

DIEGO MARQUES DE BRITO

**ANÁLISE ORGANOFACIOLÓGICA E DETERMINAÇÃO DO
POTENCIAL DE GERAÇÃO DE PETRÓLEO DO INTERVALO
FORMACIONAL RIO DA BATATEIRA-SANTANA, BACIA DO
ARARIPE, NE DO BRASIL**

**Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)**

**UFRJ
Rio de Janeiro
2010**



UFRJ

Diego Marques de Brito

**ANÁLISE ORGANOFACIOLÓGICA E DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE PETRÓLEO DO INTERVALO FORMACIONAL RIO DA
BATATEIRA-SANTANA, BACIA DO ARARIPE, NE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador:

Prof. Dr. João Graciano Mendonça Filho

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2010

Brito, Diego Marques de

Análise organofaciológica e determinação do potencial de geração de petróleo do Intervalo Formacional Rio da Batateira –Santana, bacia do Araripe, NE do Brasil / Diego Marques de Brito - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2010.
xi, 37 p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2010.

Orientador: Prof. Dr. João Graciano Mendonça Filho
1. Geologia. 2. Econômica e Regional – Trabalho de Conclusão de Curso. I. João Graciano Mendonça Filho. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Título.

Diego Marques de Brito

ANÁLISE ORGANOFACIOLÓGICA E DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE PETRÓLEO DO INTERVALO FORMACIONAL RIO DA BATATEIRA-
SANTANA, BACIA DO ARARIPE, NE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientador:

Prof. Dr. João Graciano Mendonça Filho

Aprovada em: 26 de Fevereiro de 2010

Por:

Dr. João Graciano Mendonça Filho (UFRJ)

MSc. Taíssa Rego Menezes (CEMPES)

MSc. Daniela Elias Bongioiolo (LAFO-UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2010

Dedico este trabalho aos meus pais Custódio e Maria do Socorro, aos meus irmãos Gisele e Michel, as minhas sobrinhas Camilla, Carine e Nicole, a minha família Danielle e Clara.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. João Graciano Mendonça Filho pela orientação acadêmica que foi essencial para o desenvolvimento desta monografia;

Aos meus amigos e colegas de trabalho Dr^a. Joalice de Oliveira Mendonça, Msc. Antonio Donizeti de Oliveira, Jaqueline Torres de Souza, Msc. Alexandre Jonas Sanntana e Renata Brenand Alvarenga das Chagas pela paciência e ajuda nos momentos de maiores dificuldades;

Ao Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânica (LAFO) da UFRJ pelo suporte ao processamento das amostras;

Ao Prof. Msc. Aristóteles de Moraes rios Netto por fornecer o material para realização deste trabalho;

Ao programa PRH-18 da ANP pelo fomento fornecido para a realização deste trabalho.

Resumo

BRITO, Diego Marques de. **Análise organofaciológica e determinação do potencial de geração de petróleo do Intervalo Formacional Rio da Batateira-Santana, bacia do Araripe, NE do Brasil**. 2010. xi, 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A bacia do Araripe localizada na Província Borborema, interior do Nordeste do Brasil é pouco conhecida em relação à fácies orgânicas. Este trabalho teve como objetivo caracterizar a faciologia orgânica e suas variações em duas seções sedimentares (1PS-10-CE e 1PS-12-CE) buscando determinar o potencial de geração de petróleo e a reconstrução paleoambiental. Foram coletadas 29 amostras dos depósitos lacustres da Formação Rio da Batateira e os lacustre/marinho da Formação Santana para caracterização dos componentes do querogênio, através de técnicas de microscopia (luz branca transmitida, e fluorescência) e geoquímica orgânica (Carbono Orgânico Total - COT e Enxofre Total - ST). Além disso, foi realizada a análise de Índice de Coloração de Esporos (ICE) e Poder Refletor da Vitrinita (%R_o) para a determinação do estágio de maturação térmica. Ao longo das seções estudadas, pode ser observado uma variação organocomposicional com a predominância de componentes orgânicos de composição lenhosa (Grupo Fitoclasto) e liptinítica (Grupo da Matéria Orgânica Amorfa), ambos ocorrendo sempre em associação com palinomorfos continentais (esporomorfos) e, e na seção 1PS-12-CE, ocorrem palinomorfos marinhos (dinoflagelados). Os resultados das análises geoquímicas indicaram teores máximos de COT e ST de 5,46% e 0,73% respectivamente. A partir da integração dos resultados obtidos, somente a seção 1PS-12-CE apresentou boa quantidade e qualidade para geração de hidrocarbonetos, porém com estágios de maturação térmica pouco evoluídos. O paleoambiente das duas seções pode ser caracterizado como continental de alta energia a baixa energia, com o clima variando de árido a semi-árido.

Palavras-chave: Bacia do Araripe, Matéria Orgânica, Paleoambiente, Geração de Petróleo

Abstract

BRITO, Diego Marques de. **Análise organofaciológica e determinação do potencial de geração de petróleo do Intervalo Formacional Rio da Batateira-Santana, bacia do Araripe, NE do Brasil.** 2010. xi, 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Araripe basin is located in the Borborema Province, NE Brazil. The main objective of this study is to characterise the organic facies using palynofacies and organic geochemistry data and to determine variations of these facies along of a sedimentary section from the Araripe basin. Besides this, it is intended to determine the hydrocarbon generating potential and to obtain some information about the palaeoenvironmental conditions of the studied sedimentary section. In this study, were analysed 29 drilling-core samples from lacustrine deposits of the Rio da Batateira Formation as well as those with lacustrine/marine origin from the Santana Formation. It was carried out an organic facies characterisation through the microscopy techniques using transmitted white light and fluorescence associated to organic geochemistry analyses (Total Organic Carbon – TOC and Sulphur content - ST). It was possible to observe in this work an organic composition variation with the predominance of woody (Phytoclast Group) and liptinitic (Amorphous Organic Matter Group) material associated to the occurrence of continental (sporomorphs) and marine (dinocysts) palynomorphs. The results of the geochemical analyses indicated TOC and ST contents reaching 5,46% and 0.73%, respectively. These results indicated that the studied sedimentary section presents an adequate organic matter to hydrocarbon generation (rich in hydrogen) with a low stage of thermal maturation. The palaeoenvironmental conditions were characterised as continental with marine influence in an arid to semi-arid climate.

Keywords: Araripe Basin, Organic Matter, Paleoenvironment, Oil Generation.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa da localização da bacia do Araripe (Modificado de Carvalho, 2000).....	2
Figura 2 Mapa estrutural da bacia do Araripe (Ponte & Ponte Filho, 1996).....	3
Figura 3 Diagrama estratigráfico simplificado da bacia do Araripe (Arai & Lana, 2004), em destaque o intervalo de estudo.	5
Figura 4 Mapa geológico da bacia do Araripe com a localização dos poços analisados.	7
Figura 5 Índice de Coloração de Esporos (ICE) (Robertson Resarch Limited).	10
Figura 6 Fotomicrografias de Fitoclastos e Matéria Orgânica Amorfa.....	14
Figura 7 Fotomicrografias de Palinomorfos.....	15
Figura 8 Gráfico de COT (% em peso) versus ST (% em peso) para os testemunhos 1PS-10-CE (A) e 1PS-12-CE (B), (Levental, 1983; Berner & Raiswell, 1984).....	17
Figura 9 Dendrograma da análise de agrupamento dos testemunhos 1PS-10-CE (A) e 1PS-12-CE (B).....	18
Figura 10 Fotomicrografias de Vitrinitas e InertinitasMaturação Térmica.....	22
Figura 11 Correlação entre o tempo (milhões de anos), Temperatura (°C) e Maturação (ICE e %Ro) Barnard et al., (1981).	23
Figura 12 Gráfico mostrando os principais grupos e subgrupos da matéria orgânica e os intervalos do testemunho 1PS-10-CE.	26
Figura 13 Gráfico mostrando os principais grupos e subgrupos da matéria orgânica e os intervalos do testemunho 1PS-12-CE.	31

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1	Dados dos poços analisados.	6
Quadro 2	Escala de evolução térmica no Cretáceo, Barnard et al, 1981.....	9
Quadro 3	Valores percentuais dos principais grupos do querogênio dos testemunhos 1PS-10-CE e 1PS-12-CE.....	11
Quadro 4	Valores percentuais das análises geoquímicas das amostras estudadas.	16
Quadro 5	Percentuais das amostras dos testemunhos 1PS-10-CE e 1PS-12-CE agrupadas pela palinofácies (valores percentuais em relação ao total da matéria orgânica particulada). .	20
Quadro 6	Valores de ICE e %Ro das amostras dos testemunhos 1PS-10-CE e 1PS-12-CE. .	21

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE QUADROS	x
SUMÁRIO	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 CONTEXTO GEOLÓGICO	3
3 MATERIAL E MÉTODOS	6
3.1 Preparação de Lâminas Organopalinológicas	6
3.2 Preparação de Plugs de Concentrado de Querogênio	7
3.3 Análise de Palinofácies	7
3.4 Análises Geoquímicas	8
3.5 Tratamento Estatístico	8
3.6 Análises de Maturação Térmica	9
3.6.1 Índice de Coloração de Esporos (ICE).....	9
3.6.2 Poder Refletor da Vitritina (%R _o).....	9
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
4.1 Palinofácies.....	11
4.2 Geoquímica.....	16
4.3 Agrupamento Hierárquico	17
4.4 Maturação Térmica	21
5 CARACTERIZAÇÃO PALEOAMBIENTAL.....	24
5.1 Testemunho IPS-10-CE	24
5.2 Testemunho IPS-12-CE	27
6 POTENCIAL DE GERAÇÃO.....	33
7 CONCLUSÃO.....	34
8 REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A bacia do Araripe é bastante conhecida do ponto de vista paleontológico por conter fósseis excepcionalmente preservados, entretanto, no que diz respeito à fácies orgânicas (Palinofácies + Geoquímica Orgânica) ela é pouco estudada.

O reconhecimento de rochas sedimentares de ambiente lacustre é de extrema importância na indústria de petróleo, uma vez que as suas características podem estar relacionadas a intervalos potencialmente geradores de hidrocarbonetos. Desta forma, foram realizadas análises de Palinofácies associadas às técnicas de Geoquímica Orgânica (Carbono Orgânico Total – COT e Enxofre Total – ST) e Maturação Térmica (Índice de Coloração de Esporos - ICE e Reflectância da Vitritina - %R_o) nos depósitos lacustres da Formação Rio da Batateira e os de origem lacustre/marinho da Formação Santana, com o objetivo de caracterizar a faciologia orgânica e suas variações ao longo das seções sedimentares da bacia, buscando a determinação do seu potencial de geração de petróleo e a reconstrução paleoambiental deste sistema deposicional.

A análise organofaciológica compreende o exame qualitativo e quantitativo do querogênio, ou seja, a integração de todos os aspectos dos componentes da matéria orgânica. Combaz (1964) introduziu o conceito de Palinofácies como sendo “*o estudo palinológico da associação total de matéria orgânica contida em um sedimento após a remoção da matriz sedimentar (mineral) pela acidificação com HCl (ácido clorídrico) e HF (ácido fluorídrico).*”

Tyson (1995) descreve a análise de palinofácies como o estudo palinológico de ambientes deposicionais e do potencial de rochas geradoras de hidrocarbonetos, baseado na assembléia total de componentes da matéria orgânica particulada, sendo 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*”.

A bacia do Araripe está localizada geograficamente entre os estados do Ceará, Pernambuco e Piauí (Figura 1) e possui cobertura sedimentar de aproximadamente 9.000 km² de área e até 1.700 m de espessura, sendo assim considerada a mais extensa entre as bacias interiores do Nordeste do Brasil (Moura & Borghi, 2005).

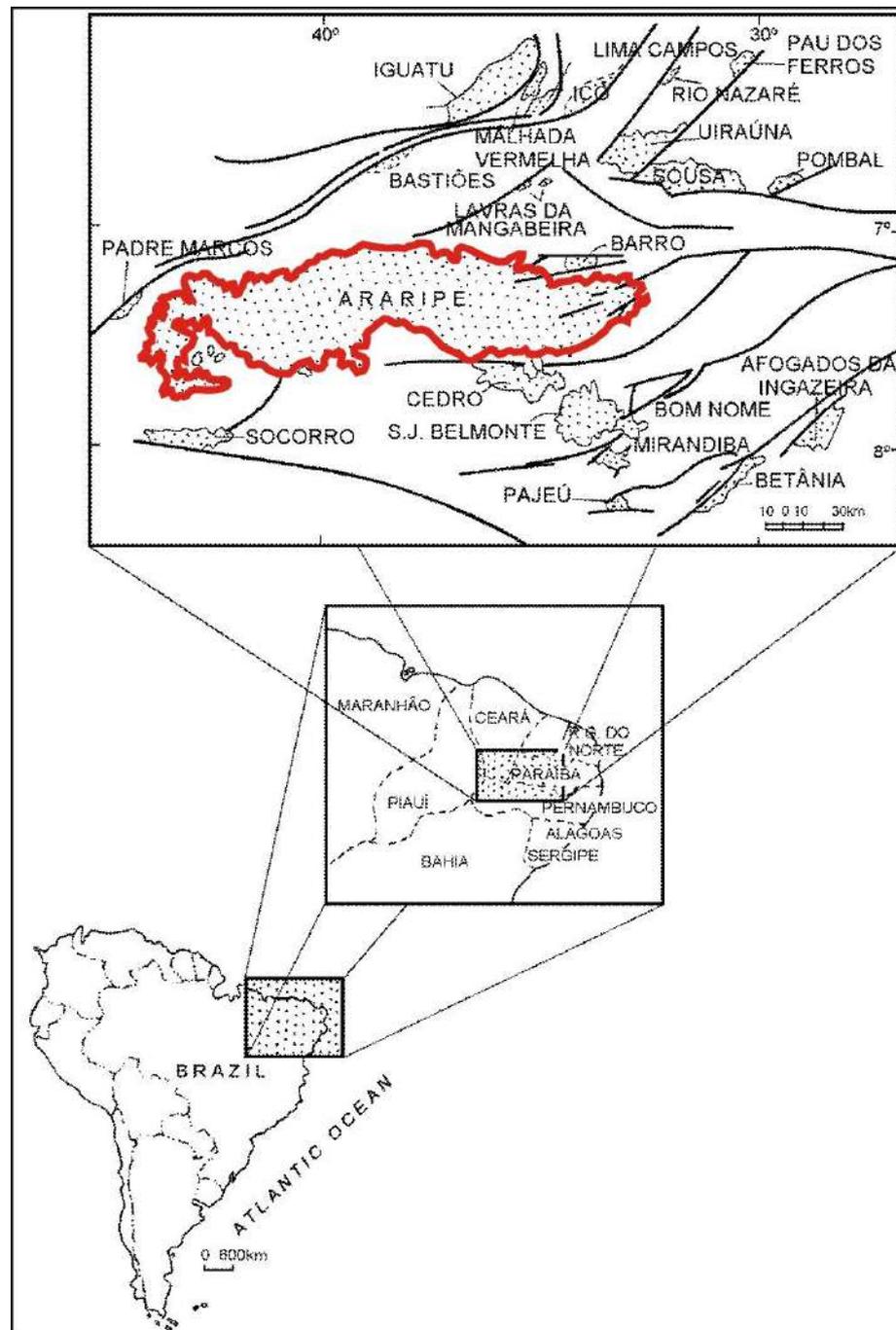


Figura 1 Mapa da localização da bacia do Araripe (Modificado de Carvalho, 2000).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A bacia do Araripe está depositada dentro da Zona Transversal, limitada pelos lineamentos de Patos (ao norte) e Pernambuco (ao sul), ambos de direção E-W, sendo esta Zona uma das principais geofraturas que cortam a Província Borborema (Ponte & Ponte Filho, 1996).

A bacia do Araripe é dividida em duas sub-bacias, uma a oeste (sub-bacia de Feitoria) e outra a leste (sub-bacia do Cariri), separadas pelo alto estrutural chamado de *horst* de Dom Leme (Figura 2). Segundo Ponte & Ponte Filho (1996), a bacia do Araripe compreende quatro tectono-sequências definidas com base em associações de estratos relacionados geneticamente, espacial e temporalmente, depositados durante uma fase específica da atividade tectônica da bacia, sendo elas: (1) Tectono-sequência Beta, de idade siluriana (?), representada pela Formação Mauriti; (2) Tectono-sequência Pré-Rift, de idade Juro-cretácica (?), representada pelas formações Brejo Santo e Missão Velha; (3) Tectono-sequência Sin-Rift, de idade eocretácica, (Rio da Serra/Aratu ?), representada pela Formação Abaiara e (4) Tectono-sequência Pós-Rift, de idade mesocretácica, representada pelo Grupo Araripe (formações Rio da Batateira, Santana, Arajara e Exú) (Figura 3).

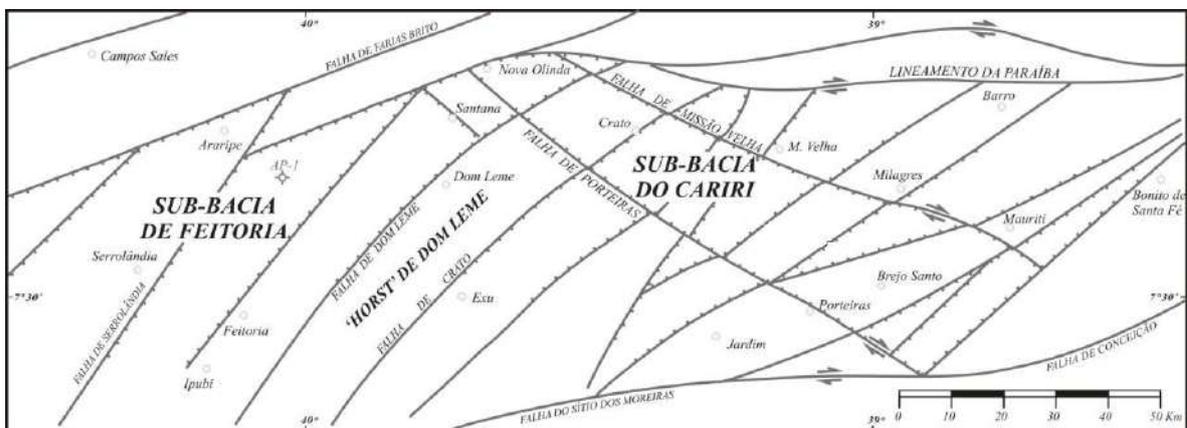


Figura 2 Mapa estrutural da bacia do Araripe (Ponte & Ponte Filho, 1996).

A Formação Rio da Batateira (Formação Barbalha segundo Assine 2007) é composta por arenitos com intercalações de folhelhos avermelhados e de níveis delgados de conglomerados. O perfil estratigráfico vertical desta formação compreende dois ciclos fluviais com granodecrescência ascendente, cujos topos são marcados pela presença de intervalos pelítico-carbonáticos lacustres, onde estes intervalos representam o primeiro registro da implantação do sistema lacustre na bacia.

A Formação Santana é dividida em três membros: o membro Crato composto por calcários micríticos laminados que formam bancos descontínuos que ultrapassam vinte metros de espessura, interdigitados lateralmente por folhelhos verdes. Os bancos de calcário possuem rica associação fossilífera, caracterizada por não conter fósseis marinhos, indicando ambiente de sedimentação lacustre; o membro Ipubí composto por camadas descontínuas de gipsita possui espessura máxima da ordem de 30 m e ocorre em associação faciológica com folhelhos verdes a pretos. A interpretação do ambiente deposicional desses evaporitos é de ambientes costeiros (supramaré), sujeitos a variações relativas do nível do mar, em condições de clima árido a semi-árido e o membro Romualdo, composto por arenitos interestratificados com folhelhos, o empilhamento para o topo mostra um perfil transgressivo onde os arenitos costeiros cedem lugar aos folhelhos verdes, os folhelhos ficam mais escuros e ricos em matéria orgânica em direção ao topo da formação. Um nível de concreções acima dos folhelhos ocorrente em toda a bacia pode ser um registro de um evento de mortandade em massa, onde essas concreções encerram a rica paleoictiofauna considerada marinha. Em direção ao topo da formação ocorrem arenitos intercalados com siltitos com ocorrência de fósseis de água doce, caracterizando as condições regressivas ao final dessa sequência.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizado o estudo de faciologia orgânica e maturação térmica em 29 amostras de folhelhos e siltitos de 2 testemunhos de sondagens pertencentes ao Projeto Santana II (Scheid *et. al.*, 1978), os testemunhos 1PS-10-CE e 1PS-12-CE (Quadro 1), localizados a leste da bacia do Araripe (Figura 4). Para tal estudo foram confeccionadas lâminas organopalinológicas e *plugs* de concentrado de querogênio.

Quadro 1 Dados dos poços analisados.

Poço	Total de amostras	Localização (UTM)	Intervalo estudado (m)
1PS-10-CE	12	9201080 0450000	42,7 – 104,4
1PS-12-CE	17	9171780 0459780	107,4 – 222,4

3.1 Preparação de Lâminas Organopalinológicas

A preparação do material para análise de palinofácies foi realizada utilizando-se os procedimentos palinológicos padrões não oxidativos descritos por Tyson (1995), Mendonça Filho (1999) e Mendonça Filho *et al.* (2010). As amostras foram fragmentadas e aproximadamente 20g a 40g de material foi separado para obtenção de um concentrado de querogênio. A primeira etapa do processamento químico consistiu na acidificação da amostra com o ácido clorídrico (32%) para eliminação da fração carbonática. Na segunda etapa do processamento utilizou-se ácido fluorídrico (40%) para eliminação da fração silicosa. A amostra foi novamente acidificada com HCl (10%), para eliminação dos possíveis fluorsilicatos formados durante as etapas anteriores. Utilizou-se o cloreto de zinco ($ZnCl_2$) para separação por flotação da fração orgânica da fração inorgânica. Após esse processo foram confeccionadas lâminas organopalinológicas com o resíduo orgânico.

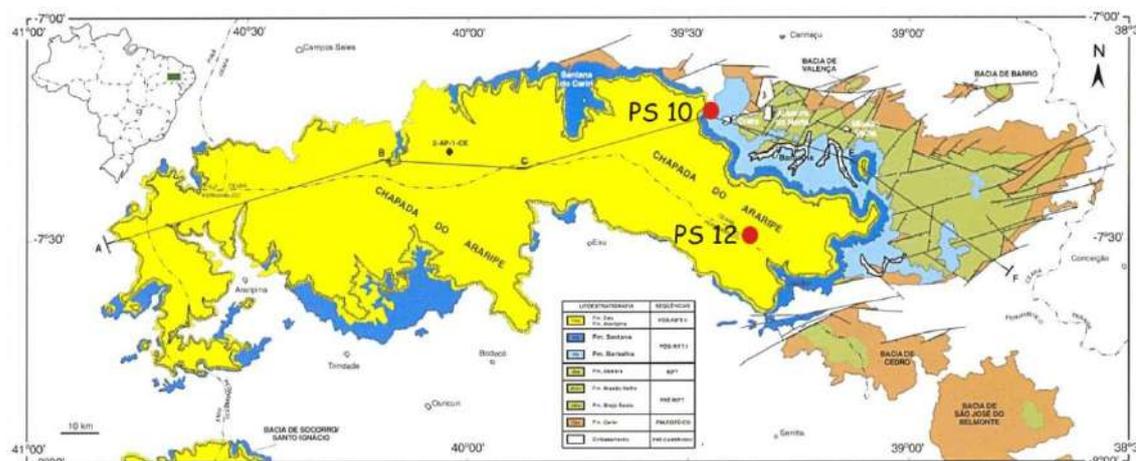


Figura 4 Mapa geológico da bacia do Araripe com a localização dos poços analisados. (Modificado de Assine, 2007).

3.2 Preparação de Plugs de Concentrado de Querogênio

Uma pequena porção do resíduo orgânico, obtida pelo procedimento de concentração de querogênio, é colocada em formas de Teflon, seca em estufa (50°C), para em seguida, receber uma mistura de resina (Serifix) e catalisador (endurecedor). Após o endurecimento do material, ele é retirado da forma, lixado, para posterior polimento.

3.3 Análise de Palinofácies

A análise de palinofácies envolveu o exame quantitativo (contagem de 300 a 500 partículas) e qualitativo (identificação das partículas) dos grupos e subgrupos de componentes do querogênio através da utilização de técnicas de microscopia sob luz branca transmitida e luz azul/ultravioleta incidente (fluorescência). Tal contagem obedeceu à classificação dos grupos e subgrupos da matéria orgânica proposta por Tyson (1995), Mendonça Filho (1999) e Mendonça Filho *et al.* (2002; 2010). Após a contagem dos componentes orgânicos particulados, os valores absolutos foram recalculados para valores percentuais e normalizados a 100%, e confeccionados diagramas binários para uma melhor visualização dos resultados.

3.4 Análises Geoquímicas

A análise de Carbono Orgânico Total (COT) foi obtida através do forno de indução do determinador de carbono WR-12 LECO, as determinações de COT e ST de todas as amostras foram realizadas no aparelho SC-144 da LECO, após acidificação com HCl para remoção dos carbonatos. Os resultados de COT expressam a quantidade de matéria orgânica presente nos sedimentos. Uma rocha é considerada potencialmente geradora quando possui pelo menos 0,5% de conteúdo orgânico (Tissot & Welte, 1984). O resíduo insolúvel (RI) corresponde à fração de amostra não eliminada pelo tratamento com HCl, pressupondo-se a eliminação total dos carbonatos existentes, haverá apenas Carbono Orgânico no resíduo restante.

$$\% \text{ RI} = \frac{\text{PI}}{\text{PA}} \times 100$$

Onde:

PI = Peso do insolúvel (massa da amostra descarbonatada)

PA = Peso da amostra (massa inicial)

3.5 Tratamento Estatístico

Após a contagem dos componentes orgânicos particulados, os valores absolutos foram recalculados para valores percentuais, normalizados a 100% e confeccionados diagramas binários para uma melhor visualização dos resultados. Esses dados foram submetidos à análise de agrupamento para a observação de similaridades entre as amostras (*Modo-Q*) utilizando o programa Statistic Basic versão 7.0.

3.6 Análises de Maturação Térmica

3.6.1 Índice de Coloração de Esporos (ICE)

De acordo com o efeito térmico que alguns componentes orgânicos das rochas sedimentares, tais como, esporomorfos (esporos e grãos de pólen) foram submetidos, sua coloração original é alterada, tornando-se mais escuros com o aumento da temperatura. A atribuição de valores numéricos a estas variações de coloração constitui o Índice de Coloração de Esporos (ICE), a partir do qual são desenvolvidos estudos de maturação térmica (Mendonça Filho *et al.*, 1994).

O ICE utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Barnard *et al.* (1981) (Tabela 2) o qual apresenta uma escala de 1 a 10, em intervalos de 0,5 que foi designada para dar linearidade com o aumento da profundidade e temperatura.

Quadro 2 Escala de evolução térmica no Cretáceo, Barnard *et al.*, 1981.

ICE	IMATURA	MATURA	SUPERMATURA
1 - 6			
6 - 9,5			
9,5 - 10			

As medidas do Índice de Coloração de Esporos (ICE) são determinadas sobre lâminas organopalinológicas em microscopia de luz transmitida utilizando como referência as lâminas-padrão da Robertson Research International Limited, calibrado em escala de 1 a 10 com intervalos de 0,5 (Figura 5).

3.6.2 Poder Refletor da Vitrinita (%R_o)

De acordo com Stach *et al.* (1982) da mesma maneira que as rochas inorgânicas são constituídas por minerais, as rochas orgânicas são constituídas por macerais. O sistema que

define a classificação dos macerais do carvão é conhecido como Stopes-Heerlen, o qual inclui vitrinita como um grupo de macerais.

A vitrinita é o mais frequente e, conseqüentemente, o mais importante grupo de macerais que ocorre em carvões betuminosos e outras rochas com matéria orgânica Stach *et al.* (1982). O seu poder refletor é um dos mais importantes parâmetros utilizados para estudos da evolução térmica da matéria orgânica contida nos sedimentos, partindo-se do princípio que a reflectância da vitrinita pode representar todos os possíveis intervalos de paleotemperaturas, ao contrário de todos os outros métodos ópticos ou físico-químicos, que estão restritos a determinados níveis de evolução térmica (Hunt, 1979).

A “janela de geração de petróleo” tem sido definida pelos valores de %Ro de 0,60% (topo da janela) e 2,0% (base da janela), no entanto, esses valores podem variar de acordo com a cinética do querogênio presente na rocha.

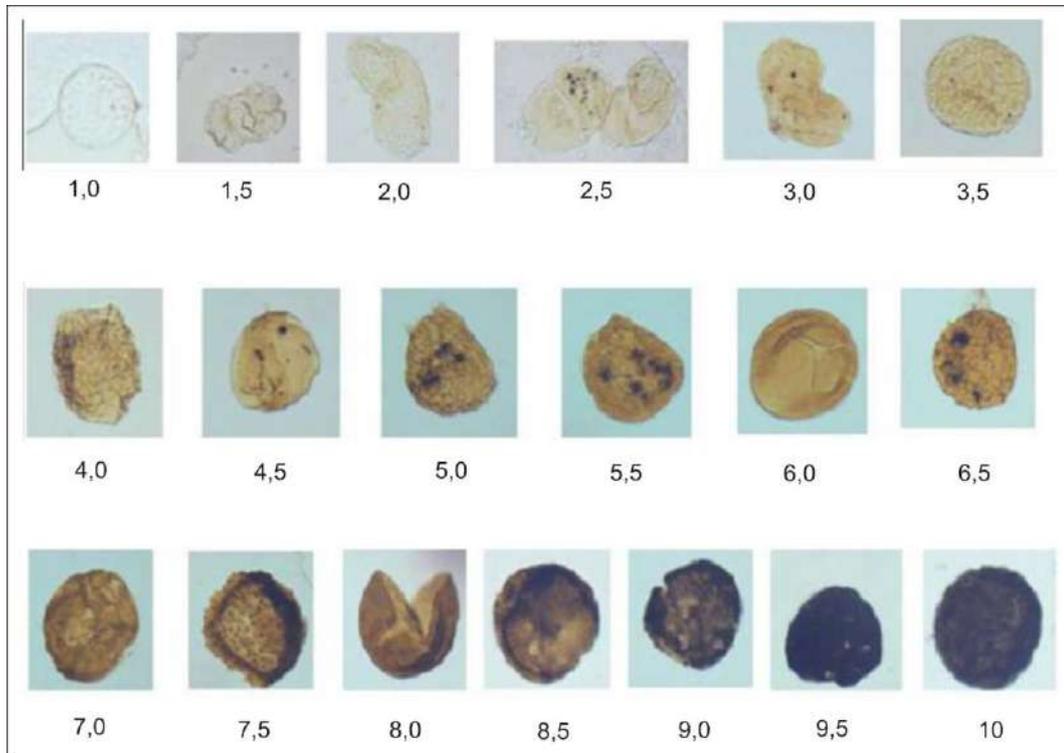


Figura 5 Índice de Coloração de Esporos (ICE) (Robertson Research Limited).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Palinofácies

A partir da análise de Palinofácies nos dois testemunhos foi possível observar a ocorrência dos três grupos principais do querogênio: Fitoclasto, Matéria Orgânica Amorfa (MOA) e Palinomorfo (quadro 3).

Quadro 3 Valores percentuais dos principais grupos do querogênio dos testemunhos IPS-10-CE e IPS-12-CE.

IPS-10-CE					IPS-12-CE				
Amostra	Prof. (m)	Fito (%)	MOA (%)	Palino (%)	Amostra	Prof. (m)	Fito (%)	MOA (%)	Palino (%)
A1	42,70	93,3	0,3	6,5	PL1	107,50	82,91	2,85	14,24
A2	47,50	96,3	0,0	3,7	PL2	110,00	47,67	41,64	10,68
9	49,55	79,0	0,9	20,1	PL3	113,00	55,04	36,69	8,27
A3	53,60	93,4	1,5	5,1	PL4	116,00	65,44	28,61	5,95
A4	55,80	96,3	0,0	3,7	PL5	120,00	99,12	0,00	0,88
A5	57,6	0,0	0,0	0,0	PL6	123,70	90,83	0,00	9,17
A6	94,00	83,1	12,6	4,3	PL7	127,00	75,53	3,32	21,15
A7	95,50	98,8	0,3	0,9	PL8	132,00	77,34	6,65	16,01
A8	98,40	95,8	0,0	4,2	PL9	136,00	56,27	29,15	14,58
P17	99,80	21,0	74,6	4,4	PL10	139,00	29,33	65,64	5,03
18	102,65	54,7	16,1	29,2	A1	139,60	13,11	81,69	5,19
A9	104,40	35,5	62,2	2,3	A2	143,00	18,92	78,08	3,00
					PL14	145,50	3,86	95,85	0,30
					A3	201,00	97,48	0,00	2,52
					PL15	206,70	7,54	91,01	1,45
					PL16	211,00	81,45	0,00	18,55
					A4	222,40	93,16	3,70	3,13

(Prof.= Profundidade; Fito = Fitoclasto; MOA = Matéria Orgânica Amorfa; Palino = Palinomorfos).

O grupo Fitoclasto, derivado de tecidos de vegetais superiores, é dominado por fitoclastos não-opacos (Figura 6, Fotos 1 e 2), por vezes, com partículas apresentando fluorescência seguido por fitoclastos opacos (Figura 6, Fotos 3 e 4). Ocorrem também

fitoclastos em estado amorfizado (Figura 6, Fotos 5a e 5b) apresentando fluorescência amarelada e/ou alaranjada, os outros componentes tais como: membranas (tecido de forma irregular, sem estrutura celular, com fluorescência amarelo-esverdeada) (Figura 6, Fotos 6a e 6b) e cutículas (camada mais externa da epiderme foliar com coloração de amarelo claro a marrom claro sob luz branca transmitida e amarelo-alaranjado sob fluorescência). As cutículas encontradas apresentam células e estômatos típicos atribuídos à família Cheirolepidiaceae (coníferas extintas no Triássico-Cretáceo), família à qual se atribui o grão de pólen *Classopollis* e que tem afinidade com as famílias Taxodiaceae, Cupressaceae e Araucariaceae. Segundo alguns autores como Gomez *et al.* (2001); Neumann *et al.* (2003); Axsmith (2006) e Mohr *et al.* (2006), as plantas desta família apresentam características xeromórficas, isto é, são plantas típicas de regiões secas (áridas), com precipitações sazonais e, segundo Axsmith (2006); Haworth & McElwain (2008), com frequentes condições de hipersalinidade e estômatos bem preservados, que poderiam funcionar como sistema anti-transpirante nestas plantas, evitando assim a perda de água para o ambiente (Figura 6, Fotos 7a a 8b).

No grupo da Matéria Orgânica Amorfa (MOA) dois componentes principais foram identificados. Primeiramente, uma MOA intensamente fluorescente, pouco espessa e com colorações de fluorescência variando de amarelo-esverdeada a amarelo-alaranjado (Figura 6, Fotos 9a e 9b) e outra com aspecto grumoso que, sob fluorescência apresenta colorações variando do amarelo-alaranjado ao laranja (Figura 6, Fotos 10a e 10b). De acordo com Mendonça Filho *et al.* (2009) e Borrego *et al.* (2009), a primeira representa uma MOA de composição lipoprotéica de provável origem bacteriana (bactérias autotróficas). Já o outro tipo representa uma MOA derivada do retrabalhamento microbiológico (bactérias heterotróficas) de vegetais, sendo rica em carboidratos. Tissot & Welte (1984) usaram a intensidade e cor da fluorescência para determinar o nível de evolução térmica do querogênio. Segundo eles, a coloração variando do amarelo-esverdeado ao laranja representa valores entre

0,48 – 0,65 %R_o, sugerindo uma baixa maturação térmica. Neumann *et al.* (2003) com base em valores de reflectância de vitrinitas (0,20 – 0,40 %R_o) sugeriram baixa maturação térmica para as camadas do Andar Alagoas da bacia do Araripe.

O grupo Palinomorfo está representado em grande parte pelos palinomorfos continentais com predomínio dos grãos de pólen (principalmente *Classopollis* e *Araucariacites*, Figura 7, Fotos 1 a 5) e ocorrências de algas de água doce dos gêneros *Botryococcus*, *Pediastrum* e *Scenedesmus* (Figura 7, Fotos 6 a 8). Os palinomorfos marinhos estão representados por dinocistos do gênero *Subtilisphaera* (Figura 7, Fotos 9 a 11), neste caso os principais marcadores biológicos de incursão marinha na seção (Arai *et al.*, 1994; 2000; Arai, 1999; 2000; 2004; 2005; Pedrão & Lana, 2000) e, por uma baixa ocorrência de palinoforaminíferos (Figura 7, Foto 12) e ainda acritarcos e prasinófitas (Figura 7, Fotos 13 a 14b), estes últimos, possivelmente retrabalhados da seção de idade devoniana. Pedrão & Lana (2000) formalizaram uma ecozona com base em *Subtilisphaera* no Cretáceo médio restrita ao nordeste do Brasil, onde é sugerido que este gênero de dinocisto teria ocorrido em ambientes marinhos restritos, devido ao seu caráter eurihalino, isto é, tolerância à variações de salinidade típicas de ambientes estuarinos/lacustres e que as associações de *Subtilisphaera* refletem preferencialmente a instalação de condições paleoambientais marinhas marginais. Segundo Arai *et al.* (2000) a ecozona *Subtilisphaera* teria sido endêmica nos mares Thetianos, ocupando mares epicontinentais de baixa latitude. A presença de palinoforaminíferos indica condições marinhas normais segundo Martinez-Hernandez *et al.* (1980) e Courtinat (1989).

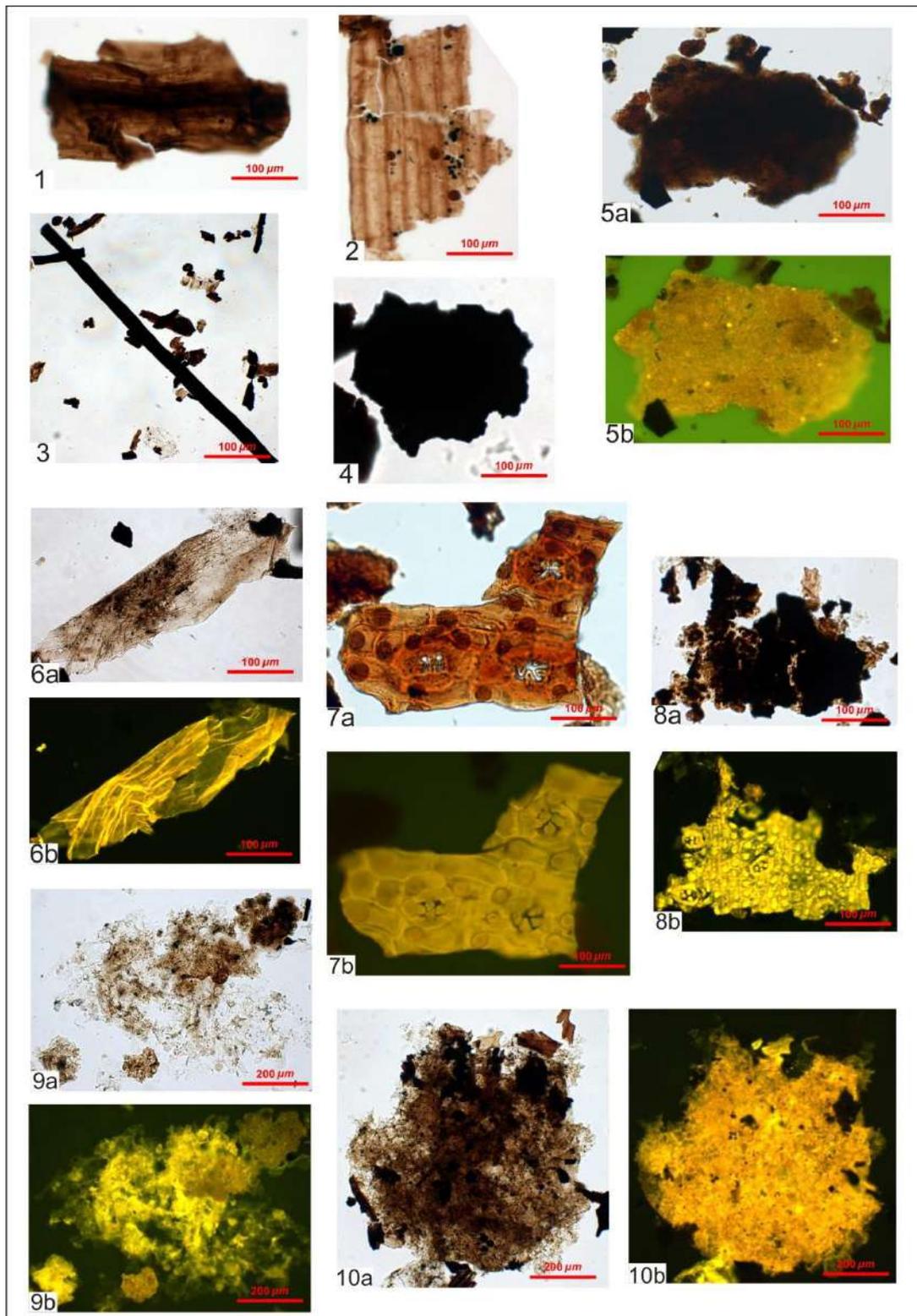


Figura 6 Fotomicrografias de Fitoclastos e Matéria Orgânica Amorfa

Luz Branca Transmitida - Fitoclastos: (1)(2) não-opaco, (3)(4) opacos, (5a) amorfizado, (6a) membrana, (7a) cutícula com estômatos, (8a) cutícula associada à fitoclasto. MOA: (9a) de origem bacteriana, (10a) de retrabalhamento bacteriano. Luz Fluorescente – Fitoclasto: (5b) amorfizado, (6b) membrana, (7b) cutícula com estômatos, (8b) cutícula associada à fitoclasto. MOA: (9b) de origem bacteriana, (10b) de retrabalhamento bacteriano.

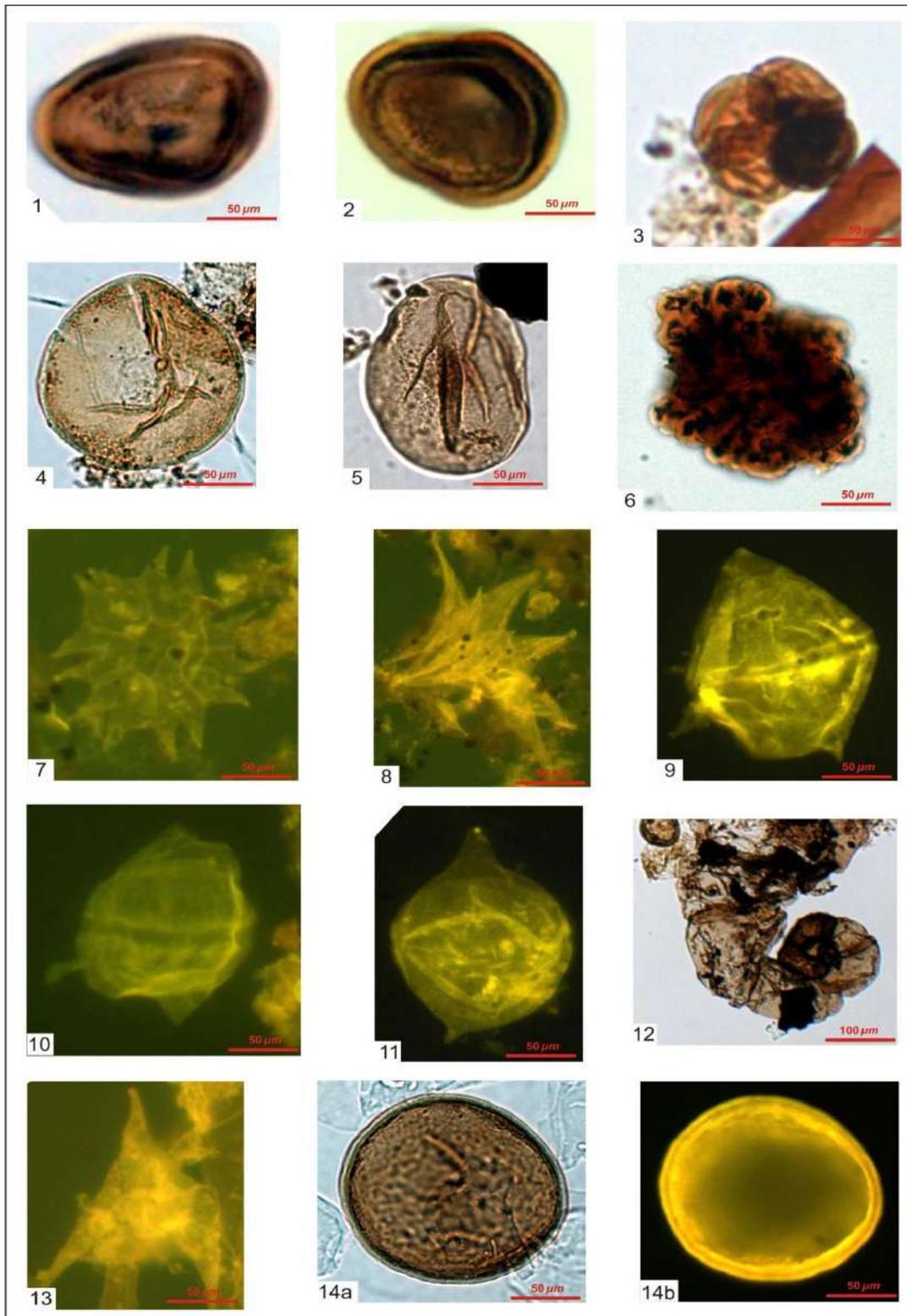


Figura 7 Fotomicrografias de Palinomorfos

Luz Branca Transmitida – Grãos de Pólen: (1)(2) *Classopollis*, (3) tétrede de *Classopollis*, (4)(5) *Araucariacites*, (6) Alga do gênero *Botryococcus*, (12) Palinoforaminífero e (14a) Alga Prasinófito. Luz Fluorescente – (7) Alga do gênero *Pediastrum*, (8) Alga do gênero *Scenedesmus*, (9)(10)(11) dinocistos do gênero *Subtilisphaera*, (13) Acritarco e (14b) Alga Prasinófito.

4.2 Geoquímica

Os teores de COT variaram de 0,08 a 0,73% no testemunho 1PS-10-CE e de 0,40 a 5,46% no 1PS-12-CE, refletindo tanto a bioprodutividade e a quantidade de matéria orgânica depositada, quanto ao grau de preservação do ambiente deposicional. O teor de Enxofre Total (ST) alcançou valores de até 0,15% no testemunho 1PS-10-CE e de 0,73% no 1PS-12-CE. Os elevados valores do resíduo insolúvel indicaram o predomínio de seções siliciclasticas nas amostras estudadas (o teor máximo de CaCO_3 foi de 16% no 1PS-10-CE e de 37% no 1PS-12-CE, quadro 4).

De acordo com o gráfico COT *versus* ST (Figura 8) é nítido o predomínio de ambiente lacustre de água doce na maioria das amostras dos dois testemunhos, com poucas amostras caindo no campo do ambiente marinho normal.

Quadro 4 Valores percentuais das análises geoquímicas das amostras estudadas.

1PS-10-CE					1PS-12-CE				
Amostra	Prof. (m)	COT (%)	ST (%)	RI (%)	Amostra	Prof. (m)	COT (%)	ST (%)	RI (%)
A1	42,70	0,34	0,02	89	PL1	107,50	0,79	0,36	83
A2	47,50	0,35	0,01	89	PL2	110,00	0,46	0,05	80
9	49,55	0,34	0,02	90	PL3	113,00	0,82	0,02	80
A3	53,60	0,36	0,02	92	PL4	116,00	1,08	0,37	83
A4	55,80	0,45	0,1	92	PL5	120,00	1,01	0,24	84
A5	57,60	0,08	0,0	86	PL6	123,70	1,39	0,39	81
A6	94,00	0,58	0,03	93	PL7	127,00	1,18	0,28	81
A7	95,50	0,67	0,04	91	PL8	132,00	1,18	0,16	80
A8	98,40	0,73	0,03	90	PL9	136,00	1,40	0,13	80
P17	99,80	0,63	0,04	89	PL10	139,00	2,20	0,17	79
18	102,65	0,67	0,03	89	A1	139,60	2,35	0,26	82
A9	104,40	0,69	0,1	87	A2	143,00	2,46	0,25	81
					PL14	145,50	4,98	0,52	73
					A3	201,00	0,66	0,45	87
					PL15	206,70	5,46	0,73	63
					PL16	211,00	0,40	0,17	87
					A4	222,40	1,88	0,67	84

(Prof = Profundidade; COT = Carbono Orgânico Total; ST = Enxofre Total; RI = Resíduo Insolúvel).

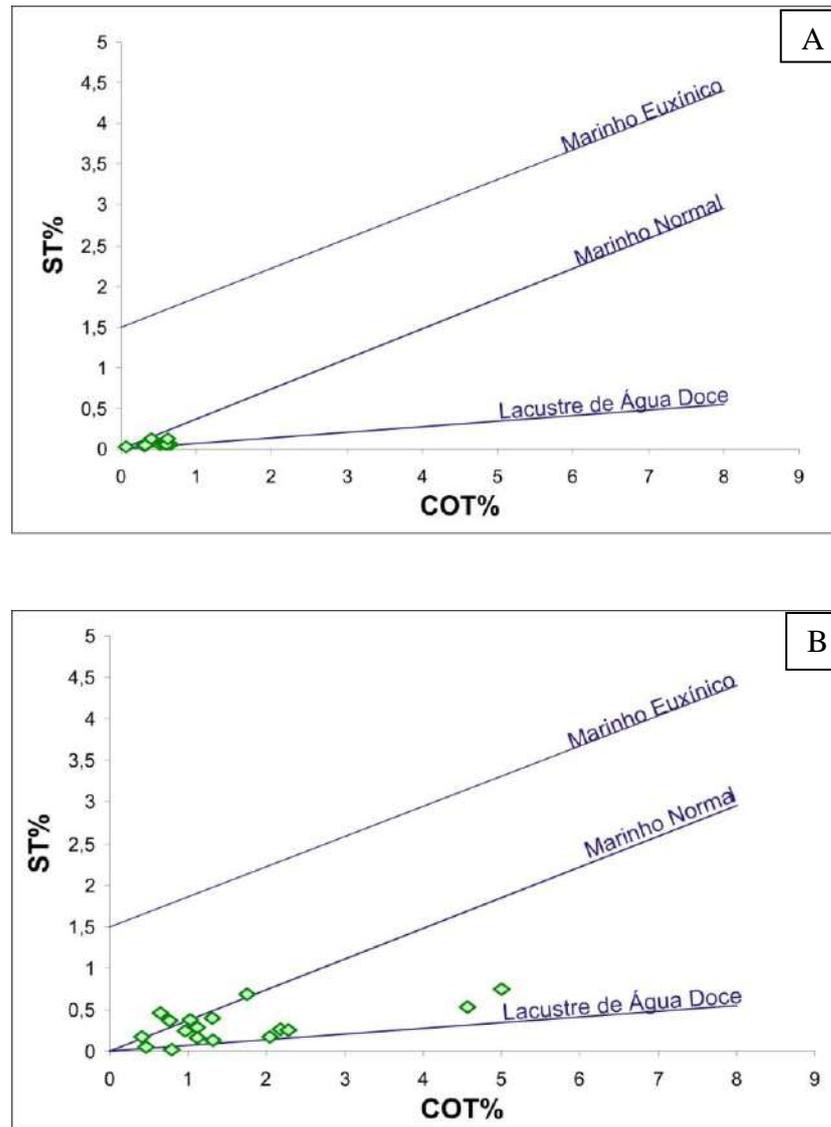


Figura 8 Gráfico de COT (% em peso) versus ST (% em peso) para os testemunhos IPS-10-CE (A) e IPS-12-CE (B), (Levental, 1983; Berner & Raiswell, 1984)

4.3 Agrupamento Hierárquico

De acordo com o tratamento estatístico *Modo-Q* (Figura 9), as 29 amostras foram subdivididas em 5 palinofácies de acordo com a quantidade de cada grupo e subgrupo da matéria orgânica (Quadro 5) que, plotadas estratigraficamente nos perfis, possibilitaram dividi-los em quatro (4) intervalos no testemunho IPS-10-CE e em seis (6) intervalos no testemunho IPS-12-CE.

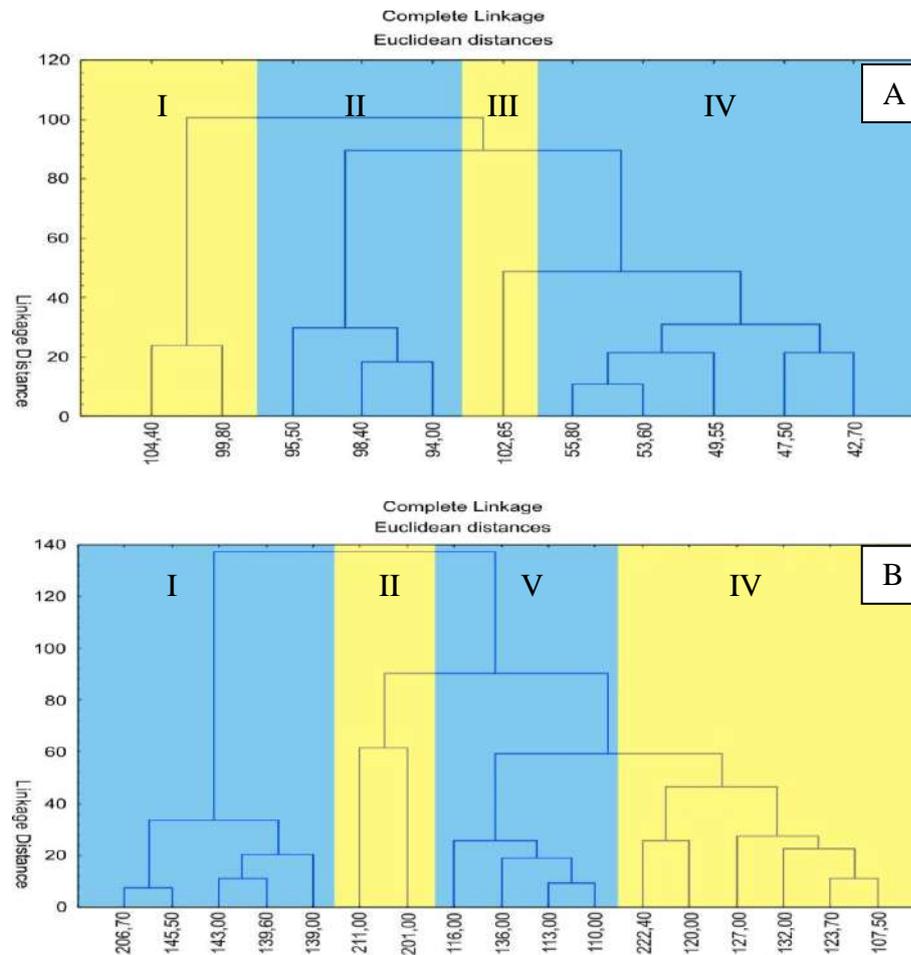


Figura 9 Dendrograma da análise de agrupamento dos testemunhos *IPS-10-CE* (A) e *IPS-12-CE* (B)

A **palinofácies I** é caracterizada pelo predomínio do grupo MOA, tendo em média 78,44% do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 12,34. Os grupos Fitoclasto e Palinomorfo ocorrem em média com 18,46% e 3,10% do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 11,37 e 1,88 respectivamente. As abundantes ocorrências do material amorfizado correlacionado com altos valores de COT (variando de 0,63 a 5,46%) indicam um ambiente lacustre salino às vezes com influência marinha (no testemunho IPS12-CE, devido à ocorrência de dinocistos), estagnado, propício à preservação.

A **palinofácies II** é caracterizada pelo predomínio do grupo Fitoclasto, principalmente os fitoclastos amorfizados, perfazendo em média 91,33% do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 8,36. Os grupos Palinomorfo e MOA ocorrem em média com

6,09% e o grupo MOA com 2,58% do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 7,10 e 5,61 respectivamente. Esta palinofácies apresenta baixos teores de COT, variando de 0,58 a 0,73%. A alta percentagem de fitoclastos amorfizados pode indicar um ambiente de baixa energia e proximidade à área fonte.

A **palinofácies III** ocorre apenas no testemunho 1PS10-CE sendo caracterizada pelo predomínio do grupo Fitoclasto, principalmente do tipo opaco, ocorrendo com média de 54,67% do total da matéria orgânica particulada. O grupo Palinomorfo ocorre com média de 29,18% (composto, em grande parte, por grãos de pólen do gênero *Classopollis*) e o grupo MOA ocorre com 16,15% do total da matéria orgânica particulada. O baixo percentual de COT (0,67%) e a elevada ocorrência de fitoclastos opacos e grãos de pólen indicam um ambiente óxico de alta energia.

A **palinofácies IV** é caracterizada pelo predomínio do grupo Fitoclasto e foi dividida em **palinofácies IVA** (predomínio de fitoclasto não-opaco bioestruturado) e **palinofácies IVB** (predomínio de fitoclasto não-opaco não-bioestruturado). O Grupo Fitoclasto ocorre em média com 88,83% do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 8,49. O grupo MOA ocorre com 1,75% e o grupo Palinomorfo com 9,42% do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 2,16 e 7,24 respectivamente. A elevada ocorrência de Fitoclasto e os valores de COT (variando de 0,37 a 1,88%) indicam ambientes menos restritos e úmidos, com maior circulação de águas oxigenadas.

A **palinofácies V** é caracterizada pelo predomínio do grupo Fitoclasto, principalmente do tipo não-opaco não-bioestruturado, tendo em média 56,10% do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 7,29. Os grupos MOA e Palinomorfo ocorrem em média com 34,03% e 9,87% respectivamente do total da matéria orgânica particulada e desvio padrão de 6,28 e 3,69. A maior ocorrência de fitoclastos opacos, de palinomorfos marinhos (dinocistos) e os valores de COT (variando de 0,46 a 1,40%) indicam um ambiente de sedimentação óxico de maior energia com influência marinha.

Quadro 5 Percentuais das amostras dos testemunhos 1PS-10-CE e 1PS-12-CE agrupadas pela palinofácies (valores percentuais em relação ao total da matéria orgânica particulada).

Palinofácies	Testemunho	Amostra	FOP	FNOB	FNONB	FAMORF	CUT	MEMB	MOA	PÓLEN	ESPORO	ALAC	DINO
I	1PS-10-CE	P17	3,0	1,8	7,4	8,6	0,0	0,3	74,6	1,8	0,3	2,1	0,0
		A9	2,0	1,2	3,5	28,5	0,3	0,0	62,2	1,5	0,3	0,6	0,0
	1PS-12-CE	PL10	9,5	2,2	11,7	5,9	0,0	0,0	65,6	2,5	0,6	0,0	2,0
		A1	3,6	0,5	3,3	5,5	0,3	0,0	81,7	1,4	0,0	0,0	3,8
		A2	1,8	0,3	1,8	15,0	0,0	0,0	78,1	1,2	0,9	0,6	0,3
		PL14	1,2	0,9	1,5	0,0	0,3	0,0	95,8	0,3	0,0	0,0	0,0
		PL15	0,6	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	91,0	1,4	0,0	0,0	0,0
II	1PS-10-CE	A6	5,2	3,7	18,9	54,4	0,9	0,0	12,6	3,2	1,1	0,0	0,0
		A7	10,4	2,4	9,9	76,1	0,0	0,0	0,3	0,9	0,0	0,0	0,0
		A8	16,4	9,2	19,5	49,6	1,1	0,0	0,0	2,8	0,3	0,3	0,0
	1PS-12-CE	A3	18,2	3,5	0,3	75,2	0,3	0,0	0,0	1,9	0,3	0,3	0,0
		PL16	3,5	0,9	7,0	65,5	0,0	4,6	0,0	15,7	2,9	0,0	0,0
III	1PS-10-CE	18	27,5	6,5	16,4	4,0	0,3	0,0	16,1	19,8	8,8	0,0	0,0
IV	1PS-10-CE IV A	A1	28,7	34,0	12,9	17,3	0,0	0,3	0,3	5,3	0,9	0,0	0,0
		A2	29,0	44,9	19,3	0,0	1,9	1,2	0,0	3,1	0,6	0,0	0,0
		A3	21,2	30,7	27,2	12,2	2,1	0,0	1,5	4,2	0,3	0,6	0,0
		A4	17,7	26,7	36,5	11,5	3,4	0,6	0,0	2,8	0,8	0,0	0,0
		9	18,9	23,7	22,8	12,6	0,9	0,0	0,9	17,4	2,1	0,0	0,0
	1PS-12-CE IV B	PL1	21,5	12,7	40,5	2,8	1,6	3,8	2,8	11,7	0,3	0,0	2,2
		PL5	14,7	12,6	64,4	5,0	2,1	0,3	0,0	0,6	0,3	0,0	0,0
		PL6	18,7	13,1	44,3	11,0	2,8	0,9	0,0	8,6	0,6	0,0	0,0
		PL7	16,9	22,1	22,4	12,4	1,5	0,3	3,3	4,5	3,6	0,0	13,0
		PL8	31,7	8,2	30,5	6,0	0,9	0,0	6,6	11,2	4,2	0,0	0,6
		A4	0,9	17,4	61,0	7,7	1,4	4,8	3,7	1,4	0,3	0,9	0,0
V	1PS-12-CE	PL2	11,5	6,3	23,3	5,8	0,3	0,5	41,6	4,9	1,6	0,5	3,6
		PL3	11,9	9,0	20,9	12,1	0,3	0,8	36,7	7,2	0,0	0,3	0,8
		PL4	7,9	9,9	37,7	5,9	1,7	2,3	28,6	5,9	0,0	0,0	0,0
		PL9	24,5	5,0	19,8	6,4	0,6	0,0	29,2	9,6	2,0	0,0	2,9

(FOP = Fitoclasto Opaco; FNOB = Fitoclasto não-opaco bioestruturado; FNONB = Fitoclasto não-opaco não-bioestruturado; FAMORF = Fitoclasto amorfizado; CUT = Cutícula; MEMB = Membrana; MOA = Matéria Orgânica Amorfa; ALAC = Algas lacustres; DINO = Dinocisto).

4.4 Maturação Térmica

As análises de ICE e Reflectância da Vitritina foram úteis na avaliação do grau de evolução térmica das seções estudadas e os respectivos resultados estão representados no Quadro 6. Segundo a comparação feita com o padrão de ICE (*Robertson Research International Group*), onde os valores de ICE variam entre 3,0 e 3,5 no testemunho 1PS-10-CE e entre 3,5 e 4,5 no 1PS-12-CE. As vitritinas (Figura 10, Fotos 1, 2, 3, 5, 6, 7) apresentaram valores de Reflectância que variam de 0,24 à 0,42%Ro no testemunho 1PS-10-CE e 0,38 à 0,59%Ro no 1PS-12-CE. De acordo com a correlação feita através do gráfico de Barnard *et al.*(1981) (Figura 11), os valores de ICE e de Reflectância da Vitritina indicam que as seções analisadas estão imaturas.

Quadro 6 Valores de ICE e %Ro das amostras dos testemunhos 1PS-10-CE e 1PS-12-CE.

1PS-10-CE				1PS-12-CE			
Amostra	Prof. (m)	ICE	%Ro	Amostra	Prof. (m)	ICE	%Ro
A1	42,70	3,0	0,24±0,019 (n=24)	PL1	107,50	3,5	-
A2	47,50	3,0	-	PL2	110,00	3,5	0,38±0,012 (n=12)
9	49,55	3,0	-	PL3	113,00	3,5	-
A3	53,60	3,5	-	PL4	116,00	4,0	-
A4	55,80	3,5	0,27±0,005 (n=59)	PL5	120,00	4,0	-
A5	57,60	-	-	PL6	123,70	3,5	-
A6	94,00	3,5	-	PL7	127,00	4,0	-
A7	95,50	3,5	0,42±0,014 (n=39)	PL8	132,00	4,0	0,41±0,008 (n=21)
A8	98,40	3,5	-	PL9	136,00	4,0	-
P17	99,80	3,5	-	PL10	139,00	4,0	-
18	102,65	3,5	-	A1	139,60	4,5	-
A9	104,40	3,5	-	A2	143,00	4,5	-
				PL14	145,50	4,0	-
				A3	201,00	4,0	-
				PL15	206,70	4,0	-
				PL16	211,00	4,5	-
				A4	222,40	4,5	0,59±0,008 (n=27)

(Prof = Profundidade; ICE = Índice de Coloração de Esporos; %Ro = Reflectância da Vitritina)

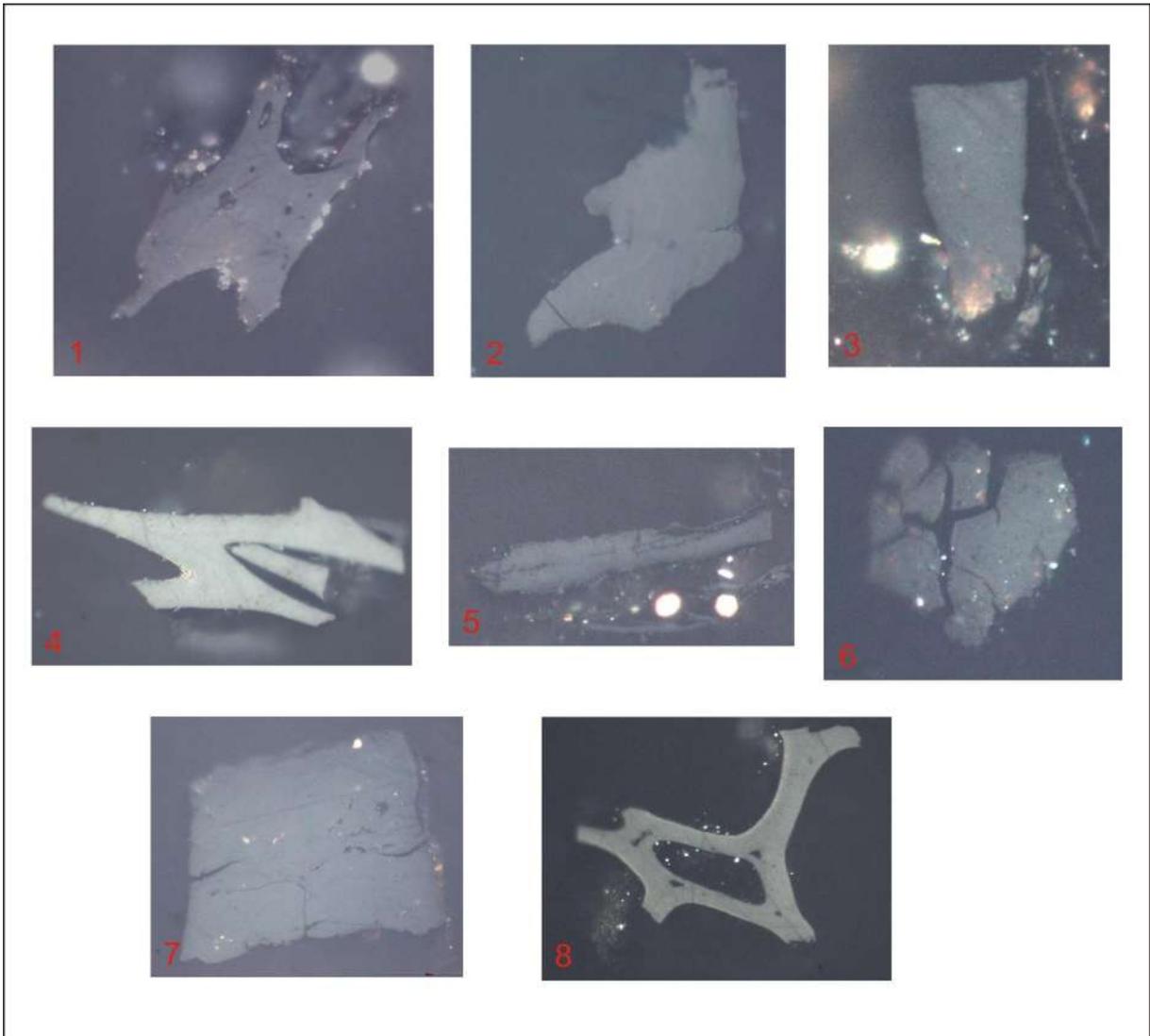


Figura 10 Fotomicrografias de Vitrinitas e Inertinitas Maturação Térmica

1PS-10-CE – Vitrinita: (1) 0,22%Ro (42,70 m), (2) 0,26%Ro (55,80m), (3) 0,45%Ro (95,50m) e Inertinita (4) 0,63%Ro (95,50m). 1PS-12-CE – Vitrinita (5) 0,38%Ro (110,00m), (6) 0,42%Ro (132,00m), (7) 0,61%Ro (222,40m) e Inertinita (8) 0,52%Ro (132,00m).

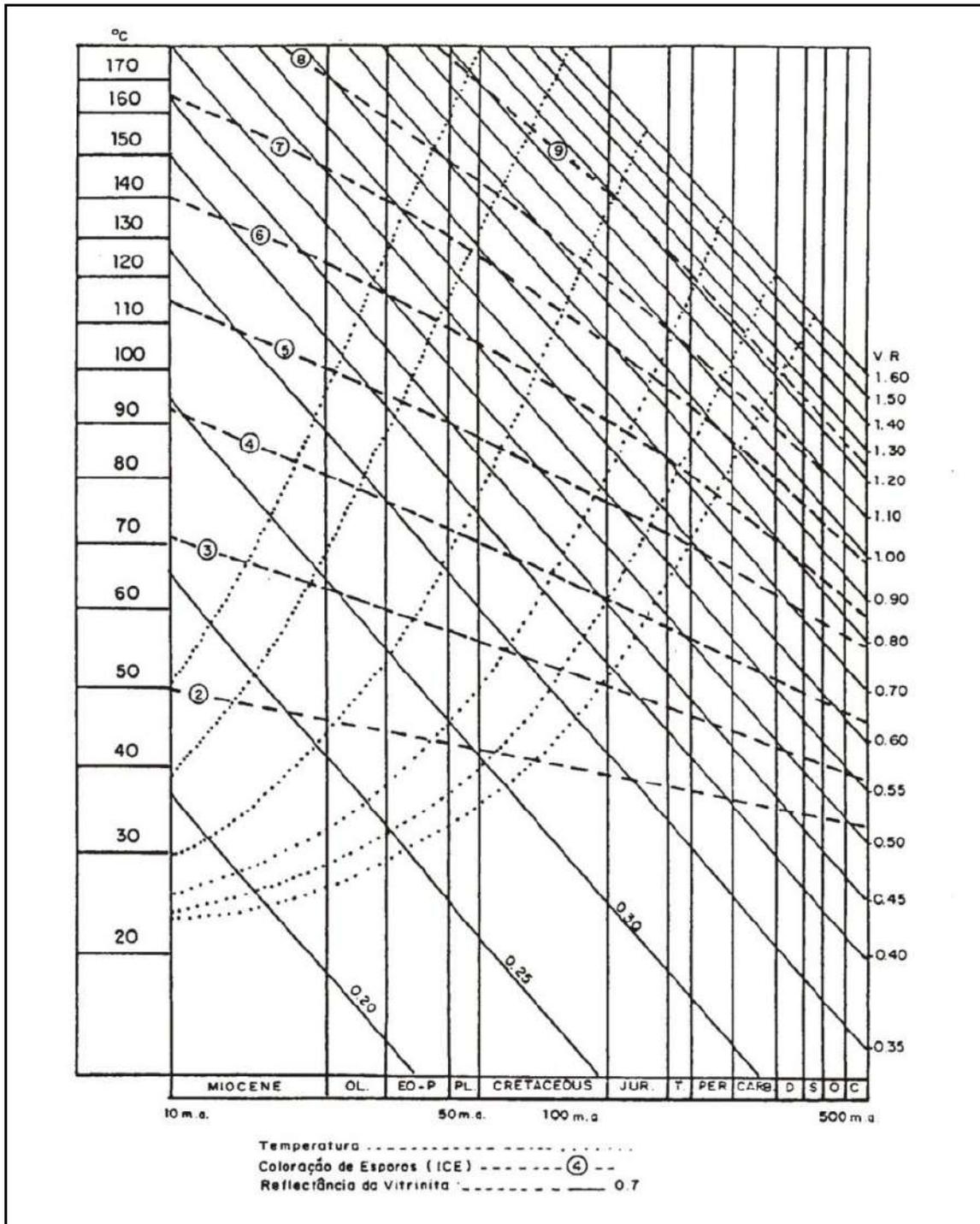


Figura 11 Correlação entre o tempo (milhões de anos), Temperatura (°C) e Maturação (ICE e %Ro) Barnard et al., (1981).

5 CARACTERIZAÇÃO PALEOAMBIENTAL

5.1 Testemunho 1PS-10-CE

Para a interpretação paleoambiental, o testemunho 1PS-10-CE foi dividido em 4 intervalos deposicionais a partir das associações de palinofácies geradas pelo agrupamento Modo-Q, com base na variação dos grupos e subgrupos da matéria orgânica (Figura 12).

O intervalo 1 (104,40 m) é composto pela palinofácies I. A alta abundância de MOA (62,9% do total da matéria orgânica) e de fitoclasto amorfizado (28,5% do total da matéria orgânica) podem indicar um ambiente estagnado, com coluna d'água anóxica e alta produtividade primária. O baixo percentual de fitoclastos opacos e não-opacos (6,7 % do total da matéria orgânica) pode indicar pouco/nulo transporte fluvial. O alto percentual de algas *Botryococcus* (25% do total de Palinomorfo) pode ser indício de ambiente com águas calmas, pouco agitada e com alta taxa de evaporação, implicando em uma coluna d'água salina e pouco espessa. O predomínio de *Classopollis* em relação ao subgrupo esporomorfo indica um clima árido e quente (Pedrão & Lana, 2000; Neumann *et al.*, 2003). A ocorrência de tétrades de *Classopollis* mostra que a sedimentação ocorreu rapidamente e próxima à área fonte. A análise de palinofácies indica um típico ambiente lacustre para este intervalo.

O intervalo 2 (102,65 m) é composto pela palinofácies III. A abundância de fitoclasto opaco (27,5 % do total da matéria orgânica), esporomorfos (28,6% do total da matéria orgânica) e a redução do percentual de MOA (16,1% do total da matéria orgânica) neste intervalo, indicam um ambiente de maior energia e mais úmido em relação ao intervalo 1, onde estes componentes orgânicos podem ter sido transportados por rios e/ou pelo vento para dentro do lago em períodos de chuvas esporádicas. O predomínio de *Classopollis* em relação a outros componentes do subgrupo esporomorfo indica clima árido. A ocorrência de algas Prasinófitas (palinomorfo marinho) sugerem um retrabalhamento de sedimentos mais antigos,

provavelmente do período Devoniano. A análise de palinofácies indica um típico ambiente flúvio-deltaico.

O intervalo 3 (99,80 – 94,00 m) é composto pelas palinofácies I e II. Neste intervalo volta a ocorrer o predomínio de MOA e de fitoclastos amorfizados, indicando ambiente de menor energia em relação ao intervalo 2. O intervalo 3 é muito semelhante ao intervalo 1, porém, com um aumento nos percentuais de fitoclasto opaco (8,7% do total da matéria orgânica) e esporomorfos (2,6% do total da matéria orgânica) indicando um ambiente de clima mais úmido (maior abundância de *Araucariacites* em relação a outros componentes do subgrupo esporomorfo) e maior aporte fluvial (aumento no percentual de fitoclastos). A presença de algas *Botryococcus* na base deste intervalo evidencia coluna d'água salina e pouco espessa. As cutículas de Cheirolepidiaceae indicam um clima árido, entretanto, a maior abundância de *Araucariacites* mostra que o clima tornou-se mais úmido, provavelmente com chuvas sazonais, pois segundo Neumann *et al.* (2003), árvores da família Araucariaceae teriam crescido nas áreas altas próximas ao lago e poderiam ser transportadas pelo vento ou rios para o interior deste. A ocorrência de algas Prasinófitas (palinomorfo marinho) pode evidenciar o retrabalhamento de sedimentos mais antigos (Devoniano?). A análise de palinofácies indica um típico ambiente lacustre com uma contribuição fluvial, corroborando com Moura (2007), que interpretou este mesmo intervalo com base em análise litofaciológica como um ambiente flúvio-lacustre.

O intervalo 4 (55,80 – 42,70 m) é composto pela palinofácies IVA. A alta abundância de fitoclasto não-opaco bioestruturado e o aumento na percentagem de esporomorfos (25,8 e 7,5% respectivamente do total da matéria orgânica), indicam uma ambiente mais úmido e de maior energia em relação ao intervalo 3, com a coluna d'água mais espessa, agitada e oxigenada (COT com média de 0,37%). Apesar da presença de cutículas de Cheirolepidiaceae com estômatos bem preservados indicando um clima mais árido, a presença de algas do

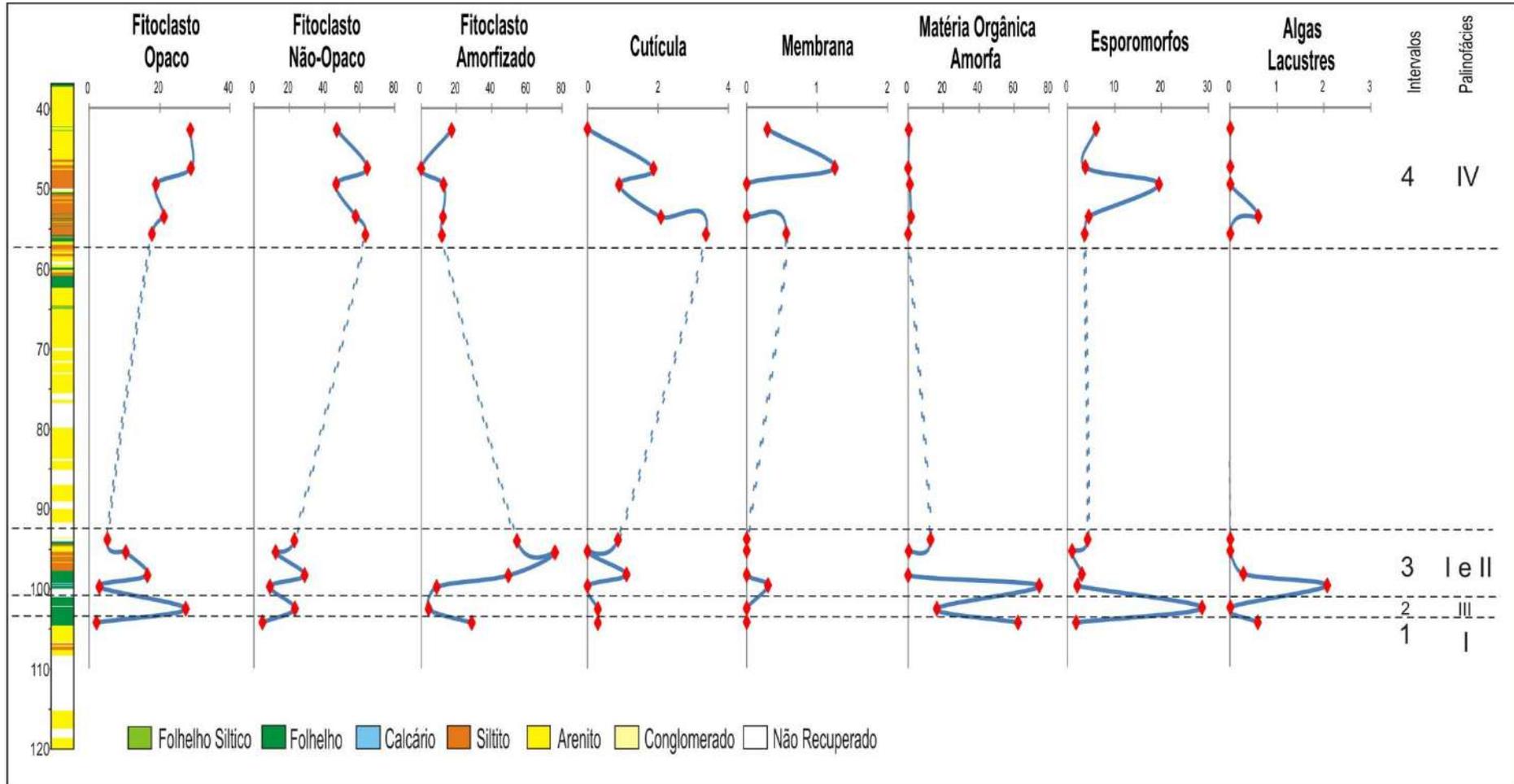


Figura 12 Gráfico mostrando os principais grupos e subgrupos da matéria orgânica e os intervalos do testemunho IPS-10-CE.

gênero *Pediastrum* corrobora com a idéia de uma coluna d'água mais espessa e salinidade mais baixa do que a do intervalo anterior, provavelmente as chuvas eram mais frequentes neste intervalo. Segundo Tyson (1995) algas desse gênero parecem ser mais abundantes em lagos tropical e subtropical permanentes, de baixa salinidade e com profundidade superior a 7 m. A ocorrência de algas Prasinófitas e acritarcos (palinómorfos marinhos) evidencia o retrabalhamento de rochas mais antigas (Devoniano?). A variedade de esporómorfos neste intervalo aumentou significativamente (*Classopollis*, *Afropollis*, *Stellatopollis* e outros). Segundo Neumann *et al.* (2003) a presença de Cheirolepidiaceae associada a angiospermas prematuras, são típicas de áreas alagadas durante as cheias do lago. O predomínio de material lenhoso (91,07% do total da matéria orgânica) neste intervalo pode estar relacionada ao transporte destes por rios e subsequente deposição em lobos deltáicos proximais a distais. Moura (2007) interpretou este mesmo intervalo como ambiente deltáico, em análise litofaciológica.

5.2 Testemunho 1PS-12-CE

Para a interpretação paleoambiental, o testemunho 1PS-12-CE foi dividido em 6 intervalos a partir das associações de palinofácies geradas pelo agrupamento Modo-Q, com base na variação dos grupos e subgrupos da matéria orgânica (Figura 13).

O intervalo 1 (222,40 m) é composto pela palinofácies IVB. A alta abundância de fitoclasto não-opaco não-biestruturado degradado (60,97% do total da matéria orgânica), ocorrendo juntamente com cutículas, membranas e grãos de pólen, indica um aporte fluvial intenso, com a coluna d'água oxigenada (COT com média de 1,88%). A presença de cutículas de Cheirolepidiaceae indica clima árido. A ocorrência de acritarcos (palinomorfo marinho) evidencia um retrabalhamento de rochas mais antigas (Devoniano?). O predomínio de tecidos lenhosos (93,16% do total da matéria orgânica) pode indicar um ambiente de alta energia,

onde essa grande quantidade de fitoclastos poderiam ter sido transportados para dentro do lago por rios, sendo depositados provavelmente em lobos deltaico.

O intervalo 2 (211,00 - 201,00 m), é composto pelas palinofácies I e II. A alta abundância de fitoclastos amorfizados e de MOA (46,9% e 30,3% do total da matéria orgânica) pode indicar ambiente de menor energia, estagnado e maior proximidade da área fonte em relação ao intervalo 1. A alta intensidade de fluorescência dessas partículas indica, provavelmente, ambiente de sedimentação alcalino, variando de salino a hipersalino, com elevada atividade bacteriana. Este ambiente de menor energia também foi identificado por Moura (2007), que determinou uma Superfície de Fechamento a 213,5m neste testemunho, sendo esta superfície caracterizada pela ausência do aporte fluvial que alimentava o sistema lacustre. Segundo o referido autor, esta superfície representa a transição de um sistema lacustre intermitente para um sistema lacustre fechado. O baixo percentual de fitoclastos opacos (7,43% do total da matéria orgânica) pode indicar menor influência de rios. A presença de algas *Botryococcus* reforça a idéia de uma coluna d'água salina e pouco espessa. O predomínio do grão de pólen *Classopollis* em relação a outros componentes do grupo esporomorfo (7,40% do total da matéria orgânica) sugere condições de clima árido, provavelmente com poucas chuvas para este intervalo, sendo reforçado pela presença de cutículas de Cheirolepidiaceae com estômatos pois, segundo Axsmith (2006) e Haworth & McElwain (2008), estes estômatos poderiam funcionar como sistema anti-transpirante nestas plantas, para evitar a perda de água para o ambiente. A análise de palinofácies indica um típico ambiente lacustre para este intervalo.

O intervalo 3 (145,50 – 136,00 m), é composto pela palinofácies I. A alta abundância da MOA (70,1% do total da matéria orgânica) indica ambientes com condições redutoras, coluna d'água anóxica e alta produtividade primária. A elevada concentração de MOA é característica de áreas com alta preservação de matéria orgânica com intenso retrabalhamento microbiológico em função das condições redutoras (COT variando de 1,4 a 4,9%). O aumento

no percentual de esporomorfos e de fitoclastos da base para o topo do intervalo pode indicar mudança no clima dentro deste intervalo com ambiente mais árido na base passando à semi-árido no topo, com maior aporte fluvial e/ou pluvial, tornando a coluna d'água mais oxigenada e o ambiente mais oxidante (redução do valor de COT), diminuindo a preservação da MOA e favorecendo a concentração de Fitoclastos. Em relação ao intervalo 2, a redução do percentual de esporomorfos (3,40% do total da matéria orgânica) com predomínio do grão de pólen *Classopollis*, reforçam a idéia de clima árido. A ocorrência de algas do gênero *Botryococcus* (20,0% do total de palinomorfos) na base deste intervalo indica uma maior salinidade da coluna d'água. A partir da amostra A2 (143,0 m) começam a aparecer indícios das primeiras incursões marinhas na bacia, sendo representado por dinocistos do gênero *Subtilisphaera* e palinoforaminíferos (Figura 7, Fotos 9 a 12). O percentual de dinocistos aumenta em direção ao topo deste intervalo, provavelmente por causa do favorecimento de nutrientes introduzidos nesse proto-oceano, proporcionando a proliferação dos mesmos. A análise de palinofácies indica um típico ambiente lacustre para a base deste intervalo, porém observam-se mudanças nas associações de componentes orgânicos particulados em direção ao topo, talvez para uma fácies marinha restrita.

O intervalo 4 (132,00 - 120,00 m), é composto pela palinofácies IVB. O aumento na proporção de fitoclastos opacos e não-opacos, a baixa preservação da MOA e a redução no valor do COT (média de 1,19%) em relação ao intervalo anterior, pode ter ocorrido devido a uma maior contribuição fluvial, indicando ambiente de maior energia e mais oxidante. O predomínio do grão de pólen *Classopollis* na base deste intervalo indica um clima árido e, na profundidade de 127,00 m, ocorre o maior percentual de *Subtilisphaera* (12,99% do total da matéria orgânica). Este pico de dinocistos pode ser entendido como ocorrência de um sistema fronteiro de coluna d'água estratificada, com maior luminosidade, um ambiente propício à proliferação dos mesmos. Em direção ao topo, o percentual de fitoclastos não-opacos aumenta em relação aos fitoclastos opacos indicando uma sedimentação mais proximal em

relação à área fonte e, a não ocorrência de dinocistos, provavelmente, é devido ao maior *input* fluvial, tornando a coluna d'água pouco salobra, aumentando a turbidez, proporcionando um ambiente desfavorável ao desenvolvimento destes dinocistos, visto que estes são considerados autotróficos e dependem de luz para sobreviver. A não ocorrência de dinocistos pode ter ocorrido até mesmo por causa de uma possível regressão marinha, corroborando com a idéia de Assine (2007). O predomínio do grão de pólen *Araucariacites* em relação ao subgrupo dos esporomorfos aumenta em direção ao topo, reforçando a idéia de um clima mais úmido, com períodos de chuvas mais intensos, justificando a maior entrada de fitoclastos no ambiente. Este intervalo mostra uma associação típica de um ambiente marinho com influência deltáica.

O intervalo 5 (116,00 – 110,00 m), é composto pela palinofácies II. A abundância de MOA (35,65% do total da matéria orgânica) neste intervalo indica um ambiente menos oxidante (COT com média de 0,79%) e mais calmo. A redução na percentagem de esporomorfos (6,59% do total da matéria orgânica, com predomínio de *Classopollis*) e fitoclastos (56,05% do total da matéria orgânica) indica clima mais árido, com menor transporte fluvial e/ou pelo vento em relação ao intervalo anterior. O baixo percentual de algas *Botryococcus* no topo deste intervalo pode indicar uma coluna d'água pouco espessa e mais salina. A ocorrência de *Subtilisphaera* e de palinoforaminífero evidencia o retorno das condições marinhas rasas propícias ao seu desenvolvimento, ocasionado talvez, por uma transgressão marinha ou pelo aumento da luminosidade na coluna d'água devido à diminuição do *input* fluvial, tornando as condições favoráveis à preservação da MOA. A análise de palinofácies indica um típico ambiente marinho restrito.

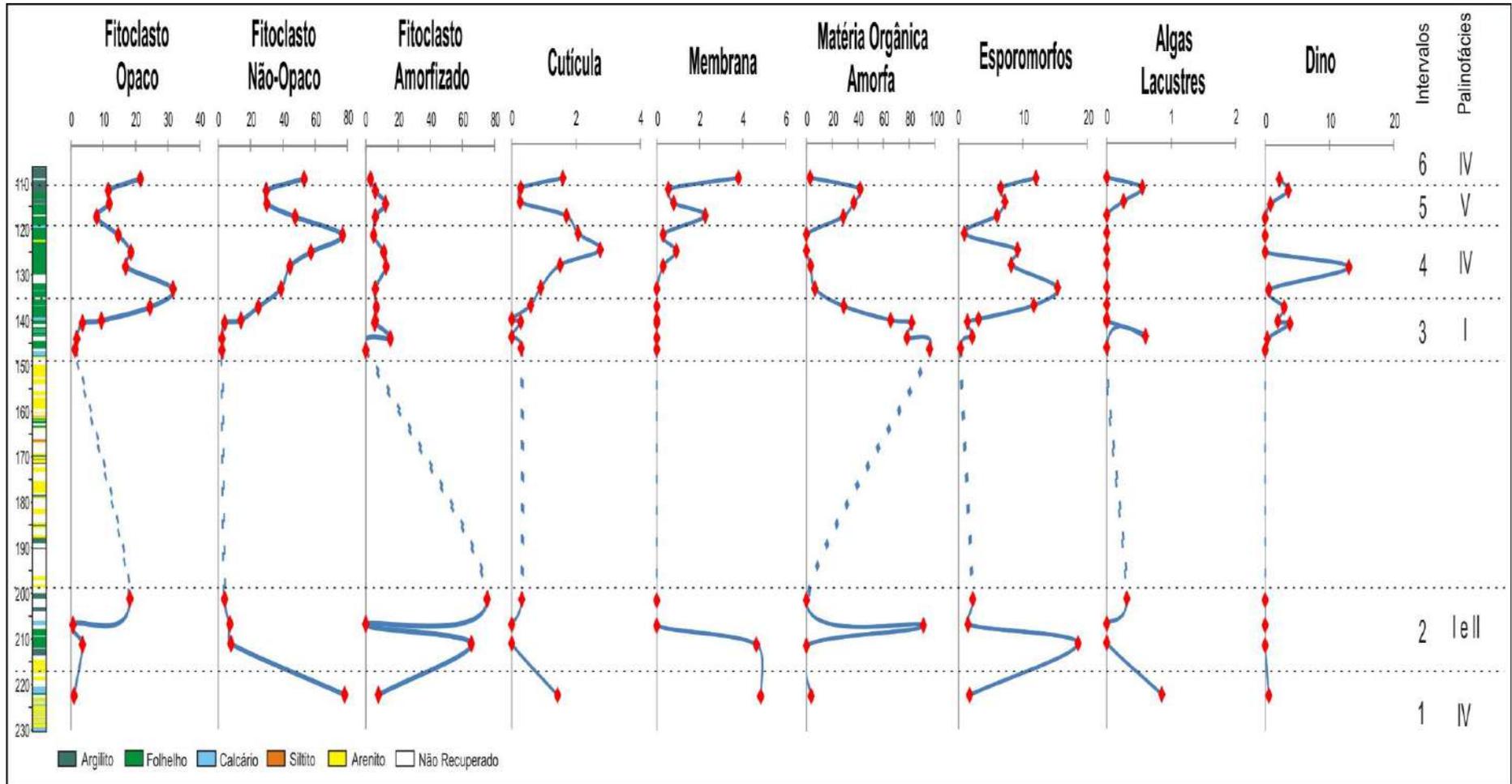


Figura 13 Gráfico mostrando os principais grupos e subgrupos da matéria orgânica e os intervalos do testemunho 1PS-12-CE.

O intervalo 6 (107,50 m), é composto pela palinofácies IVB. O aumento na abundância de fitoclastos (82,91% do total da matéria orgânica) e esporomorfos (14,24% do total da matéria orgânica, principalmente do grão de pólen *Araucariacites*) em relação ao intervalo anterior pode ter ocorrido devido a um maior aporte fluvial e/ou pelo vento, indicando clima mais úmido e um ambiente de maior energia. Com a coluna d'água mais oxigenada, ocorre uma maior degradação da MOA favorecendo a preservação dos fitoclastos, pois segundo Tyson (1989) em ambientes mais oxidantes, somente o material mais refratário é preservado. A presença de cutículas de Cheirolepidiaceae indica o predomínio de clima árido. Como no intervalo anterior, a presença de palinomorfos tipicamente marinhos (*Subtilisphaera* e palinoforaminíferos) evidencia as condições marinhas. Esse intervalo mostra uma associação típica de um ambiente marinho com influência deltaica.

6 POTENCIAL DE GERAÇÃO

O testemunho 1PS-10-CE apresentou uma palinofácies com predomínio do grupo Fitoclasto não-opaco e, segundo Tissot & Welte (1984) rochas com predomínio destes componentes podem gerar querogênio tipo III e, se soterradas a profundidades suficientes, podem gerar gás. Este testemunho apresentou baixos valores de COT (variando de 0,08 a 0,73%) e baixa maturação térmica (ICE variando de 3,0 – 3,5 e 0,24 – 0,42 %Ro), sendo considerado com baixo potencial de geração.

O testemunho 1PS-12-CE apresentou uma palinofácies com variações entre os principais grupos da matéria orgânica, ocorrendo predomínio do grupo Fitoclasto no intervalo 107,50 - 136,00 m e do grupo MOA no intervalo 136,00 – 145,50 m e, na base deste testemunho ocorre uma alternância no predomínio entre esses dois grupos. O intervalo 136,00 – 145,50 m (intervalo 3 da Figura 9) apresenta os maiores valores de COT no testemunho (variando de 2,2 – 4,98%) e predomínio de componentes orgânicos de composição liptiníticas (MOA e Palinomorfos), sendo considerado potencialmente gerador de hidrocarbonetos, porém com baixa maturação térmica (ICE variando entre 4,0 – 4,5 e 0,48 %Ro).

7 CONCLUSÃO

A variação entre o grupo Fitoclasto e o grupo MOA ao longo das duas seções estudadas mostra as sucessivas mudanças no ambiente deposicional, possivelmente controladas por mudanças climáticas que variavam entre clima árido com ambiente de menor energia a semi-árido com ambiente de maior energia. A predominância do grão de pólen *Classopollis* na maioria das amostras dos dois testemunhos sugere o estabelecimento de um clima quente e árido na maior parte das seções estudadas. A presença de *Subtilisphaera* e palinoforaminíferos no intervalo 143,00 – 107,50 m do testemunho 1PS-12-CE evidenciam a transgressão marinha ocorrida no intervalo Aptiano-Albiano desta bacia. A abundância de componentes orgânicos de composição liptinítica (MOA e Palinomorfo) e o teor mediano do COT no Intervalo 3 (145,50 – 136,00 m) do testemunho 1PS-12-CE, faz com que este intervalo seja considerado potencialmente gerador de hidrocarbonetos porém, a baixa maturação térmica das amostras estudadas, pode não ter propiciado à geração destes hidrocarbonetos.

8 REFERÊNCIAS

ARAI, M.; LANA, C.C; PEDRÃO, E. Ecozona *Subtilisphaera* spp.: registro eocretáceo de um importante episódio ecológico do Oceano Atlântico primitivo. São Leopoldo, **Acta Geológica Leopoldinense**, v.39, n.2, p.521-538, 1994.

ARAI, M. A transgressão marinha mesocretácea: sua implicação no paradigma da reconstrução paleogeográfica do Cretáceo no Brasil. Rio Claro/SP, **Boletim do 5º Congresso sobre o Cretáceo do Brasil**, p.577-582, 1999.

ARAI, M.; BOTELHO NETO, J.; LANA, C.C.; PEDRÃO, E. Cretaceous dinoflagellate provincialism in Brazilian marginal basins. **Cretaceous Research**, v.21, p.351-366, 2000.

ARAI, M. Chapadas: relict of mid-cretaceous interior seas in Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v.17, n.3, p.436-438, 2000.

ARAI, M. & LANA, C.C. Histórico do estudo de dinoflagelados fósseis no Brasil: sua relação com a evolução da exploração petrolífera no Cretáceo das bacias da margem continental. Rio de Janeiro, **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.12, n.1, p.175-189, 2004.

ARAI, M. 2004. **Sucessão das associações de dinoflagelados (protista, pyrrhophyta) ao longo das colunas estratigráficas do Cretáceo das bacias da margem continental brasileira: uma análise sob ponto de vista paleoceanográfico e paleobiogeográfico**. 2004. 241p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ARAI, M. Histórico da palinoestratigrafia marinha no Brasil com ênfase em dinoflagelados cretáceos. Rio de Janeiro, **Arquivos do Museu Nacional**, v.63, n.3, p.371-384, jul./set.2005 ISSN 0365-4508.

ASSINE, L.M. Bacia do Araripe. Rio de Janeiro, **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.15, n.2, p.371-389, 2007.

AXSMITH, B.J. The vegetative structure of a Lower Cretaceous conifer from Arkansas: further implications for morphospecies concepts in the Cheirolepidiaceae. **Cretaceous Research**, v.27, p.309-317, 2006.

BARNARD, P. C.; COLLINS, A. G.; COOPER, B. S. 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, 1981.

BERNER, R.A.; RAISWELL, R. C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rock. **Geology**, v. 12, p. 365-368, 1984.

BORREGO, A.G.; MENDONÇA FILHO, J.G.; MENDONÇA, J.O.; MENEZES, T.R.; SILVA, F.S.; NEUMANN, V.H. Organic matter in the carbonatic sediments of the Aptian lacustrine system in the Cretaceous Araripe Basin (NE Brazil). **ICCP News**, 2009.

CARVALHO, I.S. Geological environments of dinosaur footprints in the intracratonic basins of northeast Brazil during the Early Cretaceous opening of the South Atlantic. **Cretaceous Research**, v.21, p.255-267, 2000.

COMBAZ, A. Les palynofácies. **Revue de Micropaléontologie**, v.7, p.205-218, 1964.

COURTINAT, B. Les organoclastes des formations lithologiques du Malm dans le Jura Méridional. Systématique, biostratigraphie et éléments d'interprétation paléoécologique. **Documents de Laboratoire Géologique Lyon**, v.105, p.365, 1989.

GOMEZ, B.; MARTÍN-CLOSAS, C.; MÉON, H.; THÉVENARD, F.; BARALE, G. Plant taphonomy and palaeoecology in the lacustrine Uña delta (Late Barremian, Iberian Ranges, Spain). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.170, p.133-148, 2001.

HAWORTH, M. & MCELWAIN. Hot, dry, wet, cold or toxic? Revisiting the ecological significance of leaf and cuticular micromorphology. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.262, p.79-90, 2008.

HUNT, J.M. Petroleum Geochemistry and Geology. San Francisco: Freeman; Co. HUNT, J. M. **Petroleum Geochemistry and Geology**. Freeman, San Francisco, 1979, 617 p.

LEVENTHAL, J. S. An interpretation of carbon and sulfur relationships in Black Sea sediments as indicators of environments of deposition. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 47, p. 133-137, 1983.

MARTINEZ-HERNANDEZ, E.; ALMEIDA-LEÑERO, L. REYES-SALAS, M.; BETANCOPUTAGUILAR, Y. 1980. Estudio palinológico para la determinación de ambientes en la Cuenca Fuentes-Río Escondido (Cretácico Superior), Región de Piedras Negras, Coahuila. **Revista Instituto de Geología**, Universidad Nacional Autónoma de México, v.4, p. 85-167, 1980.

MENDONÇA FILHO, J. G. 1994. **Estudo Petrográfico e Organogeoquímico de amostras de folhelhos da Formação Irati, Permiano Superior da Bacia do Paraná**. 1994. 248pp. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MENDONÇA FILHO, J. G. 1999. **Aplicação de estudos de palinofácies e fácies orgânica em rochas do Paleozóico da Bacia do Paraná, Sul do Brasil**. 1999. 388 p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2 volumes, Porto Alegre.

MENDONÇA FILHO, J.G.; CARVALHO, M.A.; MENEZES, T.R. São Leopoldo, Palinofácies. In: Unisinos (ed). **Técnicas e procedimentos de trabalho com fósseis e formas modernas comparativas**, p.20-24, 2002.

MENDONÇA FILHO, J.G.; ARAUJO, C.V.; BORREGO, A.G.; COOK, A.; FLORES, D.; HACKLEY, P.; HOWER, J.; MENEZES, T.R.; MENDONÇA, J.O.; KERN, M.L.; SUÁREZ-RUIZ, I.; KUS, J.; SOUZA, I.V.A. Isolation Organic Matter: Vitrinite Reflectance and Spectral Fluorescence. **ICCP News**, 2009.

MENDONÇA FILHO, J.G.; MENEZES, T.R.; MENDONÇA, J.O.; OLIVEIRA, A.D.; CARVALHO, M.A.; SANTANNA, A.J.; SOUZA, J.T. 2010. Rio de Janeiro, Palinofácies. *In*: Carvalho, I.S (ed.). No prelo. (Org.). **Paleontologia**.

MOHR, B.A.R.; BERNADES-DE-OLIVEIRA, A.E.C.; BARALE, G.; OUAJA, M. Palaeogeographic distribution and ecology of *Klitzschophyllites*, an early Cretaceous angiosperm in southern Laurasia and northern Gondwana. **Creataceous Research**, v.27, p.464-472, 2006.

MOURA, M.V. & BORGHI, L. Análise das fácies siliciclásticas da parte superior da Formação Santana (Bacia do Araripe): caracterização de potenciais rochas-reservatório. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 3, 2005, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo & Gás (IBP), (2005).

MOURA, M. V. 2007. **Análise estratigráfica do andar Alagoas na borda leste da bacia do Araripe**. 2007. 74p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NEUMANN V.H.; BORREGO A.G.; CABRERA L.; DINO R. Organic matter composition and distribution through the Aptian–Albian lacustrine sequences of the Araripe Basin, northeastern Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v.54, p.21-40, 2003.

PONTE, F.C & PONTE-FILHO, F.C. **Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe**. Recife: Departamento Nacional da Produção Mineral, 4o e 10o Distritos Regionais, Delegacias do Ministerio das Minas e Energia em Pernambuco e Ceará, 1996. 68p.

PEDRÃO, E. & LANA, C.C. Ecozona *Subtillispaera* e seu registro nas bacias brasileiras. **Revista Universidade de Guarulhos**. Geociências V (nº especial), p.81-85, 2000.

SCHEID, C.; MUNIS, M.B.; PAULINO, J. **Projeto Santana. Relatório Final Etapa II DNPM/CPRM**, Recife, 1978, 136p.

STACH, E.; MACKOWSKY, M. T. H.; TEICHMÜLLER, M.; TAYLOR, G. H. ; CHANDRA, D. ; TEICHMÜLLER, R. **Stach's Textbook of Coal Petrology**. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1982, 535p.

TISSOT B.P. & WELTE D.H. **Petroleum Formation and Occurrence**. Berlin, Springer-Verlag, 1984, 699p.

TYSON, R.V. Late Jurassic palynofacies trends, Piper and Kimmeridge Clay Formations, UK onshore and northern North Sea. **The British Micropalaeontological society**, p.135-172, 1989.

TYSON, R.V. **Sedimentary Organic Matter. Organic facies and palynofacies**. Chapman & Hall. Londres, 1995, 615p