

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

Marcelo Fagundes de Rezende

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DE ALTA RESOLUÇÃO DO INTERVALO
PRAGUIANO – NEOEMSIANO (FORMAÇÃO PONTA GROSSA), NA
BORDA LESTE DA BACIA DO PARANÁ, COM BASE EM DADOS
GEOQUÍMICOS E SEDIMENTOLÓGICOS.**

Rio de Janeiro
2007

Marcelo Fagundes de Rezende

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DE ALTA RESOLUÇÃO DO INTERVALO PRAGUIANO – NEOEMSIANO (FORMAÇÃO PONTA GROSSA), NA BORDA LESTE DA BACIA DO PARANÁ, COM BASE EM DADOS GEOQUÍMICOS E SEDIMENTOLÓGICOS.

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.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi

Rio de Janeiro
2007

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

R467

Rezende, Marcelo Fagundes.

Análise estratigráfica de alta resolução do intervalo praguiano-neoemiano (Formação Ponta Grossa), na borda leste da Bacia do Paraná, com base em dados geoquímicos e sedimentológicos / Marcelo Fagundes Rezende. – 2007.

85 f. : il.

Orientador : Sérgio Bergamaschi.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geologia estratigráfica – Devoniano - Teses. 2. Paraná, Rio, Bacia do – Teses. I. Sichieri, Rosely. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Medicina Social. III. Título.

CDU551.7

Marcelo Fagundes de Rezende

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DE ALTA RESOLUÇÃO DO INTERVALO PRAGUIANO – NEOEMSIANO (FORMAÇÃO PONTA GROSSA), NA BORDA LESTE DA BACIA DO PARANÁ, COM BASE EM DADOS GEOQUÍMICOS E SEDIMENTOLÓGICOS.

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.

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2007

Banca examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi
Faculdade de Geologia da UERJ (Orientador)

Prof. Dr. Egberto Pereira
Faculdade de Geologia da UERJ

Dr. Edson José Milani
Petrobrás

Rio de Janeiro
2007

DEDICATÒRIA

À vida, por me surpreender a cada instante.

Aos meus pais, Eloísa e Mário. Luzes guias do meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Creio que sou sentimental demais, não por chorar quando estou triste ou rir devido à felicidade, mas por sempre querer o bem daqueles que estão perto de mim e muitas vezes lutar contra a razão. 2006 foi um ano de conquistas e perdas, me permitam rir e chorar.

Ao caminho, em sua plenitude, que a cada dia se mostra diferente e tanto me faz refletir sobre os meus próximos passos. No final, a escolha será minha e posso ver muitas coisas à frente.

Ao Sr. Cláudio Rosanes, mesmo com alguns atritos, sem você o caminho podia ter sido bifurcado algumas vezes e sinto que talvez muitas coisas não teriam acontecido. Saiba que sou grato pela ajuda, atenção e caráter.

Mãe, Pai, amo vocês e os levarei aonde for preciso. Desculpe se algumas vezes sou ausente, na verdade estou sempre pensando em vocês. O acalento que me proporcionam é suficiente para me tranquilizar e escrever esta dissertação.

Ao Prof. Dr. Sérgio Bergamaschi pela orientação acadêmica e pela confiança no meu potencial. Obrigado por tantas vezes prestar auxílio as minhas dúvidas e instruir nos momentos propícios. A seara foi menos tenebrosa.

A todos os professores e funcionários da Faculdade de Geologia da UERJ que em algum momento contribuíram para a elaboração do material desta pesquisa. Tenham-na como um fruto da simbiose desta comunidade.

À Capes, pela bolsa de mestrado no primeiro ano de atividades, foi de excepcional ajuda. Até o momento no qual se fez necessário alçar vôos mais altos para alcançar outros objetivos.

À PETROBRAS por me permitir dispor algum tempo à elaboração desta dissertação, o qual foi utilizado com parcimônia e efetividade.

À Priscilla Alfradique, companheira em todos os momentos. Neste tempo me ensinou que o globo continua a girar. Não posso fechar os olhos para minhas necessidades e lamentos. Sou grato por sua atenção, críticas e aconchego.

Por fim, obrigado a todos. Este trabalho é mais um passo no caminho dos meus sonhos. Sei que não estou sozinho e posso trilhar com mais confiança.

"Só sei que nada sei".

Sócrates (Filósofo) - 470-339 a.C.

"Não há um só efeito na natureza, nem mesmo o menor que existe, de modo que os teóricos mais hábeis possam chegar sempre a uma compreensão total. Esta vã presunção de compreender tudo não pode ter outra base que não seja nunca compreender tudo. Porque alguém que tenha experimentado uma só vez a compreensão perfeita de uma só coisa, e tenha verdadeiramente provado como se chega ao conhecimento, reconheceria que da infinidade de outras verdades nada compreende".

(O ensaiador)

Galileu Galilei (Matemático) - 1564-1642

Humanos...

Resumo

Este trabalho é o resultado da análise estratigráfica de detalhe sobre o registro sedimentar do intervalo Praguiano – Emsiano Superior, realizada em amostras testemunhadas por quatro poços, na seção de afloramentos paleozóicos da borda leste da Bacia do Paraná. A integração dos dados foi realizada a partir das informações obtidas através de sedimentologia, gamaespectrometria e geoquímica orgânica (carbono orgânico total e pirólise Rock-Eval). Desta forma, foram identificados eventos deposicionais de variadas frequências, classificados como duas seqüências deposicionais de 3ª ordem, denominadas “B” e “C”, e seis seqüências de 4ª ordem, denominadas “B1”, “B2”, “B3”, “B4”, “C1” e “C2”. Estes eventos deposicionais representam as variações relativas do nível do mar, ocorridas durante o intervalo estudado, expressas nos tratos de sistemas e superfícies estratigráficas identificados. Em alguns casos, estas variações ocorreram com acentuada ciclicidade no tempo. A cor relação dos poços ao longo de uma seção N-S possibilitou a discussão sobre a continuidade lateral dos máximos transgressivos nas seqüências de 3ª e 4ª ordens. Possibilitou, também, discorrer sobre possíveis fatores locais condicionantes da sedimentação, e sobre as dinâmicas ambiental e sedimentar, na área de estudo. A avaliação dos atributos faciológicos, integrados as ferramentas utilizadas, possibilitou indagar acerca dos principais controles sobre as condições de circulação de sedimentos, de oxigenação da coluna d’água e de preservação da matéria orgânica. Estes métodos em conjunto indicam condições ambientais consideradas marinhas normais, pontuadas por momentos de redução na oxigenação, sem, no entanto, registrar eventos de efetiva anoxia do ambiente de sedimentação. Estas informações sobre a estratigrafia de seqüências, sedimentologia e geoquímica são importantes no estudo da distribuição dos níveis com potencial de geração de hidrocarbonetos, a fim de prospectar áreas mais favoráveis, ao longo da Bacia do Paraná.

Palavras-chave: Estratigrafia. Devoniano da Bacia do Paraná. Formação Ponta Grossa.

Abstract

This work is the result of detailed stratigraphic analysis on the sedimentary record of Praguian–Emsian later interval, established on core samples of four wells in the Paleozoic outcrop section, eastern edge of Paraná Basin. Data set was obtained by means of sedimentology, gamma spectrometry and organic geochemistry (total organic carbon and pirolisis Rock-Eval), and lately integrated. Thus, depositional events with varied frequencies have been identified. These depositional events were classified as being two depositional sequences of 3rd order, termed as “B” and “C”, and six sequences of 4th order, termed as “B1”, “B2”, “B3”, “B4”, “C1” and “C2”. These depositional events typify the relative sea level variations occurred during the studied interval. They were characterized by the systems tracts and stratigraphic surfaces identified. Sometimes, these variations occurred with high cyclicity through the time. The correlation of the wells of a N-S section made possible the discussion about the continuity and lateral expression of the transgressive and regressive maximums in the depositional sequences of 3rd and 4th orders, besides the possible local factors which conditioned the sedimentation and the environmental and sedimentary dynamics. The evaluation of facies attributes, integrated with the utilized tools, helped on the inquiring of the main controls on the sediment circulation, water column oxygenation ratio, and organic matter preservation. These data in set indicated normal marine environmental conditions, with punctuated moments of reduction in oxygenation ration, without, however, show effective anoxic events in the sedimentation environment. These informations about the sequence stratigraphy and sedimentology are important in the study of distribution of levels with hydrocarbons generation potential, throughout of Paraná Basin.

Keywords: Stratigraphy. Parana basin devonian. Ponta Grossa Formation.

Lista de Figuras

- Figura 1** – Mapa de localização dos poços estudados na área da faixa de afloramentos paleozóicos na borda leste da Bacia do Paraná e indicação do traço em mapa da seção de correlação entre os poços elaborada nesta pesquisa..... 10
- Figura 2** – Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com a divisão do registro sedimentar da Bacia do Paraná em seis superseqüências e indicação dos principais elementos estruturais da Bacia. Modificado de Milani et al. (1998)..... 12
- Figura 3** – **a** – Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento, com as principais direções estruturais e a distribuição em subsuperfície e faixas de afloramentos da Formação Ponta Grossa, modificado de Ramos (1970); Zalán et al. (1990); Assine et al. (1998). **b** – Mapa de isopácas da Formação Ponta Grossa com a divisão nas sub-bacias Apucarana e Alto Garças, modificado de Assine et al. (1998); Corrêa & Pereira (2005). 14
- Figura 4** – Reconstrução paleoambiental da distribuição das terras emersas e área do mar epicontinental Devoniano durante o evento de inundação do Emsiano Superior/Eifeliano, 390 Ma. Retirada de Almeida & Carneiro, (2004) e Milani (comunicação verbal). Legenda: 1 - Área emersa; 2- Ambientes sedimentares marinhos; 3 - Ambientes transicionais; 4 - Ambientes sedimentares não-marinhos; 5 - Setas indicativas das principais direções de aporte sedimentar; 6 - Posição estimada do Pólo Sul. Cidades: A - Assunção; B - Brasília; BA - Buenos Aires; Be - Belém; C - Caracas; L - Lima; M - Manaus; P - Porto Alegre; Q - Quito; R -Rio de Janeiro; S – Salvador. 17
- Figura 5** – Representação esquemática de um sistema de plataforma marinha rasa, com destaque para os principais ambientes deposicionais, tipos de sedimentos predominantes em cada área e principais dinâmicas ambientais que podem influenciar a distribuição dos sedimentos à época da sedimentação. 19
- Figura 6** – Seções estratigráficas regionais (N-S e E-O), representativas do Devoniano na Bacia do Paraná, com destaque para a subdivisão da Formação Ponta Grossa em membros, indicação dos principais eventos deposicionais e da curva relativa de variação do nível para o Devoniano. Modificado de Pereira et al. (1998) e Assine et al. (1998). 21
- Figura 7** – Legenda com as convenções e simbologias utilizadas para a caracterização de estruturas sedimentares primárias e secundárias, como também para indicação litológica e da presença de fósseis nos perfis dos poços estudados. 24
- Figura 8** – Diagrama conceitual sugerido por Adams & Weaver (1958) à distribuição de Tório e Urânio em sedimentos e classificação litológica. Quanto

maior a concentração de Th nas rochas maior será sua afinidade com ambientes sedimentares continentais..... 28

Figura 9 – Modelo conceitual simplificado sobre a resposta dos isótopos radioativos de U, Th e K, mensurados nas rochas por gamaespectrometria, às modificações nas condições paleoecológicas e deposicionais do ambiente sedimentar durante fases de variação relativa do nível do mar, bem como suas relações com superfícies estratigráficas. 32

Figura 10 – Diagrama de distribuição entre o índice de hidrogênio e o índice de oxigênio (“Van Krevelen”), mensurados por meio da normalização dos dados de S2 e S3 obtidos por Pirólise Rock Eval com os dados de COT, a fim de classificar e qualificar a matéria orgânica existente nas rochas, modificado de Peters, 1986; Hunt, 1995)..... 34

Figura 11 – Diagrama ternário sugerido por Galloway (1989), que sugere a interação entre três fatores complexos principais (eustasia, tectônica e aporte sedimentar), na construção das seqüências deposicionais durante o tempo geológico. 36

Figura 12 – Fotografias de detalhe dos principais atributos faciográficos (estruturas, litologia, coloração, assembléia icnofossilífera), que permitiram a distinção de cinco fácies sedimentares descritas nos poços estudados. 41

Figura 13 – Perfil composto e divisão estratigráfica do registro sedimentar no poço 1 47

Figura 14 – Perfil composto e divisão estratigráfica do registro sedimentar no poço 2 51

Figura 15 – Diagramas IH vs IO (Van Krevelen), para o poço 3 e para as SIM's das seqüências “B”, “B2” e “C1” descritas no poço 3. Indicam a predominância de matéria orgânica dos tipos I e II, classificadas como de boa qualidade e associadas a algas e cutículas vegetais respectivamente. 53

Figura 16 – Perfil composto e divisão estratigráfica do registro sedimentar no poço 3. 56

Figura 17 – Elementos petrográficos que permitem sugerir um trato de sistemas transgressivo no intervalo de profundidade, no qual foram amostrados, poço 4, prof. 123,3 m. **a** Bioclasto carbonático – Obj. 20X e **b** pellet de glauconita – Obj. 40x. Ambas as fotomicrografias são apresentadas com polarizadores paralelos a esquerda e cruzados a direita. 59

Figura 18 – Estutura sedimentar erosiva interpretada como um Lag transgressivo que marca o limite basal de seqüência da seqüência deposicional “B3”, poço 4, prof. 99 m.	60
Figura 19 – Presença de moscovita expandida anterior a compactação mecânica dos grãos devido ao soterramento. Este elemento petrográfico pode ser interpretado como uma provável indicação de condições de mar baixo e/ou influxo meteórico que permitiram a percolação de água e alteração do grão, condizente com a interpretação estratigráfica elaborada neste intervalo do poço 4, prof. 49,5 m. Fotomicrografias obtida com Objetivas de. 20x. Polarizadores paralelos a direita e cruzados a esquerda.	62
Figura 20 – Perfil composto e divisão estratigráfica do registro sedimentar no poço 4	63
Figura 21 – Seção de correlação entre os poços com destaque para as seqüências de 3ª e 4ª ordens.....	65
Figura 22 – Diagramas Th vs Th/U para classificação de sedimentos. A distribuição dos dados permite a classificação dos sedimentos, dos quatro poços estudados, no campo dos folhelhos marinhos. Permite também indicar que os sedimentos foram depositados preferencialmente, em condições ambientais marinhas normais, em relação ao seu caráter de pale oxigenação. Modificados do diagrama proposto por Adams & Weaver (1958).	69
Figura 23 – Curvas de variação relativa do nível do mar para as seqüências de terceira e quarta ordens para a seção praguiana - emsiana superior. Foram construídas a partir das relações estratigráficas interpretadas na seção de correlação, considerando as principais variações litológicas e anomalias observadas nos perfis estudados para a distinção da magnitude de cada evento indicado.....	70

Sumário

Capítulo I. Introdução.....	7
I.I. Apresentação.....	7
I.II. Relevância da pesquisa.....	8
I.III. Objetivos.....	8
I.IV. Base de Dados.....	9
Capítulo II. Contexto Geológico.....	11
II.I Bacia do Paraná.....	11
II.I.I. Arcabouço Tectônico.....	13
II.I.II. Estratigrafia.....	15
II.II. Borda Leste da Bacia do Paraná.....	18
II.III. Formação Ponta Grossa.....	18
Capítulo III. Métodos.....	22
III.I. Sedimentologia.....	22
III.I.I Bases Conceituais.....	22
III.I.II. Procedimentos.....	23

III.II. Teores de Carbono Orgânico Total (COT).....	25
III.II.I. Bases Conceituais.....	25
III.II.II. Processamento das amostras.....	26
III.III Gamaespectrometria.....	27
III.III.I Bases Conceituais.....	27
III.III.II Procedimentos.....	30
III.IV Pirólise Rock-Eval.....	33
III.IV.I Bases Conceituais.....	33
Capítulo IV. Análise Estratigráfica.....	35
IV.I – Descrição de fácies sedimentares.....	38
IV.I.I – Folhelho siltico com laminação plano-paralela (aa).....	39
IV.I.II – Siltito arenoso com laminação plano paralela bioturbado (ab).....	39
IV.I.III – Interlaminado entre folhelho siltico / arenito muito fino a fino com laminação cruzada por onda (βa).....	39
IV.I.IV – Arenito fino com microestratificação cruzada hummocky ou maciço (γa).....	40
IV.I.V – Interlaminado entre arenito fino a médio lenticular com estratificação cruzada por onda e folhelho siltico cinza bioturbado(γb).....	40

IV. II – Poço 1.....	42
IV.II.I – Estratigrafia de seqüências.....	42
IV.III – Poço 2.....	48
IV.III.I – Estratigrafia de Seqüências.....	48
IV.IV – Poço 3.....	52
IV.IV.I – Estratigrafia de Seqüências.....	52
IV.V – Poço 4.....	57
IV.V.I – Estratigrafia de Seqüências.....	57
Capítulo V. Correlação estratigráfica.....	64
V.I – Considerações iniciais.....	64
V.II – Análise dos dados.....	64
V.III – Interpretação.....	66
Capítulo VI – Análise do Devoniano Inferior (Praguiano – Emsiano Superior), na borda leste da Bacia do Paraná.....	70
VI.I – Sedimentação.....	70
VI.II – Potencial para geração de hidrocarbonetos.....	72
Capítulo VII - Conclusões.....	74
Capítulo VIII. Referências Bibliográficas.....	78

Capítulo I. Introdução.

I.I. Apresentação

O Devoniano da Bacia do Paraná representa uma área clássica de estudos do Paleozóico Brasileiro, constituindo-se também em área de grande interesse nos estudos paleogeográficos do Gondwana. Desde longa data (e.g. Clark, 1913) seus fósseis despertam grande interesse científico. Estudos detalhados sobre a evolução estratigráfica do Devoniano são encontrados desde épocas pioneiras até períodos mais recentes (Petri, 1948; Lange & Petri, 1967; Melo, 1985, entre outros). No entanto, estudos de detalhe, com integração da geoquímica e da estratigrafia de seqüências, somente vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, tendo como referência os trabalhos de pesquisadores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Durante o Devoniano houve um importante evento de elevação do nível do mar relacionado a intervalos com alto potencial para geração de hidrocarbonetos nas bacias sedimentares paleozóicas do mundo. Este evento marca na Bacia do Paraná uma fase de grande transgressão marinha (Soares *et al.*, 1978; Milani *et al.*, 1998), durante a qual foram depositadas argilas e areias, em um mar epicontinental caracterizado por uma plataforma em rampa de águas pouco profundas, com forte influência de tempestades (Assine *et al.*, 1994). O registro sedimentar desta fase é denominado Formação Ponta Grossa.

A presente pesquisa não busca exaurir as questões acerca da evolução da bacia ou dos eventos ocorridos no Devoniano, mas sim realizar o detalhamento estratigráfico e analisar as modificações geoquímicas e sedimentológicas observadas no registro sedimentar estudado. Por ser a bacia um sistema complexo, seu entendimento não pode ser concebido com a utilização de métodos aplicados isoladamente. Neste sentido, para distinguir os controles da sedimentação e definir os elementos de ciclos de distintas freqüências, torna-se

necessário utilizar uma abordagem integrada, alimentada por múltiplas fontes de informação. A abordagem adotada nesta pesquisa baseia-se na utilização da estratigrafia de seqüências como ferramenta metodológica principal, a qual foi associada a informações geoquímicas, sedimentológicas, bioestratigráficas e de gamaespectrometria e analisadas suas inter-relações.

I.II. Relevância da pesquisa

O maior detalhamento dos estudos de caracterização estratigráfica e geoquímica da Formação Ponta Grossa, em escala de ciclos de médias e altas freqüências (3ª, 4ª ordens), tem apresentado uma grande eficiência no entendimento da evolução deste intervalo. Neste contexto, tais estudos vêm contribuindo sobremaneira, tanto sob o ponto de vista acadêmico (reconhecimento e rastreamento de superfícies de inundação marinha bacia adentro e correlação desses intervalos com outras bacias gondwânicas), como também, sob o ponto de vista econômico (através da avaliação mais criteriosa do potencial gerador desses intervalos enriquecidos em matéria orgânica, em termos de petróleo ou gás).

I.III. Objetivos

Os objetivos que se pretendem alcançar nesta pesquisa são:

Estabelecer a divisão estratigráfica do registro sedimentar estudado e destacar os principais elementos da estratigrafia de seqüências, com base em dados geoquímicos e sedimentológicos. A concepção estratigráfica adotada segue os preceitos definidos inicialmente pela escola da *Exxon* e atualizados, subsequentemente, desde sua divulgação original no *Memoir 26* da AAPG.

Correlacionar o registro sedimentar estudado em diferentes localidades da borda leste da Bacia do Paraná, a fim de possibilitar análises sobre a dinâmica deposicional local e suas variações laterais. Em conjunto, verificar a influência

destas variações na distribuição espacial dos níveis com maiores potenciais para geração de hidrocarbonetos.

Identificar a inter-relação de padrões entre os diferentes métodos utilizados nesta pesquisa e associá-los a características dos ambientes deposicionais. A análise destes padrões permitirá a realização de discussões mais refinadas sobre as condições ambientais à época da deposição do registro sedimentar.

I.IV. Base de Dados

A base de dados central da pesquisa refere-se aos testemunhos de quatro sondagens rasas realizadas em anos recentes no Devoniano da borda leste da Bacia do Paraná, quais sejam: a) Três sondagens perfuradas na década de 90 pela PETROBRAS, durante o desenvolvimento do Projeto Ponta Grossa (Furos PPGs); b) Uma sondagem realizada pelo DEPA-FGEL-UERJ no ano de 2004 durante o desenvolvimento do Projeto PALEOSUL (convênio UERJ-FINEP-PETROBRAS). Tais informações pertencem ao banco de dados do Projeto Paleosul desenvolvido por pesquisadores do DEPA, nos anos 2002 a 2005, sob a coordenação do Prof. Dr. Egberto Pereira.

As sondagens estão localizadas na faixa de afloramentos paleozóicos da borda leste da Bacia do Paraná (Figura 1), nos municípios de Jaguariaíva, Tibagi e Palmeira, no Estado do Paraná. Nessas quatro sondagens foram recuperados cerca de 470 metros de testemunhos referentes à Formação Ponta Grossa. Sobre os quais foram coletadas amostras, sistematicamente a cada 30 cm em média. As informações bioestratigráficas disponíveis obtidas a partir desses testemunhos foram interpretadas por Grahn (2002) e Gaugris (2004) e posicionam o registro estudado no intervalo Praguiano – Emsiano Superior.

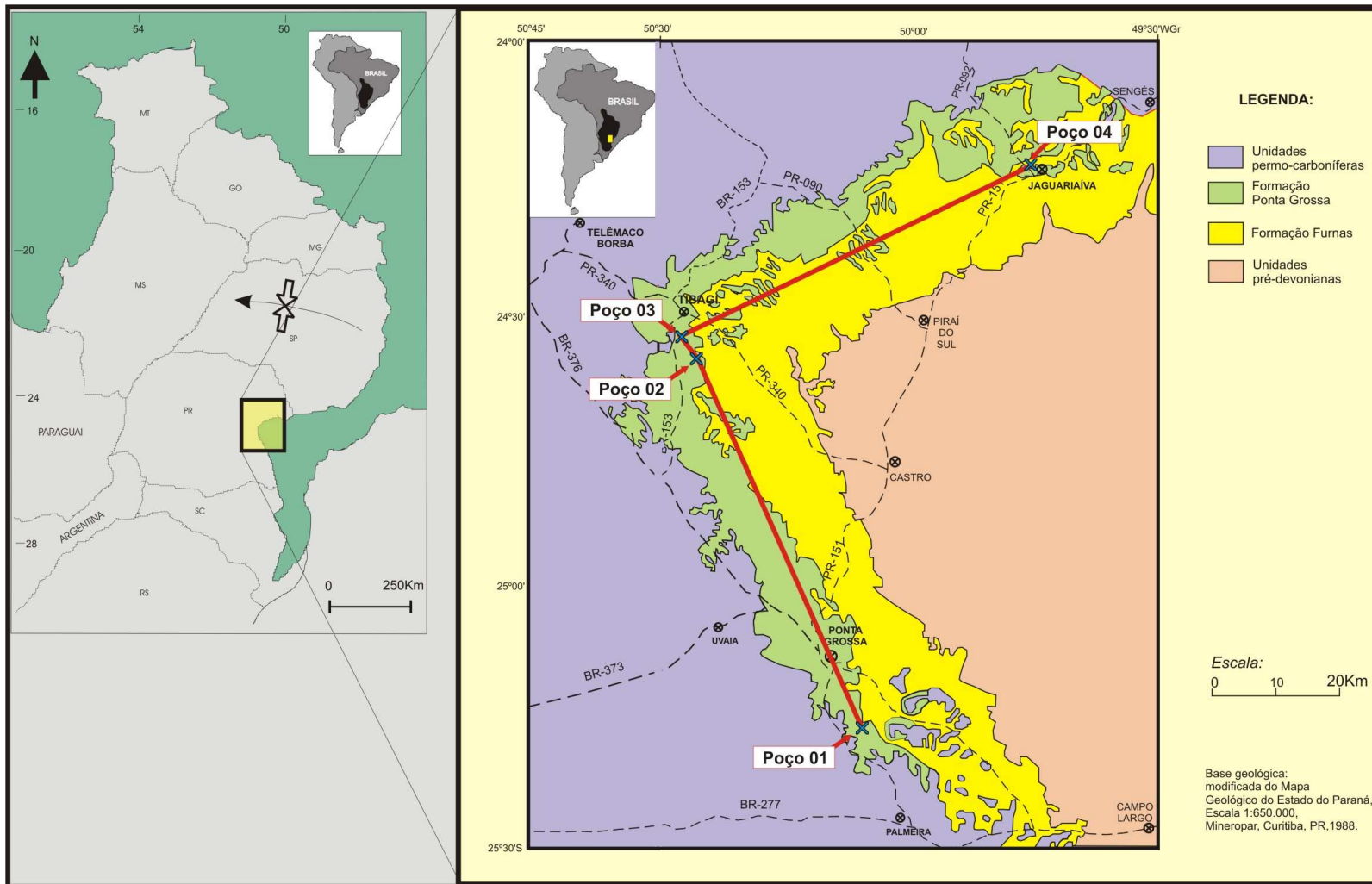


Figura 1 – Mapa de localização dos poços estudados na área da faixa de afloramentos paleozóicos na borda leste da Bacia do Paraná e indicação do traço em mapa da seção de correlação entre os poços elaborada nesta pesquisa.

Capítulo II. Contexto Geológico

II.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é classificada como uma bacia sedimentar de interior continental, situada no sudoeste da América do Sul. Recobre vasto território no Brasil (cerca de 1000000 Km²) e estende-se pelo Paraguai, Argentina e Uruguai (cerca de 400000 Km²). Seu registro litológico envolve cerca de 6000 metros de rochas sedimentares e vulcânicas (Milani *et al.*, 1998), de idades a partir de ordovicianas e distribuídas em um intervalo em torno de 385 Ma.

Durante este intervalo de tempo, a bacia passou por longos períodos de subsidência e acumulação de sedimentos intercalados com igualmente longos períodos de soerguimento. Estes eventos originaram discordâncias regionais, que podem representar hiatos de dezenas de milhões de anos (Soares *et al.*, 1978; Milani *et al.*, 1998). Um mapa simplificado dos diferentes estágios de deposição limitados por discordâncias (superseqüências), que ocorreram na bacia pode ser observado na figura 2.

Milani (2004) argumenta que o atual contorno da bacia desenvolveu-se como um reflexo de fenômenos posteriores ao Paleozóico que atuaram no continente sul-americano. Estes fenômenos foram responsáveis pela subtração de grandes áreas deposicionais pretéritas. Entre estes, destaca as feições originadas pelo soerguimento marginal ao *rift* do Atlântico Sul, que expôs tanto o embasamento da bacia, como a faixa de afloramentos paleozóicos da Borda Leste da Bacia do Paraná.

O Período Devoniano representa na Bacia do Paraná, de acordo com Soares *et al.* (1978) e Milani *et al.* (1998), uma época de amplo afogamento marinho, na qual foi desenvolvido um mar epicontinental caracterizado por uma plataforma em rampa pouco profunda, dominada por ondas (Assine *et al.*, 1994).

Águas frias predominaram neste mar até o Givetiano, quando foi estabelecida a entrada de correntes marinhas quentes vindas do norte (Freitas-Brazil, 2004).

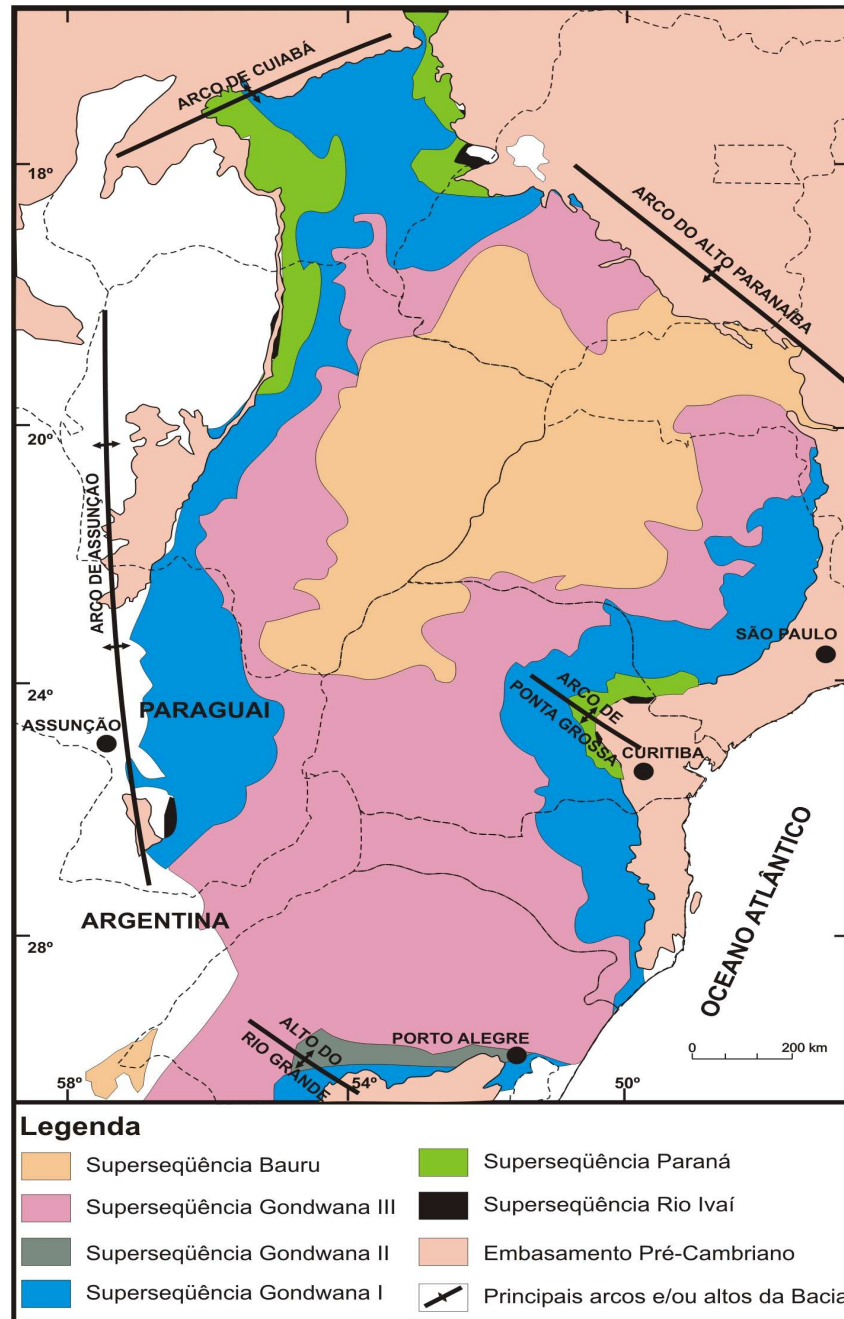


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com a divisão do registro sedimentar da Bacia do Paraná em seis superseqüências e indicação dos principais elementos estruturais da Bacia. Modificado de Milani et al. (1998).

II.1.1. Arcabouço Tectônico

A Bacia do Paraná corresponde a uma sinéclise intracontinental, desenvolvida sobre rochas metamórficas formadas no Evento Brasileiro 800 a 450 Ma (Milani *et al.*, 1998). Seu maior eixo está alinhado na direção NE-SW (figura 3a). Os mecanismos estruturais que permitiram sua abertura são pouco conhecidos. A hipótese mais aceita é a de abertura por fraturas interiores (Raja Gabaglia & Figueiredo, 1990), sobre as quais foram desenvolvidos *grabens* alongados, com direção NE-SW (Milani *et al.*, 1996).

A configuração tectônica da bacia é resultante da movimentação de estruturas regionais ativas em diferentes épocas e com diferentes direções. Estas estruturas muitas vezes se interceptam (figura 3a), e estabelecem na bacia uma compartimentação em blocos estruturais (Zalán *et al.*, 1990; Pereira, 2000). Algumas destas tiveram um caráter sindeposicional e controlaram os depocentros da bacia e variações faciológicas laterais (Ramos, 1970), devido a modificações no espaço disponível para a acumulação dos sedimentos.

Curvas de subsidência apresentadas por Quintas *et al.* (1997) indicam três grandes episódios distensivos principais, com idades de 440Ma, 350Ma e 144Ma. Estes eventos estão associados à preservação de importantes registros sedimentares na bacia e correspondem às deposições das seqüências siluriana e devoniana, do Grupo Itararé e aos derrames da Formação Serra Geral.

Estudos de anomalias de espessuras realizados por Artur & Soares (2002), indicam que no Devoniano, as principais estruturas da bacia estavam relacionadas a altos e baixos estruturais sindeposicionais alongados para NW e estruturas NE-SW, com controle estrutural da sedimentação. Esta estruturação permitiu uma diferenciação em duas sub-bacias, quais sejam: Apucarana, a sudoeste, e Alto Garças, a noroeste (figura 3b). Cabe ressaltar que a primeira apresenta registros de ambientes deposicionais mais profundos (Ramos 1970; Assine *et al.*, 1998).

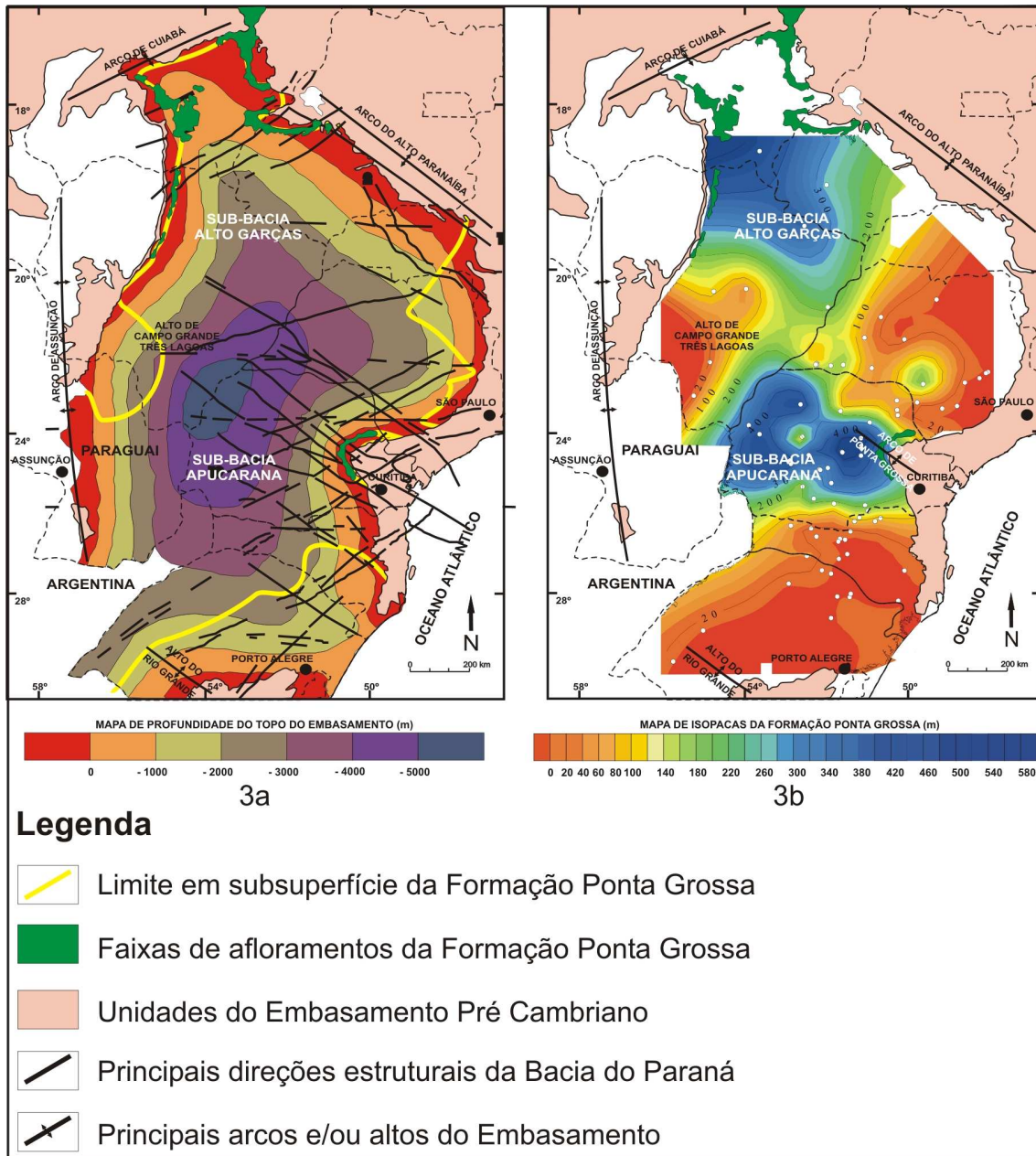


Figura 3 – a – Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento, com as principais direções estruturais e a distribuição em subsuperfície e faixas de afloramentos da Formação Ponta Grossa, modificado de. Ramos (1970); Zalán et al. (1990); Assine et al. (1998). **b** – Mapa de isopacas da Formação Ponta Grossa com a divisão nas sub-bacias Apucarana e Alto Garças, modificado de. Assine et al. (1998); Corrêa & Pereira (2005).

II.1.II. Estratigrafia

Durante a evolução tectônica da Bacia do Paraná ocorreram vários episódios de sedimentação e vulcanismo, que deixaram como registro sedimentar rochas de idades paleozóicas, mesozóicas, lavas basálticas e, localmente, rochas cenozóicas (Schneider *et al.*, 1974; Milani *et al.*, 1998). O estudo deste registro sedimentar apresenta grande importância, pois o mesmo é a representação direta dos eventos geológicos ocorridos no planeta desde a formação do supercontinente Gondwana.

Estes registros foram classificados por Soares *et al.* (1978) e Milani (1997), de acordo com sua associação a estes eventos. Serão utilizados os conceitos propostos por Milani (1997) que caracterizou para a Bacia do Paraná seis superseqüências denominadas: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru.

A superseqüência Rio Ivaí representa o intervalo Ordoviciano – Siluriano e agrupa as rochas sedimentares mais antigas da bacia (Milani *et al.*, 1994), em uma unidade litoestratigráfica definida como Grupo Rio Ivaí.

Ocorrem a partir da base, da seqüência Rio Ivaí, pacotes de arenito (Formação Alto Garças), sotopostos por diamictitos (Formação Iapó). Folhelhos e siltitos marinhos denominados Formação Vila Maria (Milani *et al.*, 1994), que representam a primeira incursão marinha (transgressão) na bacia caracterizada por sua assembléia fossilífera marinha, com destaque à presença de trilobitas (Andrade & Camarço, 1980).

No Devoniano ocorre a implantação de um novo ciclo transgressivo-regressivo, que caracteriza a superseqüência Paraná (Milani, 2004), representada pelo grupo homônimo. Este grupo compreende, a partir da base, a Formação Furnas, com depósitos fluviais, transicionais e costeiros (Bergamaschi, 1992), e a

Formação Ponta Grossa composta por folhelhos, siltitos e arenitos, depositados em ambiente marinho pouco profundo (Schneider *et al.*, 1974; Andrade & Camarço, 1982). Este ambiente era um grande golfo com efetiva conexão com as incursões de águas oceânicas do Panthalassa a oeste (Milani, 2004). A partir do Neo – Emsiano / Eifeliano, foi desenvolvida a ligação entre as Bacias do Paraná e do Parnaíba (Melo, 1985). Nesta idade, foi estabelecido um extenso mar interior (figura 4), com importantes modificações ambientais refletidas na sucessão faunística (Almeida & Carneiro, 2004).

A expressiva erosão carbonífera registrada por toda a bacia, marca o limite basal da superseqüência Gondwana I. Os registros referentes a esta superseqüência são observados do Carbonífero ao Triássico Inferior e englobam as rochas dos Grupos Itararé, Guatá e Passa Dois. Essas unidades são representadas, respectivamente, por depósitos de ambiente glacial, depósitos deltáicos e de plataforma marinha rasa. Por fim, passam a prevalecer condições de mares restritos com tendência a continentalização (Milani *et al.*, 1994).

Os registros das três superseqüências restantes correspondem a um contexto francamente continental, oriundo dos processos de continentalização e, em paralelo, de desertificação, iniciados durante o Triássico Inferior. Foram denominadas por Milani (1997), como Gondwana II, Gondwana III e Bauru e compreendem registros sedimentares do Triássico, Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior e Cretáceo Superior.

A Superseqüência Gondwana II é composta por arenitos acumulados em sistemas flúvio-eólicos e lacustres rasos, das formações Pirambóia e Rosário do Sul (Schneider *et al.*, 1974). A superseqüência Gondwana III corresponde a um sistema desértico, marcado por campos de dunas da Formação Botucatu e de derrames basálticos da Formação Serra Geral, relacionados ao magmatismo inicial da abertura do Atlântico Sul, por vezes ocorrendo intercalados. Os últimos registros correspondem aos depósitos continentais areno-conglomeráticos dos

Grupos Bauru e Caiuá que ocuparam a depressão gerada por subsidência, relativa a carga dos derrames basálticos (Milani *et al.*, 1994).

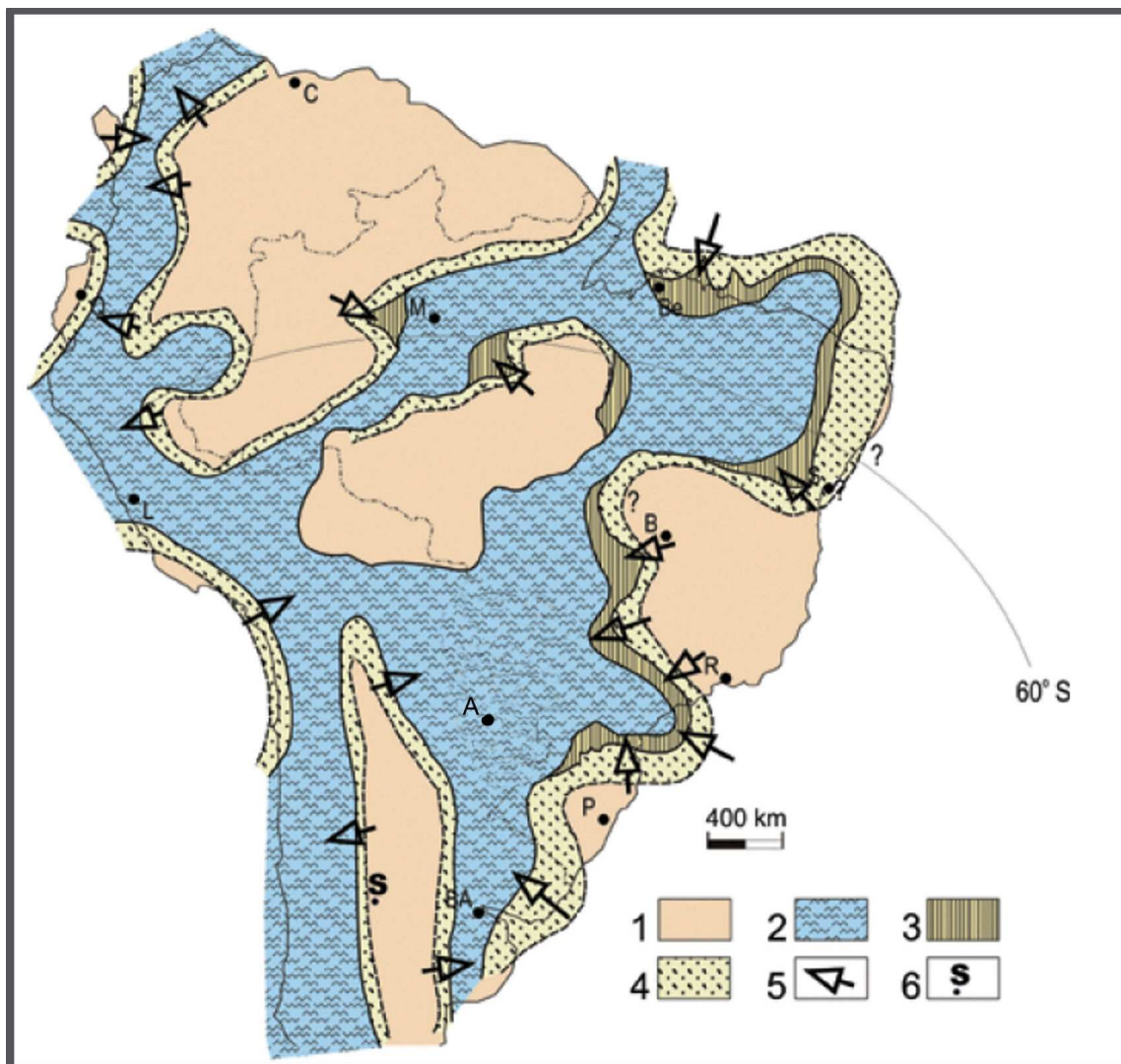


Figura 4 – Reconstrução paleoambiental da distribuição das terras emersas e área do mar epicontinental Devoniano durante o evento de inundação do Emsiano Superior/Eifeliano, 390 Ma. Retirada de Almeida & Carneiro, (2004) e Milani (comunicação verbal). Legenda: 1 - Área emersa; 2 - Ambientes sedimentares marinhos; 3 - Ambientes transicionais; 4 - Ambientes sedimentares não-marinhos; 5 - Setas indicativas das principais direções de aporte sedimentar; 6 - Posição estimada do Pólo Sul. Cidades: A - Assunção; B - Brasília; BA - Buenos Aires; Be - Belém; C - Caracas; L - Lima; M - Manaus; P - Porto Alegre; Q - Quito; R -Rio de Janeiro; S – Salvador.

II.II. Borda Leste da Bacia do Paraná

As rochas paleozóicas da bacia têm boa exposição na borda leste da Bacia do Paraná como resultado do soerguimento mesozóico do Arco de Ponta Grossa, uma feição estrutural marcante na bacia, cuja gênese é comumente associada a eventos magmáticos juro-cretácicos relacionados à abertura da margem atlântica. A esses eventos magmáticos se associam freqüentemente corpos intrusivos básicos, que na região do Arco de Ponta Grossa, em geral, preenchem fraturas de direção NW.

Ramos (1970) sugere, com base em mapas de isópacas, que a atividade tectônica do Arco de Ponta Grossa teve início durante o Permiano Inferior, tendo em vista a diminuição de espessuras de unidades pós-carboníferas neste domínio.

Esta faixa de afloramentos paleozóicos é uma área de interesse científico, pois permite o estudo em superfície e/ou em aquisições rasas em subsuperfície das rochas depositadas durante o Paleozóico, auxiliando na compreensão da evolução da bacia. Os depósitos da Formação Ponta Grossa, que ocorrem nesta área, correspondem à plataforma marinha (Assine *et al.*, 1998) e situações costeiras (Popp & Barcellos-Popp, 1986) do mar devoniano.

II.III. Formação Ponta Grossa

As rochas aflorantes na região de Ponta Grossa no Estado do Paraná foram designadas como folhelhos Ponta Grossa por Oliveira (1912). Geograficamente, a unidade cunhada como Formação Ponta Grossa distribui-se do Norte do Estado de Santa Catarina, a sul, até os Estados de Mato Grosso e Goiás, a norte.

O ambiente deposicional da Formação Ponta Grossa é representado por uma plataforma marinha em rampa de águas pouco profundas, conforme exposto na figura 5 (Schneider *et al.*, 1974; Andrade & Camarço, 1980; Assine *et al.*, 1994). Em geral, esta se apresentava dominada pela ação de ondas, com forte

influência de tempestades, sendo o registro sedimentar desenvolvido por sedimentações episódicas (Assine *et. al.*, 1998). Este ambiente está sujeito a variações ambientais de diferentes escalas e devido ao caráter do seu registro possibilita a identificação de eventos e ciclos sedimentares de ordens hierárquicas distintas.

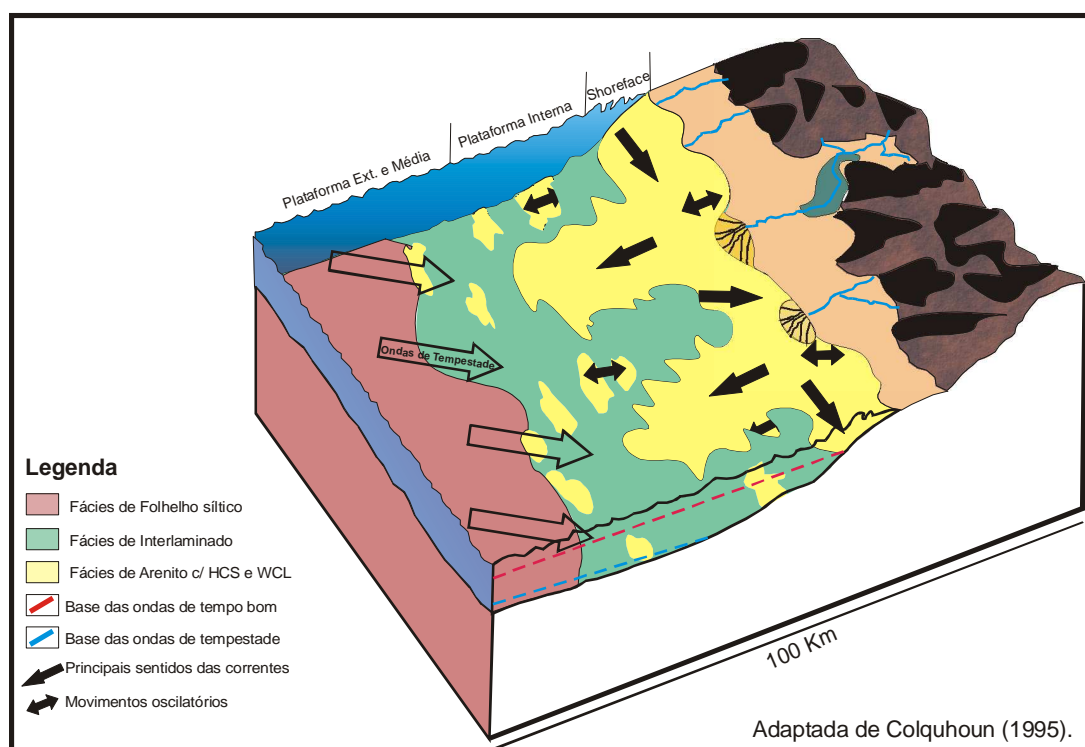


Figura 5 – Representação esquemática de um sistema de plataforma marinha rasa, com destaque para os principais ambientes deposicionais, tipos de sedimentos predominantes em cada área e principais dinâmicas ambientais que podem influenciar a distribuição dos sedimentos à época da sedimentação.

Esta unidade foi dividida por Lange & Petri (1967) em três membros denominados, a partir da base, de Jaguariaíva, Tibagi e São Domingos. Esta divisão pode ser visualizada na figura 6. O primeiro é caracterizado por folhelhos silticos, com freqüente bioturbação, rica assembléia fóssil e por intervalos de folhelhos pretos, com teores altos de matéria orgânica. A idade atribuída a este

membro é praguiana-emsiana e apresenta espessuras que variam, entre 50 e 100 metros (Assine *et al.*, 1998).

O Membro Tibagi (Eifeliano), figura 6, representa progradações de sistemas deltáicos, em um trato de sistema de mar alto, conforme afirmam Popp & Barcellos-Popp (1986). Segundo Assine *et al.* (1994), tais progradações se desenvolveram em resposta a reativações tectônicas nas áreas fonte, com a promoção do aumento do aporte de sedimentos terrígenos. Em geral, os sedimentos deste membro são marcados pela presença de corpos de arenito finos, com geometria lenticular, intercalados com folhelhos sílticos.

Por fim, em resposta ao retorno do caráter transgressivo global notado na base do Membro São Domingos (Assine *et al.*, 1994). No Givetiano, foram depositados folhelhos em condições de plataformas relativamente mais profundas. Esta tendência prossegue até a superfície de inundação máxima da seqüência devoniana, localizada próximo ao limite do Givetiano/Frasniano. A partir de então, prevalece uma tendência regressiva (Popp & Barcellos-Popp, 1986).

A existência de folhelhos, com teores relativamente elevados de matéria orgânica, associados a superfícies de inundação marinha, faz com que a Formação Ponta Grossa apresente intervalos potencialmente favoráveis à geração de hidrocarbonetos. Este aspecto sugere que tais intervalos possam constituir a fonte de hidrocarbonetos gasosos acumulados nos arenitos do Grupo Itararé e/ou da Formação Rio Bonito (Milani *et al.*, 1998).

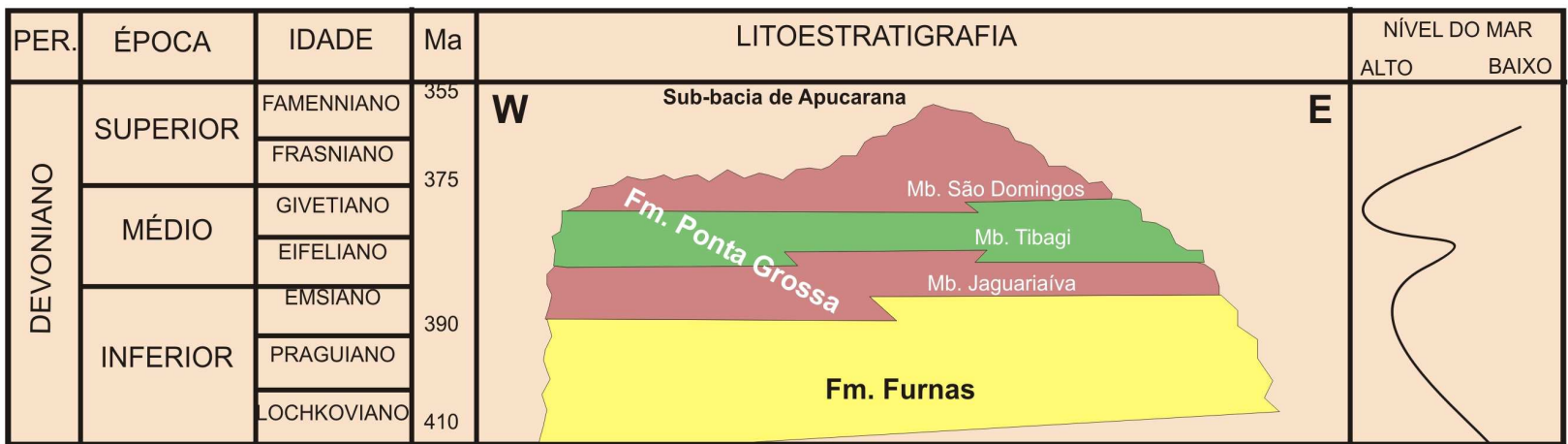
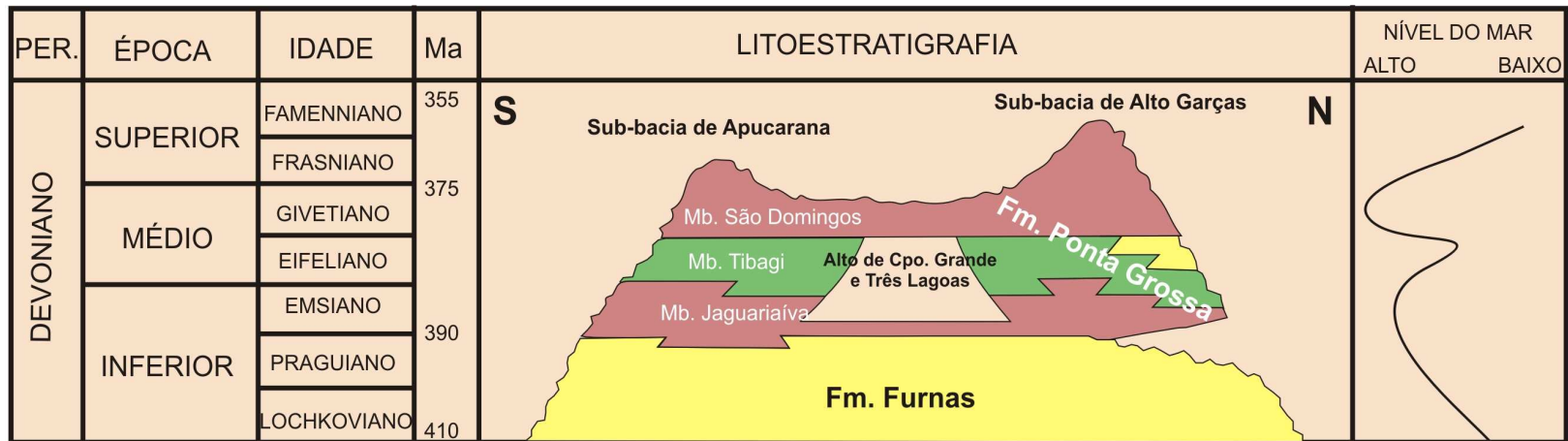


Figura 6 – Seções estratigráficas regionais (N-S e E-O), representativas do Devoniano na Bacia do Paraná, com destaque para a subdivisão da Formação Ponta Grossa em membros, indicação dos principais eventos deposicionais e da curva relativa de variação do nível para o Devoniano. Modificado de Pereira et al. (1998) e Assine et al. (1998).

Capítulo III. Métodos

Neste capítulo, serão descritos os procedimentos utilizados no tratamento dos dados desta pesquisa, bem como as premissas conceituais que permitem a sua utilização.

III.I. Sedimentologia

III.I.I Bases Conceituais

Della Fávera (2001) define fácies sedimentar como sendo um corpo de rocha sedimentar reconhecido por um conjunto de feições sejam físicas, químicas ou biológicas, que envolvem a litologia, a cor, a geometria, a paleocorrente e assembléia fossilífera. Estas são originadas a partir de determinado processo sedimentar, na maior parte, brusco e de alta energia (sedimentação episódica).

Compreende-se como processo, os fenômenos naturais, regidos pelas leis físicas universais, e que por este motivo podem ocorrer em diferentes ambientes deposicionais. Assim, na interpretação do ambiente deposicional devem ser considerados o arranjo e associação destas fácies no registro sedimentar, ao invés das fácies como um elemento isolado.

O registro sedimentar, então, é aceito como a representação das variações nas características faciológicas observadas, e reflete as modificações dos ambientes deposicionais ao longo do tempo geológico. O ambiente marinho é o que melhor registra estas variações, por ser bastante suscetível às oscilações relativas do nível do mar, em especial aquelas de caráter climático (Algeo *et al.*, 2004).

Assim, durante fases de queda do nível relativo do mar haveria de forma contemporânea à exposição de áreas rasas da bacia, a implantação de sistemas deposicionais continentais e o recuo das fácies de zonas mais profundas.

Posteriormente, com eventuais subidas do nível do mar, os sistemas marinhos avançariam sobre os sistemas continentais, até o afogamento máximo da bacia. De forma geral, estes são os principais elementos que conceituam as seqüências deposicionais (Della Fávera, 2001).

Deste modo, a descrição dos testemunhos das sondagens analisadas nesta pesquisa torna-se um instrumento importante à interpretação do ambiente no qual os sedimentos foram depositados, por meio da visualização de fácies sedimentares. Além disso, a descrição das fácies e a classificação litológica das amostras têm importante função prática, tanto na construção do perfil e/ou coluna estratigráfica, quanto na comparação direta com as análises de outros perfis disponíveis.

III.I.II. Procedimentos

Com base nestes conceitos, realizou-se a descrição dos testemunhos das sondagens em escala vertical de 1:200, sendo esta realizada no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA) da UERJ.

Foram elaborados perfis sedimentológicos que possibilitassem em etapas posteriores a realização de interpretações ambientais, pela associação das fácies sedimentares do registro sedimentar, em conjunto com a análise das demais ferramentas utilizadas na pesquisa. Desta forma, foi possível estabelecer seções de correlação estratigráfica entre os poços de mesma idade, destacando a variação das fácies sedimentares.

Os perfis geológicos foram digitalizados com o programa de gráficos vetoriais Corel *Draw* 10, em escala vertical de 1:500, elaborada pelo programa *Grapher* 2.0. As litologias foram representadas de acordo com sua faixa granulométrica predominante através de escala sedimentológica, simbologia e

cores específicas, com o objetivo de facilitar a visualização da associação e do empilhamento destas no registro sedimentar.

A legenda com as convenções de cor e símbolos estratigráficos utilizados pode ser observada na figura 7.































1 - estruturas físicas primárias (sindeposicionais)		3 - estruturas biogenéticas	
M Maciço		 Bioturbação fraca	
 Estratificação ou Laminação plano-paralela		 Bioturbação moderada	
 Estratificação cruzada sigmoidal		 Bioturbação intensa	
 Estratificação cruzada ondulante truncada		 Perfuração (<i>boring</i>)	
 Estratificação cruzada por onda (<i>hummocky</i>)		 Escavação em geral (<i>burrows</i>)	
 Flaser		 <i>Zoophycos</i>	
 Granodecrescência ascendente (<i>finning-upward</i>)		4 - feições diagenéticas	
 Granodecrescência descendente (<i>coarsening-upward</i>)		 Concreções de sulfetos	
 Filmes de argila		 Concreções calcílicas	
 Contato erosivo		5 - constituintes biogênicos	
 Contato normal		 Fósseis	
2 - estruturas físicas secundárias (quasi e pós-deposicionais)		 Braquiópodes	
 Estrutura em chama		 Restos vegetais	
 Pilar		6 - litologia	
 Falha normal		 Folhelho	
FRAT. Fratura		 Interlaminado	
 Slinkensides		 Arenito fino/mto fino	
		 Arenito médio	
		 Arenito grosso	

Figura 7 – Legenda com as convenções e simbologias utilizadas para a caracterização de estruturas sedimentares primárias e secundárias, como também para indicação litológica e da presença de fósseis nos perfis dos poços estudados.

III.II. Teores de Carbono Orgânico Total (COT)

III.II.I. Bases Conceituais

Em um ambiente marinho, a acumulação e a preservação da matéria orgânica são influenciadas pela coexistência de vários fatores, que por sua vez são controlados por variações climáticas e por modificações de caráter tectônico na morfologia da bacia (de Hass *et al.*, 2002). Deste modo, a concentração de matéria orgânica nos sedimentos é uma importante ferramenta na compreensão dos diferentes eventos que ocorreram na bacia, os quais podem ser representados por seqüências deposicionais. O teor de matéria orgânica também é um fator fundamental na formação de rochas geradoras de hidrocarbonetos, por serem estes os produtos da transformação termoquímica da matéria orgânica.

Entre os diferentes fatores que influenciaram a acumulação e a preservação da matéria orgânica, alguns são indicados como preponderantes. Demaison & Moore (1980) indicam que o principal fator que favoreceria a preservação da matéria orgânica seria a existência de uma coluna d'água e/ou águas de fundo com níveis de baixa oxigenação ou de caráter anóxico durante a deposição. Esta baixa oxigenação diminuiria ou evitaria a oxidação da matéria orgânica, como também, limitaria o retrabalhamento dos sedimentos pela ação de organismos bentônicos.

Pedersen & Calvert (1990) justificam que o principal controle na acumulação é realizado por modificações na taxa de produtividade primária de matéria orgânica por organismos planctônicos. Uma maior taxa de produtividade primária, possibilita maiores concentrações de matéria orgânica na coluna d'água, e deste modo aumentam a probabilidade de preservação, mesmo em condições ambientais favoráveis a oxidação e a decomposição.

Atualmente, é admitida a coexistência entre estes dois fatores na preservação e acumulação da matéria orgânica. No entanto, também podem ser associadas influências de variações na taxa de sedimentação, que controla a capacidade de soterramento e a chegada à bacia de nutrientes e de matéria orgânica terrestre, além de eventos anóxicos globais (Calvert *et al.*, 1996; Algeo *et al.*, 2004; Rimmer *et al.* 2004, Rodrigues, 2005).

Os teores de carbono orgânico total (COT) são referentes à quantificação da matéria orgânica (querogênio e betume) preservada em diferentes litologias (Trigüis & Araújo, 2001). Em geral, os maiores teores de COT expressam condições marinhas transgressivas e são observados nas superfícies de máxima inundação. Estas superfícies de inundação estão diretamente relacionadas com os fatores necessários para a preservação da matéria orgânica, como anoxia, alta produtividade de organismos e a entrada de nutrientes no ambiente marinho.

III.II.II. Processamento das amostras

O processamento das amostras para quantificação dos teores de COT foi realizado em etapas prévias desta pesquisa inseridas no projeto Paleosul.

As amostras coletadas nos testemunhos foram maceradas nas porções mais representativas da fácies sedimentar observada, em grãos com diâmetro inferior a 80 microns (0,177mm). Etapa posterior envolveu o tratamento químico do material macerado, na qual aproximadamente 0,25 mg submetidos à acidificação a frio com HCl a 50%, para eliminação de carbonatos, seguida de lavagem para eliminação de cloretos originados pela acidificação e secagem do material em banho de luz.

Os teores de COT foram mensurados no equipamento LECO-SC444.a partir do resíduo obtido após o tratamento químico. O processo de medida dos teores de COT é realizado pela combustão da matéria orgânica, à temperatura de

1350° C, Durante a combustão, há liberação de dióxido de carbono (CO₂), o que permite a determinação dos teores de COT, no detector de infravermelho.

Todos os procedimentos foram realizados no LGPA da UERJ. A operação do LECO SC-444 e as etapas posteriores à maceração foram realizadas pelo técnico responsável do Laboratório de Geoquímica Orgânica da UERJ.

A partir dos dados obtidos, foram construídos os perfis de teores de carbono orgânico total e enxofre dos poços. Foi utilizado o programa *Grapher 2.0*, o qual gerou gráficos de dispersão, relacionando a profundidade de cada amostra com os respectivos teores de COT.

III.III Gamaespectrometria

III.III.I Bases Conceituais

A gamaespectrometria fornece informações sobre a radioatividade natural das rochas por meio da leitura de emissões de partículas gama provenientes de isótopos radioativos. Os isótopos, ⁴⁰K, ²³²Th e ²³⁸U são os mais comuns em rochas sedimentares (Ellis, 1987). Em geral, perfis de raios gama são utilizados para caracterizar a argilosidade das rochas, e com frequência, é a primeira ferramenta de correlação de poços na exploração de hidrocarbonetos (Ellis, 1987; Svendsen & Hartley, 2001).

No ambiente de sedimentação, os isótopos de K, U, e Th são acumulados de modo distinto, devido às características químicas de cada um. Adams & Weaver (1958) sugerem que a razão Th/U caracteriza diferentes litologias em ambientes continentais e em ambientes marinhos diferenciados (figura 8). Em síntese, K e U são considerados mais solúveis em relação ao Th nos processos de intemperismo (Ruffell & Worden, 2000). Contudo, K apresenta alta correlação com Th, por serem comuns em minerais detríticos (Jones & Manning, 1994).

Isótopos de K são encontrados em sais de potássio, grãos de K-feldspato, aluminossilicatos e argilominerais, enquanto minerais de U e Th são raros em rochas sedimentares (Ellis, 1987). Concentrações de Th são associadas a minerais resistentes, como monazita e zircão, devido à imobilidade do Th durante o intemperismo. Em oposição, o U solúvel em ambientes óxicos passa a insolúvel em ambientes redutores, nos quais apresenta afinidade por matéria orgânica e é fixado como U autigênico (Ellis, 1987; Wignall & Myers, 1988; Jones & Manning, 1994).

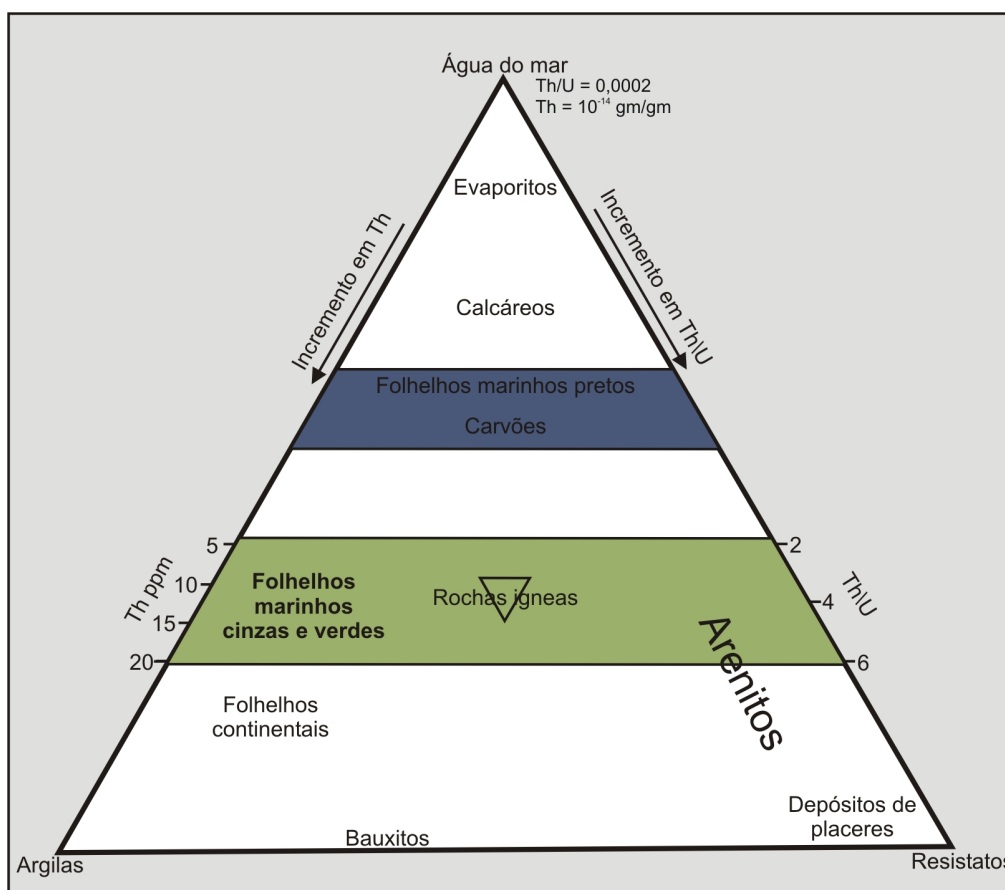


Figura 8 – Diagrama conceitual sugerido por Adams & Weaver (1958) à distribuição de Tório e Urânio em sedimentos e classificação litológica. Quanto maior a concentração de Th nas rochas maior será sua afinidade com ambientes sedimentares continentais.

Quando isótopos de potássio (K), Urânio (U), e Tório (Th) são separados no espectro de energia e em suas concentrações nas amostras é possível avaliar as razões Th/U e Th/K e a associação de cada elemento com outros dados geoquímicos (Lüning & Kolonic, 2003; White & Arthur, 2006).

A razão Th/U, sobre a qual será mantido o foco da gamaespectrometria nesta pesquisa, é indicativa de variações do nível do mar e caracteriza, muito bem, as condições de oxigenação paleoambientais. Deste modo, é útil para definir ciclos e superfícies deposicionais no registro sedimentar. Pode ser explicada devido a pouca afinidade entre os dois elementos e suas relações com a variação do potencial redox no ambiente deposicional e a taxa de deposição de sedimentos (Adams & Weaver, 1958; Jones & Manning, 1994; Dypvik & Harris, 2001; Doveton & Merriam, 2004), conforme modelo na figura 9.

A razão entre Th/K é indicativa da mineralogia de argilas presentes nas rochas sedimentares (Ellis, 1987; Doveton & Merriam, 2004). Em rochas com baixa diagênese, a mesma pode ser utilizada na caracterização de eventos paleoclimáticos (Lauer-Lauredde *et al.*, 1998; Schnyder *et al.*, 2006). Entretanto, devido à intensa diagênese observada nas rochas da Formação Ponta Grossa (Freitas-Brazil, 2004) com a formação de caulinita e ilitas autigênicas, a razão Th/K torna-se pouco representativa e não será utilizada nesta pesquisa.

Assim, a gamaespectrometria permite discutir os principais eventos que influenciaram a deposição dos sedimentos entre os quais podem ser listadas modificações nas dinâmicas dos ambientes deposicionais, modificações na paleogeografia da bacia e áreas emersas adjacentes, variações paleoclimáticas de caráter regional e local e variações relativas do nível do mar, expressas pela distinção de eventos regressivos e transgressivos, além de superfícies de afogamento marinho (Davies & Elliot, 1996, Ruffel & Worden, 2000, Doveton & Merriam, 2004).

Na Formação Ponta Grossa o método respondeu de modo satisfatório para o detalhamento estratigráfico de alta resolução, pois permitiu a identificação de ciclos deposicionais e modificações ambientais de altas frequências e sua correlação em subsuperfície (Rezende & Bergamaschi, 2006).

III.III.II Procedimentos

Os dados foram obtidos em contagens por segundo e teores de Tório (ppm), Urânio (ppm), e Potássio (%) com o instrumento GRS-2000 (*Gf Instruments*), do Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, UERJ. A gamaespectrometria foi realizada sobre material pulverizado a 80 mechs de amostras coletadas em testemunhos, com um espaçamento sistemático entre cada amostra de 30 cm nos poços 1, 2 e 4 e de 60 cm no poço 3.

O intervalo de leitura utilizado foi de dois minutos por amostra, sugerido na literatura (McRoberts *et al.*, 1997), o qual foi considerado como satisfatório para a aquisição dos dados, visto os valores relativos obtidos em repetições de algumas amostras, a maioria dentro da precisão do equipamento, avaliada pelo fabricante em 10%.

Os valores da concentração dos elementos foram convertidos para unidades API, padrão de referência internacional, criado pelo *American Petroleum Institute*. A conversão foi realizada por meio de equação sugerida na literatura (Ellis, 1987; Doveton & Merriam, 2004), onde:

$$\text{API} = 4 \text{ Th (ppm)} + 8 \text{ U (ppm)} + 16 \text{ K (\%)}$$

O U autigênico foi calculado utilizando a equação sugerida por Wignall & Myers (1988), na qual:

$$(\text{U autigênico}) = (\text{U total}) - \text{Th}/3$$

Esta relação entre os isótopos é calibrada por valores encontrados em amostras de referência internacionais, que consideram as concentrações médias de cada isótopo na rocha. As amostras desta pesquisa apresentam valores mais próximos àqueles da amostra de referência de *North American Shale Composite* (NASC), os quais são Th 12,3 ppm; U 2,66 ppm e K 3,2 % (Doveton & Merriam, 2004).

As curvas de API e de concentrações de elementos foram suavizadas, a fim de obter uma melhor distribuição das medidas, com o programa *FindGraph 2.0*. Foi utilizado um algoritmo que promove o melhor ajuste entre as médias de três amostras adjacentes.

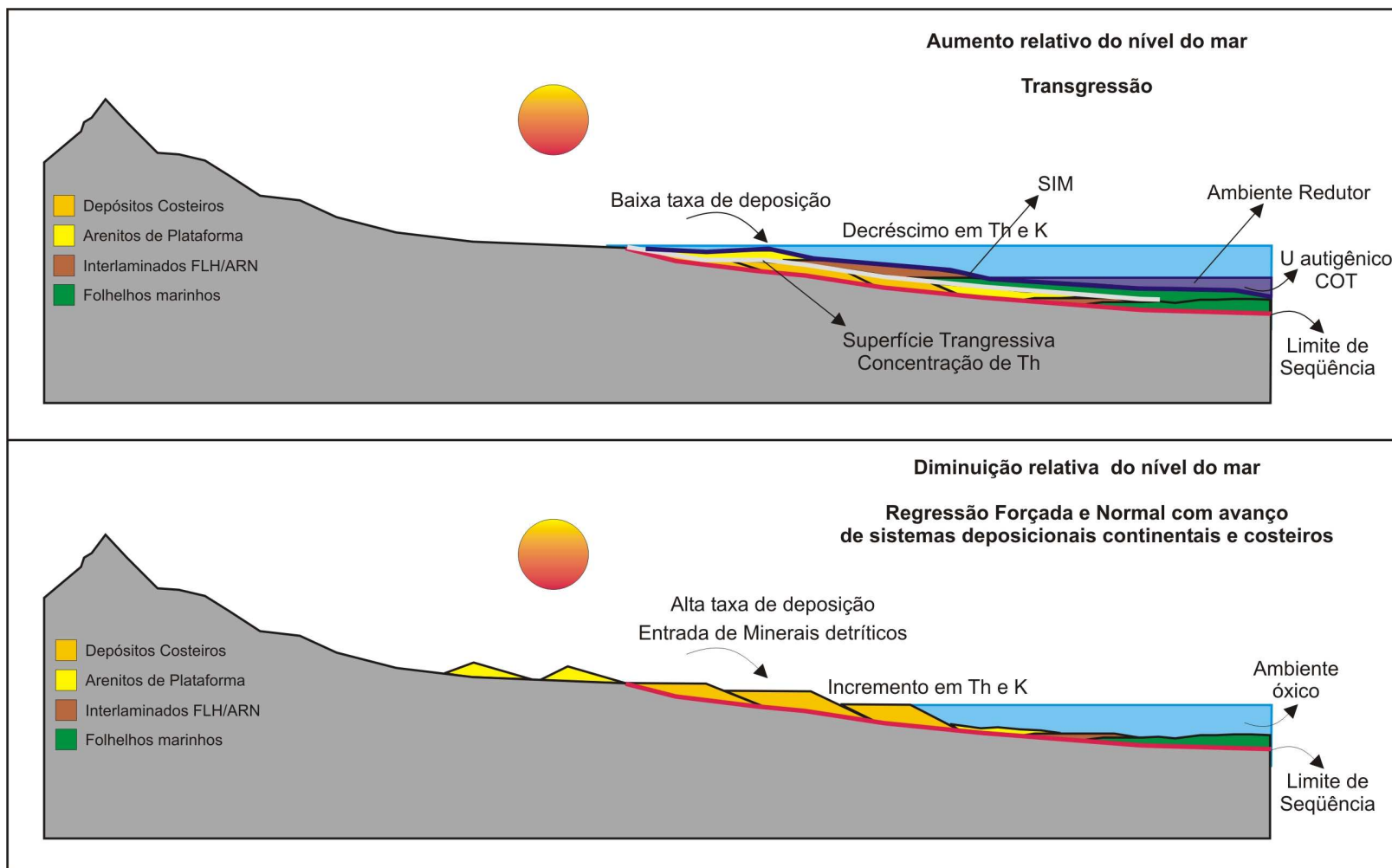


Figura 9 – Modelo conceitual simplificado sobre a resposta dos isótopos radioativos de U, Th e K, mensurados nas rochas por gamaespectrometria, às modificações nas condições paleoecológicas e deposicionais do ambiente sedimentar durante fases de variação relativa do nível do mar, bem como suas relações com superfícies estratigráficas.

III.IV Pirólise Rock-Eval

Os dados de pirólise utilizados foram obtidos em amostras do testemunho do poço 3 e estavam disponíveis na base de dados do Projeto Paleosul (Finep/Uerj/Petrobrás). Assim, não foram realizados procedimentos de aquisição de novos dados deste método nesta pesquisa.

III.IV.I Bases Conceituais

A pirólise tem grande utilidade nas análises geoquímicas por fornecer informações sobre a quantidade e qualidade da matéria orgânica presente em rochas sedimentares. Como também, por possibilitar discutir o grau de maturação atingido pela matéria orgânica (Espitalié *et al.*, 1986, Erik *et al.* 2006). A mesma consiste em realizar a transformação térmica da matéria orgânica em laboratório, aquecendo as amostras em uma faixa de temperatura entre 100 e 650° C, em atmosfera inerte (N₂).

Durante esse processo são liberados hidrocarbonetos voláteis, mensurados pelo equipamento, que representam a quantidade de hidrocarbonetos livres presentes na amostra à 300° C (pico S1), a quantidade de hidrocarbonetos gerados durante o processo entre 300 e 550° C (pico S2) e a quantidade de CO₂ liberado da matéria orgânica a partir de 570° C (pico S3). S1 caracteriza a quantidade de hidrocarbonetos gerados durante a maturação da rocha e S2, o potencial de hidrocarboneto a ser gerado (Sanei *et al.*, 2005; Erik *et al.*, 2006).

Além disso, os picos S2 e S3, quando normalizados com o teor de COT da amostra, fornecem os índices de hidrogênio (IH) e oxigênio (IO) expressos em mg HC/g COT e mg CO₂/g COT, respectivamente (Sanei *et al.* 2005). Estes índices são utilizados para estimar a qualidade e classificar a matéria orgânica em tipos I, II ou III, a partir de um diagrama de dispersão x,y (figura 10), adaptado por Espitalié *et al.* (1977) das relações atômicas do diagrama de Van Krevelen (Tissot & Welte, 1984; Trigüis & Araújo, 2001; Sanei *et al.* 2005).

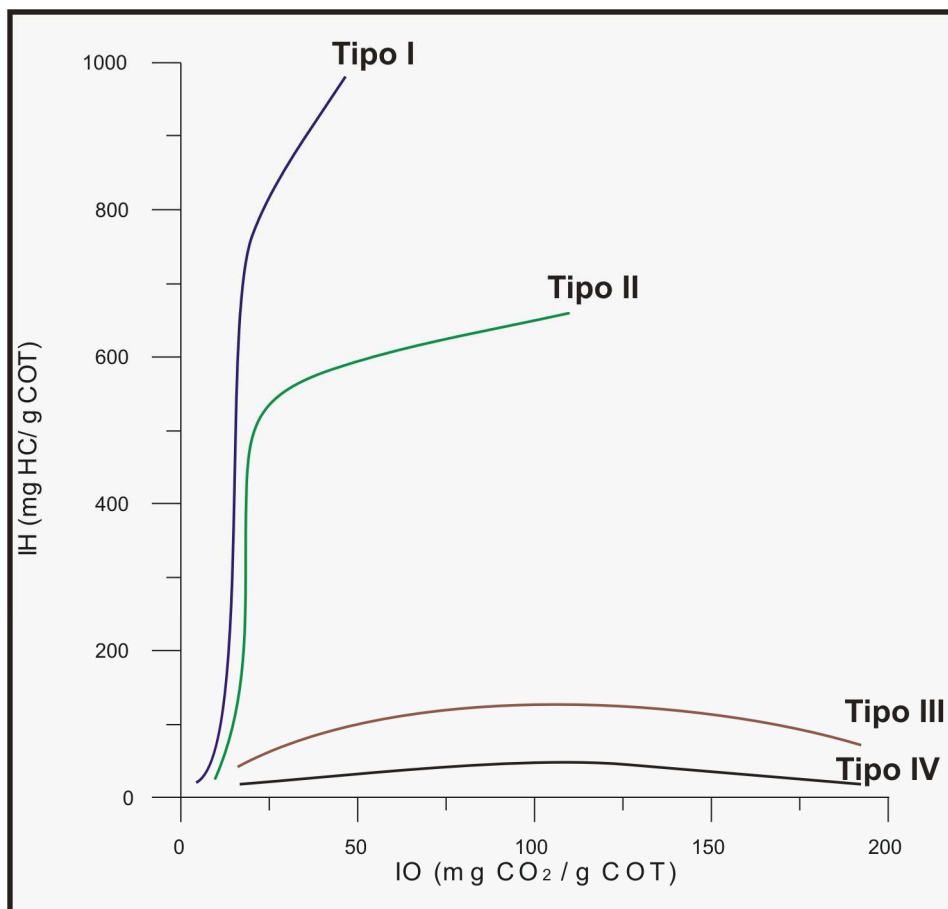


Figura 10 – Diagrama de distribuição entre o índice de hidrogênio e o índice de oxigênio (“Van Krevelen”), mensurados por meio da normalização dos dados de S2 e S3 obtidos por Pirólise Rock Eval com os dados de COT, a fim de classificar e qualificar a matéria orgânica existente nas rochas, modificado de Peters, (1986); Hunt, (1995).