

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA E POTENCIAIS HORIZONTES  
GERADORES DE HIDROCARBONETOS EM UMA SEÇÃO DEVONIANA  
NA BORDA SUDOESTE DA BACIA DO PARNAÍBA, TOCANTINS, BRASIL**

*STRATIGRAPHIC FRAMEWORK AND POTENTIAL HYDROCARBON-GENERATING  
HORIZONS AT DEVONIAN SECTION FROM THE SOUTHWESTERN BOUNDARY, PARNAÍBA  
BASIN, TOCANTINS, BRAZIL*

**Raissa da Silva LESSA<sup>1</sup>, Sergio BERGAMASCHI<sup>2</sup>, Renê RODRIGUES<sup>2</sup>, Heloisa Moure  
MONTEIRO<sup>2</sup>, Lucas Pinto Heckert BASTOS<sup>3</sup>, Loren Pinto MARTINS<sup>4</sup>, Carmen Lucia  
Ferreira ALFERES<sup>4</sup>, Egberto PEREIRA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Geociências.  
E-mail: rlessageo@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. Departamento de Estratigrafia e Paleontologia.  
E-mail: sergioberg7@hotmail.com; rene.rodrigues.uerj@gmail.com; moureheloisa2@gmail.com; egberto.geologia@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Pesquisador Visitante - PRH14.1.  
E-mail: lucasbastosgeo@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica.  
E-mail: lorenmartins.geo@gmail.com; carmenalferes@gmail.com

Introdução  
Materiais e métodos  
Resultados  
Análise de fácies sedimentares  
Análise de Carbono Orgânico Total (COT), Enxofre (S) e Resíduo Insolúvel (RI)  
Análise De Pirólise Rock-Eval  
Unidade A  
Unidade B  
Unidade C  
Unidade D  
Unidade E  
Unidade F  
Ambiente deposicional  
Formação Itaim e Formação Jaicós  
Formação Pimenteiras  
Relação COT x S nos folhelhos radioativos  
Análise estratigráfica  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - A Bacia do Parnaíba está localizada, parcialmente, em três regiões do território brasileiro - norte, nordeste e centro-oeste - que inclui parte dos estados do Ceará, Piauí, Maranhão, Pará e Tocantins. Adicionalmente, é considerada intracratônica e possui formato arredondado, cobrindo uma área de, aproximadamente, 600.000 km<sup>2</sup>. O material desse estudo abrangeu 299 amostras pertencentes ao poço GASBRAS-2-RS-TO, que incluem o topo da Formação Jaicós e seções delgadas das formações Itaim e Pimenteiras. A Formação Itaim é composta, primordialmente, por arenitos finos a médio, raramente grossos, e, subordinadamente, folhelhos em subsuperfície. Já a Formação Pimenteiras consiste, predominantemente, em folhelhos cinza escuros a pretos, podendo ocorrer intercalados com camadas de siltitos a arenitos. No testemunho estudado foi possível realizar a caracterização quimioestratigráfica da Formação Itaim com suporte de dados provenientes de análises geoquímicas (COT e Pirólise Rock Eval). Além de localizar dentro da Formação Pimenteiras os folhelhos radioativos, conhecidos como, A, B e C, já descritos na literatura. A última formação possui intervalos potencialmente geradores de hidrocarbonetos e de interesse para exploração, uma vez que os Folhelhos supracitados B e C atingiram, respectivamente, cerca de 17 m e 38 m de extensão, com COT médio de 2,29% e 2,38%.

**Palavras-chave:** Formação Pimenteiras. Sistema petrolífero. Hidrocarbonetos. Devoniano.

**ABSTRACT** - The Parnaíba Basin is located, partially, in three regions of the Brazilian territory - North, Northeast and Center-West -, including areas from the states of Ceará, Piauí, Maranhão, Pará and Tocantins. Additionally, it is considered intracratonic and rounded in shape, covering an area of approximately 600,000 km<sup>2</sup>. The material of the present study contains 299 samples recovered from the GASBRAS-2-RS-TO borehole, comprising the uppermost part of the Jaicós Formation and thin beds from Itaim and Pimenteiras formations. The Itaim Formation is mainly composed of fine to medium sandstones and, subordinately, at subsurface, shales. Differently, the Pimenteiras Formation consists, predominantly, of dark grey to black shales, which may occur interbedded with layers of siltstone and sandstone. Constrained by organic geochemical data (Total organic Carbon and Rock-Eval Pyrolysis), we present a chemostratigraphic characterization to the Itaim and Pimenteiras formations. The last one was subdivided and correlated with chemounits presented in previous studies and bolstered the recognition of the radioactive shales A, B and C. Furthermore, peaks of TOC of 2.29% and 2.38% indicate the presence of sedimentary organic matter which may suggest that the interval comprises potential source rocks.

**Keywords:** Pimenteiras Formation. Petroleum system. Hydrocarbons. Devonian.

## INTRODUÇÃO

A Bacia do Parnaíba ocupa parcialmente as regiões norte, nordeste e centro-oeste do território brasileiro, compreendendo porções dos estados do Ceará, Piauí, Maranhão, Pará e Tocantins.

A bacia é considerada intracratônica e possui forma arredondada, em planta, abrangendo uma área aproximada de 600.000 km<sup>2</sup>. Está separada da Bacia do Amazonas, a oeste, pelo Lineamento Tocantins; da Bacia Barreirinhas a norte, pelo Arco Ferrer Santos; a nordeste, pelo Arco Tocantins; a sul e sudeste, por estruturas cambrianas correlatas a Faixa Brasília; e a leste pela Falha de Tauá (Cunha, 1986).

Segundo Vaz et al. (2007), as unidades estratigráficas da bacia estão dispostas em três grandes ciclos, quais sejam: o primeiro corresponde à sequência continental-marinho-continental de idade neo-ordoviciana a eocarbonífera, o segundo, separado do primeiro por uma discordância angular, que compreende sedimentos terrígenos que vão do Neocarbonífero ao Jurássico e o terceiro, relacionado à fase rifte das bacias marginais brasileiras (cuja idade é neocretácea). Os autores supracitados ainda dividem o arcabouço estratigráfico da Bacia do Parnaíba em supersequências, a saber: Siluriana, Mesodevoniana - Eocarbonífera, Neocarbonífera – Eotriás-

sica, Jurássica e Cretácea.

A Formação Itaim é composta, sobretudo, por arenitos finos a médios, raramente grossos, e folhelhos em subsuperfície (Kegel, 1953), enquanto que a Formação Pimenteiras é reconhecida por conter, predominantemente, folhelhos cinza escuros a pretos, podendo ocorrer intercalados a camadas de siltito a arenito (Della Fávera, 1990).

A Formação Pimenteiras tem sido alvo de estudos devido ao seu potencial de geração de hidrocarbonetos e acredita-se que o intervalo mais adequado para geração nesta bacia inclui as rochas pelíticas do intervalo Givetiano / Frasniano da Formação Pimenteiras nas quais foram três intervalos geradores dentro da Formação Pimenteiras (da idade devoniana), conhecidos como folhelhos radioativos A, B e C (Rodrigues, 1995).

Neste contexto, este estudo visa promover uma análise estratigráfica de alta resolução das formações Itaim e Pimenteiras e uma discussão do potencial para geração de hidrocarbonetos na borda sudoeste da Bacia do Parnaíba, apoiando-se na análise de fácies e de geoquímica orgânica conduzida a partir do registro sedimentar recuperado em sondagens rasas no Estado de Tocantins.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é baseado no estudo de testemunhos de sondagem do poço GASBRAS-2-RS-TO, perfurado no município de Rio Sono, Estado do Tocantins (Brasil), borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. A sua localização é dada pelas coordenadas UTM 191967mE e 8921176mS, Zona 23L (Figura 1) e dista cerca de 80km a nordeste da cidade de Palmas (TO).

O poço foi testemunhado continuamente, atingiu a profundidade de 335m e atravessou seções das formações Pimenteiras e Itaim, além da porção mais superior da Formação Jaicós. Os dados aqui apresentados resultam da caracterização de fácies sedimentares e de análises geoquímicas de duas formações: Itaim e Pimenteiras.

A análise sedimentológica considerou tamanhos de grãos, litotipos de rocha, estruturas, descrição de litofácies deposicionais e realizou as associações de fácies. Os critérios utilizados para esta classificação foram baseados nos

conceitos de Vail et al. (1977), Galloway (1989) e Walker & James (1992). A análise de fácies sedimentares é considerada a etapa principal deste estudo, onde seu objetivo é descrever e interpretar, macroscopicamente, com maior nível de detalhes no testemunho, a fim de estabelecer com precisão os limites das sequências sedimentares envolvidas.

A caracterização das sequências deposicionais é feita por meio da interpretação de superfícies de inundação máxima, estruturas sedimentares e inconformidades existentes no perfil estratigráfico.

É importante ressaltar que essas características foram um dos aspectos essenciais na identificação das formações contidas nos testemunhos de sondagens, a saber:

- a) GASBRAS-1-RS-TO – Formação Itaim (231,0 m - 283,8 m); Formação Pimenteiras (8,5 m – 231,0 m); e Formação Cabeças (3,5 – 8,5 m);
- b) GABRAS-2-RS-TO – Formação Jaicós (324,5

m – 334,8 m); Formação Itaim (207,5 m – 324,5 m); e Formação Pimenteiras (15,5 m - 207,5 m).

Assim, combinando o registro de ambos os poços, se constata que a Formação Pimenteiras apresenta nesta área da bacia uma espessura de 222,5 m, enquanto que a Formação Itaim apresenta uma espessura de 116,5 m. A abundância de matéria orgânica nos sedimentos é expressa por meio da porcentagem relativa do Carbono Orgânico Total (COT) com base no peso seco da amostra (Tyson, 1995; Mendonça Filho et al., 2012).

Assim, também é possível obter, nessa análise, outros teores, como: Enxofre Total (S) e Resíduo Insolúvel (RI). Para a realização da análise de

Pirólise Rock-Eval foram utilizados cerca de 70 mg de amostra pulverizada e peneirada em peneira de 80 mesh, posteriormente pesadas em cadinhos de aço. Os cadinhos com as amostras foram submetidos a um aquecimento progressivo em atmosfera inerte a 850 °C, utilizando nitrogênio como gás de arraste. Esses procedimentos foram realizados no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica (LGQM) da Faculdade de Geologia da UERJ, utilizando o analisador LECO SC 632. Os métodos adotados estão descritos em ASTM D 4239 (*American Society for Testing and Materials* - ASTM, 2008) e NCEA-C-1282 (*United States Environmental Protection Agency* - US EPA, 2002).

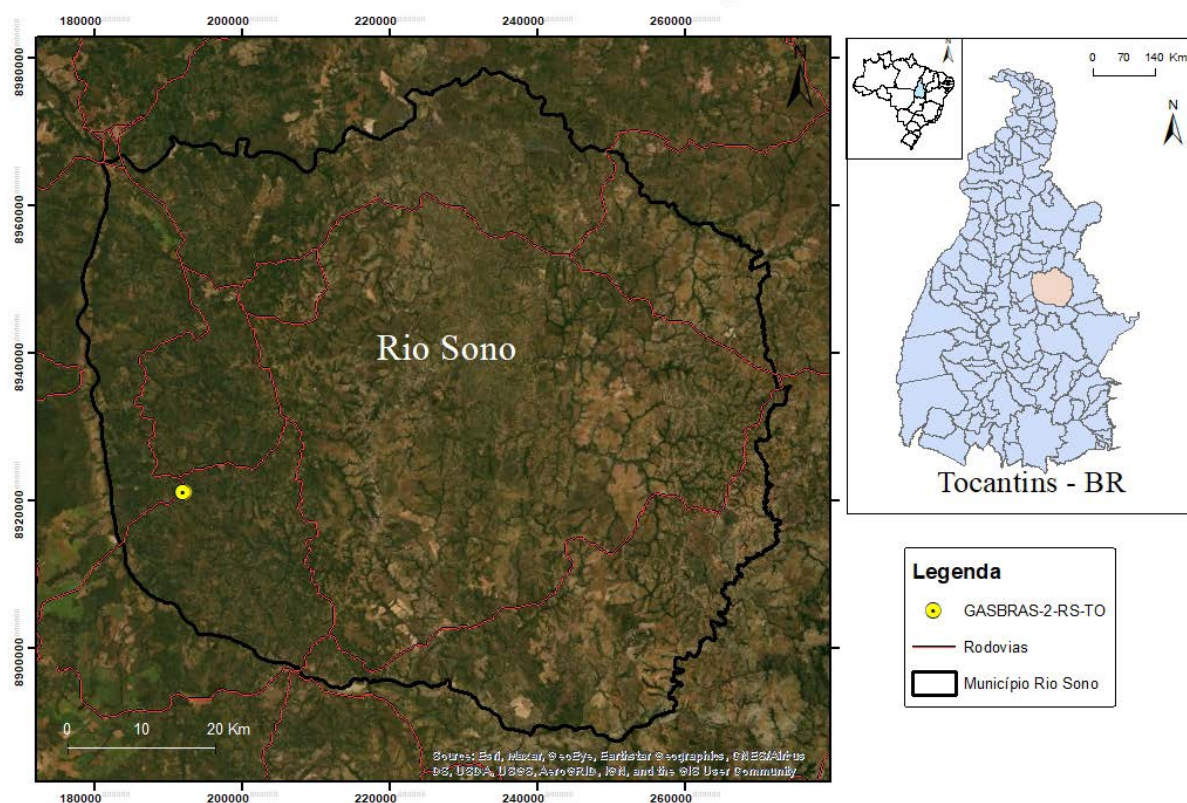


Figura 1 – Mapa de localização do poço GASBRAS-2-RS-TO no Município de Rio Sono.

## RESULTADOS

### Análise de fácies sedimentares

Por meio da análise macroscópica, foi possível descrever e separar intervalos no testemunho de sondagem GASBRAS-2-RS-TO, conforme as características contidas nas 11 classificações de fácies sedimentares especificadas na tabela 1 e ilustradas na figura 2.

No topo da Formação Jaicós – de 324,5 m a 334,8 m – foram encontradas as fácies C, AI1, AI2 e T.

Enquanto que no trecho pertencente a Formação Itaim – de 207,5 m a 324,5 m – se observou fácies arenosas intercaladas com finas quantidades de siltito, com moderada a intensa bioturbação,

quais sejam: AH1, AH2, AH3, A1 e A2.

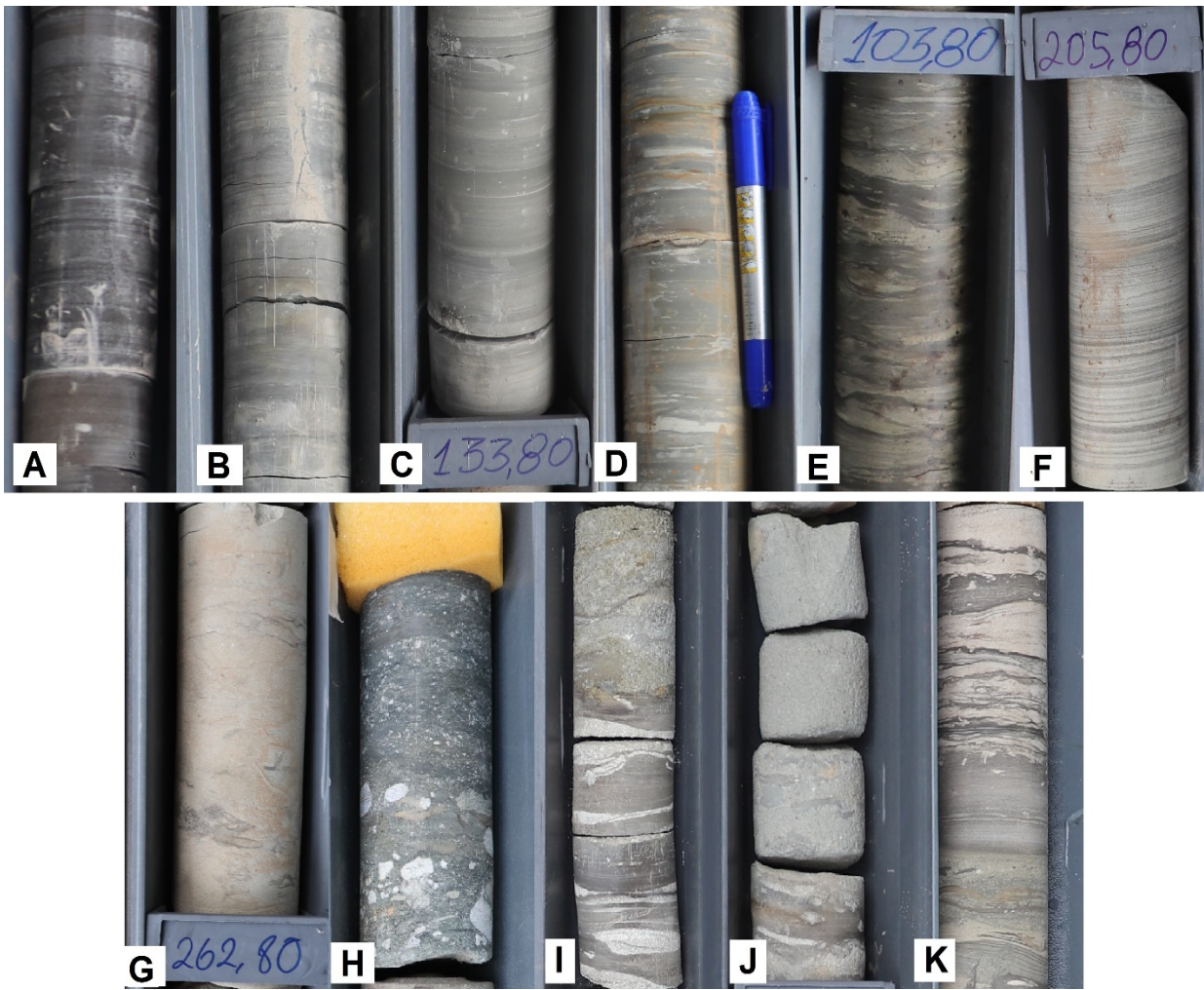
Já a Formação Pimenteiras, principal alvo desse estudo, compreende de 15,7 m a 207,5 m, tendo registrado camadas de folhelhos, ditos F1 e F2, assim como, intercalações com proporção variável de Silte: Areia (5:1 a 1:3) chamadas AH1, AH2, AH3, e, ocorrendo também, pequenos níveis de arenitos – A1 e A2.

Foram identificados, ao longo do poço, alguns aspectos estruturais marcantes a saber: estratificação cruzada *hummocky* (HCS), estratificação cruzada por onda (WCL), marcas de ondas, estratificação de baixo ângulo e estratificação plano-paralela (laminar) (Figura 3).

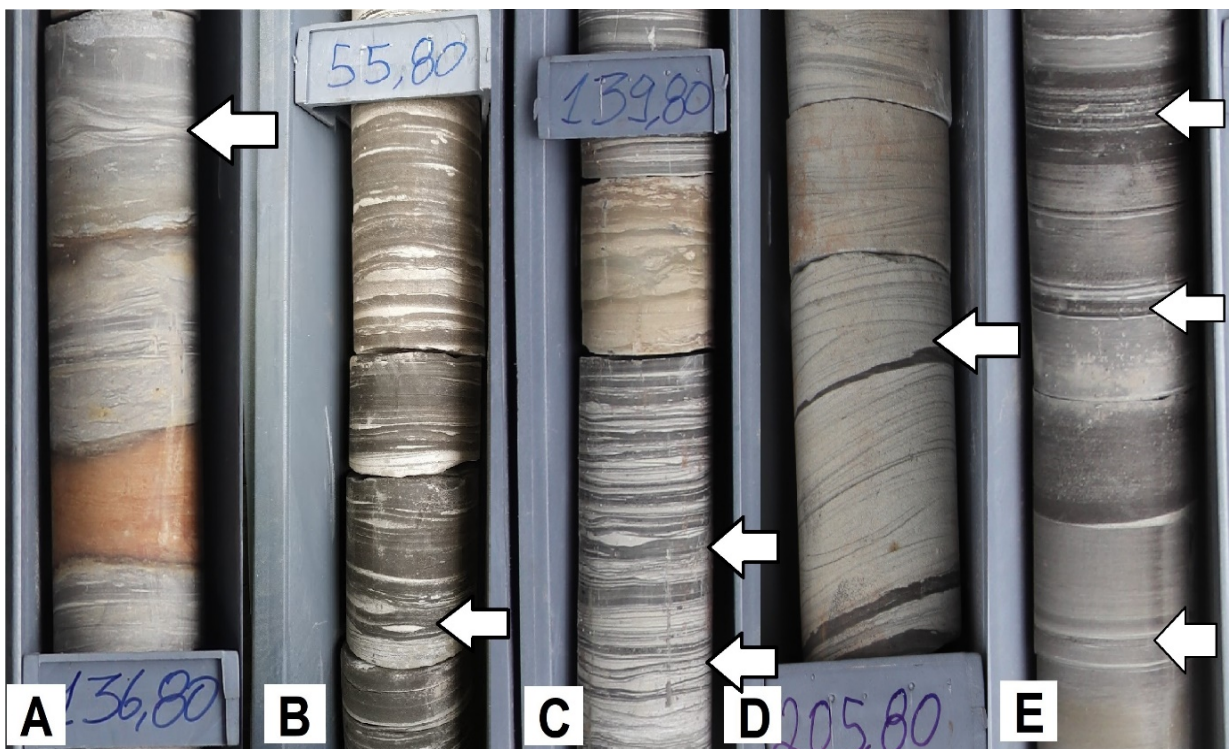
**Tabela 1** - Fácies sedimentares definidas para o testemunho de sondagem GASBRAS-2-RS-TO, onde NBOT é nível de base de ondas de tempestade e NBON é nível de base de ondas normais.

Fácies	Aspectos Descritivos Principais	Interpretação
F1	Folhelho e siltito laminado, com intercalações eventuais de delgados níveis (milimétricos) de siltito ou arenito muito fino. Predomínio de tons cinza escuro e preto. Bioturbação ausente ou fraca.	Predomínio de decantação nas porções mais distais da plataforma ( <i>offshore</i> ), abaixo do NBOT, com rara e eventual ação de correntes de fundo. Condições de fundo redutoras.
F2	Folhelho e siltito laminados a maciços, de coloração cinza claro a cinza médio, intercalados com lâminas milimétricas e centimétricas de arenito muito fino, branco, laminado a maciço. Apresenta-se, em geral, moderadamente bioturbado.	Predomínio de decantação na transição entre o <i>shoreface</i> e o <i>offshore</i> , abaixo do NBON. Condições de fundo predominantemente oxidantes, com ocasionais variações para condições redutoras.
AH1	Folhelho e/ou siltito laminados, com coloração cinza escura, intercalados com siltito e/ou arenito muito finos a fino de coloração cinza claro a branco, formando acamamento heterolítico lenticular. Razão Finos: Areia variando de 3:1 a 5:1. Os níveis arenosos apresentam laminações cruzadas por onda e plano-paralelas. Níveis avermelhados estão presentes. Fracamente bioturbado.	Decantação associada a processos trativos (ondas e correntes) nas porções mais distais da plataforma ( <i>offshore</i> ), próximo ao NBOT
AH2	Folhelho e ou/siltito fracamente laminados, com coloração cinza escura, intercalados com siltito e/ou arenito muito fino a fino de coloração cinza claro a branca, formando acamamento heterolítico lenticular a pouco ondulado. Razão Finos: Areia variando de 2:1 a 1:2. Os níveis arenosos apresentam laminações cruzadas por onda e plano-paralelas. Níveis avermelhados estão presentes. Moderadamente bioturbado.	Decantação associada a processos trativos (ondas e correntes) na transição entre o <i>shoreface</i> e o <i>offshore</i> , entre o NBON e o NBOT
AH3	Siltito fracamente laminado, com coloração cinza clara a cinza médio, intercalados com arenito muito fino a fino de coloração cinza claro a branca, formando acamamento heterolítico fláser. Razão Finos: Areia variando de 1:3 a 1:5. Os níveis arenosos apresentam laminações cruzadas por onda e plano-paralelas. Níveis avermelhados estão presentes. Moderada a intensamente bioturbado.	Processos trativos (ondas e correntes) associados a decantação na transição entre o <i>shoreface</i> e o <i>offshore</i> , próximo ao NBON.
A1	Arenito e arenito argiloso muito fino a fino com laminações cruzadas por onda (WCL), laminações plano-paralelas e estratificação cruzada <i>hummocky</i> (HCS). Predomínio de Coloração cinza claro a branco. Em geral, apresenta-se fracamente bioturbado.	Processos trativos (ondas e correntes) no <i>shoreface</i> , acima do NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.
A2	Arenito e arenito argiloso muito fino a médio, em geral, maciços/mosqueados. Predomínio de coloração cinza claro a branca, com níveis e nódulos de coloração avermelhada. Intensamente bioturbado.	Processos trativos (ondas e correntes), associados à sedimentação no <i>shoreface</i> , acima do NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.
C	Conglomerado matriz suportada formado por arcabouço composto por grânulos de quartzo, em geral, subangulosos, brancos, oligomítico e uma matriz arenosa formada por areia média a grossa, acinzentada a cinza, maciça.	Processos trativos na porção distal na parte <i>shoreface</i> , acima do NBOT. Condições turbulentas de fundo.
AI1	Arenito médio a grosso, cinza, em geral, maciço e apresentando intercalações de arenito médio e siltito preto, intensamente bioturbado.	Processos trativos ocorrentes na parte <i>shoreface</i> , próximo ao NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.
AI2	Arenito médio a grosso, acinzentado, bem selecionado, em geral, maciço, fracamente bioturbado e apresentando intercalações de arenito médio estratificado e siltito preto.	Processos trativos relacionado a sedimentação na parte <i>foreshore</i> , próximo ao NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.
T	Ciclos <i>finning up</i> (granocrescente ascendente) com arenito fino a muito fino, branco, com estratificação plano-paralela na base e intercalações de arenito fino e siltito preto, intensamente bioturbado no topo.	Ocorre na transição com a <i>shoreface</i> , em uma plataforma dominada por tempestades, acima do NBOT.





**Figura 2** – Exemplos das fácies encontradas, em: A) F1; B) F2; C) AH1; D) AH2; E) AH3; F) A1; G) A2; H) C; I) AI1; J) AI2; e K) T.



**Figura 3** – Algumas estruturas encontradas (apontadas pela seta branca) no testemunho de sondagem GASBRAS-2-RS-TO, a saber: A) HCS; B) WCL; C) Marcas de onda (WCL?); D) Truncamento de baixo ângulo (HCS?); e E) Plano-paralela.

### Análise de Carbono Orgânico Total (COT), Enxofre (S) e Resíduo Insolúvel (RI)

As análises geoquímicas contaram com 299 amostras do poço GASBRAS-2-RS-TO cuja profundidade é de 15,70 m a 333,80 m, e os resultados são ilustrados na figura 4. Em suma, os teores de COT em arenitos e conglomerados tiveram variação de 0,16% a 0,98%, enquanto que, em folhelhos e siltitos, esses valores ficaram entre 1,00% a 3,65% de COT. Dentro dessa

última litologia, foi possível identificar 3 camadas enriquecidas em COT. Tais zonas seriam de interesse econômico quanto ao potencial gerador de hidrocarbonetos. Essas camadas foram correlacionadas com o trabalho de Rodrigues (1995) e correspondem aos seguintes folhelhos (Figura 5), a saber:

- Folhelho C: Intervalo gerador estendendo-se de 36,5 m a 74,6 m, cujo COT médio é de 2,38% (37 amostras).

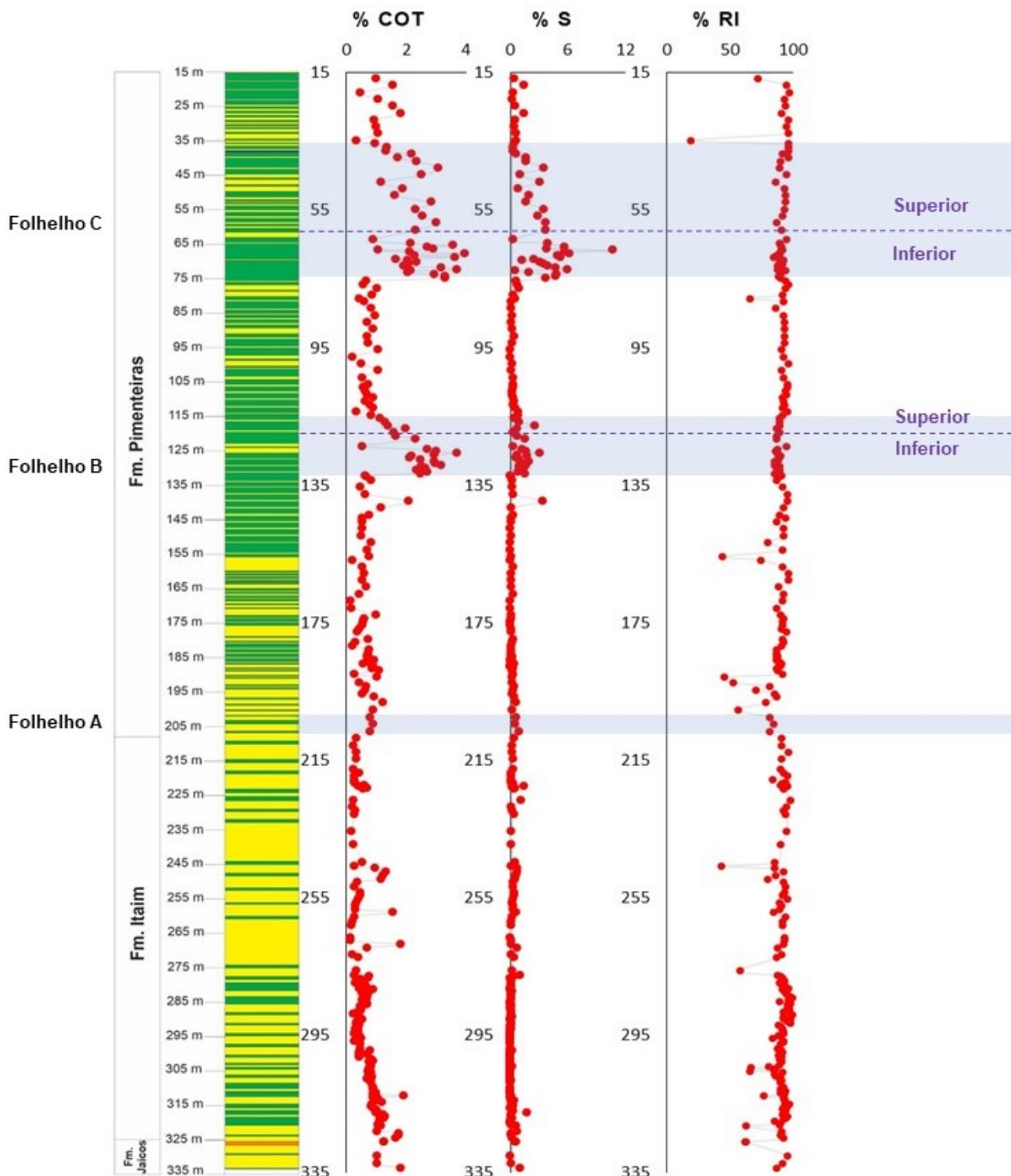
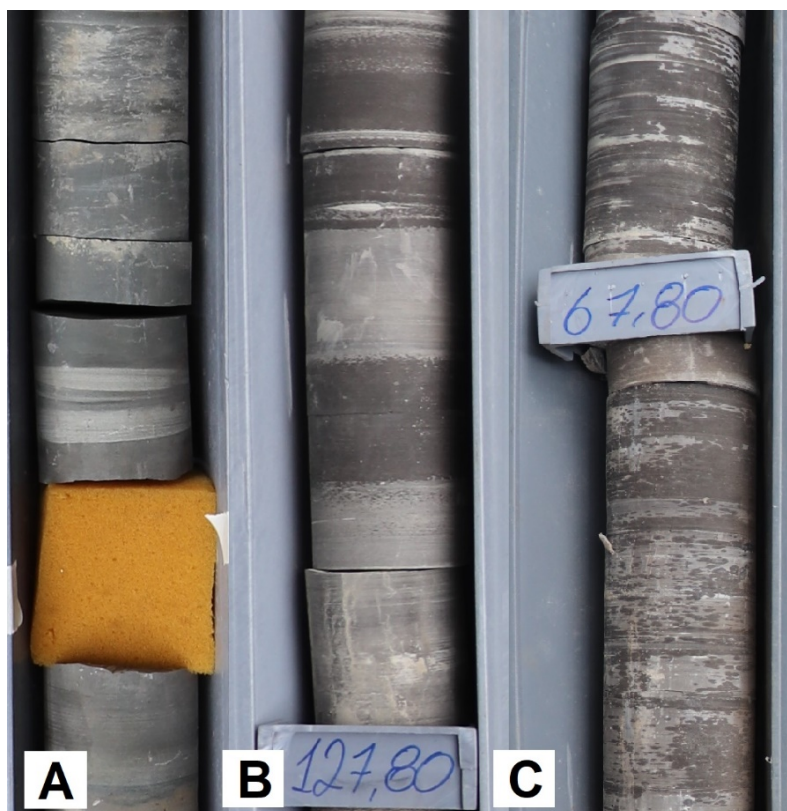


Figura 4 – Correlação entre os dados litológicos e geoquímicos (COT, S e RI) do poço GASBRAS-2-RS-TO.





**Figura 5** – Folhelhos geradores encontrados no poço GASBRAS-2-RS-TO, sendo: A) Folhelho A em 203,8 m; B) Folhelho B em 127,8 m; e C) Folhelho C em 67,8 m.

Com base nas características faciológicas e nos dados de COT, esse intervalo pode ser subdividido em dois subintervalos, a saber: superior, de 36,5 m a 60,6 m, onde o COT médio é de 2,14 % (15 amostras); e o inferior, de 64,6 m a 74,6 m, no qual o COT médio é de 2,62% (21 amostras), sendo que o subintervalo inferior é aquele que reúne as melhores características de rocha geradora, constituindo-se em um seção de folhelhos pretos finamente laminados, com ausência de bioturbações e pequenos nódulos dispersos de pirita. Já o subintervalo superior exibe a mesma litologia, porém apresentando um ligeiro aumento nas intercalações de níveis milimétricos a centimétricos de arenito muito fino com WCL.

- Folhelho B: Intervalo estendendo-se de 115,0 m a 132,0 m, cujo COT médio é de 2,29% (23 amostras). Adotando-se os mesmos critérios sinalizados acima, dentro deste intervalo houve também o reconhecimento de dois subintervalos: o subintervalo superior, de 115,0 m a 121,7 m, cujo COT médio é de 1,62% (7 amostras) e o inferior, de 124,0 m a 132,0 m, com COT médio de 2,72% (15 amostras). As características faciológicas desses dois subintervalos são iguais às características dos dois subintervalos do Folhelho C, assinaladas acima.

- Folhelho A: Intervalo único de 203,5 m a

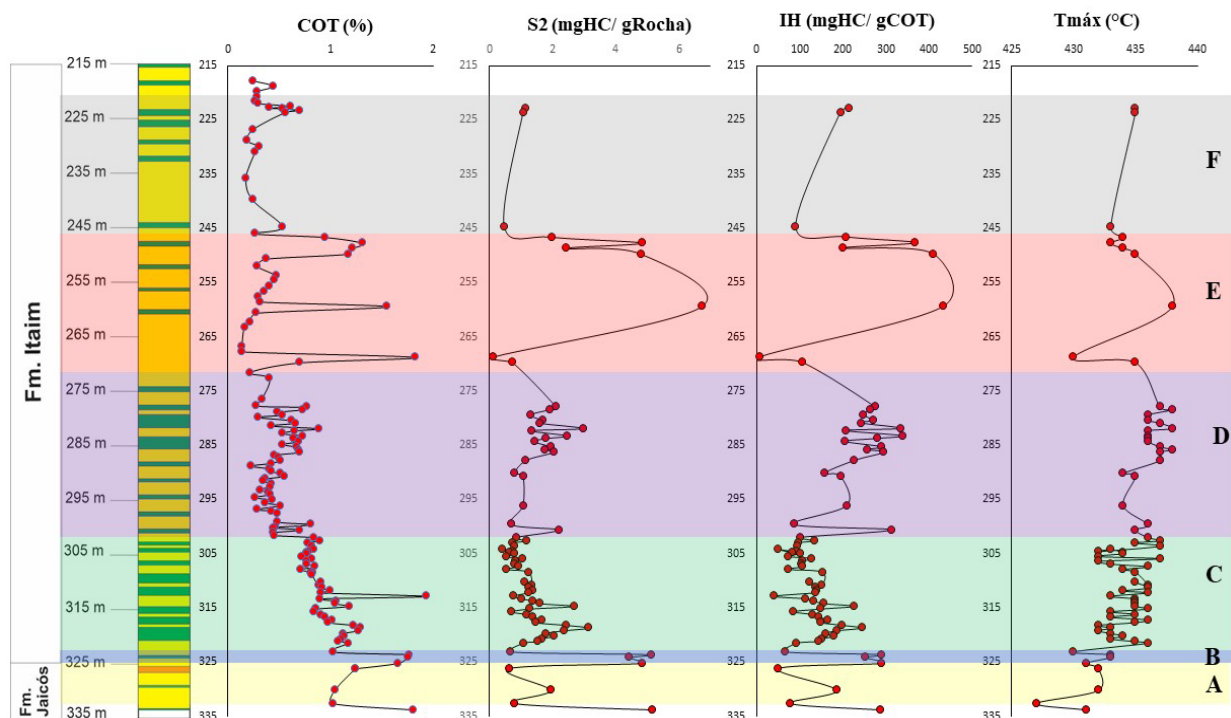
208,9 m onde o COT médio atribuído é de 0,68% (3 amostras); no poço GASBRAS-2-RS-TO, os valores de COT permaneceram, em geral, abaixo de 1,0 %, na maior parte da seção, exibindo, entretanto, alguns intervalos anômalos, com teores superiores a 1,0%, tanto na Formação Pimenteiras quanto na Formação Itaim. Intervalos com tendências prográdacionais, retrogradacionais e gradacionais, definidos com base nas variações reconhecidas e dispostas nas curvas geoquímicas, as quais estabelecem ciclos com diferentes magnitudes.

#### **Análise De Pirólise Rock-Eval**

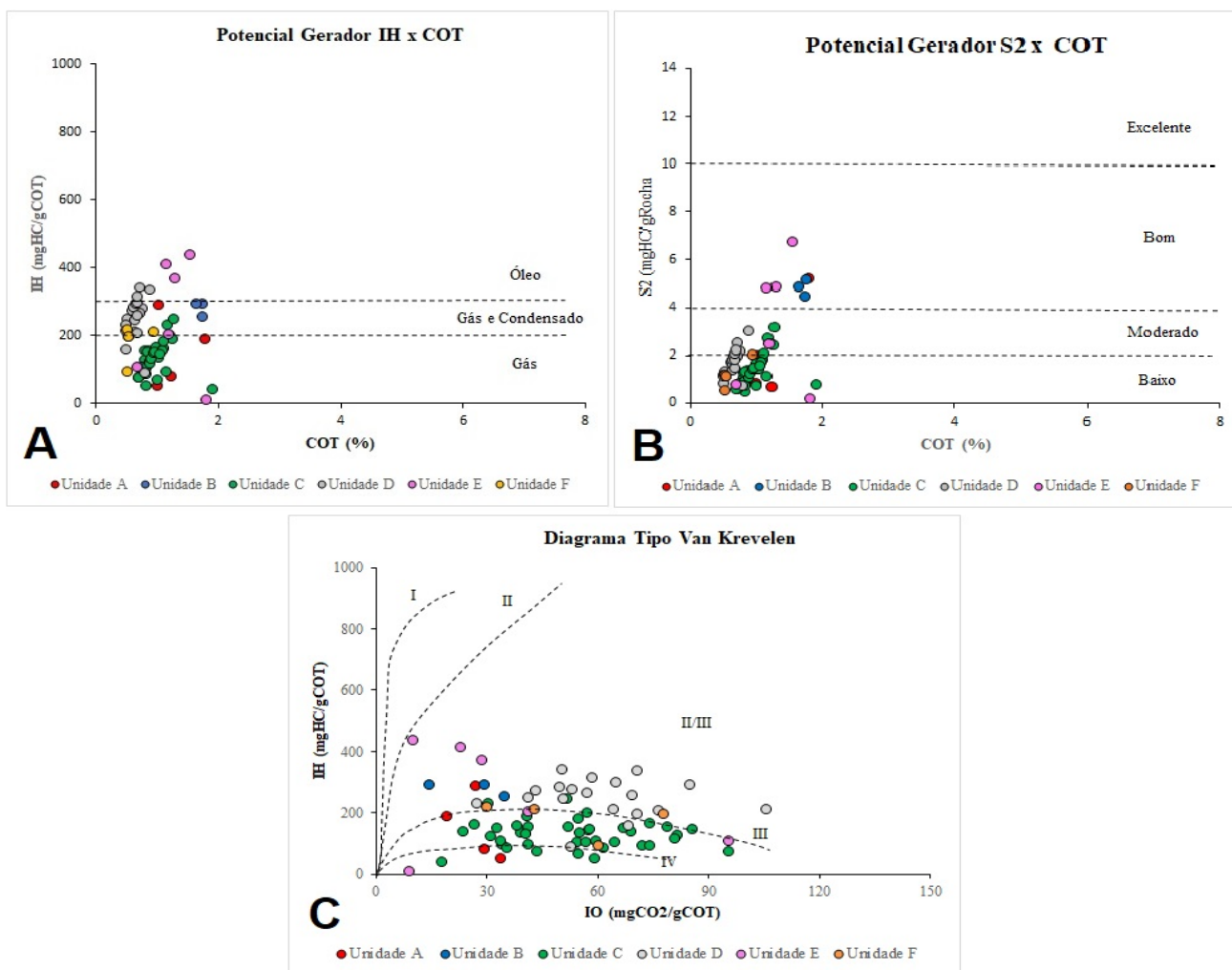
Os dados obtidos nesse procedimento são provenientes da porção inferior do poço GASBRAS-2-RS-TO e englobam a Formação Itaim por completo, além do topo da Formação Jaicós. São ao todo 77 amostras distribuídas de 222,8 m a 312,8 m de profundidade.

Baseado na correlação de resultados das análises de COT e Pirólise, foi possível gerar gráficos nos quais foram delimitadas seis unidades quimioestratigráficas, denominadas A,B,C, D, E e F. A unidade A abrange a porção mais superior da Formação Jaicós, as demais integram a Formação Itaim (Figura 6).

Essas unidades são descritas a seguir no que tange a litologia, geoquímica, potencial gerador de hidrocarbonetos (Figuras 7A e 7B) e ao tipo de matéria orgânica presente (Figura 7C).



**Figura 6**– As seis unidades quimioestratigráficas definidas para a Formação Itaim e a porção mais superior da Formação Jaicós com base na integração de dados de COT e Pirólise *Rock-Eval*.



**Figura 7**– Diagramas relacionando o potencial gerador das amostras, sendo em A) IH x COT; B) S2 x COT; e C) tipo Van Krevelen IH X IO.



### **Unidade A**

É composta por amostras pertencentes ao topo da Formação Jaicós (a saber: 326,20 m; 330,20 m; 332,60 m e 333,80 m), sendo constituída por arenito médio a grosso, bem selecionados, fracamente bioturbados e interlaminados finamente por arenitos finos e siltitos; arenitos médios a grossos, bem selecionados, estratificados e fracamente bioturbados; passando para arenitos maços a intensamente bioturbados, intercalados por siltitos; ciclos *finning up* arenitos finos estratificados a siltitos bioturbados; sucedidos por conglomerados.

Essas amostras apresentam de 1,02% a 1,80% de COT, o que poderia inferir em rochas potencialmente geradoras de hidrocarbonetos, contudo, são amostras de níveis pelíticos superficiais da mencionada formação. Tal fato impossibilita relacionar essa unidade a uma camada de interesse econômico para exploração de hidrocarbonetos. Além disso, se tratam de rochas siliciclásticas (92% e 87% de RI), as quais foram depositadas em um ambiente pouco óxido devido a baixos percentuais de enxofre encontrados (0,09% e 1,00%).

Em uma amostra, 326,20 m, a quantidade de RI ficou abaixo de 80%, se trata de conglomerado que, possivelmente, contém cimento carbonático em sua composição. O tipo de querogênio contido nessa seção corresponde a uma oscilação entre matéria orgânica do Tipo II/III e do Tipo IV. Além disso, os valores obtidos na pirólise demonstram que há baixo potencial para geração de hidrocarbonetos (S2 entre 0,30 a 0,49 mgHC/gRocha), os quais são formados, principalmente, por gás e condensado, segundo os dados de IH, que variam entre 50 e 287 mgHC/gCOT.

### **Unidade B**

Abrange as primeiras amostras da base da Formação Itaim, sendo formada, por arenitos finos, avermelhados, mosqueado a intensamente bioturbados, finamente laminados por siltitos. Dados geoquímicos encontrados nessa seção, respectivamente, são: COT (1,76%; 1,75%; 1,66%); S (0,13%; 0,07% e 0,16%); e RI (91%, 90% e 92%).

Isso demonstra que tal sucessão de rochas são, majoritariamente, formada por rochas siliciclásticas, depositadas em ambiente óxido. As geradoras dessa unidade são camadas poucas espessas de siltitos intercaladas entre arenitos espessos, mas inexpressivos em termos de geração econômica de hidrocarbonetos, devido as pequenas espessuras encontradas.

O tipo de querogênio atribuído a esse bloco é do tipo II/III a tipo III, ou seja, está correlacionada contribuição de matéria orgânica de origem marinha, com aporte considerável de material terrestre.

Os dados gerados na pirólise (S2, 4,42 a 5,11 mgHC/ gRocha; IH, 252,57 mgHC/ gCOT a 290,96 mgHC/ gCOT; e T<sub>máx</sub> (431°C a 433°C) indicam que essa seção possui um moderado potencial para geração de gás e condensado.

### **Unidade C**

A seção está localizada de 302,00 m a 323,60 m na Formação Itaim e é composta, da base para o topo, por: arenito avermelhado e intensamente bioturbado; blocos mais siltosos, contendo interlaminação com arenito muito fino, fraco a moderadamente bioturbado, intercalados por blocos mais arenosos, com estratificação de baixo ângulo, também interlaminados com siltito laminar.

São ao todo 42 amostras pertencentes à essa unidade cujos teores de COT são, majoritariamente, baixos (0,28% a 0,99%) no topo, e aumentam a medida que vai aumentando a profundidade (1,01% a 1,29%). Os valores de enxofre permearam de 0,01% a 0,72%, significando assim, que a deposição de toda essa zona ocorreu, provavelmente, em um ambiente óxido. Já o RI é, predominantemente, alto (80 a 97%), sendo que, apenas 3 amostras parecem ser formadas, parcialmente, por carbonatos, tais como: 304,60 m; 305,50 m; 312,85 m; e 321,50 m. O tipo de querogênio presente é do tipo III e tipo IV, sendo a primeira, proveniente de vegetais terrestres com teores de hidrogênio baixos e rico em oxigênio, propício a geração de gás, enquanto que o segundo, é referente a matéria orgânica oxidada, sem qualquer potencial para geração de hidrocarbonetos. De 40 amostras enca-minhadas para a pirólise, apenas 5 apresentaram moderado potencial para geração de hidrocarbonetos (S2, 2,03 a 3,15 mgHC/ gRocha), e o restante, apenas um baixo potencial gerador (< 2,00 mgHC/gRocha). Os hidrocarbonetos já gerados nesse bloco correspondem, prevalentemente, por gás (50,00 a 187,40 mgHC/gCOT). Além disso, os valores de T<sub>max</sub> são inferiores a 440°C, indicando uma matéria orgânica termicamente imatura.

### **Unidade D**

Essa seção corresponde as rochas encontradas de 277,95 m a 302,00 m de profundidade na Formação Itaim. É constituída pelas seguintes

litologias, da base para o topo, quais sejam: interlaminação de siltito laminar com arenito muito fino, com bioturbação fraca a moderada, geralmente, apresentando WCL e HCS, intervalando com porções mais arenosas de arenito muito fino, intensamente bioturbado a mosqueado com siltito, também, por vezes, laminar. Os teores de COT presentes são baixos (< 1,00%), adicionalmente, o tipo de querogênio associado é, sobretudo, o tipo II/III, ocorrendo, também, casos do tipo III e, subordinadamente, tipo IV. Isso é constatado pelo fato de boa parte das amostras terem quantidade considerável de hidrogênio em sua composição, mas devido ao valor significativo de oxigênio presente, ainda são insuficientes para gerar grandes volumes de hidrocarbonetos.

A matéria orgânica associada é de origem terrestre, podendo ter, também, alguma contribuição marinha. Os hidrocarbonetos a serem gerados correspondem, sobretudo, a gás e condensado (IH 205,80 a 308,36 mgHC/gCOT). Essa unidade, também, tem baixo potencial para geração, uma vez que, os teores de S2 permeiam entre 0,70 e 2,97 mgHC/gRocha. Nenhuma das amostras atingiu a temperatura mínima para obter maturidade térmica, ou seja, estão imaturas.

#### **Unidade E**

Essa unidade é composta por amostras de 246,60 m a 277,95 m de profundidade cujo as características litológicas, da base para o topo, são: intercalação de arenitos finos e brancos, ora mostrando estratificação (plano paralela, truncamentos de baixo ângulo e *hummocky*), ora fortemente bioturbados; sendo intercalados por interlaminados, menos espessos, de arenito muito fino, em maior proporção, intensamente bioturbado, por vezes, apresentando *hummocky*, com siltito, laminar. O teor de COT encontrada nessas

rochas varia de 0,13 a 1,82%, embora a maior parte das amostras não tenha ultrapassado 1%. Os valores de S permearam em 0,10% a 0,69% que indica ambiente sedimentar óxico. Enquanto que o resultado do RI corrobora para que, grande parte, sejam rochas siliciclásticas (RI > 84%), com exceção da amostra 276,40 m cujo teor de 58% indica composição parcialmente carbonática e, provavelmente, de origem diagenética. O tipo de querogênio associado é, majoritariamente, do tipo II/III, tendo também tipo III e tipo IV. As amostras possuem um moderado potencial gerador (S2 < 5,00 mgHC/gRocha) e índice de Hidrogênio entre 100 e 400 mgHC/gCOT. O principal problema reside na pouca espessura (< 3,00 m) dos intervalos com melhor potencial para geração de hidrocarbonetos, além dos baixos valores de evolução térmica constatados pelos valores de T<sub>máx</sub> encontrados.

#### **Unidade F**

Essa unidade abrange amostras de 222,40 m a 246,60 m de profundidade na Formação Itaim. Tais rochas incluem, da base para o topo: arenito fino, branco a cinza, com HCS e estratificação plano paralela; intercalações de arenito fino, branco a cinza, intensamente bioturbado e gradando para interlaminação de arenito muito fino com siltito laminar. No topo, ocorre a presença de siltito laminado, em maior proporção, intervalando com arenito muito fino, contendo HCS e moderadamente bioturbado. Os teores de COT são baixos, variando de 0,19% a 0,95%. O tipo de querogênio associado é do tipo III e, secundariamente, do tipo IV. Os hidrocarbonetos gerados apresentam um baixo potencial gerador (S2 entre 0,48 a 1,97 mgHC/gRocha) somente para gás (IH entre 90,57 a 215,09 mgHC/gCOT). Os valores de T<sub>máx</sub> são inferiores a 440°C, o que indica uma matéria orgânica termicamente imatura.

### **AMBIENTE DEPOSICIONAL**

#### **Formações Itaim e Jaicós**

Com base nos dados faciológicos e geoquímicos foi possível caracterizar o paleoambiente deposicional da Formação Itaim e do topo da Formação Jaicós como uma plataforma marinha rasa, submetida a ação predominante de ondas normais e de tempestade.

A seção de topo da Formação Jaicós compreende, da base para o topo, arenito gradando de médio a grosso para fino a muito fino, tendo boa seleção dos grãos, sendo o limite da formação,

marcado pela presença de conglomerados. Segundo Della Fávera (2001), no contexto de plataformas marinho-rasas, dominadas pela ação de ondas, em ambientes localizados entre NBO e NBOT, ocorrem ações de retrabalhamento por ondas de tempestade, como a gradação de grãos e presença de HCS em arenitos. O conglomerado descrito é de origem marinha, provavelmente, depositado na parte transicional a partir de canais fluviais de alta energia (contribuição deltaica?).

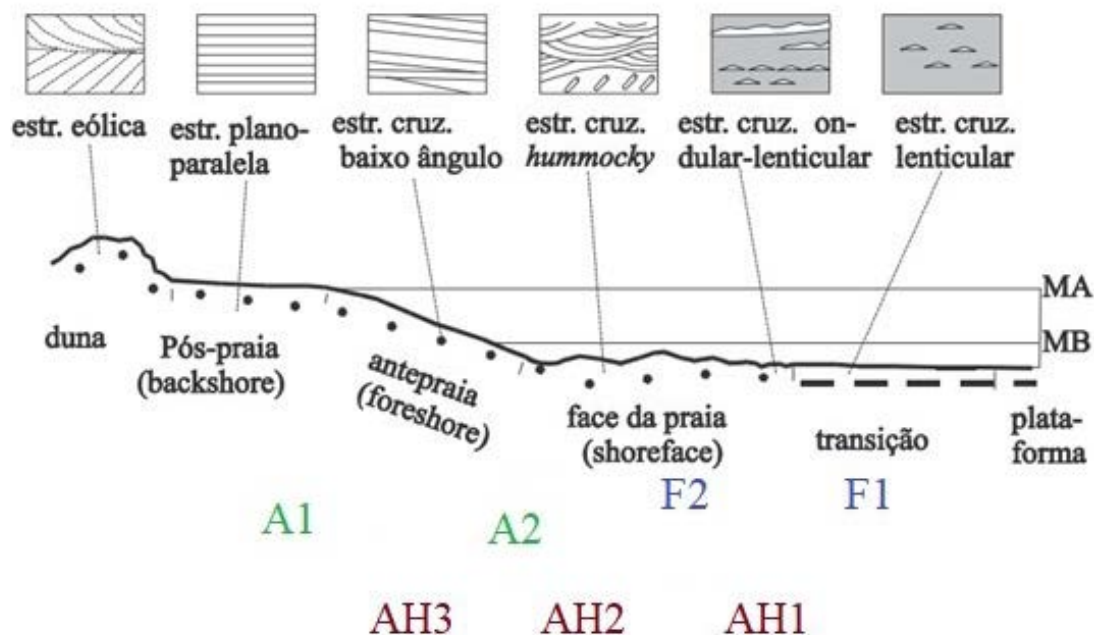
Na Formação Itaim há observação de ciclos de arenito muito fino a fino, granocrescentes em direção ao topo, bem marcados, com bioturbação moderada, e nos quais há predomínio de estratos de arenitos com HCS mais ao topo. Essas sucessões verticais que começam com granocrescência e se encerram, geralmente, com um *hardground*, sobre a última camada, com *hummocky* e muita bioturbação, conferem à fácies características de lobo de tempestade, onde a combinação de fluxos unidirecionais e oscilatórios pode findar na construção dessa estrutura sedimentar marcante (Della Fávera, 2001). A formação teria sido depositada entre a antepraia (*foreshore*) e a face de praia (*shoreface*), onde processos trativos, dominado por correntes e ondas, teriam influenciado o retrabalhamento dos sedimentos, além do aporte sedimentar advindo de prováveis

deltas.

### Formação Pimenteiras

A deposição da Formação Pimenteiras é reconhecida na literatura como tendo se processado em ambiente deposicional marinho plataformal sob ação dominante de ondas de tempestade (Caputo, 1984; Della Fávera, 1990; Vaz et al., 2007).

A análise em contexto das sete fácies que predominam na Formação Pimenteiras, quais sejam: F1, F2, AH1, AH2, AH3, A1 e A2, aliada aos dados geoquímicos, corrobora o modelo de deposição dessas fácies constiuintes na área de estudo dentro do cenário de ambiente marinho raso submetido a ação de ondas normais e de tempestade, em diferentes zonas da plataforma, conforme representado no modelo deposicional esquemático apresentado na figura 8.



**Figura 8** - Modelo deposicional para Formação Pimenteiras no poço GASBRAS-2-RS-TO, onde se verifica ser ambiente costeiro a marinho raso, dominado pela ação de ondas normais e de tempestade, advogado para a deposição da Formação Pimenteiras na área de estudo (sendo também aplicável para a Formação Itaim), com a indicação das fácies definidas neste estudo dentro do desenho esquemático do sistema deposicional de marinho-raso (Modificado de Della Fávera, 2001).

Na parte transicional, estão os folhelhos laminados, com pouca ou nenhuma bioturbação, e que foram depositados em ambientes distais da plataforma, lugar abaixo da zona de retrabalhamento por ondas de tempestade, em zonas mais profundas nas quais condições redutoras dominam e se tem melhor preservação da matéria orgânica (fácies F1). Nesse local, haveria a formação dos folhelhos radioativos mais importantes da bacia.

Um pouco acima na fisiografia dessa plataforma, foram depositados folhelhos finamente

intercalados com arenitos muito fino, abaixo do nível de ondas de tempestade, em um sistema menos redutor, podendo ter moderada bioturbação, até mesmo devido a pouca entrada de oxigênio no sistema permitindo a sobrevivência de organismos (Fácies F2 e AH1 e AH2).

As fácies predominantemente arenosas (AH3, A1 e A2) estariam se depositando entre a pós-praia e a face da praia. Nessas duas zonas, mudanças no fluxo, ações de ondas e bioturbação foram essenciais para gerar distintos de padrões de estratificações. No primeiro sistema, acima



das ondas normais, há a preservação de estruturas, além ser característico de acamamento plano-paralelo e truncamentos de baixo ângulo.

A medida que se caminha para a rampa, o fluxo vai aumentando, se está próximo a zona de ondas de tempestade, há retrabalhamento dos sedimentos devido ação de ondas e fluxos combinados de tempestade, o que pode culminar na construção de HCS (tempestitos). Adicionalmente, como são regiões próximas ao continente, constitui o depósito de alta energia, concentrando fração areia.

As intercalações Silte/Areia estão associadas a decantação granocrescentes que ocorrem na plataforma, na qual quanto mais próximo do continente, maior seria a porcentagem de arenito na camada.

Zonas próximas a *foreshore* estariam interligadas com a ação de ondas normais e com um fluxo de bioturbação maior, capaz de retrabalhar o material, não preservando estratificações nele.

#### Relação COT x S nos folhelhos radioativos

Com base no resultado de análises geoquímicas, foi possível a elaboração do gráfico COT x S (Figura 9) com a finalidade de diferenciar as condições paleoambientais reinantes na deposição de cada um dos intervalos de folhelhos geradores reconhecidos, ressaltando as características e a mudança de disaeróbico para anaeróbico no sistema deposicional. O folhelho

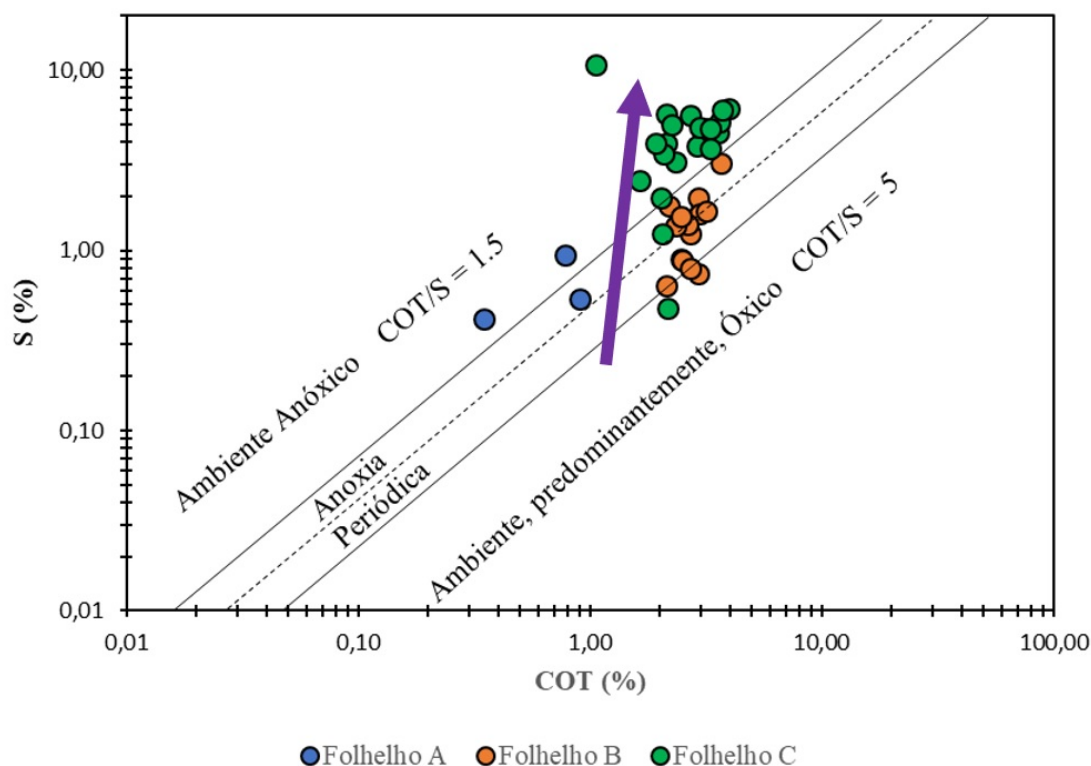
A, disposto na base da Formação Pimenteiras, é, dentre esses três intervalos geradores, o que possui teores relativamente baixos tanto de COT quanto de S.

Está inserido em um quadro, predominantemente, aeróbico/disaeróbico, ou seja, no momento da deposição havia pouca circulação de água e oxigênio contra o fundo do sítio deposicional.

No entanto, os folhelhos B e C, por terem maiores espessuras e, conseqüentemente, maior amostragem, marcam a passagem de um ambiente, predominantemente, óxico para anóxico. Essa passagem é ressaltada quando se utiliza somente as subunidades inferiores dos folhelhos B e C, mais ricas em COT, e as três amostras pertencentes ao folhelho A (Figura 9).

O folhelho B contém teores elevados de COT (1,1% a 3,7%) e evidencia o aumento na concentração de enxofre no sistema, só que ainda mostra oscilação nesses teores – ou seja, momentos de menor concentração (0,38% a 0,90% de S) intercalando com indicadores de condições mais redutoras (1,23% a 3,05% de S).

Já o folhelho C, em particular o seu subintervalo inferior, se destaca por conter maior concentração de COT (1,93% a 3,95%) concomitantemente com altas percentagens de enxofre no sistema (3,12% a 10,70%), caracterizando um ambiente anóxico.



**Figura 9** - Relação COT x S do folhelho A com as subunidades inferiores dos folhelhos B e C no poço GASBRAS-2-RS-TO. A seta roxa evidencia o aumento da taxa de anoxia do folhelho A até o C.

## ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA

A figura 10 apresenta o perfil de integração de dados e interpretações faciológicas, geoquímicas e estratigráficas das formações Itaim e Pimenteiras no poço GASBRAS-2-RS-TO.

No âmbito da Formação Itaim, com base na integração desses dados, são reconhecidos três ciclos deposicionais prográdantes (sequências de 3ª ordem?), denominados **ITA-1**, **ITA-2** e **ITA-3**, a partir da base, similares às sequências genéticas de Galloway (1989), com espessuras médias de cerca de 40 m. Cada ciclo é limitado na base por uma inundação marinha / superfície transgressiva (ST), também definidas por anomalias nos teores de COT nas fácies pelíticas (F1 e F2), que contemplam as superfícies de inundação máxima (SIM) de cada ciclo, e que é, então, sucedido pela seção prográdante que predomina em cada ciclo. Esta seção prográdante é evidenciada pela tendência de diminuição dos teores de COT em direção ao topo dos ciclos e pelo aumento da proporção de fácies arenosas proximais na mesma direção. As setas menores (em azul) da Figura 10 indicam as tendências prográdantes de cada ciclo, marcando o preenchimento progressivo do espaço de acomodação em cada ciclo com a tendência progressiva de raseamento do sistema em direção ao topo.

Considerando-se o conjunto dos três ciclos ITA-1, ITA-2 e ITA-3, reconhecidos na Formação Itaim, se observa uma tendência geral prográdante nessa formação, destacada pela seta vermelha na figura 10. Esta tendência geral prográdacional na Formação Itaim é bastante bem evidenciada quando se nota a tendência geral de variação da curva de teores de COT desde a base até o topo da Formação Itaim.

No contexto da Formação Pimenteiras, por sua vez, são também identificados três ciclos deposicionais prográdantes (sequências de 3ª ordem?), com espessuras individuais variando entre 60 e 70 m, semelhantes aos ciclos definidos na Formação Itaim, que foram então denominados de PMT-1, PMT-2 e PMT-3, a partir da base (Figura 10), igualmente similares à sequências genéticas de Galloway (1989). Tais ciclos são, igualmente, limitados na base por uma

inundação marinha / superfície transgressiva (ST), também pelas anomalias de COT nas fácies pelíticas (F1 e F2), que contemplam as superfícies de inundação máxima (SIM) de cada ciclo. São, então, sucedidos pela seção prográdante predominante em cada ciclo.

No entanto, quando se considera em conjunto os ciclos PMT-1, PMT-2 e PMT-3, reconhecidos na Formação Pimenteiras, observa-se uma tendência geral retrográdante desde a base em direção ao topo da Formação Pimenteiras (tendência destacada com a seta vermelha na Figura 10). Esta tendência retrográdante geral é melhor evidenciada pelo maior enriquecimento orgânico dos três intervalos de anomalias do COT (folhelhos A, B e C), e pelo aumento do caráter de anoxia em direção ao topo durante a deposição desses intervalos, conforme assinalado acima no item anterior.

Essa repetição de de ciclos prográdacionais, conferida nesse trabalho, culminando com uma importante inundação da plataforma (SIM), é comum em bacias marinhas, de acordo com Galloway (1989).

Os resultados da geoquímica obtidos a partir da testemunhagem contínua dos depósitos das formações Itaim e Pimenteiras permitiram a delimitação e o detalhamento em alta resolução dessas unidades, bem como o rastreamento das SIMs de 3ª ordem dessa seção, em caráter ainda inédito para a borda sudoeste da Bacia do Parnaíba.

A superfície de contato entre as formações Itaim e Pimenteiras é marcada como uma superfície de descontinuidade de maior magnitude, marcando a inflexão entre a tendência geral prográdante da Formação Itaim para uma tendência geral retrográdante da Formação Pimenteiras.

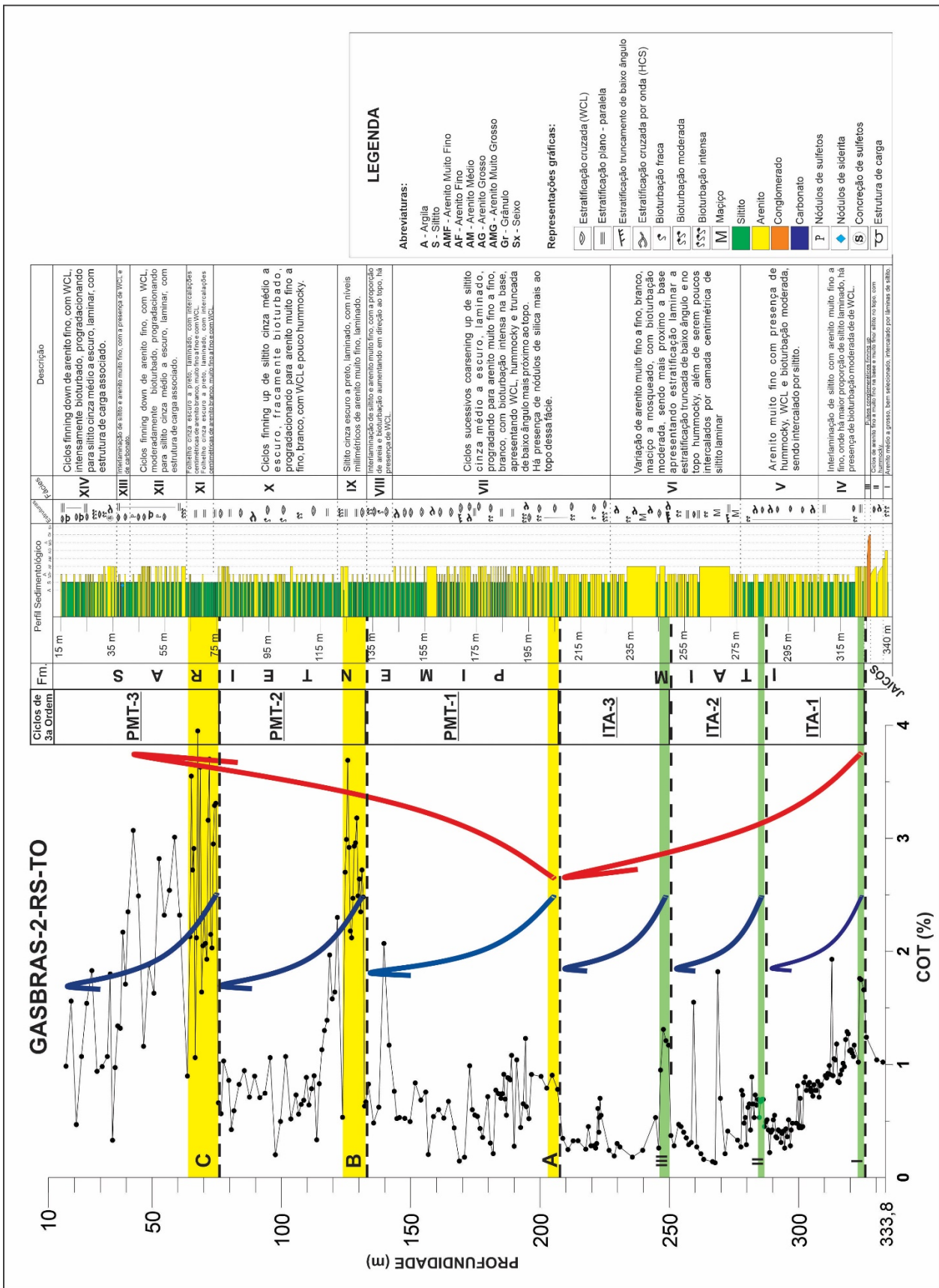
Tal superfície é assinalada como uma Superfície Transgressiva (ST) em escala maior. Outro ponto importante a ser destacado, é que a Superfície de Inundação Máxima (SIM) associada ao folhelho C, que constitui, segundo Rodrigues (1995), no principal gerador do Devoniano da bacia, é associada a um evento anóxico global, de idade frasniana, por Rodrigues et al. (1995) e Steemans et al. (2021).

## CONCLUSÕES

Os resultados gerados a partir das análises sedimentológica, geoquímica (COT e Pirólise) e estratigráfica do poço GASBRAS-2-RS-TO possibilitaram delimitar as formações presentes

(Jaicós, Itaim e Pimenteiras), bem como, detalhar a evolução deposicional desta seção na borda sudoeste da bacia.

As fácies encontradas nessas formações sugerem



**Figura 10** - Perfil de integração de dados e interpretações faciológicas, geoquímicas e estratigráficas das formações Itaim e Pimenteiras no poço GASBRAS-2-RS-TO. No âmbito da Formação Itaim, são reconhecidos três ciclos deposicionais progradantes (ITA-1, ITA-2 e ITA-3), enquanto que na Formação Pimenteiras são reconhecidos os Ciclos progradantes PMT-1, PMT-2 e PMT-3. Os números I, II e III marcam as superfícies de inundação máxima (SIM) de cada ciclo na Formação Itaim, enquanto que as letras A, B e C marcam as SIMs de cada ciclo na Formação Pimenteiras. As setas menores (em azul) destacam as tendências progradante de cada ciclo individual. Já as setas vermelhas maiores (ciclos agrupados) apontam para a tendência progradante (para a esquerda) ou retrogradante (para a direita) em maior escala.



o predomínio de tempestitos e fluxos de alta energia no topo da Formação Jaicós, ciclos finning up compondo três ciclos progradacionais com tendência geral também progradacional na Formação Itaim, e três ciclos progradacionais, compondo uma tendência geral retrogradacional, na Formação Pimenteiras. Na seção superior da Formação Pimenteiras registra-se a SIM principal, de idade frasniana, de toda a seção estudada, que se constitui no principal intervalo gerador do Devoniano da bacia.

No que se relaciona à Formação Pimenteiras, foram identificadas e caracterizadas três SIMs (folhelhos A, B e C), que apresentam relevância tanto estratigráfica, como também, quanto no que diz respeito a intervalos geradores de HCs. Dentre esses três intervalos de folhelhos radiativos, os folhelhos B e C se mostram mais promissores como geradores, em especial, em seus subintervalos – 125,0 m a 132,0m e 64,6 m a 74,6 m – onde, a média de COT alcança 2,72% e 2,62%, respectivamente.

## AGRADECIMENTOS

Ao Projeto GASBRAS - Rede de Pesquisa e Desenvolvimento em Gás Não Convencional no Brasil, sediado no IEE-USP e financiado pela FINEP, pelo suporte financeiro que viabilizou a perfuração do poço GASBRAS-2-RS-TO; ao Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica (LGQM), da FGE/UERJ, pela realização das análises geoquímicas, e ao Programa de Formação de Recursos Humanos (PRH28.1), Convênio UERJ/FINEP/ANP, pela concessão de bolsa de Mestrado à Raíssa Lessa.

## REFERÊNCIAS

- CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil**, 586 p. Santa Bárbara. 1984. Tese (Doutorado), University of Califórnia.
- CUNHA, F.M.B. Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico. Rio de Janeiro, 1986. 107 p. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências.
- DELLA FÁVERA, J.C. **Fundamentos da Estratigrafia Moderna**. Rio de Janeiro. Ed. UERJ. 264 p, 2001.
- DELLA FÁVERA, J.C. **Tempestitos na Bacia do Parnaíba**. Porto Alegre, 1990. 560 p. Porto Alegre. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências.
- GALLOWAY, W. E. Genetic Stratigraphic Sequences in Basin Analysis: I Architecture and Genesis of Flooding-Surface Bounded Depositional Units. **AAPG Bull**, v. 73, n. 2, p. 125-142, 1989.
- KEGEL, W. Contribuição para o estudo do devoniano da Bacia do Parnaíba. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do Inst. **Brasileiro de Geografia e Estatística**, n. 141, 48 p., 1953.
- MENDONÇA FILHO, J.G.; CARVALHO, M.A., MENEZES, T.R. Palinofácies – técnicas e procedimentos de trabalho com formas fósseis e formas comparativas atuais. São Leopoldo, UNISINOS - **Publicação Especial**, p. 20-24, 2012.
- RODRIGUES, R. **A geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba**. Porto Alegre, 1995. 225 p. Tese. (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências.
- RODRIGUES, R.; LOBOZIAK, S.; MELO, J.H.G.; ALVES, D.B. Geochemical characterization and miospore biostratigraphy of the Frasnian anoxic event in the Parnaíba Basin, Northeast Brazil. **Bull. Centres Rech. Explo. – Prod. Elf Aquitaine**, v. 19, n. 2, p. 319–327, 1995.
- STEEMANS, P.; PEREIRA, E.; LE HÉRISSE, A.; GRAHN, Y.; STREEL, M.; BRITO, M.; BERGAMASCHI, S.; RODRIGUES, R. Palynology and geochemistry of the Frasnian global transgression in the Parnaíba Basin, Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 284, p. 104345, 2021.
- TYSON, R. V. **Sedimentary Organic Matter**. Londres, Chap. & Hall, 615 p, 1995.
- US EPA - United States Environmental Protection Agency, 2002.
- VAIL, P.R. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, in Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration. **AAPG Memoir**, v. 26, p. 49-212, 1977.
- VAZ, P.T.; REZENDE, N.G.A.M.; WANDERLEY FILHO, J.R. & SILVA TRAVASSOS, W.A. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, p. 253–263, 2007.
- WALKER, R.G. & JAMES, N.P. **Facies Models**. Geological Association of Canada, p. 1- 409 p., 1992.

*Submetido em 4 de dezembro de 2021  
Aceito para publicação em 25 de fevereiro de 2022*