão concêntrico, radial e poligonais. As ocorrências estão compartimentadas preferencialmente em sinclinais locais controlados por falhas normais sobrepostas a soleiras em formato de pires que intrudem os pacotes do Grupo Itararé. A correlação dos dados e escalas utilizados constatou que o arcabouço estrutural que configura a área das ocorrências é complexo, exibindo um fator controlador principal tectônico em resposta a esforços sofridos pela bacia ao longo da sua evolução, e outro deformacional contributivo e associado à intrusão de soleiras e diques de diabásio durante o Magmatismo Serra Geral (Eocretáceo).

Palavras-chave: Arenitos asfálticos. Soleiras em formato de pires. Bacia do Paraná. Sistema petrolífero não convencional. Migração. Trapas. Estruturas associadas. Dobramentos forçados.

ABSTRACT

COSTA, Diego Felipe Bezerra da. *The role of diabase sills and dikes intrusions in the genesis of migration pathways and hydrocarbon traps, in area of tar sandstones occurrences of the Piramboia Formation, near Guareí-SP, Paraná Basin*. 2015. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

The current study consists in the analysis of tar sandstones occurrences near Guareí-SP, mostly of the Piramboia Formation and locally of the Rio Bonito Formation (Triassic and Permian of the Paraná Basin, respectively) in an attempt to set a tectonostratigraphic framework, as well the processes and timing which controlled their accumulations, emphasizing migration and traps formation associated to intrusive rocks. Therefore, the study took as a basis in various scales of observation ranging from the analysis of potential methods (gravimetry and magnetometry) and remote sensing (SRTM images) to the outcrop scale, and it included seismic interpretation of 2D lines, analysis of geological maps and well correlation. It uses concepts of unconventional petroleum systems and methodologies that have been applied in basins from Norway, UK and South Africa, linking genetically the emplacement of sills and dikes with associated structures in the formation and / or enhancement of migration pathways and hydrocarbon traps. Seismic facies were distinguished for the diabase sills according the classifications of Planke *et al.* (2005) and Hansen *et al.* (2004), that reveal a tangled network thresholds (composed and complex sills) which intrude the entire local stratigraphy plus the recognition and mapping of associated structures, such as forced folds and faults in a concentric pattern, radial and polygonal. The occurrences are set preferably in synclines controlled by normal faults just above saucer shaped sills that intrude the Itararé Group packages. The correlation of the data and different scales used say that the structural framework that sets the area of the occurrences is complex, exhibiting a major tectonic factor in response to sustained stress on the basin throug its evolution, and other additional and deformational associated to the intrusion of diabase sills and dikes during the Magmatism Serra Geral (Early Cretaceous).

Keywords: Tar sandstones. Saucer shaped sills. Paraná Basin. Unconventional Petroleum System. Migration. Traps. Associated structures . Forced folds.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	8
1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.1	Justificativa	9
1.2	Objetivos	10
1.3	Definições importantes	10
1.3.1	<u>Arenitos Asfálticos</u>	10
1.3.2	<u>Sistema Petrolífero</u>	11
1.3.3	<u>Convencional versus não convencional</u>	11
1.4	Localização e vias de acesso	12
1.5	Base de dados	13
1.5.1	<u>Folhas da CPRM</u>	14
1.5.2	<u>Gravimetria e Magnetometria</u>	15
1.5.3	<u>Poços ANP e Furos de sondagem da CPRM</u>	17
1.5.4	<u>Linhas sísmica 2D</u>	19
1.5.5	<u>Dados de campo</u>	20
2	SÍNTESES GEOLÓGICA REGIONAL	20
2.1	Introdução	20
2.2	Contexto Geotectônico	22
2.3	Arcabouço Estratigráfico	28
2.3.1	<u>Supersequência Gondwana I</u>	30
2.3.2	<u>Magmatismo Serra Geral</u>	34
2.4	Sistema Petrolífero da Bacia do Paraná	36
3	ARCABOUÇO TECTÔNICO ESTRATIGRÁFICO	38
3.1	Introdução	38
3.2	Gravimetria	38
3.2.1	<u>Generalidades</u>	38
3.2.2	<u>Interpretação de Anomalias Gravimétricas</u>	40
3.3	Magnetometria	42
3.3.1	<u>Generalidades</u>	42
3.3.2	<u>Interpretação de Anomalias Magnéticas</u>	42

3.4	Sensoriamento Remoto	45
3.4.1	<u>Generalidades</u>	45
3.4.2	<u>Interpretação SRTM</u>	46
3.4.3	<u>Modelo digital de elevação</u>	49
4	INTERPRETAÇÃO SÍSMICA	54
4.1	Introdução	54
4.2	Carregamento dos dados	57
4.2.1	<u>Definições de projeção, datum e unidades</u>	57
4.2.2	<u>Definição de marcadores estratigráficos</u>	58
4.3	Calibração Poço-Sísmica	60
4.3.1	<u>Preparação dos dados</u>	60
4.3.2	<u>Fase e polaridade da sísmica</u>	62
4.3.3	<u>Sismograma Sintético</u>	64
4.3.4	<u>Amarração</u>	64
4.3.5	<u>Estudo 1: Poço 1-CP-01-SP x Linha 0040-0025</u>	66
4.3.6	<u>Estudo 2: Poço 1-GU-04-SP x Linha 0040-0026</u>	68
4.3.7	<u>Estudo 3: Poço 2-GU-03-SP x Linha 0040-0021</u>	68
4.4	Interpretação dos horizontes	71
4.4.1	<u>Metodologia</u>	72
4.4.2	<u>Embasamento Pré-Cambriano</u>	73
4.4.3	<u>Topo do Grupo Itararé</u>	73
4.4.4	<u>Topo da Formação Palermo</u>	73
4.4.5	<u>Topo da Formação Irati</u>	77
4.4.6	<u>Topo do Serra Alta</u>	77
4.5	Interpretação de intrusivas e estruturas	83
4.5.1	<u>Fluxograma de interpretação</u>	83
4.5.2	<u>Fundamentação teórica</u>	86
4.5.3	<u>Modelos de implantação de soleiras</u>	88
4.5.4	<u>Geometria de soleiras em formato de pires</u>	92
4.5.5	<u>Estruturas associadas à intrusão de soleiras e diques</u>	94
4.6	Linhas 2D interpretadas	103
4.6.1	<u>Linha 0240-0021</u>	103
4.6.2	<u>Linha 0240-0022</u>	106

4.6.3	<u>Linha 0240-0023</u>	108
4.6.4	<u>Linha 0240-0025</u>	110
4.6.5	<u>Linha 0240-0026</u>	112
4.6.6	<u>Linha 0240-0027</u>	114
4.7	Mapas estruturais	116
5	ARCABOUÇO ESTRUTURAL DAS OCORRÊNCIAS DE ARENITOS ASFÁLTICOS	118
5.1	Introdução	118
5.2	Padrão estrutural das ocorrências	118
5.3	Análise das ocorrências de Guareí	120
5.3.1	<u>O Sinclinal de Nhaíva e as ocorrências de Nhaíva e Capela Velha</u>	121
5.3.2	<u>O Sinclinal de Sobar e as ocorrências de Ribeirão Sargento e Sobar</u>	124
5.3.3	<u>A ocorrência de Jacutinga</u>	127
6	MODELO DE MIGRAÇÃO E ARMADILHAS	129
6.1	Introdução	129
6.2	Resgate bibliográfico	129
6.3	Contribuição da implantação das intrusivas aos modelos de migração e armadilhas	134
	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
	REFERÊNCIAS	

INTRODUÇÃO

O presente documento intitulado “O papel das intrusões de soleiras e diques de diabásio na gênese de rotas de migração e armadilhas de hidrocarbonetos, em área de ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia, região de Guareí-SP, Bacia do Paraná”, é um apanhado descritivo das atividades realizadas e dos resultados obtidos acerca do tema, que culmina em uma dissertação de mestrado para a obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Faculdade de Geologia (FGEL), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

Contou com a orientação do Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi, do Departamento de Estratigrafia e Paleontologia (DEPA) da FGEL-UERJ, sendo parte documental e integrante dos trabalhos inseridos no âmbito do Projeto “INCT de Óleo e Gás – Jazidas não convencionais (INOG)”, financiado pelo CNPq e Faperj e coordenado pelo Prof. Dr. René Rodrigues também do DEPA.

Foi dividido em oito capítulos a configurar e contemplar de forma introdutória, interpretativa e conclusiva, as diversas etapas envolvidas em sua produção.

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Justificativa

A ocorrência de arenitos asfálticos da Formação Piramboia, na porção centro-leste do Estado de São Paulo, Bacia do Paraná, tem sido estudada ao longo dos anos como um importante reservatório de um sistema petrolífero não convencional. Desse modo, sua caracterização e entendimento das relações tectono-estratigráficas, de processos e de sincronismo, inseridas no contexto da dinâmica evolutiva da Bacia do Paraná e do Sistema Petrolífero Irati-Piramboia (!) são de grande importância.

O trabalho de Thomaz Filho (1982) voltado para a ocorrência de arenitos asfálticos da Fazenda Betumita (Anhembi-SP), cubou somente para esta, um volume aproximado de 5,7 milhões de barris de óleo pesado (5°API), onde baseado em parâmetros equivalentes, estimulou que as ocorrências de Moqué, Morro do Bofete, Guareí e Capela Velha - estas últimas inseridas na área de estudo desse trabalho - somam aproximadamente 26 milhões de barris. Portanto, além da relevância acadêmica, as ocorrências de arenitos asfálticos do centro-leste paulista demandam também um interesse exploratório, havendo inclusive histórico de mineração na primeira metade do século XX, com o intuito de obter matéria prima de pavimentação a frio e também destilação de óleo (Cabral, 2006).

A partir destas motivações iniciais a justificar o desenvolvimento do trabalho, é importante frisar que embora as ocorrências de arenitos asfálticos tenham sido estudadas ao longo de todo o último século até os dias atuais sobre diversos aspectos geológicos, principalmente a partir de afloramentos, sensoriamento remoto e métodos potenciais, sua subsuperfície ainda é pouco compreendida devido ao pobre imageamento sísmico da bacia e da baixa densidade na amostragem de poços. É exatamente sobre essa problemática que se considera e reside a maior motivação e relevância a justificar esse trabalho: o uso e a interpretação de linhas sísmicas 2D e de correlação de poços na tentativa de melhor entender os fatores responsáveis e controladores dessas acumulações.

1.2 Objetivos

Apresentar, interpretar, analisar e discutir todos os dados de correlação geológica disponíveis de forma coesa, metódica e eficaz, na tentativa de se obter um modelo de migração e trapeamento na escala de detalhe para as acumulações específicas e alvos desse trabalho.

Com isso, contribuir e somar aos esforços de outros alunos e docentes da Instituição na avaliação do potencial exploratório das bacias paleozoicas brasileiras, que incluíram temáticas que relacionam a influência de intrusivas observadas em linhas sísmicas na geração, migração e acumulação não convencionais de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná, do Parnaíba (Porto, 2014) e do Amazonas (Domenech, 2012).

1.3 Definições importantes

A definição prévia de alguns conceitos que são condicionantes e carregam consigo certas especificações, se faz necessária para uma melhor leitura e entendimento do que vem a seguir.

1.3.1 Arenitos Asfálticos

O termo arenitos asfálticos ou arenitos betuminosos (do inglês oil sands, tar sands, asphaltic sandstones ou bitumen-impregnated sandstones) são descritos pela Oil Sands Research and Information Network (OSRIN), da Universidade de Alberta no Canadá, como um depósito de grãos siliciclásticos (areia, argila ou outros mineiras) com impregnação de betume em seus poros. O betume por sua vez, é a fração de policíclicos aromáticos de hidrocarbonetos que formam um óleo pesado e de alta viscosidade semelhante ao asfalto. Pode existir naturalmente ou obtido através do fracionamento do óleo por destilação.

1.3.2 Sistema Petrolífero

O trabalho de Magoon & Dow (1994) define um sistema petrolífero como sendo um sistema natural que compreende uma área de rocha geradora ativa e todas as acumulações de hidrocarbonetos a ela associadas, incluindo todos os elementos e processos geológicos essenciais para que estas existam, tendo como condicionante o sincronismo de eventos e o espaço em que esses elementos e processos ocorreram.

A nomear esses elementos essenciais tem-se: a rocha geradora, rocha reservatório, rocha selante e rocha de sobrecarga. Os processos geológicos essenciais são: a formação da trapa, geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos. Para que o processo de acumulação exista, a formação da trapa tem que ser obrigatoriamente antecessora ou sincrônica aos processos de geração e migração (Magoon & Dow, 1994).

A nomenclatura do sistema petrolífero segundo a classificação de Magoon & Dow (1994) deve ser formatado a guardar relação entre a geradora (primeiro nome) e o reservatório (segundo nome), bem como o nível de certeza que indica o grau de confiança expressada por essa relação, podendo ser: conhecido (!), hipotético (.) ou especulativo (?). Em exemplificação, o Sistema Petrolífero Irati-Piramboia (!) é um sistema petrolífero conhecido, em que as acumulações presentes na rocha reservatório (Piramboia) guardam relação com a matéria orgânica da rocha geradora (Irati).

1.3.3 Convencional versus não convencional

A tipicidade com que se classifica um sistema petrolífero em convencional ou não convencional reside basicamente, na natureza em que os seus processos ocorreram.

Para Magoon & Dow (1994), um sistema petrolífero típico (convencional) é aquele em que a rocha geradora entrou na janela de maturação da matéria orgânica por condições naturais de soterramento. Em contrapartida, sistemas petrolíferos atípicos (não convencionais) têm a sua geração relacionada a outras formas, como por exemplo, pelo calor associado a intrusões ígneas.

É sob esta segunda perspectiva de não convencionalidade que se associam as acumulações do sistema petrolífero em estudo.

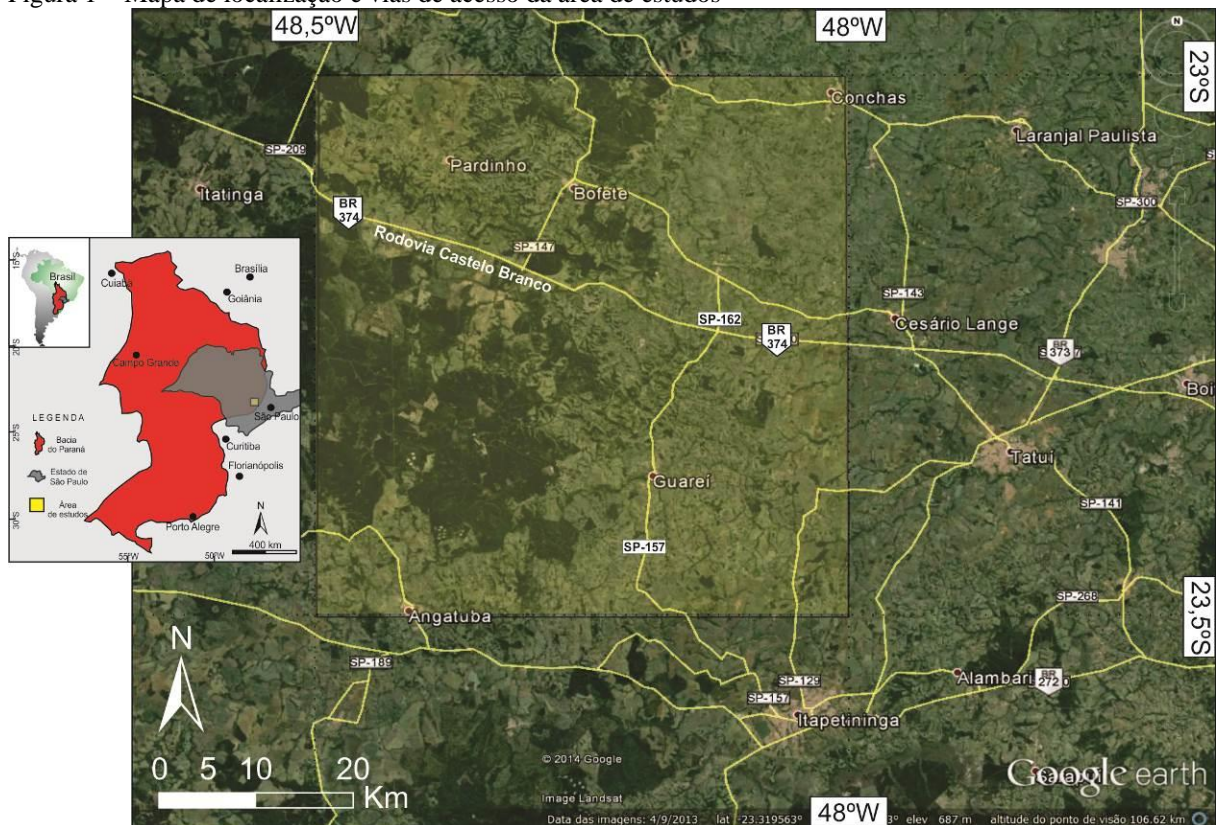
1.4 Localização e vias de acesso

A área de estudo está localizada na região centro-leste do estado de São Paulo, abrangendo as áreas urbanas e rurais dos municípios de Conchas a norte, Bofete e Pardinho no centro-norte, Angatuba a sul e Guareí na porção sudeste.

As coordenadas que delimitam seus vértices são: $48^{\circ}30'W/23^{\circ}00'S$; $48^{\circ}00'W/23^{\circ}00'S$; $48^{\circ}30'W/23^{\circ}30'S$ e $48^{\circ}W/23^{\circ}30'S$.

O acesso à região pode ser feito por diversas vias tendo como a principal a BR-374 - também chamada de Rodovia Presidente Castelo Branco (SP-280) - que corta toda a área de leste a noroeste. O acesso à região de Guareí pode ser feito pela SP-157/Rodovia Aristídes da Costa Barros, que liga a BR-374 a Itapetininga (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização e vias de acesso da área de estudos



Legenda: Mapa de localização da área de estudos indicada pelo quadrado amarelo.

Nota: Ilustração confeccionada a partir da extração de imagem do *software* Google Earth.

Fonte: O autor, 2015.

1.5 Banco de dados

A base de dados disponível é complexa e diversificada, pois além da tipologia e forma, atravessa várias escalas de observação, amostragem, aquisição, requerimento e aplicação. Alguns dados podem ainda não pertencer à área de estudo, mas não foram descartados por seu valor correlacionável, proximidade e como análogo direto.

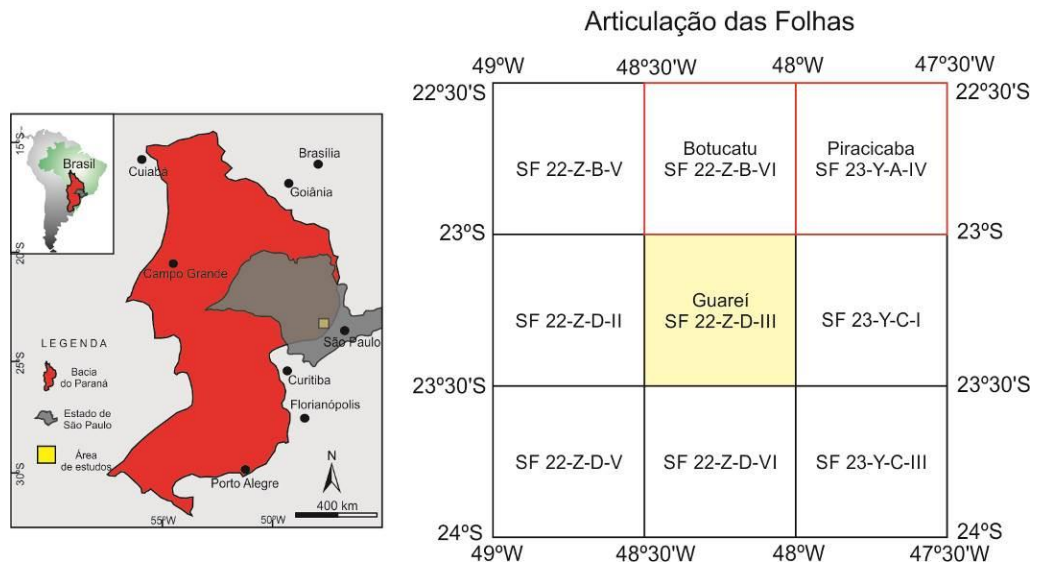
1.5.1 Folhas da CPRM

Foram usadas como mapas base para a geologia de superfície três folhas mapeadas pela CPRM na escala de 1:100.000, referentes ao Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná: Integração geológica e avaliação econômica - DNPM 1985, sendo elas: Folha Piracicaba (SF.23-Y-A-IV), Folha Botucatu (SF.22-Z-B-VI) e Folha Guareí (SF.22-Z-D-III), encontradas respectivamente nos anexos 12, 11 e 18 do projeto disponível para consulta no acervo da FGEL pela CPRM.

Embora apenas a Folha Guareí abranja a área de estudos, de onde partilha dos mesmos vértices, utilizou-se da Folha Piracicaba decorrente à presença de afloramentos do folhelho gerador (Membro Assistência da Formação Irati) visitados durante as expedições de campo, e que estão intrudidos por soleiras de diabásio, servindo como análogo direto para a geologia de subsuperfície da área de estudos.

A Folha Botucatu por sua vez, apresenta áreas de ocorrências de arenitos asfálticos nas regiões de Anhembi, Piapara e a norte de Botucatu bordejando a Represa Barra Bonita, servindo também como análogos e passíveis de correlação tectono-estratigráficas, bem como análise da distribuição espacial e geológica das ocorrências (Figura 2).

Figura 2 – Mapa de articulação das Folhas da CPRM



Nota: A área de estudos (em amarelo) coincide com os limites da Folha Guareí.

Fonte: O autor, 2015.

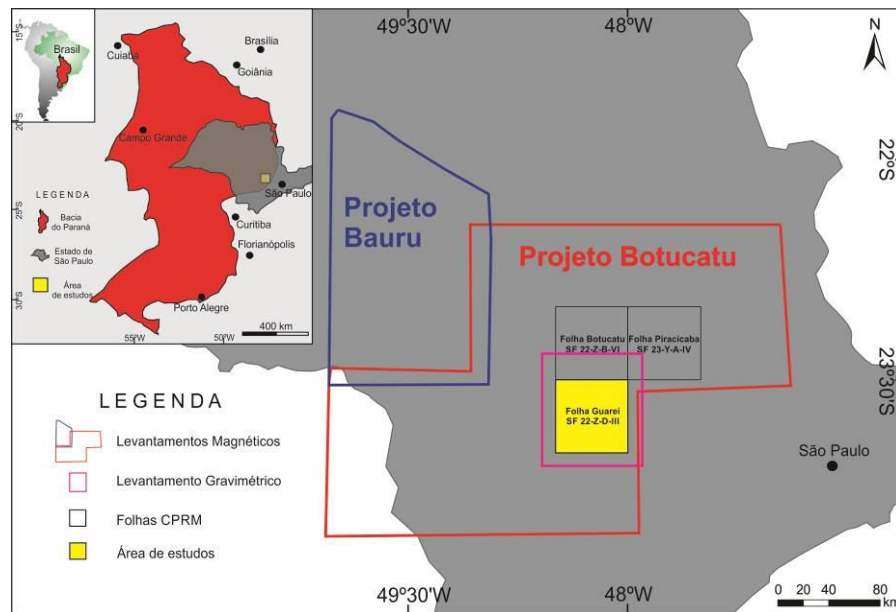
As folhas foram digitalizadas, de onde posteriormente georreferenciadas no ArcMap v.10 e vetorizadas a resultar nos mapas geológicos na escala de 1:100.000 usados nesse trabalho.

1.5.2 Gravimetria e Magnetometria

Foram requeridos à ANP, a partir da plataforma de atendimento as universidades do BDEP, dois levantamentos magnéticos: os Projeto Botucatu (Paulipetro, 1980) e Projeto Bauru (Paulipetro, 1979). O levantamento Botucatu abrange toda a área de estudos e adjacências, sendo o único a ser utilizado nesse trabalho (Figura 1.3).

Os dados gravimétricos foram adquiridos pelo portal do grupo de pesquisa The Satellite Geodesy Research Group do Instituto de Oceanografia da Universidade da Califórnia de São Diego (UCSD), que disponibiliza gratuitamente dados de anomalia Ar Livre, convertidos a partir de altimetria de satélites (Figura 3).

Figura 3 - Mapa de localização dos levantamentos magnéticos e gravimétrico



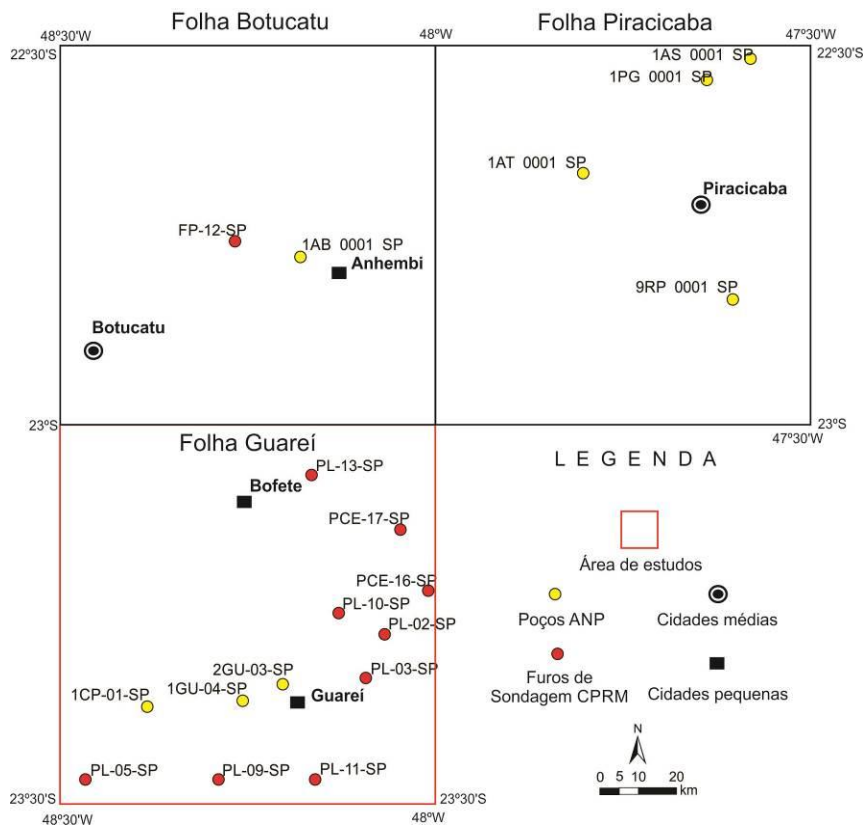
Fonte: O autor, 2015.

1.5.3 Poços ANP e Furos de sondagem da CPRM

O mesmo pacote de dados solicitado a ANP incluiu 10 poços exploratórios embora apenas os poços 1CP-01-SP, 1GU-04-SP e 2GU-03-SP estejam localizados na área de estudos (Figura 1.4). O Quadro 1.1 detalha o conteúdo disponibilizado pelo BDEP com o pedido.

O acervo do Projeto Borda Leste inclui ainda em seus anexos para consulta, diversos furos de sondagem que em sua maioria sondaram até o topo do Grupo Itararé, de modo a contemplar o registro geológico de interesse e foram utilizados na correlação de subsuperfície. Nove dos dez furos selecionados, a exceção do FP-12-SP próximo às ocorrências de Anhembi, estão localizados na área de estudos (Figura 4). Os Quadros 1 e 2 detalham seus conteúdos.

Figura 4 – Mapa de localização dos poços ANP e furos de sondagem da CPRM



Fonte: O autor, 2015.

Quadro 1 – Conteúdo dos poços ANP

Poço	Cota (m)	Profundidade (m)	Relatório do poço (.pdf)	Registros (.Jas)
1GU-04-SP	716,3	900	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Sônico Integrado.
2GU-03-SP	716,3	980	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Sônico Integrado.
1CP-01-SP	689	1545	SIM	Potencial Espontâneo; Sônico Integrado.
1AS-01-SP	543,3	1330	SIM	Potencial Espontâneo
1AT-01-SP	460	1255	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
1PG-01-SP	637,3	1224	SIM	Potencial Espontâneo; Sônico Integrado.
9RP-01-SP	633	295	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Sônico; Resistividade.
1AB-01-SP	497	1659,5	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Sônico.
2PN-01-SP	615,3	772	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Sônico; Resistividade.
1MA-01-SP	632,4	2992	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Sônico; Resistividade.

Fonte: O autor, 2015.

Quadro 2 – Conteúdo dos furos de sondagem da CPRM

Furo	Cota (m)	Profundidade (m)	Estratigrafia e Litologia	Registros (papel)
PL-02-SP	578	200,65	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PL-03-SP	657	218	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PL-05-SP	608	215,9	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PL-09-SP	642	270,5	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PL-10-SP	562	225	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PL-11-SP	741	238,8	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PL-13-SP	500	286,4	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PCE-16-SP	575	200	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
PCE-17-SP	520	200	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.
FP-12-SP	500	404	SIM	Raios Gama; Potencial Espontâneo; Resistividade.

Fonte: O autor, 2015.

1.5.4 Linhas sísmicas 2D

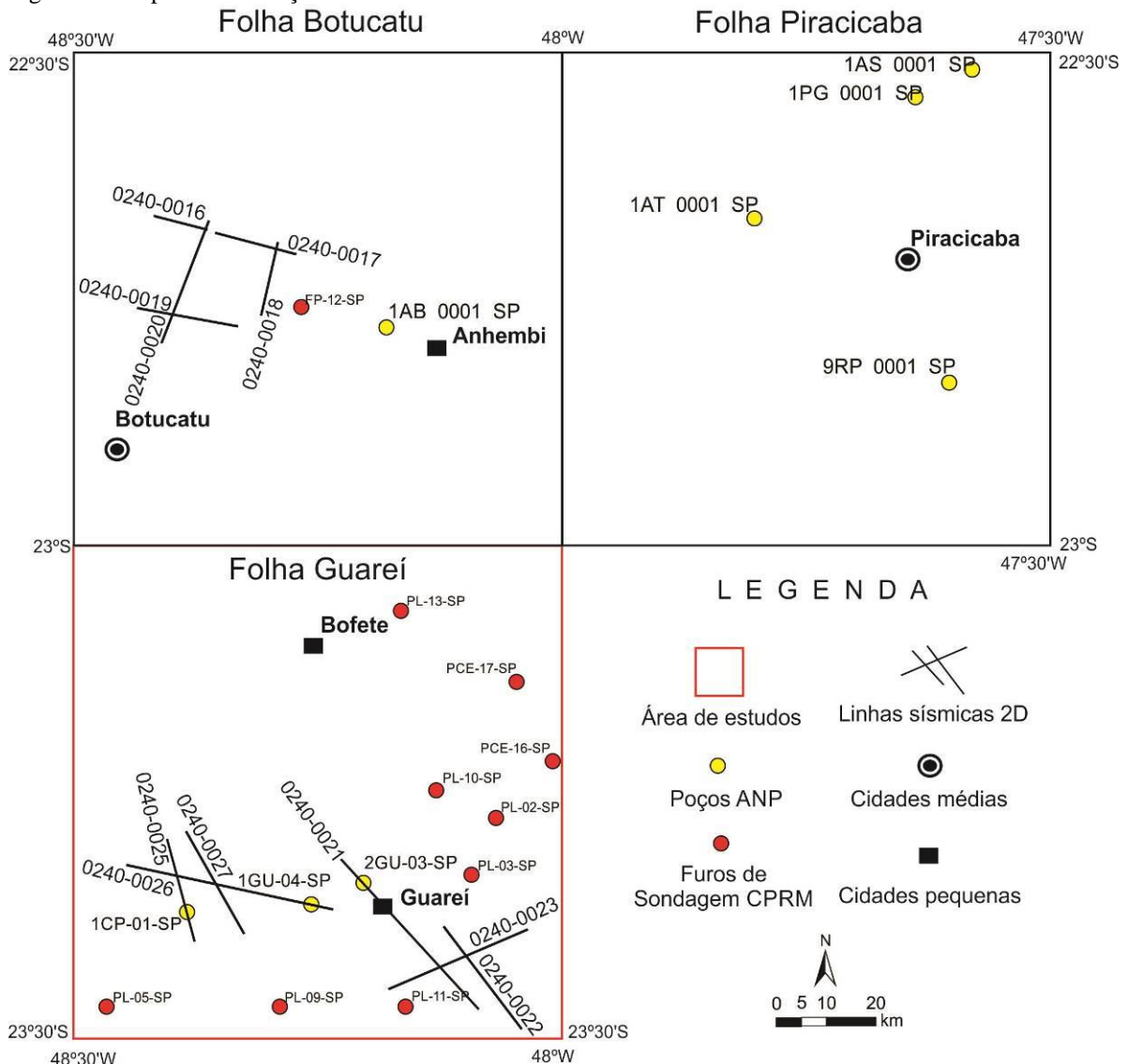
Foram solicitados a ANP por meio do BDEP onze linhas sísmicas 2D, cinco delas localizadas na área de ocorrências a NW de Anhembi e seis na região de Guareí e das ocorrências de Sobar/Ribeirão Sargento, sendo estas as utilizadas na confecção dessa dissertação. São dados pós-stack e pertencem ao levantamento 0240_PARANÁ_51 da PETROBRAS, de 1992. O Quadro 3 detalha suas características físicas e a Figura 5 sua distribuição espacial.

Quadro 3 – Características das Linhas 2D

Segmento	Tipo	Domínio	Extensão da linha (km)	Interseção com poço
0240_0016	MIG FIN	Tempo	5,8	-
0240_0017	MIG FIN	Tempo	8,8	-
0240_0018	MIG FIN	Tempo	8,5	-
0240_0019	MIG FIN	Tempo	10,83	-
0240_0020	MIG FIN	Tempo	14,73	-
0240_0021	MIG FIN	Tempo	22,10	2GU-03-SP
0240_0022	MIG FIN	Tempo	14,13	-
0240_0023	MIG FIN	Tempo	16,05	-
0240_0025	MIG FIN	Tempo	11,77	1CP-01-SP
0240_0026	MIG FIN	Tempo	22,23	1GU-04-SP
0240_0027	MIG FIN	Tempo	13,05	-

Fonte: O autor, 2015.

Figura 5 – Mapa de localização das linhas 2D

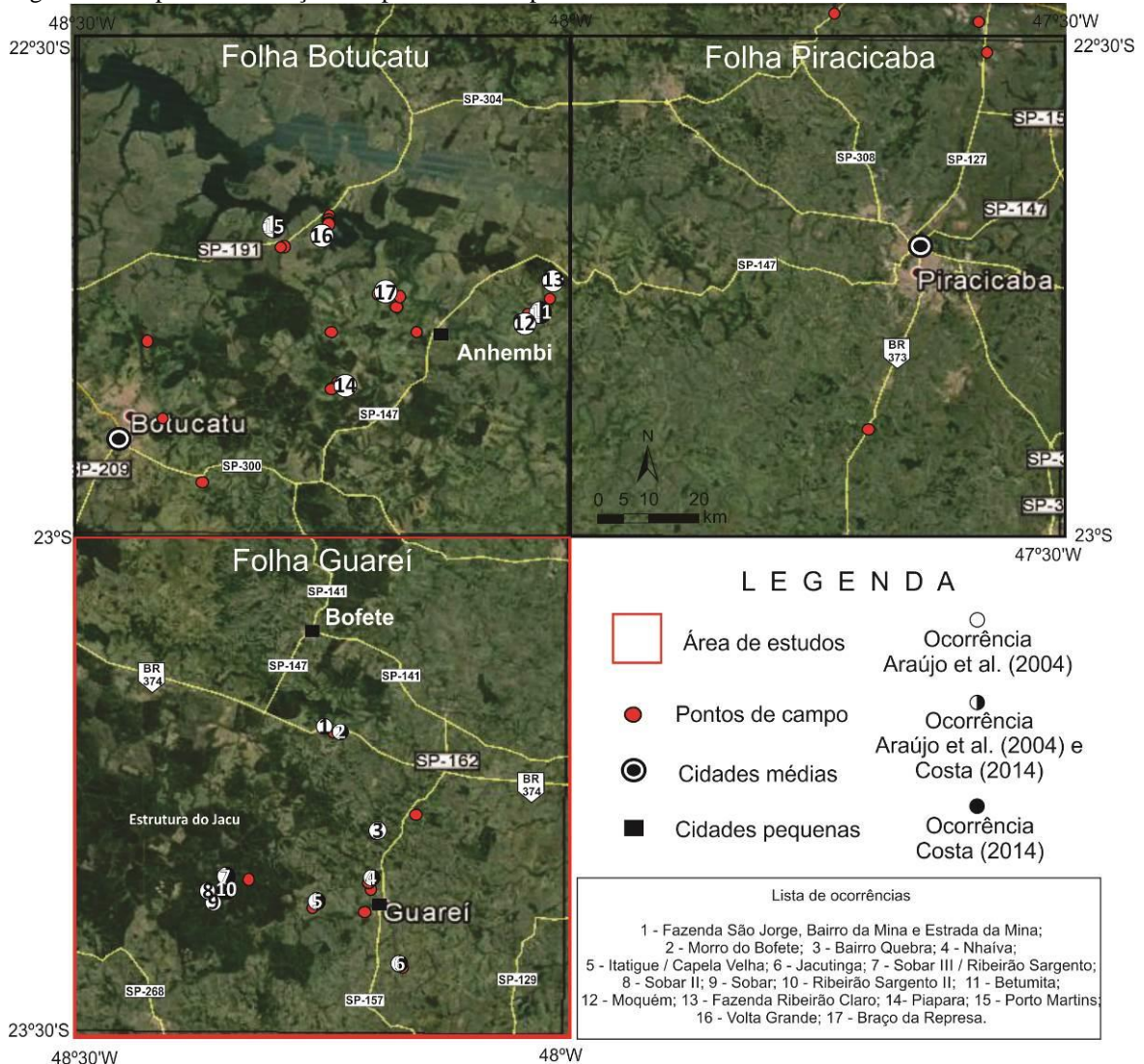


Fonte: O autor, 2015.

1.5.5 Dados de campo

Foram feitos aproximadamente 50 pontos em duas expedições de campo, que incluíram afloramentos da rocha geradora, do reservatório impregnado com óleo ou não, de soleiras de diabásio aflorantes, e de possíveis rochas selantes. Das 26 ocorrências de arenitos asfálticos reconhecidas por Araújo *et al.* (2004), 10 foram visitadas. Todavia em uma delas apenas se verificou amostras roladas e em outras três nenhum indício. Caberá ao capítulo 5 deste documento abordar e descrever esses dados (Figura 6).

Figura 6 – Mapa de localização dos pontos de campo



Nota: Além da localização dos pontos de campo, o mapa mostra a localização das ocorrências de arenitos asfálticos em Araújo *et al.*, 2004 e Costa *et al.*, 2015.

Fonte: O autor, 2015.

2 SÍNTESE GEOLÓGICA REGIONAL

2.1 Introdução

A área de estudos está inserida no contexto tectono-estratigráfico da chamada Bacia do Paraná, uma vasta região composta por rochas magmáticas e sedimentares, que se estende desde as porções meridionais do Brasil até o leste paraguaio, e extremos nordeste e noroeste argentino e uruguaio, respectivamente, ocupando uma área total aproximada em 1,4 milhões de quilômetros quadrados (Figura 7).

Figura 7 – Mapa de localização da Bacia do Paraná



Fonte: Modificado de Zalán, 1990. Figura 1, p. 137.

Segundo Milani (2004), o contorno da sinéclise configura um limite erosivo ao longo da maior parte de seu perímetro, onde seu formato atual é resultante de fenômenos pós-paleozoicos do continente sul-americano, que subtraíram do registro sedimentar significativas áreas do contexto original. Desse modo, seu limite leste foi esculpido pela erosão oriunda do soerguimento marginal ao rifteamento do Atlântico sul, o que patrocinou a abertura de janelas do embasamento cristalino. A oeste, a Bacia do Paraná é limitada pelo Arco de Assunção, um alto estrutural originado pela sobrecarga litosférica imposta ao continente pela compressão andina na margem oeste, e que emancipa a Bacia do Paraná de áreas que já fora coligada, como a região do Chaco paraguaio-boliviano.

Além dos limites erosivos oriundos da tectônica, Zalán (1990), sugere que há limites em que as camadas simplesmente afinam ou são suavemente afinadas por erosão sem que tenha havido a contribuição de um esforço tectônico maior, o que parece ser o caso da borda nordeste entre a Zona de Falha Guapira e o Arco de Goiânia/Alto do Parnaíba. Isso corroboraria em parte com a ideia expressa por Almeida (1981), de que há evidências de um limite original (uma paleoborda deposicional) ao longo do flanco nordeste. O cinturão de dobramentos do Paraguai-Araguaia limita a bacia a noroeste e provavelmente funcionou como barreira local para a sedimentação. Para sul-sudoeste, a bacia tem continuidade com os territórios da Argentina e do Uruguai, havendo a importante reentrância da bacia para o continente imposta pelo Arco do Rio Grande de orientação NW no Rio Grande do Sul. Outra importante reentrância que modela parte da borda oriental da bacia é provocada pelo Arco de Ponta Grossa também de orientação NW.

O despertar científico pela Bacia do Paraná se deu a partir das ocorrências de carvão da Formação Rio Bonito; de seu potencial petrolífero aflorante no centro-leste paulista e em outras localidades; de expressivos aquíferos em arenitos eólicos da Formação Botucatu; dentre outros, tendo como trabalho pioneiro na sistematização de seu empilhamento estratigráfico o relatório de White (1908). Mesmo com mais de um século de informação crescente e evolutiva, a complexidade em que se configura e repousa seu arcabouço tectono-estratigráfico permite diversidade interpretativa de ampla e polêmica discussão.

Entretanto, é consenso que se trata de uma bacia intracontinental configurada sob a forma de uma sinéclise ovalada, com eixo maior de direção NNE-SSW de 1750 km de comprimento e largura média de 900 km; possui um registro sedimentar de idades que vão do Paleozoico ao Mesozoico, depositado na forma de pacotes cronologicamente discordantes, em resposta as mudanças tectônicas, deposicionais e faciológicas, que controlaram o seu

preenchimento em diferentes momentos da dinâmica evolutiva do Gondwana a partir do Neo-Ordoviciano, e de sua posterior quebra no Eocretáceo.

Segundo Zalán (1990), a região de maior espessura de sedimentos e capa de lavas do derrame Serra Geral pode chegar a isópaca de sete mil metros, coincide com o centro geométrico da bacia e acompanha a região de calha do Rio Paraná, rio este, que empresta o nome à bacia.

Sua origem ainda é controversa e há pelo menos duas vertentes principais que encabeçam a discussão quanto aos mecanismos de subsidência que impulsionaram sua deposição e serão abordadas no subcapítulo seguinte.

2.2 Contexto Geotectônico

Bacias intracratônicas ocorrem por definição segundo Klein (1995), no interior continental, distantes de margens de placas, onde seu substrato é constituído em sua totalidade por crosta continental, e em muitos casos encontram-se sobrepostas a riftes abortados. Possuem a forma ovalada em planta e de pires em seção. A evolução destas bacias envolve uma conjugação e sucessão de processos que incluem distensão continental, subsidência térmica de amplas regiões e reajustes isostáticos tardios. Ou seja, o próprio conceito de bacia intracratônica foi formatado a deixar em aberto um modelo termo-mecânico definitivo que pudesse explicar sua origem, e com a Bacia do Paraná essa ressalva não seria diferente: geotectonicamente configura-se como uma bacia intracratônica, ambientada em crosta continental, distante das margens ativa e passiva da placa Sul-americana, possui forma ovalada em planta e de pires em seção, mas sem um modelo de origem e evolução definido, onde a presença de um rifte central ainda é discutida.

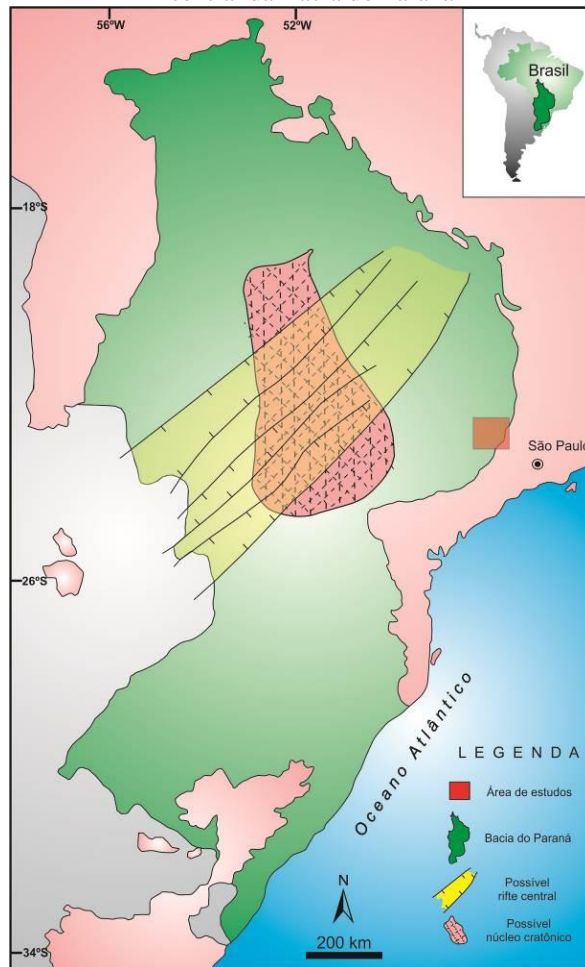
Para Zalán (1990), o Ciclo Brasileiro/Pan-africano patrocinou um anômalo aquecimento da crosta continental após a colisão e agrupamento de diversos blocos crustais cratônicos e de seus prismas no Neoproterozoico (700-650 Ma), formando cinturões de faixas móveis de orientação NE até o fim do ciclo no Cambro-ordoviciano (500-450 Ma). Com a dissipação termal pelas estruturas formadas e controle isostático pós-orogênico estabelecido, o resfriamento crustal patrocinou a subsidência necessária para a formação de altos e baixos topográficos, que levou a deposição da sequência siluriana da bacia. Embora sua hipótese parta do resfriamento crustal como motor propulsor que deu origem a sinéclise no entorno de

um núcleo cratônico, Zalán não descarta a possibilidade de estiramento litosférico conjugando um rifte central.

Possibilidade esta defendida por Marques *et al.* (1993), que baseado em métodos geofísicos (gravimetria, magnetometria e sísmica de reflexão além de poços) defende a presença de um uma proeminente depressão pré-devoniana, demarcada geograficamente pela região de calha do Rio Paraná ao qual foi chamada pelos autores no trabalho interno da Petrobrás e divulgado em Milani (2004) de “rifte central”, que constitui um domínio ordovício-siluriano limitado por falhas normais e internamente compartimentado numa série de altos e baixos estruturais que não se refletem no pacote devoniano a ele sobreposto.

É frisado por Milani (2004), que a feição descrita como “rifte central” da Bacia do Paraná não guarda compromisso com o modelo de evolução de bacias extensionais, em que uma fase de estiramento e aquecimento litosféricos e de subsidência mecânica promovida por falhas é seguida por uma etapa de subsidência térmica. É o caso registrado na história evolutiva das bacias marginais brasileiras, onde a fase rifte foi de curta duração (15-20 Ma), e a fase de subsidência térmica que se seguiu foi uma consequência das características e processos atuantes na etapa tafrogênica que permitiram a dissipação do calor acumulado. Desse modo, levando em consideração que o espaço colocado à disposição para a acomodação do pacote devoniano, se destoa no tempo por um hiato de dezenas de milhões de anos das depressões ou “rifte central” neo-ordoviciano sotoposto, demonstrando tempo suficiente para um reequilíbrio térmico da litosfera. Em suma, o conceito de rifte central independentemente da sua existência tem um caráter meramente descritivo e não genético como mecanismo de subsidência (Figura 8).

Figura 8 – Conceitos de núcleo cratônico e rifte central da Bacia do Paraná



Nota: A ilustração sobrepõe os conceitos de “núcleo cratônico” Cordani *et al.*, 1984 e de “rifte central” Marques *et al.* 1983.

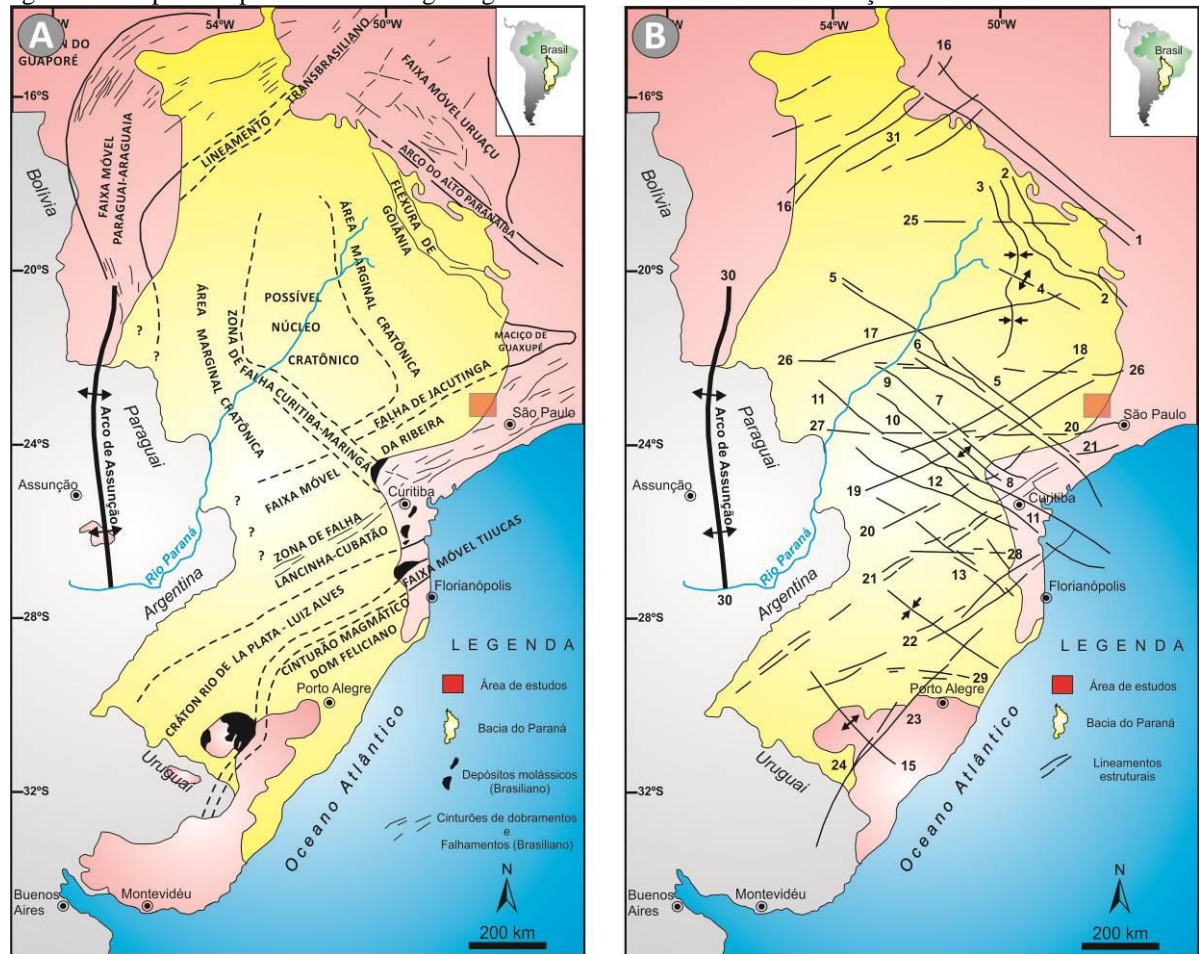
Fonte: Modificado de Milani & Ramos, 1998. Figura 6, p. 477.

A escuridão investigativa por métodos geofísicos e poços lito-estratigráficos que ainda reside nas porções mais profundas da Bacia do Paraná dificultam seu entendimento evolutivo. Vários autores sugerem e concordam que os trends estruturais são herdados de feições mais profundas e pretéritas dadas por zonas de fraquezas do embasamento, podendo ser agrupados, segundo Zalán (1990), em três famílias de lineamentos com direções, idades e propriedades distintas.

Os lineamentos de direção NE-SW, seriam reativações e expressões do trend estrutural vinculado às faixas móveis brasileiras, como as faixas Dom Feliciano e Ribeira que margeiam a leste e a sudeste a bacia, e pelas faixas Paraguai-Araguaia na borda noroeste, bem como o Lineamento Transbrasiliano. Os lineamentos de direção NW-SE por sua vez tem uma origem mais difusa, podendo ter a mesma relação com as faixas móveis supracitadas ou ainda refletoras de estruturas mais antigas, pois a Faixa Uruaçu que norteia a borda nordeste da

bacia possui uma orientação NW-SE e é de idade paleoproterozoica oriunda da Orogênese Transamazônica (1.9 a 2 Ga). Há também registro de um terceiro trend de lineamentos de direção E-W e são pouco compreendidos, aparecem a partir do Triássico e ocorrem em paralelo as zonas de fratura da abertura do Atlântico Sul, estabelecendo assim uma relação genética com o campo de tensões da deriva continental (Figura 9).

Figura 9 – Mapas comparativos entre a geologia do embasamento com o arcabouço estrutural da Bacia do Paraná



Nota: A ilustração faz um comparativo entre uma tentativa de geologia do embasamento da Bacia do Paraná (A) e do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná com os elementos mais importantes conhecidos por direção (B), são eles, NW:

Legenda: 1- Arco do Alto do Parnaíba; 2-Flexura de Goiânia; 3-Baixo de Ipiiaçu/Campina Verde; 4-Alto de Cardoso; 5-Zona de Falha de Guapiara; 6-Falha de Santo Anastácio; 7-Falha de São Jerônimo-Curiúva; 8-Arco de Ponta Grossa; 9-Zona de Falha de Curitiba-Maringá; 10-Falha do Rio Alonzo; 11-Zona de Falha Cândido de Abreu-Campo Mourão; 12-Lineamento do Rio Piquiri; 13-Zona de Falha Caçador; 14-Sinclinal de Torres; 15-Arco do Rio Grande; NE: 16-Lineamento Transbrasiliano; 17-Lineamento de Araçatuba; 18-Falha de Guaxupé; 19-Falha de Jacutinga; 20-Zona de Falha de Taxaquara; 21-Zona de Falha Lancinha-Cubatão; 22-Zona de Falha Blumenau-Soledade; 23-Falha do Leão; 24-Falha do Açotea; E-W: 25-Lineamento de Cassilândia; 26-Lineamento Moji-Guaçu-Dourados; 27-Lineamento de São Sebastião; 28-Lineamento de Taquara Verde; 29-Lineamento de Bento Gonçalves; N-S: 30-Arco de Assunção e 31- Domo de Araguainha.

Fonte: Modificado de Zalán, 1990. Figuras 4 e 3, p. 142 e 139, respectivamente.

Com uma gênese predominantemente refletora à tectônica do embasamento, o padrão com que esses lineamentos se dispõem na bacia pode ser distinguido não somente por sua orientação, mas também pela geometria, distribuição espacial, preenchimento quando existente, estruturas associadas e escala. De modo que, os lineamentos NW-SE são padronizados por falhas fortemente reativadas com o quebraamento do Gondwana, que condicionaram a instalação de diversos diques, soleiras e extrusão do maior derrame de lavas conhecido no planeta, que, na história evolutiva da bacia, configura um importante evento de subsidência por sobrecarga das lavas no pacote sedimentar. Tal evento foi denominado por Almeida (1967) de reativação Wealdeniana e por Schobbenhaus *et al.* (1984) de evento Sul-Atlântico.

Os lineamentos de direção NE-SW por sua vez, parecem não partilhar da mesma resposta à quebra do Gondwana, sem indícios de reativação associada e ausência de diques condicionados a este trend, sendo constituídos no geral, por uma única falha larga ou uma zona de falha retilínea, Zalán (1990). Ambas as famílias de lineamentos NW e NE, podem representar estilos estruturais com rejeito vertical e transcorrente da ordem de poucos a centena de metros, configuradas sob as formas de estruturas em flor, dobras, falhas reversas escalonadas ou grandes falhas normais que podem conjugar-se sob a forma de horsts e grábens. Já as feições relacionadas aos lineamentos de direção E-W são constituídas basicamente por diáclases (Quadro 4).

Quadro 4 –Resumo das principais estruturas na Bacia do Paraná

Lineamentos	Estruturas conhecidas	Descrição / estilo / preenchimento	Relação com o embasamento	Idade
NW-SE	Arco do Alto do Parnaíba; Flexura de Goiânia; Baixo de Ipiacu/Campina Verde; Alto de Cardoso; Zona de Falha de Guapiara; Falha de Santo Anastácio; Falha de São Jerônimo-Curiúva; Arco de Ponta Grossa; Zona de Falha de Curitiba-Maringá; Falha do Rio Alonzo; Zona de Falha Cândido de Abreu-Campo Mourão; Lineamento do Rio Piquiri; Zona de Falha Caçador; Sinclinal de Torres; Arco do Rio Grande.	Falhas e zonas de falhas que ocorrem por toda a bacia e preenchidas normalmente por diques de diabásio e apresentam com frequência estruturas relacionadas a movimentações transcorrentes.	Possivelmente são reativações de zonas de fraqueza do embasamento como a Faixa Uruaçu do Transamazônico	Possivelmente do Mesozoico com uma forte reativação no Juro-Cretáceo
NE-SW	Lineamento Transbrasiliano; Lineamento de Araçatuba; Falha de Guaxupé; Falha de Jacutinga; Zona de Falha de Taxaquara; Zona de Falha Lancinha-Cubatão; Zona de Falha Blumenau-Soledade; Falha do Leão; Falha do Açotea.	Constituídos por uma única falha larga ou por uma zona de falha retilínea. Estruturas transcorrentes e de diques diabásio preenchendo-os apresentam-se com frequência menor aos lineamentos NW-SE	Possivelmente são reativações de zonas de fraqueza do embasamento como as faixas móveis do Brasileiro	Possivelmente do Mesozoico sem reativação no Juro-Cretáceo
E-W	Lineamento de Cassilândia; Lineamento Moji-Guaçu-Dourados; Lineamento de São Sebastião; Lineamento de Taquara Verde; Lineamento de Bento Gonçalves;	Diáclases paralelas as zonas de fratura oceânica	Sem ligação aparente com o embasamento Pré-cambriano	Possivelmente do Juro-Cretáceo
N-S	Arco de Assunção	Grande flexura do embasamento que se estende do Paraguai até o estado do Mato Grosso	Resposta ao soerguimento da crosta aos primeiros movimentos da orogenia da margem oeste	Provavelmente do Permiano (Pereira <i>et al.</i> 2012)

Nota: Além de elencar as principais estruturas conhecidas na Bacia do Paraná, O Quadro ainda mostra suas relações descritivas e genéticas.

Autor: Baseada em Zalán ,1990.

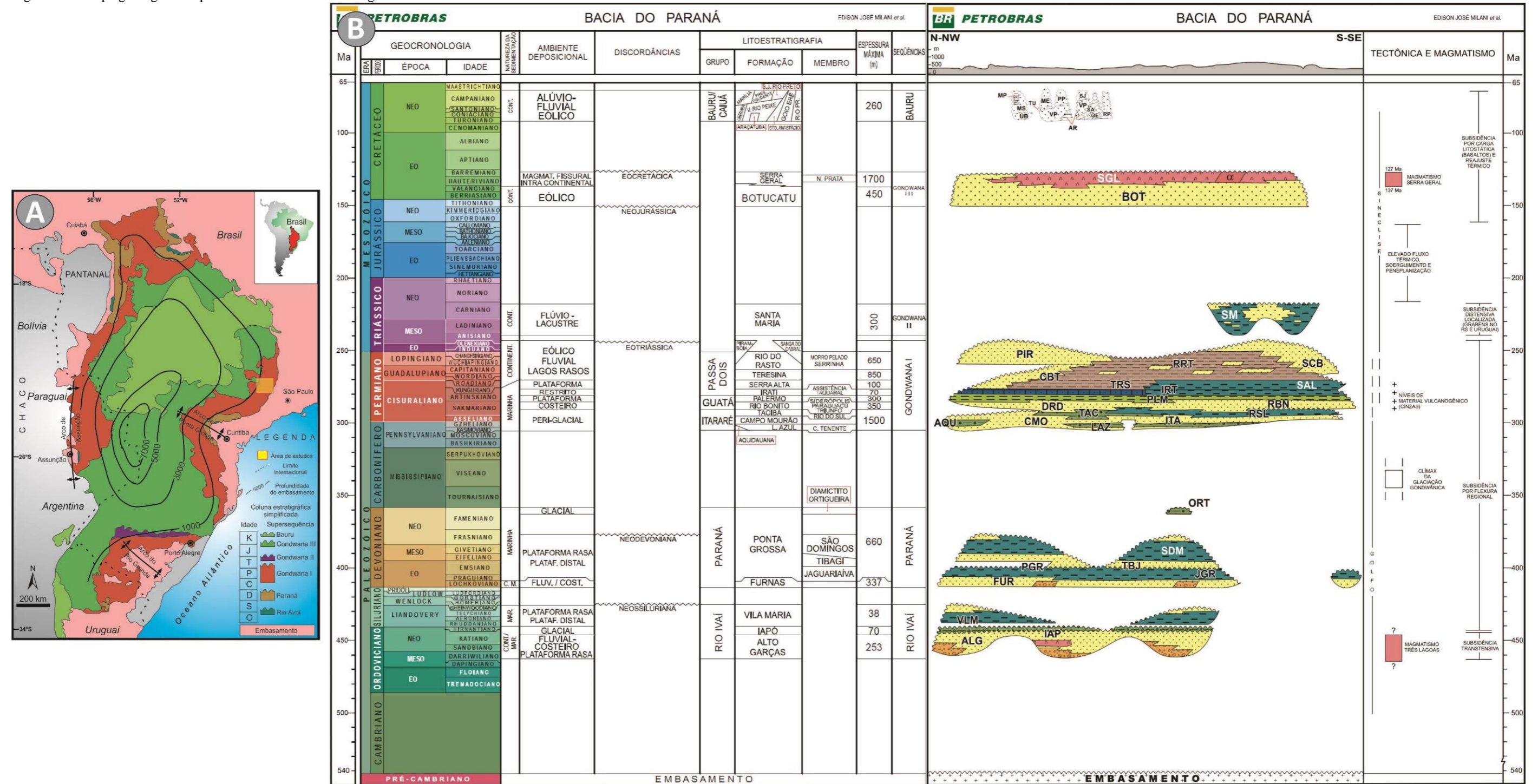
2.3 Arcabouço Estratigráfico

Com mais de um século de discussão acerca de sua origem, evolução e preenchimento sedimentar, ater-se aos limites da síntese sobre um tópico ou conjunto é no mínimo desafiador. Deste modo, este trabalho assumiu como referência principal no que diz respeito à Estratigrafia da Bacia do Paraná, o trabalho de Milani *et al.* (2007), havendo quando necessário por considerar um ponto digno de discussão, a inclusão de outras referências, embora o próprio trabalho citado seja uma soma recente de conhecimentos compilados de vários outros estudos anteriores (Figura 10).

Foram reconhecidas por Milani *et al.* (2007), seis supersequências no registro estratigráfico da Bacia do Paraná, definidas sob a forma de pacotes de rochas envelopados por superfícies de discordância de caráter interregional, intervalados ao longo do tempo geológico à ordem de dezenas de milhões de anos, são elas: Supersequência Rio Avaí (Ordoviciano-Siluriano), Supersequência Paraná (Devoniano), Supersequência Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Supersequência Gondwana II (Meso a Neotriássico), Supersequência Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Supersequência Bauru (Neocretáceo). Cada uma destas seis supersequências é a resposta individualizada a processos de subsidência com naturezas distintas, recorrentes no tempo e persistentes na sua extensão paleogeográfica, produzindo um registro multi-cíclico de grande amplitude geocronológica.

Deu-se as três primeiras supersequências o caráter predominantemente eustático no seu empilhamento ao longo do tempo, tendo suas sucessões sedimentares sido depositadas por ciclos transgressivo-regressivos em resposta a oscilações no nível relativo do mar ao longo do Paleozoico, havendo a partir da Supersequência Gondwana II uma continentalização dos sistemas deposicionais (desertos Piramboia e Botucatu) com forte magmatismo associado. Considerando o contexto tectono-sedimentar do Gondwana sul-ocidental, Milani & Ramos (1998) destacaram que durante o Neo-Ordoviciano, de onde se deu a deposição dos primeiros horizontes sedimentares da Bacia Paraná, a margem do paleocontinente era submetida aos processos da Orogenia Oclóyca com a colisão do Terreno Pré-Cordilherano (Ramos, 1998), o que implicaria em um campo compressivo de esforços que reativaram as discontinuidades do substrato pré-cambriano criando os depocentros motivadores à acumulação da **Supersequência Rio Avaí**. Nesse contexto evolutivo embrionário da bacia, a natureza da sedimentação Rio Avaí assumiu um caráter transgressivo, já que a subsidência intracontinental instalou um imenso golfo permitindo o avanço das águas do Panthalassa continente adentro.

Figura 10 – Mapa geológico simplificado e Carta cronoestratigráfica da Bacia do Paraná



Nota: Em (A), o mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná mostra as seis superseqüências definidas por Milani *et al.* (2007); em (B), Carta Cronoestratigráfica da Bacia do Paraná proposta por Milani *et al.* 2007. Autor: O mapa em (A) foi modificado de Milani (2004), figura 1 página 267; e a Carta cronoestratigráfica (B) retirada na íntegra do Boletim de Geociências da Petrobrás, volume 15, número 2, p. 286-287, ano 2007.

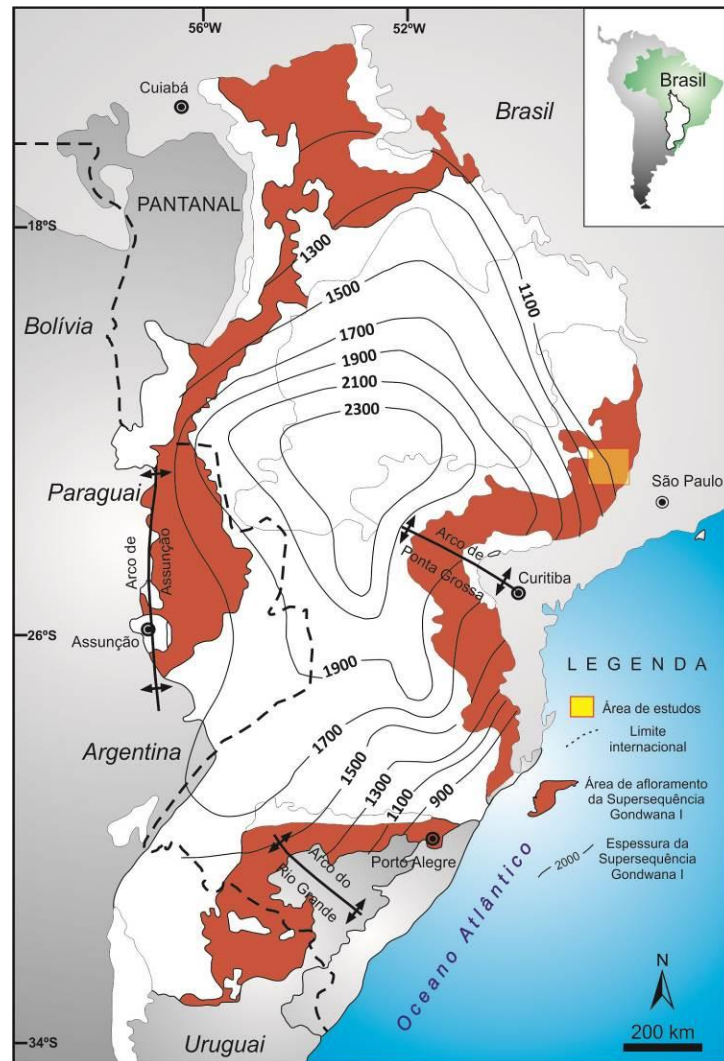
O topo desta supersequência é limitado pela discordância neossiluriana fruto da exposição subaérea dos pacotes sedimentares da Formação Rio Avaí, onde após retorno da subsidência iniciou-se a evolução devoniana da bacia envelopada pela Supersequência Paraná, de grande extensão areal e uma notável uniformidade faciológica, documentando um ciclo transgressivo-regressivo iniciada com os depósitos areno-conglomeráticos da Formação Furnas – de idade eodevoniana – recobertos por um pacote pelítico fossilífero da Formação Ponta Grossa do Emsiano-Frasniano. A discordância neodevoniana (pré-Itararé) define um notável marco na geologia do Gondwana demarcando na Bacia do Paraná uma lacuna em sua história tectono-sedimentar por um significativo hiato de 70 Ma em decorrência as altas latitudes em que se encontrava o paleocontinente no Eocarbonífero, o que propiciou uma extensa glaciação continental que minou outros sistemas deposicionais. À medida que o paleocontinente migrou para norte, houve sob condições periglaciais o início da Supersequência Gondwana I.

Como os elementos do sistema-petrolífero alvo deste trabalho são de idade permotriássica será dado foco no subitem a seguir a Supersequência Gondwana I a continuar a história de tectônica e sedimentação da bacia.

2.3.1 Supersequência Gondwana I

Conjugando o maior volume sedimentar da Bacia do Paraná que pode chegar a isópaca de 2.500 m, a Supersequência Gondwana I envelopa-se sobre a discordância neodevoniana, sendo expressa pela invasão e recuo das águas do Panthalassa no interior do paleocontinente a partir do neocarbonífero com o degelo das calotas polares, havendo continentalização dos sistemas deposicionais no Permiano Inferior, até desertifica-se no Triássico, configurando assim uma sequência carbonífera-eotriássica e dada por um ciclo transgressivo-regressivo completo (Milani 2007). (Figura 11).

Figura 11 – Mapa de Isópacas da Supersequência Gondwana I



Fonte: Modificado de Milani & Ramos 1998. Figura 11, p. 480.

O Grupo Itararé e a Formação Aquiduaana (correspondente na parte setentrional da bacia e diferenciada por generalizada oxidação) conjugam a base sedimentar da supersequência, caracterizados predominantemente por depósitos ligados a fluxos de massa e ressedimentação (diamictitos maciços e estratificados) sob condições periglaciais, e também por ciclos de sedimentação com afinamento de grãos para o topo em resposta a mudanças climáticas dentro do regime glacial.

Lavina & Lopes (1987) chamaram a subida relativa do nível do mar fruto da deglaciação iniciada no neocarbonífero de “transgressão permiana”, sendo responsável pela deposição do Grupo Guatá sucedendo os depósitos glaciogênicos do Grupo Itararé, e expressos na forma de uma cunha transgressiva em onlap de sul para norte de onde se deu a inserção.

Atribuiu-se aos depósitos da Formação Rio Bonito como sendo um extenso front deltaico (Northfleet *et al.* 1969) e com uma notável ciclicidade ora arenosa ora pelítica em

resposta a variações do nível de base da bacia (Schneider *et al.* 1974), havendo também o retrabalhamento dos lobos deltaicos como tendência a transgressão de maior ordem.

É notória a influência marinha na forma de espessos pacotes pelíticos (Membro Paraguaçu) configurando essa tendência transgressiva e a posterior instauração do “mar Palermo” que recobriria toda a bacia. O desenvolvimento de turfeiras que deram origem as camadas carbonosas intercaladas com arenitos finos e siltitos do Membro Siderópolis, unidade superior da Formação Rio Bonito, foram patrocinadas por condições de restrição dessas inserções marinhas que formataram lagunas ao longo da faixa litorânea.

A transgressão permiana chega ao seu ápice com a deposição dos folhelhos cinza-escuros da Formação Palermo configurando a superfície de máxima inundação marinha da Supersequência Gondwana I (Milani, 1997), com um conteúdo bioestratigráfico marcador na zona do Artinskiano (± 280 Ma).

É então que se estabelece com a deposição da Formação Irati um marco estratigráfico altamente fossilífero (que incluem a paleofauna vertebrada de *Mesosaurus* e *Stereosternum* que são provas corroborativas da teoria da deriva continental) e rico em matéria orgânica, patrocinado pela restrição das águas do Panthalassa que constituíram um golfo de caráter hipersalino onde foram depositados carbonatos, evaporitos e folhelhos betuminosos. Localmente, estes podem ter um conteúdo de matéria orgânica na casa dos 20%, sendo esta porcentagem única no registro sedimentar das bacias conhecidas e os qualificam como potencial gerador para os potenciais petrolíferos da Bacia do Paraná.

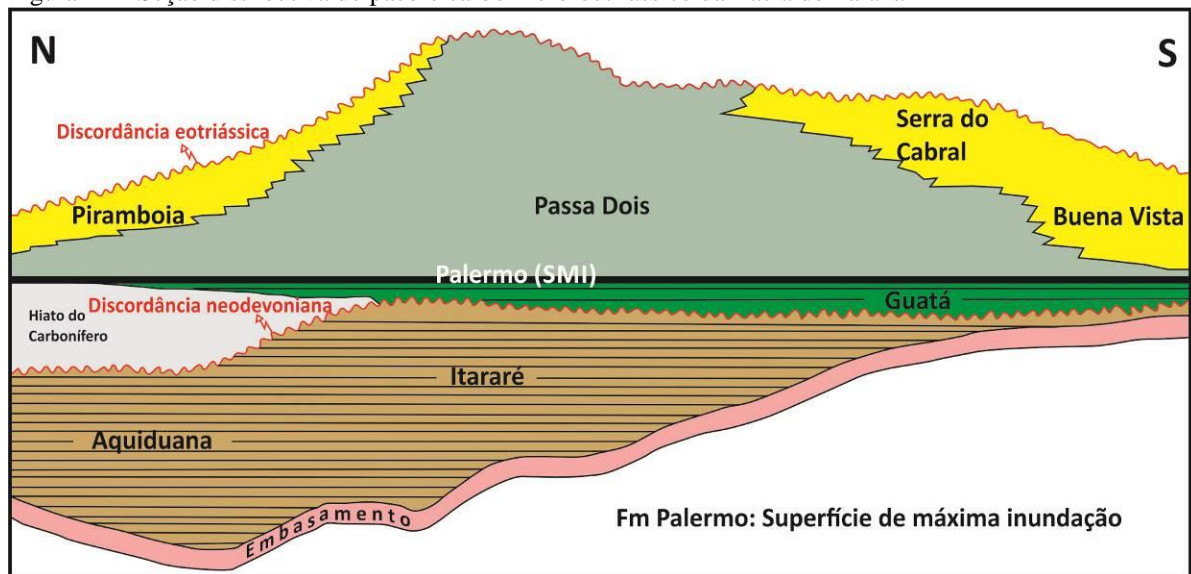
Como geradora do sistema petrolífero em estudo, a Formação Irati será abordada exaustivamente ao longo desta dissertação e em diversas escalas de trabalho.

Sucedem-se após o “afogamento” do “golfo Irati” como última incursão marinha do Panthalassa na Bacia do Paraná, a Formação Serra Alta, denotada por folhelhos cinza-escuros finamente laminados produtos de decantação de argila em ambiente marinho de baixa energia (Gama Jr, 1979).

Depois da última incursão marinha registrada pela Formação Serra Alta, estabeleceu-se uma tendência regressiva em larga escala continentalizando os sistemas deposicionais ligados à ação de marés da Formação Teresina, que tem como equivalente na área de estudos dentro do domínio paulista a Formação Corumbataí. Seguindo o contexto progracional na sedimentação, os pelitos da Formação Teresina evoluem para um registro de red beds que incluem lobos deltaicos, argilitos e siltitos lacustrinos, arenitos eólicos e fluviais da Formação Rio do Rasto ausente no domínio paulista.

A Formação Piramboia perfaz, por fim, a Supersequência Gondwana I como um equivalente lateral do avanço dos sistemas continentais bacia adentro, formatada por depósitos flúvio-eólicos compondo uma cunha que se afina para sudoeste. As ocorrências de arenitos asfálticos de origem eólica da Formação Piramboia, que são alvo de estudo desse trabalho, funcionam como reservatório do sistema petrolífero em estudo e também serão abordados em detalhe ao longo deste documento (Figura 12).

Figura 12 – Seção distributiva do pacore carbonífero-eotriássico da Bacia do Paraná



Nota: A distribuição da Supersequência Gondwana I evidencia a diferença no sentido regional do onlap estratigráfico, que ocorreu na passagem da deposição do Grupo Itararé - onlapando de norte para e sul - para o Grupo Guatá, que onlapa de sul para norte.

Fonte: Milani, 2004, p. 246, figura 14.

Com o aprisionamento da bacia no árido interior do continente com a chegada do Triássico, assume-se a Supersequência Gondwana II representada pela Formação Santa Maria, que ocorre apenas nas porções gaúcha e uruguaia da bacia, como refletora de uma acumulação de bacias do tipo gráben em resposta a distensão que passa a se instaurar no paleocontinente.

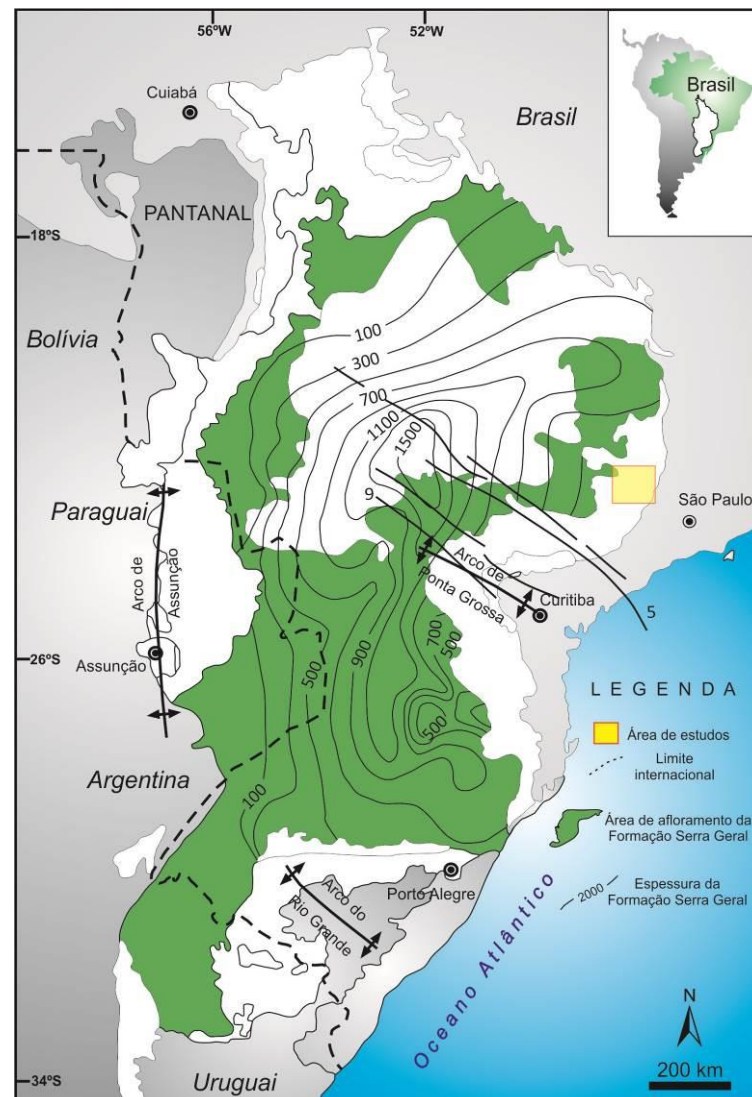
Esse isolamento da bacia no interior do Gondwana resulta no maior hiato do registro sedimentar da Bacia do Paraná causado pela abrasão eólica. É então que com a instauração de um imenso deserto e de extensos campos de dunas da Formação Botucatu que se estabeleceu a Supersequência Gondwana III a partir do final do Jurássico. Nos momentos iniciais da partição do paleocontinente, sucedeu-se um intenso magmatismo basáltico no Eocretáceo, conhecido como Magmatismo Serra Geral e será abordado em maior detalhe no subitem a seguir a respeitar sua importância dentro da história evolutiva da Bacia do Paraná, bem como no Sistema Petrolífero Irati-Piramboia em mira neste estudo.

2.3.2 Magmatismo Serra Geral

O Supercontinente Gondwana começou sua história de partição há cerca de 200 Ma, que acaba por culminar na abertura do Oceano Atlântico há aproximadamente 120 Ma (Mizusaki e Filho, 2004). Nos momentos precusores da abertura, registrou-se em todas as bacias intracratônicas sul-americanas um intenso vulcanismo fissural constituindo uma ampla província magmática no Mesozoico, definida como a maior manifestação ígnea de origem não oceânica e contributiva a uma imensa parcela na geração de crosta continental do planeta no Fanerozoico (Milani, 2007). Tal episódio foi registrado na Bacia do Paraná no Eocretáceo como um magmatismo de basaltos toleíticos e de andesitos basálticos, ocorrendo, subordinadamente, riolitos e riodacitos que formatam a Formação Serra Geral (Peate *et al.* 1992).

A Formação Serra Geral configura-se sobre as formas de uma espessa cobertura de lavas que pode atingir a isópaca de 2.000 m na região do Pontal de Paranapanema no estado de São Paulo (Milani, 2007); por uma intrincada rede de diques cortando a inteira seção sedimentar paleozoica-mesozoica e de múltiplas soleiras de diabásio que intrudem segundo os planos de estratificação dos sedimentos paleozoicos, onde Mizusaki e Filho (2004) acrescentam que estas soleiras tem preferência de instalação nos horizontes da Formação Irati (Figura 13).

Figura 13 – Mapa de isópacas da Formação Serra Geral



Nota: Os lineamentos de direção NW-SE indicados no mapa pelos números 5 e 9 são, respectivamente, as zonas de Falha Guapiara e Curitiba-Maringá.

Fonte: Modificado de Zalán, 1990, figura 15, página 159 e Milani 2004, figura 1, p. 267.

É sabido e apontado por Zalán (1990), que a direção preferencial dos diques de diabásio na Bacia do Paraná é notadamente noroeste e atribuída ao controle estrutural das zonas de falhas Curitiba-Maringá e Guapiara, onde na borda da bacia afloram e através de lineamentos aeromagnéticos seguem por centenas de quilômetros sob o pacote de lavas, o que leva a crer que estas zonas de falhas foram os principais condutos para extrusão/intrusão do magmatismo Serra Geral.

Em termos geocronológicos, Milani (2004 e 2007) compila datações de diversos trabalhos realizados em alvos amostrados em diferentes níveis da capa de lavas, em superfície e subsuperfície, em diques de orientação NW-SE e NE-SW, próximos ao Arco de Ponta

Grossa, e em vários pontos da bacia usando os métodos K/Ar e Ar/Ar, chegando a um conjunto de resultados que permite limitar o evento Serra Geral entre 137 e 127 Ma.

Em contato por uma superfície de discordância erosiva que pode chegar à extensão areal de 400.000 km², repousa sobre o pacote de lavas da Formação Serra Geral os horizontes estratigráficos da Supersequência Bauru (Milani, 2004). Sua deposição se deu no Neocretáceo após o reajuste isostático com a cessão do vulcanismo, que possibilitou a implementação de uma depressão no pacote basáltico (Milani, 2007), onde sob condições climáticas de semi-árido, depósitos areno-conglomeráticos de leques aluviais, e sistemas fluviais distributários o soterraram com o avanço progressivo da sedimentação na forma de lençóis de areia com pequenas dunas e lamitos, sendo esta, a última supersequência da Bacia do Paraná.

2.4 Sistemas Petrolíferos da Bacia do Paraná

São reconhecidos para a Bacia do Paraná pelo menos dois sistemas petrolíferos, um devono-carbonífero chamado de Ponta Grossa-Itararé(!) e outro permotriássico chamado de Irati-Rio Bonito/Piramboia(!).

Segundo Zalán (1990), os folhelhos geradores da Formação Irati suprem os arenitos das formações Rio Bonito e Piramboia. É um *play* para óleo e relativamente raso, com profundidades inferiores a três mil metros, podendo ser inclusive, aflorante, como é o caso das ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia em São Paulo e Santa Catarina. Além dos arenitos asfálticos há shows de óleo em horizontes carbonosos da Formação Rio Bonito, diabásios e basaltos fraturados, além do enorme potencial exploratório não convencional dos folhelhos betuminosos da Formação Irati que constituem o melhor gerador da bacia.

Já o *play* Ponta Grossa-Itararé é para gás e condensado, profundo, com profundidades entre 3 e 4,6 km. A geradora contida na parte superior da Formação Ponta Grossa supre os arenitos do Grupo Itararé, havendo também, reservatórios secundários e locais, arenitos da Formação Furnas, esporádicas lentes arenosas na base da própria Formação Ponta Grossa e soleiras fraturadas como ocorre no *play* permotriássico.

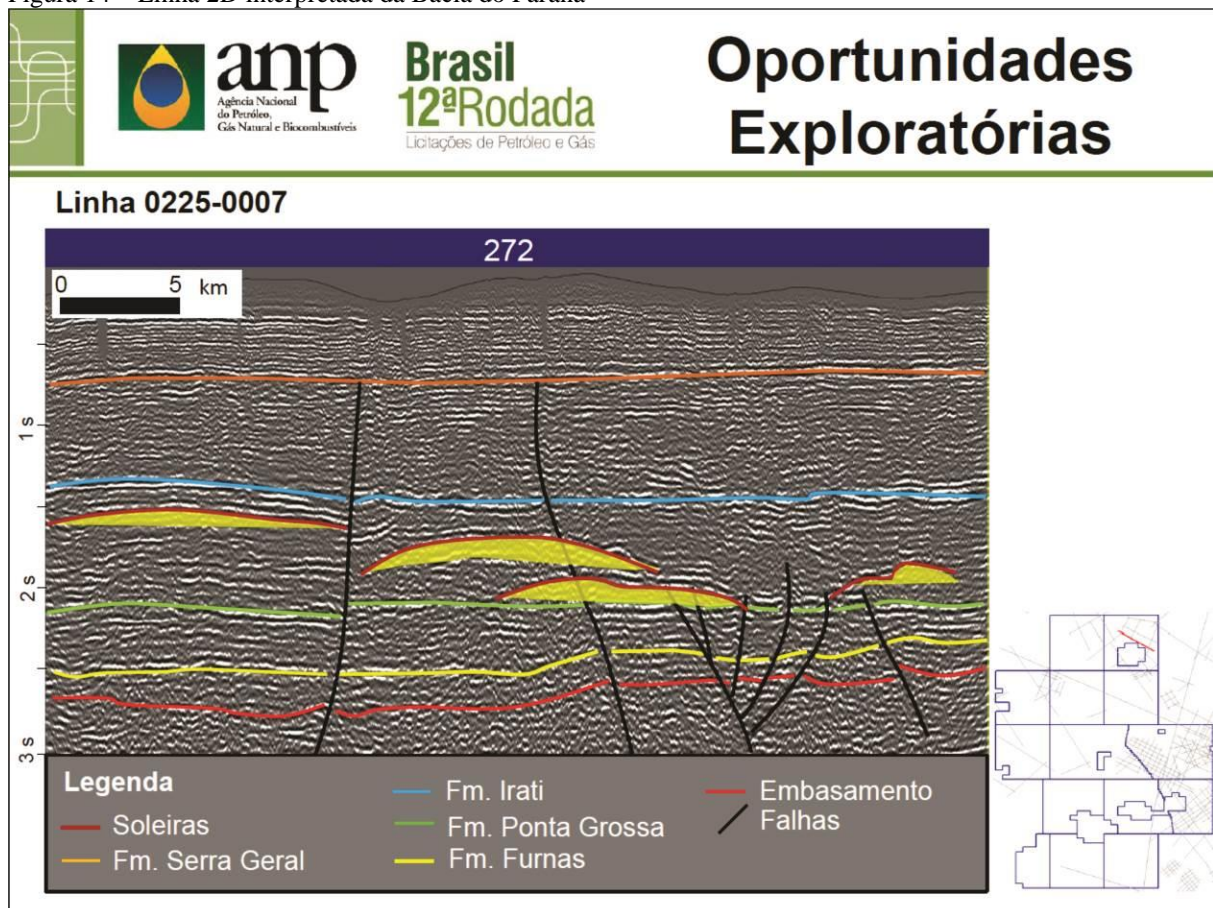
Vale salientar que os processos e sincronismo de eventos que possibilitaram a existência de acumulações estão intrinsicamente ligados ao magmatismo Serra Geral, sendo,

portanto, sistemas petrolíferos com modelo de geração e acumulação não convencionais, e terão notada discussão ao longo de todo este trabalho.

A 12ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás da ANP - a última ocorrida até a data de finalização deste documento - ofertou no dia 28 de novembro de 2013, 19 blocos exploratórios na Bacia do Paraná na categoria de Novas Fronteiras, de onde 16 foram arrematados.

Em justificativa as oportunidades exploratórias oferecidas, a Superintendência de Definição de Blocos da ANP identificou soleiras de diabásio em linhas sísmicas 2D como possíveis trapas de hidrocarbonetos a serem exploradas (Figura 14).

Figura 14 – Linha 2D interpretada da Bacia do Paraná



Nota: A interpretação feita pelo BDEP, mostra soleiras de diabásio como possíveis selos de oportunidades exploratórias para um bloco ofertado em licitação da 12ª Rodada da ANP.

Fonte: Brasil Rounds, 2013, slide 54.

3 ARCABOUÇO TECTONO-ESTRATIGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDOS

3.1 Introdução

Neste capítulo serão usadas diferentes ferramentas de correlação tectônica e estratigráfica na área de estudos, na tentativa de definir um arcabouço tectono-estratigráfico na macro escala, sendo estas: a identificação e verificação de anomalias gravimétricas e magnéticas; lineamentos morfoestruturais extraídos de imagens de radar SRTM através de ferramentas de sensoriamento remoto; geração de modelos digitais de elevação (MDE) e a análise e interpretação de mapas geológicos locais na escala de 1:100.000. Tendo em vista que a área de estudos está inserida em uma bacia há muito pesquisada, o uso de referências nas identificações de feições (lineamentos e geomorfologia) e de anomalias (altos e baixos gravimétricos ou magnéticos) não ficaram apenas no campo da verificação isolada, mas foram comparadas a algo conhecido geologicamente na literatura (estruturas e mapas) e em superfície através de expedições de campo. No que tange a geologia de subsuperfície na escala da sísmica, a correlação tectono-estratigráfica foi feita através da interpretação de linhas sísmicas 2D e será abordada no capítulo seguinte de forma cumulativa e complementar as ferramentas neste utilizadas.

3.2 Gravimetria

3.2.1 Generalidades

A gravimetria investiga a subsuperfície terrestre com base nas variações do campo gravitacional da Terra causadas pela diferença de densidade das rochas que compõem o substrato amostrado. Tendo em vista que a densidade das rochas constituintes do embasamento meta/paraderivado e ígneo é contrastante a dos pacotes sedimentares das bacias, as anomalias gravimétricas são importantes na caracterização da relação do embasamento com a bacia, permitindo distinguir limites, altos e baixos estruturais que estão intrinsecamente

ligados a depocentos ou de soerguimento do embasamento. Permite ainda ressaltar trends estruturais, já que a tectônica e a sedimentação são fatores quase sempre dependentes na dinâmica de preenchimento de uma bacia.

Segundo Kearey *et al.* (2009), as densidades das rochas estão entre os menos variáveis entre todos os parâmetros geofísicos, sendo dependente de sua composição mineralógica e de sua porosidade. O mesmo ainda ressalta que as anomalias gravimétricas resultam do contraste de densidade entre um corpo de rocha (ρ_1) e a sua vizinhança (ρ_2), onde o contraste é dado pela equação (1):

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 \dots \dots \dots (1)$$

Essa relação de contraste de densidades permite estabelecer uma relação anômala também entre os estratos sedimentares presentes na área de estudos com a grande quantidade de corpos intrusivos e de derrame de lavas fruto do Magmatismo Serra Geral (Quadro 5).

Quadro 5 – Densidade para diferentes rochas/sedimentos

Rochas / Sedimentos	Intervalos de densidades (Mg m ⁻³)	Relação com a estratigrafia local
Aluvião (saturado)	1,96-2,00	-
Argila	1,63-2,60	-
Folhelho	2,06-2,66	Formações Teresina, Serra Alta, Irati, Palermo e Rio Bonito.
Arenito (Cretáceo)	2,05-2,35	Formação Botucatu
Arenito (Triássico)	2,25-2,30	Formação Piramboia
Arenito (Carbonífero)	2,35-2,55	Grupo Itararé
Calcário	2,60-2,80	Formação Irati
Giz	1,94-2,23	-
Dolomita	2,28-2,90	-
Halita	2,10-2,40	-
Granito	2,52-2,75	Intrusões brasileiras
Granodiorito	2,67-2,79	Intrusões brasileiras
Basalto	2,70-3,20	Diques, soleiras e derrames da Fm Serra Geral
Gabro	2,85-3,12	Embasamento?
Gnaise	2,61-2,99	Embasamento?
Quartzito	2,60-2,70	Embasamento
Anfibolito	2,79-3,14	Embasamento?

Nota: O Quadro correlaciona também com a estratigrafia da área de estudos.

Fonte: Modificado de Kearey *et al.*, 2009, p. 248, Quadro 6.2.