



FÁCIES ORGÂNICA DA FORMAÇÃO BAMBUCA, BACIA DO VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA, COLÔMBIA: IMPLICAÇÕES PARA A GERAÇÃO DE PETRÓLEO E CARACTERIZAÇÃO PALEOAMBIENTAL

Organic facies of the Bambuca Formation, Upper Valley Magdalena Basin, Colômbia:
Implication to oil generation and characterization paleoenvironment.

Samille Costa Macêdo¹; João Graciano Mendonça Filho²; Felix Thadeu Teixeira Gonçalves³; Juliana Andrade Iemini⁴.

¹ UFRJ, Departamento de Geologia, CCMN/IGEO, Cidade Universitária – Ilha do Fundão, samille@gmail.com 21949-900. Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

² DEGEO/IGEO/UFRJ, Ilha do Fundão, 21949-900, RJ, Brasil, graciano@geologia.ufrj.br.

³ UFRJ, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Civil Cidade Universitária – Ilha do Fundão 21949-900. Rio de Janeiro- felix.goncalves@lab2m.coppe.ufrj.br

⁴ UFRJ, Departamento de Geologia, CCMN/IGEO, Cidade Universitária – Ilha do Fundão, juliana.iemini@gmail.com 21949-900. Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

Resumo

As rochas pelíticas do Cretáceo Superior são as geradoras da maior parte das reservas de petróleo na Colômbia. A Bacia do Valle Superior Del Magdalena (VSM) possui afloramentos de boa qualidade e níveis de evolução térmica que variam desde o imaturo até o fim da “janela” de geração de óleo, o que torna esta região uma das mais propícias para o estudo dos processos de geração e migração primária do petróleo no Cretáceo Superior. O objetivo principal consistiu no estudo de fácies orgânica da Formação Bambuca do VSM em uma seção aflorante, Riacho Bambuca, visando determinar o potencial de geração de petróleo e caracterizar o paleoambiente de deposição desta formação. Para tanto foram utilizadas dezoito amostras para análises de palinofácies (caracterização da assembléia de componentes do querogênio) e geoquímica orgânica (análises de Carbono Orgânico Total – COT e pirólise *Rock-Eval*, cedidas pelo Instituto Colombiano do Petróleo – ECOPETROL). A análise de palinofácies compreendeu a utilização de técnicas de microscopia (luz branca transmitida e luz azul incidente). Além disso, foi realizada a análise de Índice de Coloração de Esporos (ICE) para a determinação do estágio de maturação térmica. O material estudado apresentou o predomínio do Grupo matéria orgânica amorfa com colorações de fluorescência variando do amarelo ao laranja claro. O Grupo Palinomorfo é representado por cistos de dinoflagelados e esporomorfos. O material lenhoso é representado principalmente por fitoclastos opacos. Os resultados das análises geoquímicas revelaram teores de COT de médios a elevados, excelente potencial de geração de hidrocarbonetos (PG > 4 mg HC/g Rocha), índice de hidrogênio variando de 132 a 613 mg HC/g e baixos valores de índice de oxigênio mostrando o predomínio do querogênio tipo II. O baixo grau de maturação térmica foi determinado por valores de Índice de Coloração de Esporos entre 2,5-3,0, valores de Tmax inferiores a 440°C e Índice de Produção de hidrocarboneto inferior a 0,2. De acordo com os dados de fácies orgânica, a Formação Bambuca mostrou uma variação de ambiente proximal de plataforma óxica a bacia distal anóxica, contendo

querogênio de excelente qualidade e com quantidade adequada para a geração de petróleo.

Palavras chaves: Fácies Orgânica Formação Bambuca, Cretáceo, Colômbia, Palinofácies, Geoquímica Orgânica.

Organic facies of Bambuca Formation, Del Magdalena Upper Valley Basin, Colômbia: Implications for the oil generation and paleoenvironmental characterization.

Abstract

Upper Cretaceous pelitic rocks generate most of the oil reserves in Colombia. In Del Magdalena Upper Valley (MUV), the existence of good quality outcrops and thermal evolution levels that vary from immaturity to the end of the oil generation “window” makes it one of the most appropriate regions for the study of primary migration and generation of oil in Upper Cretaceous. The main objectives of this work were to study the organic facies of Bambuca Formation in an outcrop section called Riacho Bambuca (Bambuca Creek), determine the oil generation potential and characterize the paleoenvironment. For this research, 18 samples were used in palynofacies analysis (characterization of the kerogen components assembly) and in organic geochemistry analysis (Total Organic Carbon – TOC analysis and Rock-Eval pyrolysis, provided by Colombia Oil Institute – ECOPETROL). The palynofacies analysis included the use of microscopy techniques (transmitted white light and incident blue light). Furthermore, a Spore Coloration Index (SCI) analysis was made in order to determine the thermal maturation stage. The studied material was composed mainly of an amorphous organic substance, with its fluorescent coloration varying from yellow to bright orange. The palynomorph group is represented by spore morph and dinoflagellate cysts. The ligneous material present is mainly opaque phytoclasts. The results of geochemical analysis showed TOC contents ranging from medium to high, excellent potential for the generation of hydrocarbons (PG > 4 mg HC/g of rock), hydrogen index ranging from 132 to 613 mg HC/g, and low values of oxygen index, characterizing type II kerogen. The low degree of thermal maturation was determined by Spore Coloration Index values ranging from 2,5 to 3,0, Tmax values below 440°C and Hydrocarbon Production Index inferior to 0,2. According to the organic facies data, La Luna Formation deposited in a marine environment with facies from oxic shelf and anoxic distal basin; there was kerogen of excellent quality, and its quantity was adequate for the generation of oil.

Key words: Organic facies, Bambuca Formation, Cretaceous, Colombia, Palynofacies, Organic Geochemistry.

1. Introdução

O Valle Superior Del Magdalena é uma prolífica bacia intermontana alongada na direção NE-SW, localizada entre as Cordilheiras Andina Central e Oriental, na porção centro sul da Colômbia (Figura 1). A seqüência estratigráfica é composta por depósitos do Cretáceo ao Recente, depositado sobre um embasamento vulcanoclástico de idade Jurássica.

Os depósitos sedimentares Albo-Coniaciano do Grupo Villeta são considerados como os principais responsáveis pela geração das reservas de petróleo descobertas até o momento (2650 milhões de barris; Kairuz *et al.*, 2000; Sarmiento & Rangel, 2004). Os estudos das rochas geradoras de petróleo realizados em poços exploratórios são normalmente amostrados a cada nove metros e, geralmente, por meio de calha, o que torna uma avaliação pouco realista das rochas geradoras de uma bacia em virtude dos obstáculos na qualidade de amostragem. Assim a solução para esta limitação foi implementar o estudo numa seção aflorante denominada Riacho Bambuca, trazendo novos conhecimentos para a elucidação dos processos de geração de hidrocarbonetos.

O objetivo principal consistiu no estudo de fácies orgânica em rochas cretáceas do Valle Superior Del Magdalena, Formação Bambuca, em uma seção aflorante, Riacho Bambuca, visando determinar o potencial de geração de petróleo, além da caracterização paleoambiental. Para tanto, foram realizadas análises de palinofácies associadas à técnicas de geoquímica orgânica.

Os estudos organofaciológicos nunca foram realizados em rochas geradoras colombianas, ainda mais numa bacia tão importante para a geração de petróleo como a Bacia do Valle Superior Del Magdalena. Sendo assim, a aplicação dos estudos de facilogia orgânica é considerada de grande importância na caracterização do

paleoambiente de formação das rochas geradoras, na determinação do estágio de evolução térmica da matéria orgânica e do potencial de geração de petróleo.

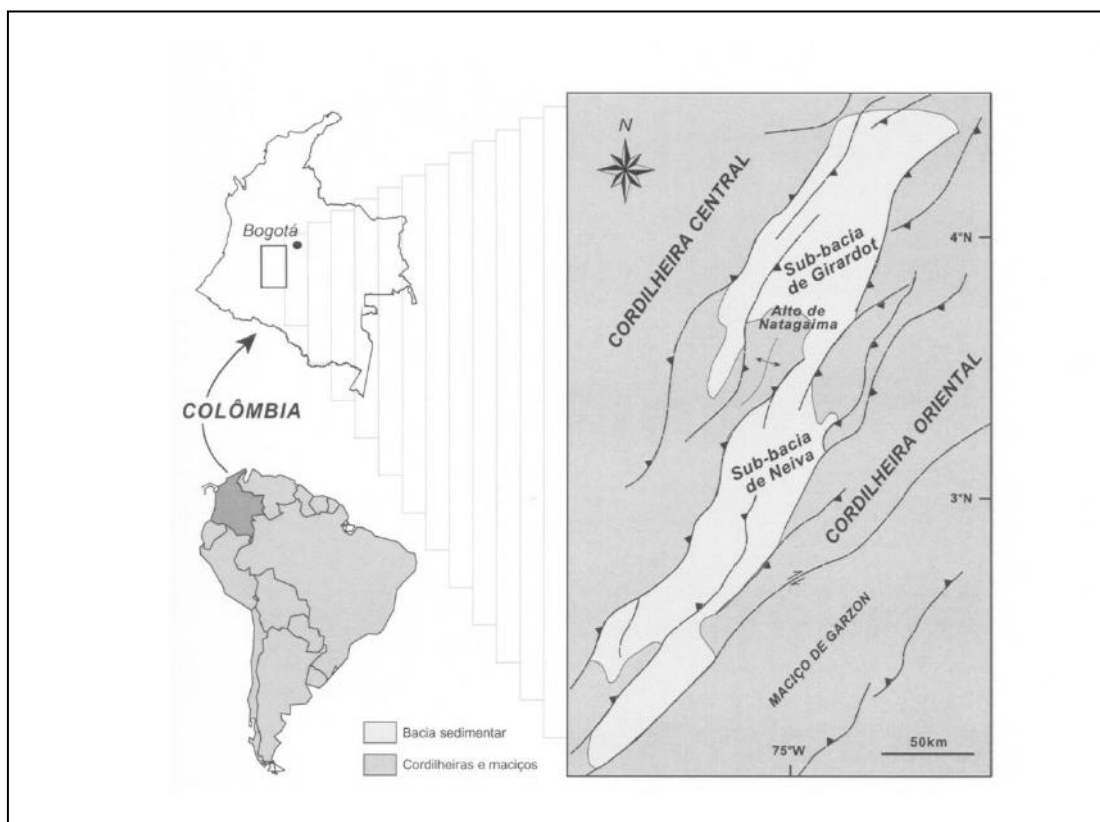


Figura 1: Mapa de localização e o arcabouço estrutural da Bacia do Vale Superior do Magdalena (modificado de Schamel, 1991).

2. Geologia Regional

A Bacia do Valle Superior Del Magdalena (VSM), é uma bacia intermontana alongada na direção NE-SW, com uma área de, aproximadamente, 26.000 km². A bacia do VSM localiza-se entre as Cordilheiras Andina Central e Oriental, na porção centro sul da Colômbia. Segundo Schamel (1991), é limitada ao norte pela Bacia do Valle Médio Del Magdalena e ao sul pela Cordilheira Andina, sendo dividida nas sub-bacias Girardot e Neiva pelo alto de Nataigama.

A seqüência estratigráfica é composta por depósitos do Cretáceo ao Recente, sotopostos ao embasamento vulcanoclástico do período Jurássico (Figura 2). A

evolução geológica do VSM está relacionada às múltiplas fases da evolução dos Andes Colombianos (Cooper, *et al* 1995).

CRO-ESTRATIGRAFIA		LIRO-ESTRATIGRAFIA		
QUATERNÁRIO		Fm. Gigante		
CRETÁCEO	Plioc.	Fm. Mesa		
	Mioc.	Gr. Honda		
		Fm. Barzalozza		
	Oligoc.	Gr. Gualanday		
	Eoc.			
	Paleoc.	Fm. Guaduala		
CRETÁCEO	Maastr./ Santon.	Fms. Monserr./Buscav.		
		Gr. Oline		
	Super.	Coniac.	Grupo Villeta	Fm. La Luna
		Turon.		Fm. Bambuca
		Cenom.		Fm. Tetuan
	Infer.	Albiano	Fm. Cacallos	
		Aptiano	Fm. Yavi	
		Barrem.		
		Neocom.		
	JURÁSSICO		Fm. Saldaña	

Figura 2: Coluna estratigráfica generalizada do Vale Superior do Magdalena (modificado de Kairuz *et al.*, 2000).

A seção sedimentar aflorante, Riacho Bambuca, compreende o intervalo deposicional Albo-Santoniano, composto por folhelhos e arenitos marinhos proximais da Formação Caballos; carbonatos e folhelhos marinhos das formações Tetuan, Bambuca e La Luna (Grupo Villeta), e os cherts e folhelhos do Grupo Oline (Figura 3). Estes sedimentos depositaram-se sobre uma extensa bacia de retro-arco que cobriu grande parte do noroeste da América do Sul. Esta sucessão sedimentar foi controlada principalmente por variações do nível relativo do mar durante o Albo-Campaniano.

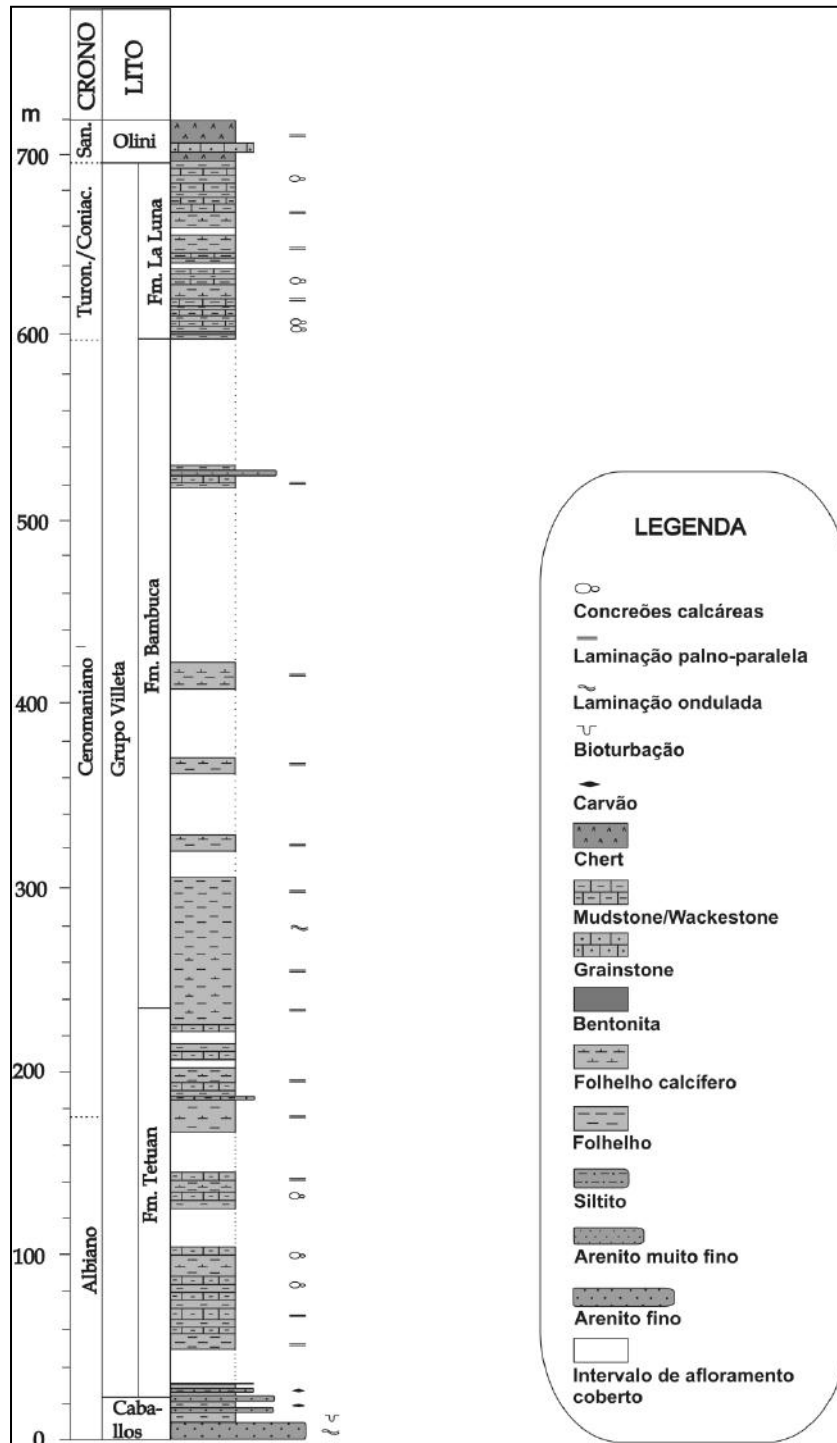


Figura 3: Coluna estratigráfica da seção aflorante do Riacho Bambuca, mostrado suas principais características litológicas, sedimentológicas e cronoestratigráficas inferidas (Gonçalves, 2005).

Baseado em estudos de outras seções aflorantes no VSM e na Cordilheira Andina Oriental, Villamil (1998) identificou ciclos transgressivos-regressivos de caráter regional. A mudança de arenitos proximais da parte superior da Formação Caballos

para siltitos e folhelhos na parte inferior da Formação Tetuan marca um aumento regional do nível do mar no Albiano, definindo trato de sistema transgressivo que atingiu seu desenvolvimento máximo no Albiano médio/tardio (superfície de inundação máxima contemporânea ao Evento Anóxico Global 1, Figura 4) , registrado por um intervalo de carbonatos e folhelhos escuros com abundantes concreções calcíferas na porção inferior da Formação Tetuan.

Do Albiano tardio ao Cenomaniano inferior se desenvolveu um trato de sistema de mar alto marcado pelo aumento progressivo da espessura e frequência das camadas de carbonatos pelágicos. A queda do nível do mar do Cenomaniano inferior é registrada por uma camada delgada de siltito abruptamente sobreposta às camadas de intercalações folhelho-carbonato na parte superior da Formação Tetuan. Durante o Cenomaniano em todo VSM, ocorre incremento da proporção de depósitos siliciclásticos em relação aos calcários, caracterizando um novo trato de sistema de mar alto. O evento regressivo no Cenomaniano superior é marcado em todo VSM, representado na seção estudada por uma camada de arenito fino que interrompe de forma abrupta a sucessão pelítica da Formação Bambuca em sua porção superior (em torno dos 530m, Figura 3).

Na porção superior da Formação Bambuca, retornam as intercalações de folhelhos escuros e carbonatos pelágicos (grande parte encontra-se encoberta na seção), registrado em todo VSM e por praticamente todas as bacias cretáceas da Colômbia, caracterizando um trato de sistema transgressivo do Cenomaniano superior/Turoniano inferior.

O máximo transgressivo ocorreu na base da Formação La Luna (ao redor de 600m; Figura 3), sendo representada por um intervalo condensado de folhelhos e carbonatos ricos em matéria orgânica e pirita e pela presença de abundantes concreções calcárias e de vários níveis finos de bentonita (Figura 3), contemporâneo ao segundo Evento Anóxico Oceânico (Figura 4), sendo considerados como marcadores dos limites

Cenomaniano – Turoniano na Colômbia e particularmente no VSM (Villamil, 1998; Villamil & Aranco, 1998).

A porção média superior da Formação La Luna é caracterizada por um aumento da espessura das camadas da seqüência rítmica folhelho- calcáreo com leve predomínio dos folhelhos, indicativo de condições de mar alto. Finalmente, na parte mais superior da seção Riacho Bambuca, camadas de cherts e fosfatos assinalam a base do Grupo Olini, marcando o rebaixamento do nível do mar do Santoniano inferior (Villamil, 1998).

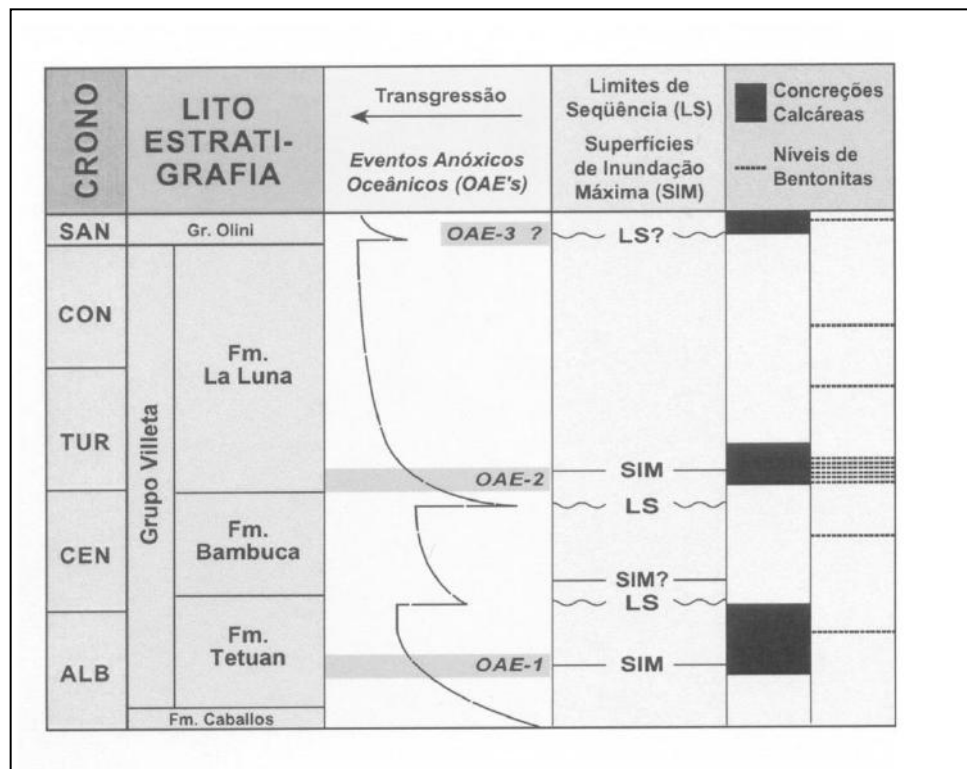


Figura 4: Quadro resumo estratigráfico do intervalo Albiano/Santoniano na Colômbia (especialmente na região do Vale do Magdalena e Cordilheira Oriental) de acordo com o trabalho de Villamil (1998), mostrando uma curva de *onlap* costeiro, principais limites de seqüências, eventos paleoceanográficos e marcos litológicos.

3. Sistema Petrolífero

O Grupo Villeta contém dois principais intervalos estratigráficos geradores, responsáveis pela maior parte do óleo comercial encontrado no VSM.

O principal intervalo de rocha geradora dentro do Grupo Villeta são as rochas calcárias das formações Tetuan e La Luna.

A maior descoberta de óleo do VSM está acumulada na Formação Caballos, o qual é a principal unidade reservatório, e a segunda unidade mais importante de rocha reservatório por volume de óleo no VSM é a Formação Monserrate (Ver Figura 2). As rochas de sobrecarga compreendem todos os depósitos sedimentares do Cretáceo ao Terciário sobrepondo as rochas geradoras.

O soterramento foi ocasionado pelo mecanismo de empurrão, que também empilhou a Formação Yavi (Aptiano) e a Formação Saldãna (Jurássico) (Ver Figura 2), ou unidades litológicas mais velhas incluídas no mesmo mecanismo tectônico.

As trapas são predominantemente estruturais e foram formadas do Eoceno ao Mioceno por deformação associada com o desenvolvimento de dobras e faixas de empurrão. Com exceção da parte nordeste da bacia, onde o momento crítico ocorreu durante o Paleogeno, o momento crítico do sistema petrolífero ocorreu durante o Mioceno assim que a rocha geradora alcançou a saturação crítica de expulsão. A extensão temporal do sistema petrolífero ocorreu do Albiano ao Recente. Provavelmente, grandes volumes de hidrocarboneto foram degradados na superfície em consequência dos eventos de deformação e de erosão que ocorreram durante o Terciário pela maior parte no Mioceno.

4. Material e Métodos

4.1 Material de Estudo

Dezoito amostras da Formação Bambuca foram coletadas de uma seção com 700m de espessura que aflora ao longo do Riacho Bambuca no flanco oeste da bacia (Figura 5).

O intervalo coletado da Formação Bambuca apresenta uma espessura total de cerca de 360 m, dos quais uma grande porção se encontra encoberta.

As amostras para análise de palinofácies e os resultados de geoquímica orgânica foram cedidas pelo Instituto Colombiano do Petróleo (ICP) – ECOPEPETROL.

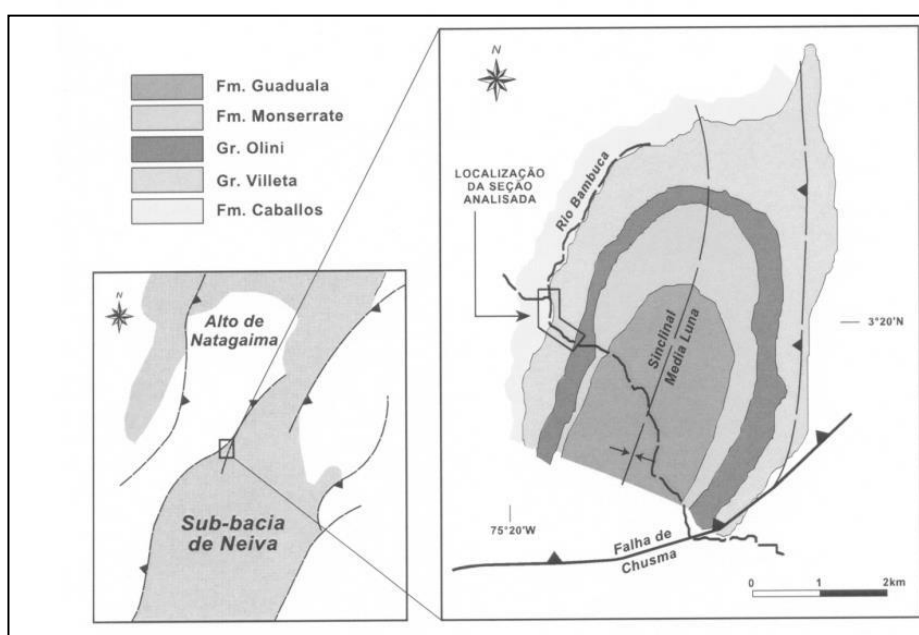


Figura 5: Localização da seção aflorante "Riacho Bambuca" dentro do contexto geológico da porção norte da Sub-bacia Neiva (modificado de Vargas *et al.*, 2002).

4.2 Métodos de Estudo

A caracterização de fácies orgânica empregada no presente estudo aplicou a integração dos dados de palinofácies e de geoquímica orgânica (Carbono Orgânico Total – COT e pirólise *Rock-Eval*).

O conceito de fácies orgânica pode ser definido como um "grupo de sedimentos contendo um conjunto distinto de constituintes orgânicos que podem ser reconhecidos

por microscopia ou estar associado com uma composição organogeoquímica característica” (Tyson, 1995).

O conceito de palinofácies foi introduzido por Combaz (1964) e sua definição pode ser entendida como o estudo palinológico do total de componentes da matéria orgânica contida em um sedimento após a remoção da matriz sedimentar (mineral) pela acidificação com HCl (ácido clorídrico) e HF (ácido fluorídrico).

Segundo Tyson (1995), a análise de palinofácies é o estudo palinológico de ambientes deposicionais e do potencial de rochas geradoras de hidrocarbonetos baseado na assembléia total de componentes da matéria orgânica particulada. Palinofácies pode ser definida como *“um corpo de sedimento contendo uma assembléia distinta de matéria orgânica palinológica que reflete um grupo específico de condições ambientais, podendo ser associada com um potencial de geração de hidrocarbonetos característico”*.

4.2.1 Parte Experimental

A preparação de amostras para a análise de palinofácies seguiu os procedimentos não-oxidativos para isolamento da matéria orgânica (Tyson, 1995 e Mendonça Filho, 1999). As amostras foram acidificadas com ácido clorídrico e fluorídrico e a separação do querogênio do resíduo mineral e sua concentração foi realizada com a utilização de cloreto de zinco. A matéria orgânica isolada foi então montada em lâmina de vidro.

A análise de palinofácies envolveu o exame qualitativo e quantitativo (contagem de 300 a 500 partículas) do querogênio com a utilização de técnicas de microscopia sob luz branca transmitida e luz azul incidente (fluorescência).

A classificação dos grupos e subgrupos do querogênio obedeceu à classificação proposta por Tyson, 1995, Mendonça Filho, 1999 e Mendonça Filho *et al.*, 2002.

As análises de Carbono Orgânico Total (COT) foram obtidas com o forno de indução do determinador de carbono WR-12 da LECO e os de pirólise *Rock-Eval* com o equipamento Rock-Eval II. Os resultados de COT expressam a quantidade de matéria orgânica presente nos sedimentos, e os resultados de pirólise *Rock-Eval* fornecem informações sobre a potencialidade de geração de hidrocarbonetos, bem como o tipo de matéria orgânica presente nos sedimentos.

A avaliação do grau de maturação térmica foi realizada através do Índice de Coloração de Esporos (ICE) e da correlação deste com os resultados de Tmax da pirólise *Rock-Eval* e dos resultados qualitativos da fluorescência.

O ICE utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Barnard *et al.* (1981), o qual apresenta uma escala de 1 a 10, em intervalos de 0,5, que foi designada para dar linearidade com o aumento de profundidade e temperatura.

As análises microscópicas foram realizadas no Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânica, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências.

4.2.2 Tratamento dos Dados

Após a contagem dos componentes orgânicos particulados, os valores absolutos foram recalculados para valores percentuais e normalizados a 100%.

Para a representação dos resultados foram gerados diagramas ternários e binários para denotar as variações nas assembléias de palinofácies e dos dados organogeoquímicos ao longo do intervalo estudado.

5. Resultados e Discussões

5.1 Palinofácies

O Grupo da Matéria Orgânica Amorfa (M.O.A), oriundo de ataque microbiológico, domina a assembléia de componentes orgânicos (Figura 6, Tabela 1). A M.O.A., sob luz branca transmitida, apresenta grumos com coloração variando do

amarelo ao marrom, e sob luz azul incidente, as colorações de fluorescência variam do amarelo ao laranja claro (Estampa 1-a e 1-b).

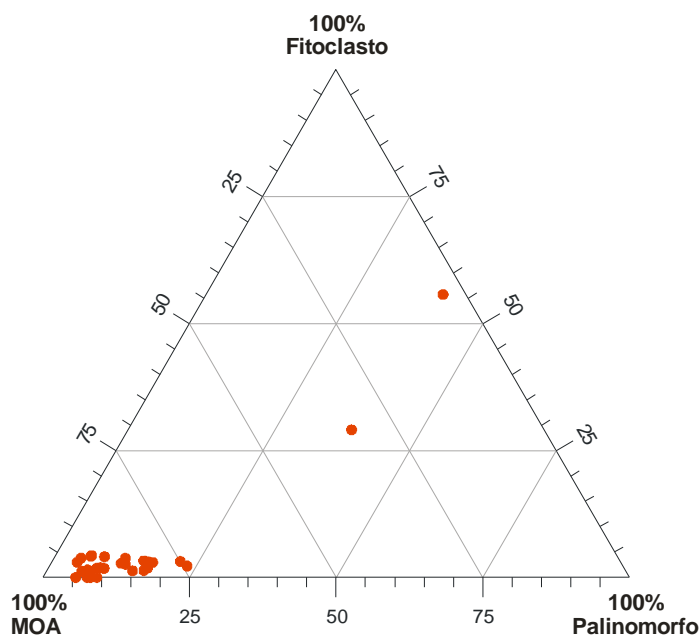


Figura 6: Análise quantitativa dos componentes do querogênio

A elevada abundância relativa de M.O.A. com fluorescência é característica de áreas de alta preservação de matéria orgânica com intenso retrabalhamento microbiológico devido às condições redutoras, especialmente em áreas de alta produtividade primária (Tyson, 1993, 1995).

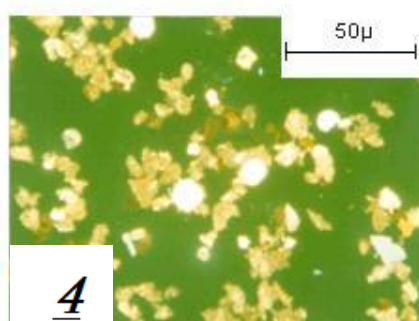
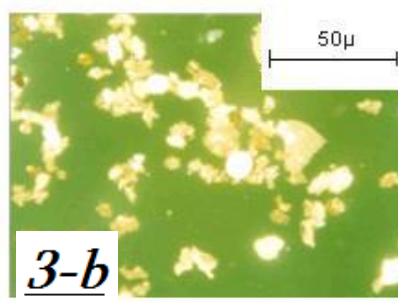
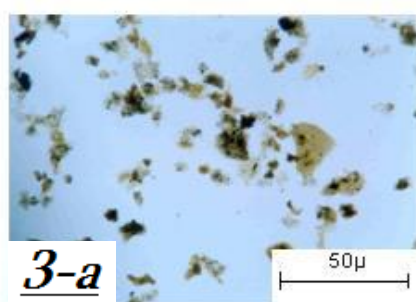
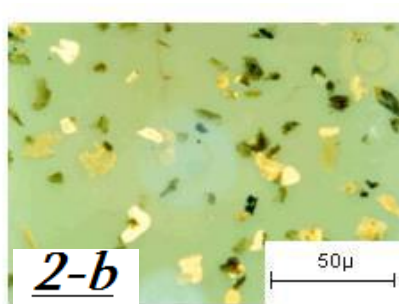
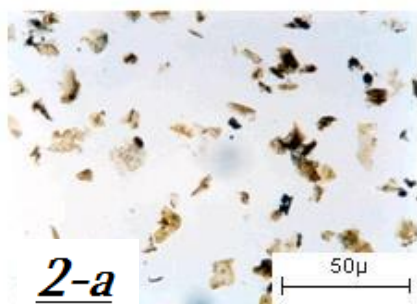
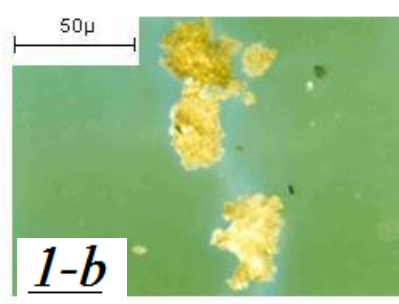
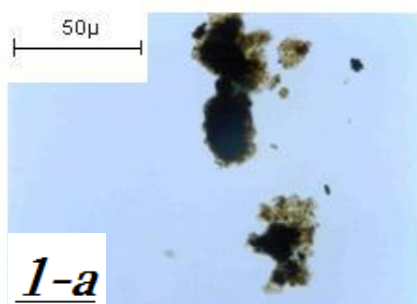
No geral, os demais grupos do querogênio representam baixos a baixíssimos percentuais do total do querogênio (Figura 7, Tabela 1).

O Grupo Fitoclasto (derivado de tecidos lenhosos de vegetais superiores) é composto predominantemente de fitoclastos opacos (Estampa 2-a e 2-b).

Devido ao predomínio de M.O.A., a identificação dos palinomorfos foi auxiliada pela observação do material em fluorescência. Os esporomorfos (palinomorfos terrestres) em luz branca transmitida apresentam coloração amarela a laranja e coloração de fluorescência de amarelo intenso a castanho claro (Estampa 3-a e 3-b).

Os dinoflagelados (microplâncton marinho) apresentam fluorescência amarela (Estampa 4).

ESTAMPA



Estampa: 1-a Matéria orgânica amorfa grumosa em luz branca transmitida, amostra BV-146; 1-b Mesma visada da estampa 1-a, mostrando a intensidade da fluorescência da M.O.A.; 2-a Fitoclasto opaco em luz branca transmitida, amostra BV-174; 2-b Mesma visada da estampa 2-a, mostrando a fluorescência; 3-a M.O.A. e esporomorfo em luz branca transmitida, amostra BV-176, 3-b mostrando a fluorescência do esporomorfo; 4-a mostrando a fluorescência do dinoflagelado, amostra BV-138.

Tabela 1: Valores percentuais dos grupos e subgrupos do querogênio em relação ao total do querogênio.

AMOSTRA	PROF. (m)	MOA %	Fitoclasto %	Esporomorfo %	Dinoflagelado %	Prasinófitas %	Palinomorfo %
BV-176	530.00	3.9	55.7	37.8	0.8	1.8	40.4
BV-174	526.00	33.0	29.0	32.1	1.1	4.8	38.0
BV-172	518.70	89.5	4.5	1.9	0.0	4.2	6.1
BV-171	416.20	79.7	10.2	10.2	0.0	0.0	10.2
BV-169	413.30	92.3	5.1	0.0	1.5	1.1	2.6
BV-167	410.00	83.9	4.8	6.5	0.0	4.8	11.3
BV-165	366.50	83.1	8.5	1.9	1.5	5	8.5
BV-163	324.00	80.8	5.0	5.9	2.2	6.2	14.3
BV-161	295.00	83.9	11.8	4.4	0.0	0.0	4.4
BV-159	292.50	79.2	3.7	6.1	1.5	9.5	17.1
BV-156	289.60	91.6	3.8	4.6	0.0	0.0	4.6
BV-150	270.80	81.4	1.4	7.9	0.0	9.3	17.2
BV-146	267.00	95.4	3.1	1.5	0.0	0.0	1.5
BV-142	258.50	52.9	31.4	15.7	0.0	0.0	15.7
BV-140	245.50	65.9	34.1	0.0	0.0	0.0	0.0
BV-138	243.00	56.6	7.5	12.6	5.1	18.1	35.9
BV-137	239.30	79.1	19.1	1.8	0.0	0.0	1.8
BV-135	236.70	87.7	7.3	5.2	0.0	0.0	5.2

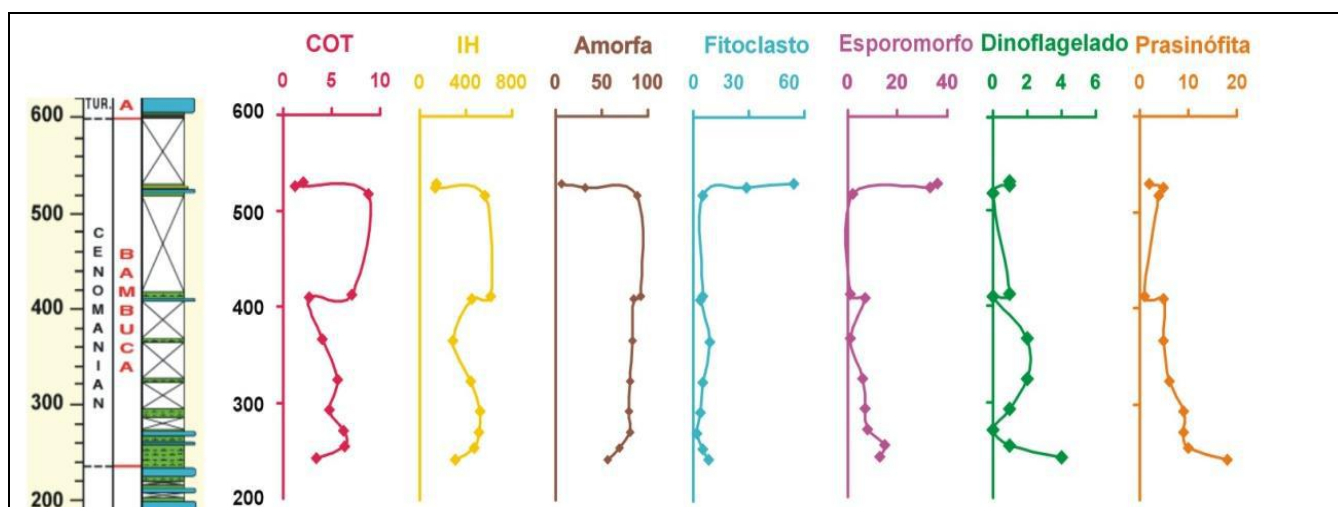


Figura 7: Análise qualitativa e quantitativa dos componentes do querogênio.

5.2 COT e Pirólise *Rock-Eval*

O material analisado apresentou teores médios a elevados de COT variando de 1,21% a 8,80%, que reflete tanto na elevada quantidade de matéria orgânica depositada, bem como no elevado grau de preservação (Tabela 2). Os resultados de pirólise *Rock-Eval* (Tabela 2) revelam que os valores de S1 (quantidade de hidrocarbonetos presentes nas amostras) são baixos e variam de 0,09 a 2,62 mg Hc/gRocha, os valores de S2

(quantidade de hidrocarboneto que as amostras produziram durante a pirólise) chegam ao valor de até 43,34 mg HC/g. Os valores de índice de hidrogênio (IH) variam de 132 a 613 mg Hc/g de COT e os de índice de oxigênio (IO) são baixos e variam de 4 a 38 mg de CO₂/g de COT. Os valores de Tmax variam de 424°C e 437°C.

Foram confeccionados diagramas binários *IH x IO* – tipo Van Krevelen (Espitalié, *et al.*, 1977), *S2 x COT* (Langford & Blanc-valleron, 1990) e *IH x Tmax* (Delvaux *et al.*, 1990), os quais classificaram o querogênio como do tipo II correspondente à matéria orgânica de origem marinha (Figura 8).

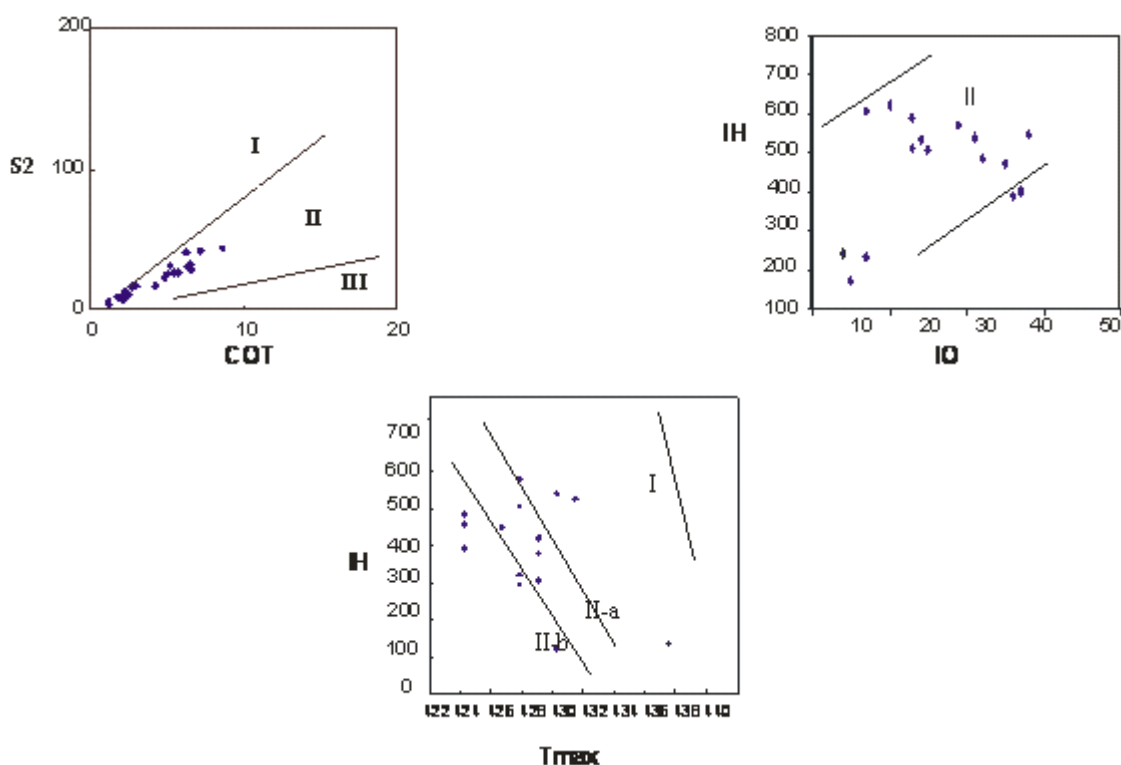


Figura 8: Diagramas binários representando os tipos de querogênio, *IH x IO* (Espatalié, *et al.*, 1977), *S2 x COT* (Langford & Blanc-valleron; 1990), *IH x Tmax* (Delvaux *et al.*, 1990).

De acordo com Tissot & Welte (1984), os valores dos picos S1 e S2, somados representam o potencial de geração (PG). As amostras estudadas apresentam PG de 0,18 a 51,5 mg Hc/gRocha, indicativo de rochas com baixo a excelente potencial geração de hidrocarbonetos.

Tabela 2: Resultados de COT (%) e pirólise *Rock-Eval* das amostras analisadas da Formação Bambuca, seção Riacho Bambuca.

AMOSTRA	PROF. (m)	COT %	Tmax °C	S1 mg HC/gR	S2 mg HC/gR	S3 mg CO ₂ /gR	IH mg HC/gCOT	IO mg CO ₂ /gR	IP mg HC/gRocha
BV-176	530.00	2.03	437	0.09	2.90	0.08	143	4	0.03
BV-174	526.00	1.21	431	0.09	1.60	0.09	132	7	0.05
BV-172	518.70	8.80	429	2.27	49.28	1.11	560	13	0.04
BV-171	416.20	6.27	426	1.13	29.63	1.21	473	19	0.04
BV-169	413.30	7.07	424	2.62	43.34	1.60	613	23	0.06
BV-167	410.00	2.66	426	0.81	11.90	0.74	447	28	0.06
BV-165	366.50	4.00	429	0.64	11.68	1.06	292	26	0.05
BV-163	324.00	5.57	428	1.38	24.34	0.76	437	14	0.05
BV-161	295.00	3.17	430	0.90	12.99	0.46	410	15	0.06
BV-159	292.50	4.75	431	1.39	24.88	0.49	524	10	0.05
BV-156	289.60	5.59	430	1.59	23.17	0.74	414	13	0.06
BV-150	270.80	6.21	432	1.95	31.62	0.45	509	7	0.06
BV-146	267.00	5.93	429	2.02	29.26	0.79	493	13	0.06
BV-142	258.50	1.87	426	0.36	7.19	0.41	384	22	0.05
BV-140	245.50	5.73	430	0.82	21.35	1.45	373	25	0.04
BV-138	243.00	3.46	430	0.53	10.51	0.92	304	27	0.05
BV-137	239.30	4.24	428	0.80	18.67	0.88	440	21	0.04
BV-135	236.70	1.41	429	0.37	4.47	0.53	317	38	0.08

5.3 Avaliação do Estágio de Maturação Térmica

O intervalo analisado da Formação Bambuca (Figura 9) é termicamente imaturo, com ICE 2,5-3,0. Este dado é corroborado pelos valores de Tmax abaixo de 440°C, pela intensa coloração de fluorescência da assembléia de componentes do querogênio e pelos valores de Índice de Produção ($IP = (S1/(S1+S2) \times 100$, Bordenave *et al.*, 1993) inferiores a 0,12 (Espitalié, 1977).

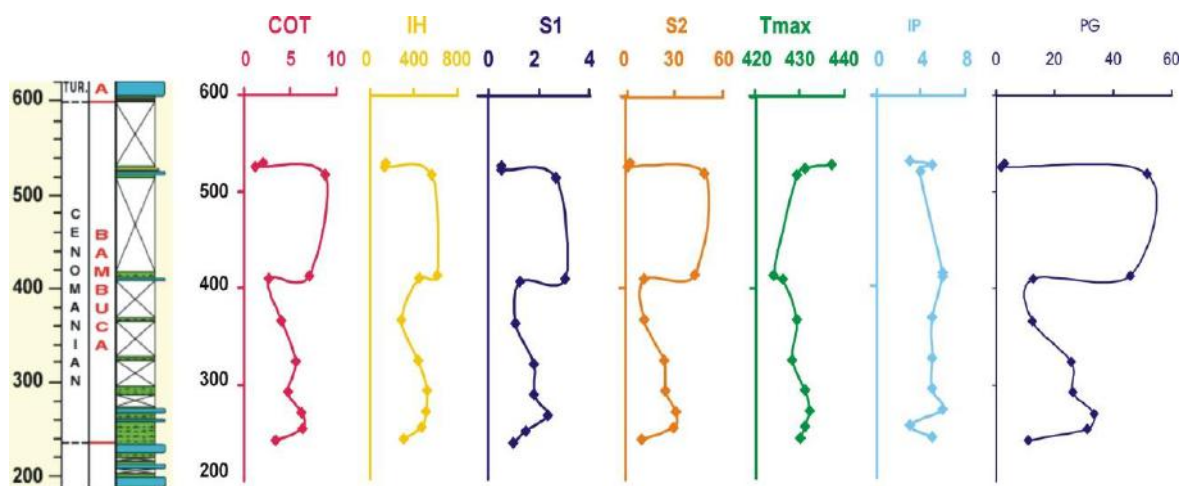


Figura 9: Parâmetros Organogeoquímicos, COT (%) e pirólise *Rock-Eval* das amostras analisadas da Formação Bambuca.

6. Fácies Orgânica

A abordagem de fácies orgânica definida por Jones (1987) é provavelmente mais realística que a aplicação do tipo de querogênio na tentativa de classificar as diferentes assembléias de componentes orgânicos. Essa caracterização leva em consideração o fato de que as assembléias são controladas por fatores preservacionais tão bem quanto sua origem e que mudanças entre assembléias são frequentemente gradacionais (Tyson, 1995).

Sete fácies orgânicas foram identificadas por Jones (*op. cit.*) usando informações geoquímicas e, em menor extensão, dados ópticos. Essas fácies orgânicas têm sido determinadas para cada amostra individual, grupos de amostras ou unidades estratigráficas completas. Não é aconselhável uma determinação de uma fácies orgânica utilizando, somente, os dados obtidos pela análise de pirólise *Rock-Eval* e COT. Isto é devido ao fato desses parâmetros não refletirem muito bem as variações significantes na proporção de diferentes tipos de querogênio. A tabela 3 ilustra a relação comum entre fácies orgânica de Jones (1987) e palinofácies de Tyson (1995).

De acordo com Tyson (1995), as três principais divisões são as fácies anóxica-disóxica (A, AB, B, BC), proximal flúvio-deltaica à plataforma prodeltaíca-óxica (C, CD) e distal lentamente depositada, fácies óxica (D).

As fácies orgânicas *sensu* Jones (1987) dão ênfase principalmente à distinção entre fácies anóxica-disóxica (fácies orgânicas A, AB, B e BC), fácies proximal fluvio-deltaica a pró-deltaica e fácies de plataforma óxica (fácies C e CD) e fácies altamente óxica, distal e lentamente depositada (fácies orgânica D). No limite da fácies disóxica-anóxica, a fácies orgânica BC representa sedimentos com um aporte relativamente elevado de fitoclastos (geralmente nas margens da bacia), enquanto as fácies orgânicas A, AB e B ocorrem onde existe um aporte relativamente baixo de fitoclastos (devido tanto ao clima como a distância de áreas-fonte fluvio-deltaicas).

Tabela 3: Fácies orgânica (Mendonça Filho, 1999, baseado em Jones, 1987 e Tyson, 1995).

FÁCIES ORGÂNICA (IMATURA)	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS DE PALINOFÁCIES
A IH > 850 COT 5 - 20%	Rara; bem laminada; rica em conteúdo orgânico; usualmente lacustre; anoxia persistente no fundo da coluna d'água; aporte desprezível de matéria orgânica terrestre.	M.O.A domina; baixo conteúdo de fitoclastos; razão opacos/não-opacos elevada; rica em prasinófitas se marinha, e algas chlorococcales, se lacustre.
AB IH 650 – 850 COT 3 - 10%	Laminada; rica conteúdo org.; matéria orgânica quase que exclusivamente composta por componentes derivados de algas e/ou bactérias; anoxia persistente na coluna d'água.	M.O.A dominante; baixo conteúdo de fitoclastos; razão opacos/não-opacos elevada; rica em prasinófitas, se marinha, e algas chlorococcales, se lacustre.
B IH 400 - 650 COT 3 - 10%	Laminada a acamadada; percentagem mais elevada de matéria orgânica terrestre e residual que a fácies AB; freqüentemente ocorre uma anoxia flutuante no fundo da coluna d'água; freqüentemente intercalada com fácies menos ricas.	Matéria orgânica amorfa dominante; baixo conteúdo de fitoclastos; razão opacos/não-opacos elevada; rica em prasinófitas, se marinha, e algas chlorococcales, se lacustre.
BC IH 250 – 400 COT 1 - 3%	Coluna d'água óxica; deposição rápida cria anoxia pós deposicional; matéria orgânica mista parcialmente derivada de material terrestre / algalico biodegradados.	Matéria orgânica amorfa moderada; conteúdo moderado de fitoclastos; razão fitoclastos opacos/não-opacos usualmente baixa.
C IH 125 - 250 COT 1 - 3%	M.O. dominada por m.o. terrestre variavelmente oxidada.	Matéria orgânica amorfa ausente ou com baixo conteúdo; fitoclastos dominam a assembléia do querogênio; razão fitoclastos opacos/não-opacos usualmente baixa; esta fácies pode também ser dominada por matéria orgânica amorfa parcialmente oxidada (não fluorescente).
CD IH 50 – 125 COT < 0,5	M.O. terrestre moderadamente a bem oxidada; m.o. residual.	Matéria orgânica amorfa ausente ou em baixo conteúdo; fitoclastos dominam a assembléia, razão de fitoclastos opacos / não-opacos aumenta; esta fácies pode também ser dominada por matéria orgânica amorfa parcialmente oxidada não apresentando fluorescência.
D IH < 50 COT < 0,5	M.O. residual altamente oxidada ou redepositada.	M.O.A. ausente ou em baixo conteúdo; fitoclastos dominam a assembléia; razão de fitoclastos opacos/não-opacos aumenta; esta fácies pode também ser dominada por matéria orgânica amorfa parcialmente oxidada não apresentando fluorescência.

Através dos parâmetros analisados, foram identificadas predominantemente a fácies B (distal – disóxico/anóxico) e secundariamente as fácies, BC (distal – disóxico/anóxico) e C (proximal-óxico).

7. Caracterização Paleoambiental

Para a caracterização paleoambiental da Formação Bambuca, utilizou-se o diagrama ternário confeccionado a partir dos dados de abundância relativa dos três grupos principais (Figura 10) que contêm a definição de nove paleoambientes baseados nos dados de palinofácies marinha (Tyson, 1995).

As amostras estudadas recaem sobre os campos: III, correspondente à fácies de deposição de matéria orgânica em ambientes de plataforma proximal óxica, V, plataforma distal óxica, e, ainda, em sua grande maioria, VIII e IX, que correspondem à fácies de deposição de matéria orgânica em ambientes de plataforma distal disóxica – óxica e bacia distal subóxica-anóxica.

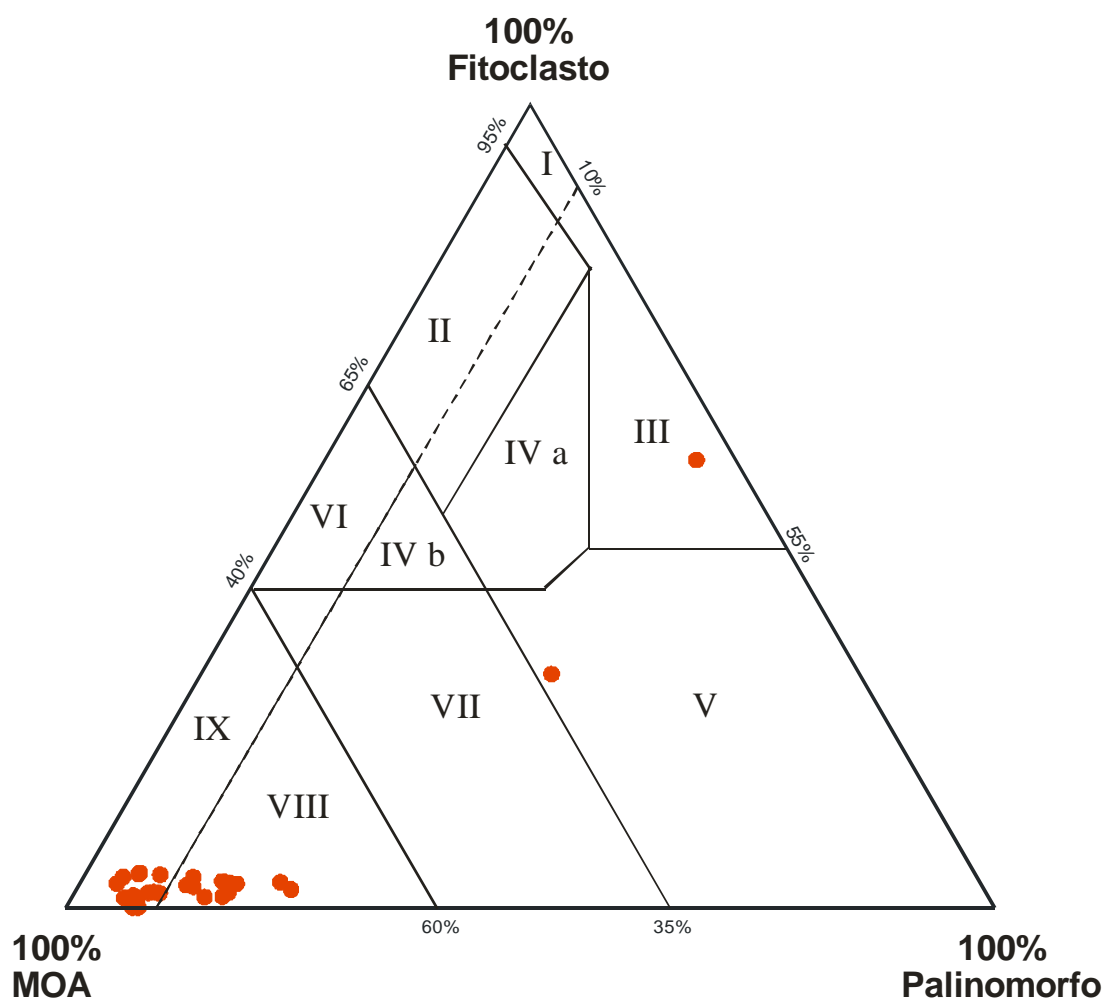


Figura 10: Diagrama ternário com os campos de palinofácies definidos pelos valores percentuais dos três principais grupos da matéria orgânica particulada (Tyson, 1995) e com as amostras plotadas da seção estudada.

7. Conclusão

De acordo com a faciologia orgânica, a caracterização paleoambiental da sucessão litológica que é dominada por folhelhos e carbonatos pelágicos de coloração escura e laminados mostrou uma variação de ambiente proximal de plataforma óxica a bacia distal anóxica. Tais condições paleambientais implicaram na formação de rochas ricas em matéria orgânica de excelente qualidade para geração de hidrocarbonetos e os altos valores de IH e COT corroboram para esta interpretação.

A avaliação do estágio de maturação térmica da Formação Bambuca indica imaturidade para o intervalo.

Agradecimentos

Ao Instituto Colombiano do Petróleo – ECOPETROL pelas amostras cedidas e pelas análises de geoquímica orgânica utilizadas neste estudo.

Ao Professor Dr. João Graciano Mendonça Filho e à co-orientadora Juliana Iemini.

Referências Bibliográficas

- BARNARD, P. C.; COLLINS, A. G.; COOPER, B. S., 1981. Identification of Kerogen Facies in a Source Rock Horizon. Examples from the North Sea Basin. In: Brooks, J, (Ed.) *Organic Maturation Studies and Fossil Fuel Exploration*. Academic Press, London, 271-282.
- BORDENAVE, M.L.; ESPITALIÉ, J.; LAPLAT, P.; OUDIN, J. L. & VANDENBROUKE, M. 1993. Screening techniques for source rock evaluation, In: BORDENAVE, M.L. (ed) *Applied Petroleum Geochemistry*, Editions Technip, Paris, p. 217-279.
- COMBAZ, A. 1964 Les Palynofacies. *Revue de Micropaléontologie*, **7**, 205-18
- COOPER, M.A., F. T. ADDISON, R. ALVAREZ, M. CORAL, R. H. GRAHAM, A.B. HAYWARD, S. HOWE, J. MARTINEZ, J. NAAR, R. PEÑAS, A.J. PULHAM, E A. TABORDA, 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: AAPG Boletim, v.79, p. 1421-1443

- DELVAUX, D.; MARTIN, H.; LEPLAT, P. & PAULET, J. 1990. Geochemical characterization of sedimentary organic matter by means of pyrolysis kinetic parameters, In: DURAND, B. & BEHAR, F. (eds) *Advances in Organic Geochemistry 1989*, Pergamon, Oxford. *Organic Geochemistry*, v. 16, p. 175-87.
- ESPITALIÉ, J.; LAPORTE, J. L.; MADEC, M.; MARQUIS, LEPLAT, P.; PAULET, J.; BOUTEFEU, A. (1977). Methode Rapide de Caracterisation des Roches Meres de leur Potentiell Petrolier e de leur Degre d'Evolution. *Rev. Inst. Fr. Pet.*, 32:23-42.
- GONCALVES, F. T. T, 2005. Investigação quimioestratigráfica de alta resolução de rochas geradoras de hidrocarbonetos: aplicação na análise do sistema petrolífero do Grupo Villeta, Vale Superior do Magdalena, Colômbia. Tese de doutorado em Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 164p.
- JONES, R. W., 1987, Organic Facies, em J. Brooks e D. Welts, eds., *Advances in Organic Geochemistry*, Academic Press, v. 2, p. 1-90.
- KAIRUZ, E., P. FERREIRA, E O.SOLANO, 2000, Província petrolífera Del Valle Superior Del Magdalena, Colombia: Proceedings of the VII Simpósio Bolivariano, Cartagena, Colômbia, v.1, p. 533-536.
- LANGFORD, F.F. & BLANC-VALLERON, M.M. 1990. Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using graphs of pyrolyzable hydrocarbons vs. Total organic carbon. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 74, p. 799-804.
- MENDONÇA FILHO, J. G. 1999. Aplicação de estudos de palinofácies e fácies orgânica em rochas do Paleozóico da Bacia do Paraná, Sul do Brasil. Tese de Doutorado em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2 volumes.
- MENDONÇA FILHO, J.G; CARVALHO, M.A.; MENEZES, T.R., 2002. Palinofácies. In: Unisinos ed. *Técnicas e procedimentos de trabalho com fósseis e formas modernas comparativas*. São Leopoldo. p. 20-24.
- SARMIENTO, L.F. & RANGEL. A (2004). Petroleum systems of the Upper Magdalena Valley, Colombia. *Marine and Petroleum Geology* 21, 373-391.
- SCHAMEL, S., (1991), Middle and Upper Magdalena basins, Colômbia, em K. T. Biddle, ed., *Active Margin Basins: AAPG Memoir* 52, p. 283-303.
- SINTON, C. W. & DUNCAN, R. A. (1997). Potential links between ocean plateau volcanism and global ocean anoxia at the Cenomanian–Turonian boundary. *Economic Geology* 92, 836–842.
- SINTON, C. W., DUNCAN, R. A., STOREY, M., LEWIS, J. & ESTRADA, J. J. 1998. An oceanic flood basalt province within the Caribbean plate. *Earth and Planetary Science Letters* 155, 221–235.
- TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. 2 ed. Berlin: Springer-Verlag. 699p.
- TYSON, R. V. (1995). *Sedimentary Organic Matter. Organic facies and palynofacies*. Chapman & Hall. Londres. 615 p.

- TYSON, R. V. (1993). *Palynofacies Analysis*. Kluwer Academic Publishers. p. 153-191.
- TYSON, R. V. (1995). *Sedimentary Organic Matter. Organic facies and palynofacies*. Chapman & Hall. Londres. 615 p.
- VARGAS. L. S., Zamora. W. H., Nino. C. H., Gonçalves. F. T. T, e Mora. C. A., 2002 Caracterización estratigráfica y geoquímica del Colección Villeta em la sección de la Quebrada Bambuca (VSM): ECOPETROL-ICP relatório interno, 243p.
- VILLAMIL, T. & ARANCO. C, 1998 Integrated stratigraphy of Latest Cenomanian and Early Turanian facies of Colombia, em Pindell, J.L. e Dracks, C.L, eds., *Paleogeographic evolution and non-glacial eustasy, Northern South America: SEPM Special Publication 58*, p. 129-160.
- VILLAMIL, T., 1998 Chronology, relative sea-level history and a new sequence stratigraphic model for the Basinal Cretaceous facies of Colombia, em Pindell, J.L e Dracks, C.L, eds., *Paleogeographic evolution and non-glacial eustasy, Northern South America: SEPM Special Publication 58*, p. 161-216