

**QUIMIOESTRATIGRAFIA DE FÓSFORO DO TESTEMUNHO DE
SONDAGEM 1-LABIO-PE3 (FURO IATE): INVESTIGAÇÃO SOBRE O
REGISTRO DE EVENTO DE ANOXIA OCEÂNICA NA BACIA
PERNAMBUCO**

Paulo Ricardo Riedel¹
Mário F. de Lima Filho²
Haydon Peter Mort³

10.51359/1980-8208/estudosgeologicos.v29n1p120-134

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências – UFPE, e-mail: riedelpaulo@gmail.com

²Departamento de Geologia – CTG/UFPE, e-mail: mflf@ufpe.br

³Geologize – Somerset, Reino Unido, e-mail: geomort@gmail.com

RESUMO

A presença de folhelhos negros com concentrações de carbono orgânico total e enxofre em torno de 1% e fragrância característica de gás natural intercalados a litologias típicas de depósitos de ambiente sedimentar transicional, encontrados no testemunho de sondagem do poço estratigráfico 1-LABIO-PE3, localizado na cidade do Recife, porção Norte da Bacia Pernambuco, levantou a suspeita de que uma grande perturbação ambiental teria ocorrido durante a deposição deste material. Este trabalho apresenta os resultados de uma investigação sobre ocorrência de evento de anoxia oceânica em rochas sedimentares do Cretáceo superior (Cenomaniano–Turoniano) da Bacia Pernambuco, NE-Brasil. O estudo foi baseado na quimioestratigrafia do fósforo, realizada em 34 amostras do testemunho de sondagem, distribuídas entre as profundidades de 80.50 e 54.00 metros. As concentrações do fósforo nas amostras foram realizadas através de espectrofotometria ultravioleta-visível e divididas nas fases distintas: orgânico (P-Orgânico) e inorgânico (P-Inorgânico). Os resultados obtidos sugerem que a camada de folhelhos negros da formação Estiva foi depositada durante o evento de anoxia oceânica 2 (ou Evento Bonarelli). As paleotemperaturas e níveis oceânicos elevados durante o Cretáceo teriam favorecido o aporte de nutrientes às bacias oceânicas. A degradação bacteriológica da matéria orgânica no fundo da bacia teria consumido o oxigênio livre na água tornando-a redutora. Nestas condições, a fixação do fósforo nos sedimentos, na forma de mineralizações autigênicas, seria prevenida, reciclando este elemento como nutriente na zona trófica.

Palavras Chave: Bacia Pernambuco; Formação Estiva; Quimioestratigrafia de Fósforo; Eventos de Anoxia Oceânica; Limite Cenomaniano–Turoniano

ABSTRACT

The occurrence of a gas-smelling black shale, with total organic Carbon and Sulfur concentrations of about 1%, interleaved with lithologies typical of transitional sedimentary environment, found on the 1-LABIO-PE3 stratigraphic borehole core, located in Recife, Northern region of the Pernambuco Basin, raised suspicion that a major environmental turnover had occurred during its deposition. The present paper shows the results of an investigation about oceanic anoxic event on Upper Cretaceous sedimentary rocks (Cenomanian–Turonian) of the Pernambuco Basin, NE-Brazil. The study was based on Phosphorus chemostratigraphy, done by using 34 core samples spanning from 80.50 to

54.00 meters depths. The phosphorus concentrations were measured by ultraviolet-visible spectrophotometry and subdivided into two distinct phases: organic (P-Organic) e inorganic (P-Inorganic). The results obtained suggest that the black shale bed of the Estiva formation had been deposited during the oceanic anoxic event II (or the Bonarelli Event). High paleotemperatures and sea levels during the Cretaceous period would have favored the input of nutrients into the oceanic basin. The bacteriological degradation of organic matter on the bottom of the ocean would have consumed the water free oxygen, making a reduced environment. Under these conditions, the storage of Phosphorus on the sediments, as authigenic mineralization, would be prevented, recycling it as nutrient into trophic zone.

Keywords: Pernambuco Basin; Estiva Formation; Phosphorous Chemostratigraphy; Oceanic Anoxic Events; Cenomanian–Turonian Boundary

INTRODUÇÃO

O poço de sondagem 1-LABIO-PE3 está localizado no bairro de Brasília Teimosa, nas dependências do Iate Club do Recife, Pernambuco, NE-Brasil. Geologicamente esta área está situada no extremo norte da Bacia Pernambuco. As principais rotas de acesso na região são a BR 101, que cruza a área de Norte a Sul, e a BR 232, com direção aproximadamente E–W (Fig. 1).

A ideia de se estudar a quimioestratigrafia do fósforo no testemunho de sondagem do Furo Iate surgiu ao se observar a presença de níveis de folhelhos negros com fragrância característica de gás natural. Além disso, em um estudo

litoestratigráfico e palinológico, Araújo (2014) correlacionou o intervalo entre 82 e 58 metros, que contém os folhelhos negros, à Formação Estiva, de idade Cenomaniano–Turoniano (93.9 Ma). Esta idade é tipicamente associada a um evento de magnitude global, responsável pela deposição massiva de folhelhos ricos em matéria orgânica, denominado por Evento de Anoxia Oceânica 2 (EAO2). Devido à sensibilidade do fósforo às condições de pH-Eh do meio, esta ferramenta foi utilizada aqui como proxy para interpretações paleoambientais.

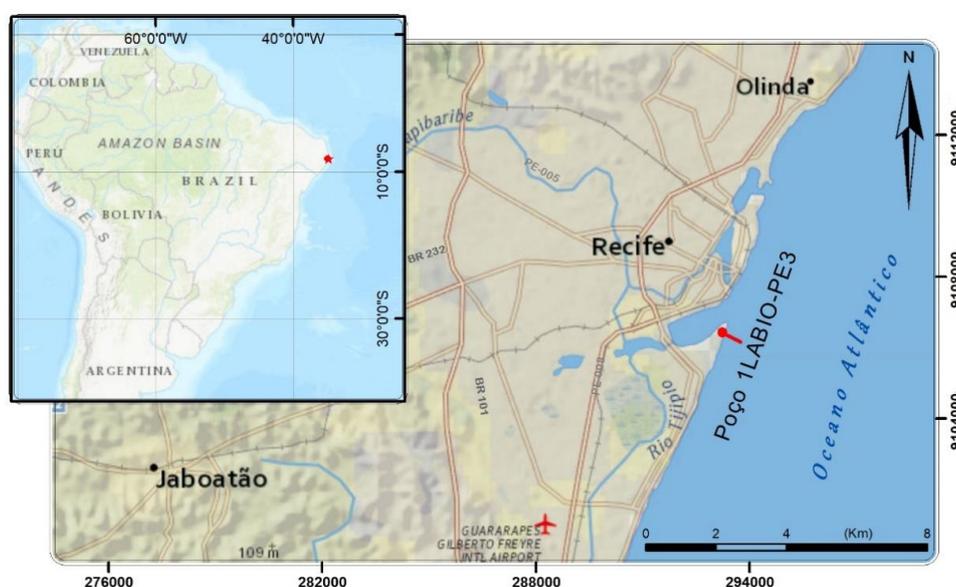


Figura 1- Mapa de Localização do poço 1-LABIO-PE. Projeção em UTM, Zona 25 L.

Evento de anoxia oceânica 2

O conceito de Evento de Anoxia Oceânica (EAO) foi primeiramente introduzido por Shlanger & Jenkyns (1976) ao investigarem rochas cretáceas testemunhadas pelo DSDP (*Deep Sea Drilling Project*), no Oceano Pacífico, correlacionadas em idade e litologia aos folhelhos negros encontrados em testemunhos do Oceano Atlântico e em afloramentos na Europa. Estes autores interpretaram os EAO como sendo períodos relativamente curtos do registro geológico onde vastas áreas oceânicas atingiram condições de alta deficiência em oxigênio à euxínicas. Durante estes períodos são reconhecidos depósitos sedimentares que contrastam fortemente com as litologias sobre- e suprajacentes em termos de condições de ambientes deposicionais. Estes depósitos são constituídos predominantemente por folhelhos cinza a negros ricos em matéria orgânica embora evidências de depósitos de *red beds* oceânicos relacionados a estes eventos tenham sido reportados (Wang *et al.*, 2011).

Depósitos como estes são interpretados como mudanças drásticas globais das condições ambientais e estão

muitas vezes associados aos grandes eventos de extinção em massa. O EAO 2, ou Evento Bonarelli, é tido como o quinto de uma série de grandes eventos de anoxia ocorridos durante o Cretáceo (Shlanger & Jenkyns, 1976; Mort, 2006; Mort *et al.*, 2007; Jenkyns, 2010) e é considerado como o intervalo de tempo de deposição de algumas das maiores rochas geradoras de hidrocarbonetos do mundo (Nzoussi-Mbassani *et al.*, 2003). Em casos excepcionais, como os depósitos aptianos do Evento Selli (EAO 1a), no sudeste da França, apresentam teores de carbono orgânico total (COT) de ~40% (Dumitrescu & Brassel, 2006).

Jenkyns (2010) argumenta que biomarcadores de bactérias verdes sulfurosas têm sido encontrados em folhelhos negros formados durante os intervalos de anoxia. Devido às condições específicas de luz solar e disponibilidade de ácido sulfídrico dissolvido na água que essas bactérias requerem para sobreviver, estes dados sugerem que águas euxínicas tenham existido em paleopropriedades tão rasas quanto 15 m. A figura 2 apresenta uma reconstrução paleogeográfica do proto-Atlântico durante o intervalo Cenomaniano–Turoniano.

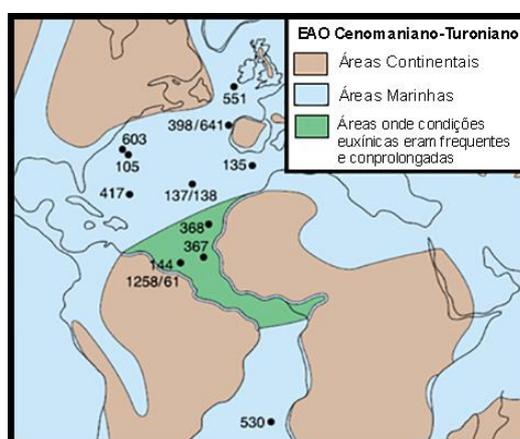


Figura 2- Reconstrução paleogeográfica do oceano Atlântico Sul durante o intervalo Cenomaniano–Turoniano (93.9 Ma) destacando áreas influenciadas pelo EAO 2. Dados baseados em biomarcadores de bactérias verdes sulfurosas que requerem incidência intensa de luz solar e ácido sulfídrico dissolvido na água (modificado de Jenkyns, 2010).

Na Bacia Potiguar, exemplo de uma das bacias petrolíferas do Nordeste brasileiro, este período é marcado pela deposição de uma seção de folhelhos betuminosos contínuos na porção submersa da bacia (Membro Redonda da Formação Quebrada) e pelo limite concordante entre as formações Açú e Jandaíra, na porção proximal. Estes depósitos são interpretados como sendo a superfície de inundação máxima durante o evento transgressivo da bacia (Pessoa Neto *et al.*, 2007).

Embora intensamente estudados, a força motriz causadora dos EAOs permanece sob debate. É sugerido que aumentos bruscos de temperatura provocados por rápido incremento de CO₂ no sistema atmosfera/oceano tenha sido o resultado de um ou mais fatores tais como: liberação de hidratos de metano sob os *permafrosts* (Hesselbo *et al.*, 2000), devido a atividades vulcânicas em larga escala (Turgeon & Creaser, 2008); e/ou queima de sedimentos ricos em matéria orgânica como resultado de atividade intrusiva (abertura do assoalho oceânico) (McElwain *et al.*, 2005); ou até mesmo eventos catastróficos gerados por impactos de asteroides (Onoue *et al.*, 2016).

Ciclo do fósforo durante os EAOs

O fósforo (P) é classificado como um não-metal do grupo do nitrogênio. Devido a sua alta reatividade, não é encontrado de forma livre (elementar) na natureza. Ao invés disso, ele se encontra quase sempre na sua forma de máxima oxidação, como unidade básica dos minerais do grupo dos fosfatos (PO₄³⁻) (Greenwood & Earnshaw, 1977). O fósforo, na forma de fosfatos, desempenha um papel fundamental em todas as formas de vida conhecidas na natureza e atua como um nutriente limitante para produção primária nos oceanos (Froelich *et al.*, 1982). Em termos de exemplificação, o corpo de um ser

humano adulto contém, em média 0.7 kg de fósforo, sendo 85 a 90% presente nos ossos e dentes, na forma de apatita [Ca₅(PO₄)₃(OH,F,Cl)] (Anderson, 1996).

Os primeiros estudos apontavam que o principal aporte de fósforo nos oceanos seriam os rios, negligenciando a entrada deste nutriente por meio de transporte eólico (Froelich *et al.*, 1982). Entretanto, estudos mais recentes, utilizando imageamento por LIDAR e infravermelho através de satélites, observaram que nuvens de aerossol com quantidades massivas de poeira rica em fósforo provenientes do deserto do Saara atravessam o Oceano Atlântico e fertilizam os solos da floresta amazônica todos os anos (Yu *et al.*, 2015). Embora o trabalho citado não quantifique, é de se esperar que porções significativas sejam depositadas no oceano durante o trajeto.

Modelos paleoambientais sugerem que épocas relativamente mais quentes, como durante o Cretáceo, eram acompanhadas por uma aceleração do ciclo hidrológico, favorecendo o intemperismo continental, aumento do aporte de nutrientes aos sistemas oceânicos e lacustres e intensificação das correntes de ressurgência (*upwelling*), resultando na potencialização da produtividade primária (Jenkyns, 2010).

A super produtividade primária nas águas superficiais, favorecida pela abundância de nutrientes, acarreta o aumento do aporte de matéria orgânica nos fundos oceânicos. Durante a decomposição desta matéria orgânica há um consumo de O₂ das águas circundantes e liberação de CO₂. (Demaison & Moore, 1980), gerando-se um ciclo. O fosfato contido nos sedimentos marinhos tem dois destinos possíveis. Em condições óxicas, o fósforo é oxidado formando minerais autigênicos (oxi-hidróxidos de Fe e Mn). Em condições anóxicas, as mineralizações autigênicas tendem a não acontecer e o fósforo pode

ser reciclado e retornar como nutriente para a zona trófica (Mort *et al.*, 2009).

Mort *et al.* (2009), baseados nas concentrações do fósforo na seção Whadi El Ghaib, no Egito, propõem um modelo de quatro etapas para o ciclo do fósforo durante o EAO2, como segue:

I- Transgressão rápida antes do EAO2 causando afogamento e retrabalhamento de sedimentos continentais em larga escala. Os oceanos cretáceos seriam pré-dispostos às condições de anoxia devido a elevada concentração de CO₂ atmosférico. Nutrientes contidos na matriz dos sedimentos seriam mais facilmente biodisponibilizados. A produção primária se mantém alta durante o platô do $\delta^{13}\text{C}$.

II- Decréscimo na eficiência do aprisionamento do P no sedimento devido às condições redutoras, mantendo o fósforo biodisponível e sustentando a produção primária da matéria orgânica criando um feedback positivo.

III- Após centenas de milhares de anos, a acumulação de O₂, por fotossíntese, na atmosfera seria tanta que a pressão parcial de oxigênio (pO₂) excederia a de dióxido de carbono (pCO₂) na zona fótica, resultando na oxigenação das águas e dos nutrientes, reduzindo a reserva de fósforo biodisponível nos oceanos. Ao mesmo tempo que o consumo de oxigênio em águas profundas, necessário para oxidar quantidades enormes de matéria orgânica, diminuiria a eficiência da degradação da matéria orgânica, favorecendo sua preservação.

IV- Acumulação de P inorgânico cresceria com a sorção do P em oxihidroxidos de Fe e Mn e a formação de minerais autigênicos estaria novamente equilibrada em condições mais óxicas.

CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA DE PERNAMBUCO

A Bacia de Pernambuco está situada no extremo leste da Província Borborema (Almeida *et al.*, 1977; 1981),

recobrimo os litótipos pré-cambrianos do Domínio Pernambuco-Alagoas (Silva Filho *et al.*, 2016). Sua porção emersa ocupa uma faixa com cerca de 900 km², com largura variando entre 5 a 12 km e extensão de aproximadamente 80 km, alongada segundo uma direção N40E, paralela à linha de costa. A bacia é limitada a sul pelo Alto de Maragogi e a norte pelo Lineamento Pernambuco, estes limites separam a Bacia Pernambuco das bacias Sergipe-Alagoas e Paraíba, respectivamente (Lima Filho, 1998; Barbosa & Lima Filho, 2006; Lima Filho *et al.*, 2006).

Em termos estruturais, a Bacia de Pernambuco pode ser compartimentada em três domínios estruturais distintos (Maia, 2012; Barbosa *et al.*, 2014; Buarque *et al.*, 2016): 1- Bacia interna, resultado do preenchimento de um rifte estreito paralelo à abertura do Oceano Atlântico. Este domínio apresenta dois depocentros, o *graben* de Piedade e o *graben* do Cupe, separados pelo alto estrutural do Cabo de Santo Agostinho; 2- Alto estrutural Maracatu, que separa a Bacia Interna da porção offshore; e 3- Platô de Pernambuco, que representa as porções mais profundas da Bacia de Pernambuco. Este domínio é interpretado como uma crosta continental hiperextendida durante o processo de rifting da bacia e consequente abertura do Oceano Atlântico (Magalhães *et al.*, 2014).

Lima Filho (1998) propôs que a coluna estratigráfica da bacia seria composta pelos depósitos siliciclásticos Albiano–Aptianos da Formação Cabo afetados pela Suíte Magmática Ipojuca, durante a fase rifte; depósitos carbonáticos Cenomaniano–Turonianos da Formação Estiva e siliciclásticos pós-Turoniano–Paleógeno da Formação Algodoads, durante a fase pós-rifte; recobertos por sedimentos Paleógeno–Neógenos da Formação Barreiras e coberturas Quaternárias.

A formação Estiva é aflorante na porção Sul da Bacia de Pernambuco, ocorrendo apenas em subsuperfície na região próxima ao poço 1-LABIO-PE. Na área Nordeste do Recife, a formação Estiva está situada a profundidades variando entre 50 e 120 m (Riedel, 2016). Estudos palinológicos recentes apontam que a Formação Estiva apresenta fácies palinológicas com características terrígenas na base e tende a um caráter marinho em direção ao topo, e propõem a subdivisão da formação em Estiva I e II (Ramirez, 2017).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Para a realização deste estudo foi utilizado o intervalo entre as profundidades 54.0 a 80.5 metros (Caixas 03, 04 e 05) do testemunho de sondagem do poço 1-LABIO-PE3 (Fig. 3). Foram retiradas 34 amostras para a realização das análises químicas. As amostras foram analisadas em um espectrofotômetro modelo Genesys™ 10S UV-Vis, da marca Thermo Scientific, no Laboratório de Engenharia Ambiental e da Qualidade do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco.



Figura 3- Caixas 03, 04 e 05 do testemunho de sondagem do poço 1-LABIO-PE3, com o folhelho negro em destaque. Caixa com comprimento 1m, testemunho com diâmetro de 45mm.

Metodologia

Para as análises químicas foi utilizada uma adaptação do protocolo de extração sequencial do fósforo, SEDEX (da sigla em inglês para *Sequential Extraction Method*) proposto por Ruttenberg (1992). Neste trabalho, as amostras foram especificadas em P-inorgânico e P-orgânico. Foram extraídas alíquotas de aproximadamente 120 a 200 mg, para as amostras de granulometria areia, e 90 a 140 mg, para amostras de granulometria silte/argila.

As amostras foram diluídas em aproximadamente 40 ml de HCl a 1M (um molar) e agitadas por 16 horas para a extração da fase inorgânica. O material sobrenadante foi retirado com ajuda de filtros (0.45µm/25mm) e seringas. O sedimento decantado foi posto em estufa por 12 horas à 80°C para secagem. O material foi pesado e levado à mufla por 4 horas à 550°C para a queima da matéria orgânica. Em seguida, foi adicionado 10 ml de HCL a 1M e posto em mesa agitadora por 16 horas para a obtenção da fase orgânica. A solução sobrenadante do material foi filtrada e o resíduo final decantado foi descartado.

Foi preparada uma solução reagente composta por 1.2 g de tartarato de antimônio e potássio ($C_8H_4K_2O_{12}Sb_2 \cdot 3H_2O$), 6.75 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), 0.0281 g de heptamolibdato de amônia ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}$) e 0.2112 g de ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) diluídos em 250 ml água ultrapura. Em cubetes de 2 ml, foram misturados 1.2 ml de água ultrapura, 0.4 ml da solução da amostra com a fase orgânica ou inorgânica do fósforo e 0.4 ml da solução reagente. Após aproximadamente 10 minutos de reação, a mistura final adquire uma coloração em tons de azul, proporcionais às concentrações do fósforo contido na amostra.

Os cubetes foram então analisados no espectrofotômetro calibrado para um comprimento de onda de 880 nm. O cálculo de transformação dos valores medidos no espectrofotômetro em concentrações de fósforo ($\mu\text{mol/g}$), foi realizada com base nas densidades médias das litologias de cada amostra e os pesos dos resíduos decantados em cada etapa do processo. Um fluxograma da metodologia utilizada é apresentado na figura 4.

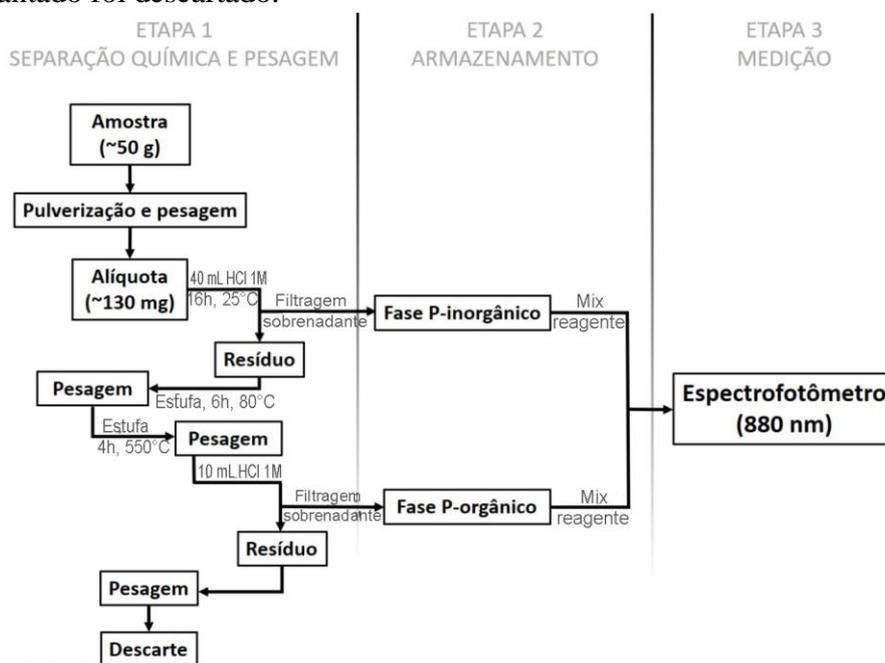


Figura 4- Fluxograma das etapas do processo analítico de extração do fósforo.

RESULTADOS

Litoestratigrafia

Aos 80,50 m é observado um arenito grosso a muito grosso suportado por matriz de silte e areia muito fina, com presença de pequenos cristais de mica branca e material lenhoso carbonizado. Os grãos apresentam granocrescência ascendente e culminam em um siltito aos 79,10 m. Aos 78,5 m, é observado um carbonato muito bem litificado com grãos de quartzo dispersos. A proporção carbonato/grãos de quartzo tende a diminuir sentido ao topo e se inicia a deposição de um arenito com cimentação carbonática e fragmentos lenhosos carbonizados distribuídos em níveis paralelos horizontais.

Aos 77,40 m, é observado um siltito com laminação tipo *flaser/wavy* e granocrescência ascendente até culminar em um nível com 25 cm de conglomerado suportado pela matriz com clastos monominerálicos e litoclastos de até 2 cm. Os clastos são predominantemente de quartzo e feldspato, os litoclastos apresentam uma borda de alteração ferruginosa. Em seguida, aos 76,10 m, está

depositado um arenito muito fino com cimentação carbonática que tende a siltito no topo.

A deposição dos folhelhos negros se inicia aos 75,30 m. O folhelho negro tem uma espessura total de aproximadamente 1,20 m e apresenta laminação bem marcada com presença de pequenos cristais de mica branca e cristais minúsculos de pirita, por vezes limonitizadas. O fim da deposição dos folhelhos negros é gradacional para um siltito a arenito muito fino com presença abundante de material lenhoso carbonizado, aos 74,10 m. Este siltito/arenito muito fino apresenta laminação tipo *flaser/wavy* que tende a laminação plano-paralela horizontal com granocrescência para o topo. A figura 5 apresenta um perfil litoestratigráfico esquemático do material estudado.

Em seguida, é depositado um pacote de arenito quartzoso com baixa litificação com cerca de 2,20 m de espessura. O arenito é composto por grãos de quartzo grossos a muito grossos, angulosos e mal selecionados. É observada presença de manchas ferruginosas. No topo desta camada, aos 70,60 m, foram observados grãos de quartzo rosa.

QUIMIOESTRATIGRAFIA DE FÓSFORO DO TESTEMUNHO...

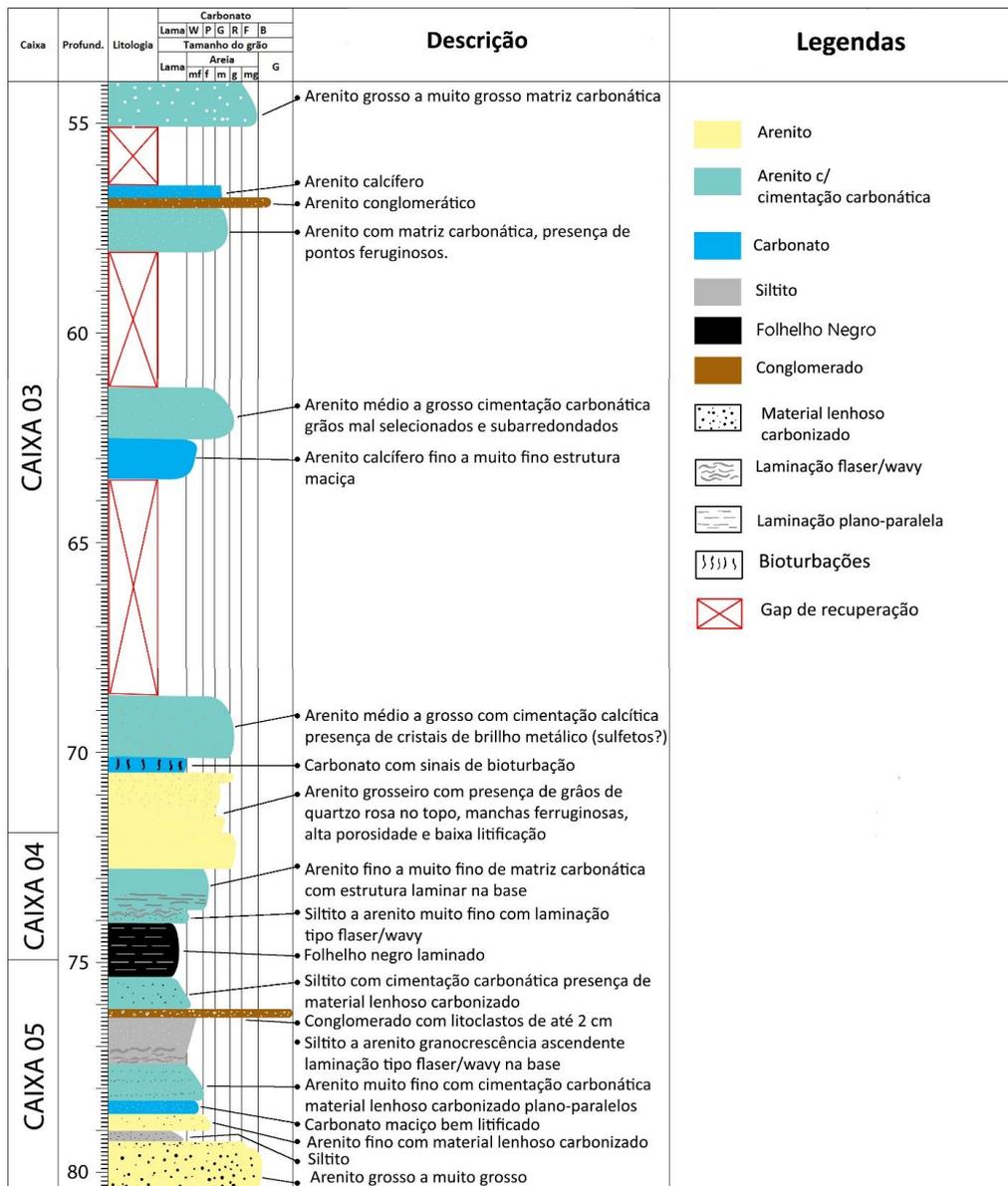


Figura 5- Perfil litoestratigráfico esquemático da seção entre 80,50 e 54,00 m do testemunho de sondagem 1-LABIO-PE3.

Em contato abrupto com o pacote anterior, é observado um carbonato muito fino com sinais de bioturbação. Sobre este material, novamente em contato abrupto, é depositado um arenito médio a grosso de cimentação calcítica muito bem litificado com espessura de aproximadamente 1,5 m. Este arenito apresenta cristais submilimétricos de brilho metálico, provavelmente sulfetos.

Após estas litologias, há um gap de recuperação de aproximadamente 5 m, entre as profundidades de 68,60 e

63,50 m. Em seguida, ocorre um arenito calcífero maciço muito fino e muito bem litificado com aproximadamente 1,0 m de espessura. Sobre esta litologia, observa-se um arenito médio a grosso de cimentação carbonática com grãos de quartzo mal selecionados e subarredondados que se estende até a profundidade de 61,30 m. Nesta parte, ocorre outro gap de recuperação de aproximadamente 2,10 m, até a profundidade de 58,10 m.

Após o gap, é depositado um arenito médio com grãos de quartzo

angulosos, moderadamente selecionados, com pontos ferruginosos e cimentação calcítica, até a profundidade de 57,05 m. Em seguida, é depositado uma camada, com cerca de 25 cm, de arenito conglomeráticos com clastos de quartzo subarredondados, pouca cimentação calcítica e presença de minerais pesados. Acima desta litologia, ocorre um arenito calcífero de granulometria média, com minerais pesados e pontos ferruginosos, até a profundidade de 56,50 m, onde ocorre outro gap de recuperação com cerca de 1,35 m. A seção termina com a deposição de um arenito de cimentação calcítica muito bem litificado com tendência de granodecrescência ascendente.

Quimioestratigrafia do fósforo

As análises por espectrofotometria por absorção e de concentração de fósforo nas 34 amostras estão divididas em fases orgânica (P-Orgânico) e inorgânica (P-Inorgânica) e os resultados são apresentados na Tabela 1. Os resultados apresentaram nível de confiança (95%) da medida analítica de 0.026, 0.099, 20.558 e 0.843 para absorção P-

Inorgânico, absorção P-Orgânico, concentração P-Inorgânico e concentração P-Orgânico, respectivamente.

Os valores de absorção da fase inorgânica apresentam uma amplitude de intervalo de 0.429, variando entre 0.046 e 0.475, nas amostras IC-21 e IC-26, respectivamente. Para a absorção da fase orgânica, os valores variaram entre 0.013 e 0.932, nas amostras IC-06 e IC-31, respectivamente. Estes valores de absorção correspondem, respectivamente, às concentrações de fósforo máximas de mínimas de 30.485 e 333.202, para a fase inorgânica e 0.086 e 8.153, para a fase orgânica (em $\mu\text{mol/g}$).

Na figura 6 estão plotadas as concentrações das fases orgânica e inorgânica do fósforo versus a litoestratigrafia. Também foram adicionados à figura resultados de carbono orgânico total (COT), enxofre (S) e isótopos de carbono orgânico ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) analisados por Araújo (2014). Por causa da grande quantidade de *gaps* de recuperação do testemunho apresentada na caixa 03 (>40%), a análise quimioestratigráfica foi limitada ao intervalo entre 80.5 e 68.60 m

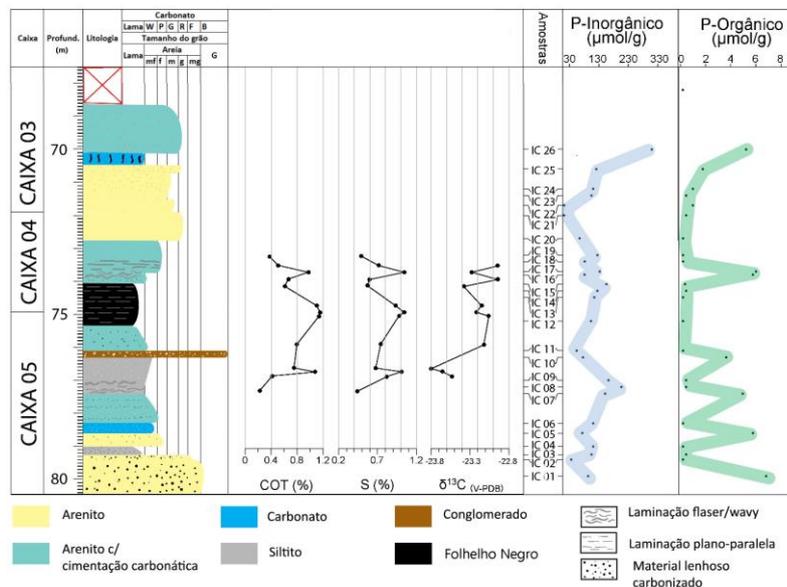


Figura 6: Quimioestratigrafia do fósforo na seção entre 80.5 e 68.60 m do furo 1LABIO-PE3. Dados de COT (%), S (%) e $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (V-PDB) realizados por Araújo (2014).

QUIMIOESTRATIGRAFIA DE FÓSFORO DO TESTEMUNHO...

Tabela 1: Resultados das análises espectrofotométricas ultravioleta-visível (calibrado em 880 nm) para o fósforo e respectivas concentrações.

Profund. (metros)	A mostra	Absorção P-Inorgânico	Absorção P-Orgânico	P-Inorgânico (µmol/g)	P-Orgânico (µmol/g)	Litologia
54.40	IC - 34	0.233	0.097	101.916	1.245	Arenito médio a grosso
54.70	IC - 33	0.115	0.017	48.888	0.101	Arenito muito grosso
56.70	IC - 32	0.118	0.304	76.298	3.170	Arenito calcífero
56.88	IC - 31	0.066	0.932	45.736	8.153	Arenito conglomerático
57.18	IC - 30	0.126	0.411	81.639	3.437	Arenito médio a fino
60.00	IC - 29	0.115	0.367	76.023	3.495	Quartzo-Arenito grosso
63.28	IC - 28	0.148	0.024	94.143	0.257	Quartzo-Arenito médio
63.80	IC - 27	0.114	0.173	76.647	4.033	Arenito calcífero
70.50	IC - 26	0.475	0.769	333.202	5.033	Arenito cimento carbonático
70.64	IC - 25	0.175	0.198	142.686	1.871	Siltito
71.16	IC - 24	0.163	0.192	135.031	1.029	Quartzo-Arenito grosso
71.46	IC - 23	0.214	0.059	129.475	0.446	Quartzo-Arenito médio
71.77	IC - 22	0.056	0.221	36.034	0.976	Quartzo-Arenito médio
72.05	IC - 21	0.046	0.133	30.485	0.546	Quartzo-Arenito grosso
72.75	IC - 20	0.129	0.026	90.673	0.139	Quartzo-Arenito grosso
73.19	IC - 19	0.181	0.021	147.485	0.116	Arenito fino a muito fino
73.40	IC - 18	0.135	0.018	106.848	0.109	Quartzo-Arenito muito fino
73.69	IC - 17	0.183	0.646	157.760	5.865	Siltito
73.77	IC - 16	0.122	0.757	105.217	5.750	Siltito
74.20	IC - 15	0.213	0.049	180.973	0.330	Folhelho negro
74.28	IC - 14	0.176	0.041	149.318	0.282	Folhelho negro
74.54	IC - 13	0.169	0.024	139.517	0.169	Folhelho negro
75.30	IC - 12	0.147	0.029	127.260	0.202	Folhelho negro
76.17	IC - 11	0.095	0.028	81.007	0.262	Arenito fino a médio
76.32	IC - 10	0.115	0.407	98.735	3.654	Arenito muito grosso
77.04	IC - 9	0.218	0.08	185.800	0.545	Siltito
77.28	IC - 8	0.276	0.68	229.997	4.811	Siltito/Arenito
77.42	IC - 7	0.204	0.686	175.097	4.327	Siltito grosso
78.38	IC - 6	0.157	0.013	136.202	0.106	Quarto-Arenito fino
78.68	IC - 5	0.114	0.503	97.443	5.840	Arenito fino a muito fino
79.00	IC - 4	0.16	0.021	132.957	0.088	Arenito fino
79.28	IC - 3	0.148	0.049	128.202	0.323	Arenito siltoso
79.40	IC - 2	0.112	0.023	60.270	0.086	Arenito médio a grosso
79.75	IC - 1	0.211	0.692	116.095	6.639	Arenito muito grosso

Na porção basal, o comportamento do fósforo apresenta um padrão em “zig-zag”, com valores variando aproximadamente entre 60 e 130 µmol/g para a fase inorgânica e 0.08 e 6.6 µmol/g para a fase orgânica, com diminuição da amplitude da variação em direção ao topo, até a profundidade de

76 metros. Na profundidade de 77,10 m, observa-se que há uma diminuição da fase P-inorgânica e um acúmulo da fase P-orgânica. No intervalo entre 76 e 74 metros, onde está depositado o folhelho negro, a concentração do fósforo orgânico se mantém baixa, com valores entre 0.2 a 0.3 µmol/g. Para este, intervalo

a fase inorgânica apresenta um acúmulo contínuo moderado de 81,007 a 180,973 $\mu\text{mol/g}$.

Aproximadamente aos 74,0 m as concentrações do P-orgânico apresenta um *spike* positivo com valor de até 5.865 (amostra IC-17), retornando a valores baixos em direção ao topo. A concentração da fase inorgânica apresenta uma tendência de declínio até valores mínimos de aproximadamente 30 $\mu\text{mol/g}$, aos 72 m. Após a profundidade de 72 m, em direção ao topo, as concentrações das fases orgânicas e inorgânicas apresentam um caráter de acúmulo crescente, terminando em 5.033 e 333.202 $\mu\text{mol/g}$, respectivamente, na amostra IC-26 na profundidade de 70,5 metros.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A litoestratigrafia da seção estudada apresenta características típicas de ambiente transicional da interface terrígeno/marinho. Porções siliciclásticas intercaladas a depósitos carbonáticos sugerem um ambiente marinho raso com frequente aporte terrígeno. Além disso, a presença de fragmentos lenhosos reforça a interpretação de uma proximidade com o continente. A observação de laminações do tipo *flaser/wavy*, é uma forte indicação de ambiente de planície deltaica dominada por maré.

O padrão em “zig-zag” das concentrações das fases orgânica e inorgânica do fósforo, na porção basal da sessão estudada, pode ser interpretado como constantes aportes terrígenos e incremento na introdução deste nutriente para a Bacia. Nesta fase, a oxigenação da água permitiria a fixação do fósforo no sedimento por sorção em minerais antigênicos de oxi-hidróxidos de Fe e Mn.

Durante a fase de inundação máxima as águas atingiram picos de anoxia onde a preservação da matéria orgânica seria favorecida, representada litologi-

camente pela camada de folhelho negro. Em condições anoxicas, o fósforo seria biodisponibilizado e utilizado como nutriente favorecendo a produtividade primária, aumentando a demanda por oxigênio. Após alcançar condições suficientemente anóxicas (reduzidas), a mineralização da fase P-orgânica seria impossibilitada, o fósforo seria liberado como nutriente para as águas tróficas. Este cenário se perpetuaria por toda a deposição do folhelho negro.

Na profundidade de aproximadamente 75 m, o COT apresenta valores máximos da ordem de 1.15%, enquanto o enxofre apresenta valores em torno de 1%. Estes dados estão em concordância com a deposição da camada de folhelhos negros da formação Estiva. Entretanto, os valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ apresentam um comportamento contrário ao esperado, uma vez que a matéria orgânica é enriquecida preferencialmente no isótopo mais leve, que resultaria em valores mais negativos.

A camada de material conglomerático (em meio a material fino a muito fino), provavelmente está relacionada a abalos sísmicos durante reativações tectônicas. Este fato poderia explicar o aumento relativo das concentrações da fase P-inorgânico (apatita ígnea ou metamórfica detrítica).

As análises de fósforo nas amostras do testemunho de sondagem do poço 1-LABIO-PE3 permitiram algumas interpretações paleoambientais de caráter especulativo. Resultados mais conclusivos requerem estudos mais aprofundados. Análises elementar e isotópica de mercúrio, para se observar relações com eventos vulcânicos, bem como de elementos terras-raras, por exemplo, colocariam mais luz sobre esta temática.

Os folhelhos negros da formação Estiva se apresentam como uma ótima camada guia para estudos de correlação intra- e extra bacia, devido ao seu caráter de fácil reconhecimento e distribui-

ção. Além disso, caso esta camada tenha continuidade lateral em porções mais profundas da Bacia Pernambuco, como no Platô de Pernambuco, por exemplo, ela apresentaria um alto potencial de acúmulo e preservação de matéria orgânica, favorecendo a formação de hidrocarbonetos.

Agradecimentos

À ANP–Agência Nacional do Petróleo Gás e Biocombustíveis, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos (PRH-26/ANP/UFPE). Ao Laboratório de Engenharia Ambiental e da Qualidade do Departamento de Engenharia Química pela disponibilidade dos equipamentos para a análise das amostras.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. 1977. O cráton do São Francisco. *Brazilian Journal of Geology*, 7: 349-364.
- Almeida, F. F. M. 1981. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: *Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas marginais*, 1981. v. 1, p.1-10.
- Anderson, J.J. 1996. Calcium, phosphorus and human bone development. *The Journal of nutrition*, 126: 1153S
- Araújo, I. G. 2014. Litoestratigrafia, palinologia, geofísica e geoquímica do furo 1-LABIO-PE3, borda norte da bacia de Pernambuco: Implicações Estratigráficas. *Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Geociências, UFPE*, 74p.
- Barbosa, J. A., Lima Filho, M. F. 2006. Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: observações em dados de poços. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 14: 287-306.
- Barbosa, J. A., Maia, M. F., Lima, M. F., Magalhães, J. R., Correia, O. 2014. Seismic Stratigraphy of the Onshore Portion of Pernambuco Basin: Evidence of Break-Up during Middle Albian for the South Atlantic Rift in Northeast Brazil. In: *AAPG 2014 Annual Convention and Exhibition, Search and Discovery Article #30324* (2014)
- Buarque, B. V., Barbosa, J. A., Magalhães, J. R., Oliveira, J. T. C., Correia Filho, O. 2016 Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 70: 251-267.
- Demaison, G.J., Moore, G.T. 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis. *Organic Geochemistry*, 2: 9-31.
- Dumitrescu, M., Brassel, S. 2006. Compositional and isotopic characteristics of organic matter for the early Aptian Oceanic Anoxic Event at Shatsky Rise, ODP Leg 198. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 235:168-191.
- Froelich, P. N., Bender, M. L., Luedtke, N. A. 1982. The marine phosphorus cycle. *American Journal of Science*, 282: 474-511
- Greenwood, N. N., Earnshaw, A. 1997. *Chemistry of the Elements*, 2ª Edição. Butterworth-Heinemann, Oxford. 473p
- Hesselbo, S.P., Grocke, D.R., Jenkyns, H.C., Bjerrum, C.J., Farrimond, P., Morgans Bell, H.S., Greeb, O.R., 2000. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event. *Nature*, 406, 392-395.
- Jenkyns, H. C. 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11: 1-30.
- Lima Filho, M. F. 1998. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia Per-

- nambuco. Tese de Doutorado. USP. 200p
- Lima Filho, M. F., Barbosa, J. A., Souza, E. M. 2006. Eventos tectônicos e sedimentares nas Bacias de Pernambuco e da Paraíba: Implicações no quebraamento do Gondwana e correlação com a Bacia do Rio Muni. *Geociências*, 25: 117-126.
- Magalhães, J. R., Barbosa, J. A., Oliveira, J.T.C., Lima Filho, M. F. 2014. Characterization of the ocean-continent transition in the Paraíba Basin and Natal platform region, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32: 481-496.
- Maia, M.F.B. 2012. Revisão estratigráfica do intervalo Aptiano-Albiano da Bacia de Pernambuco, Nordeste do Brasil. Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Geociências UFPE, 226 p.
- McElwain, J.C., Wade-Murphy, J., Hesselbo, S.P., 2005. Changes in carbon dioxide during an oceanic anoxic event linked to intrusion into Gondwana coals. *Nature*, 435(26), 479-482.
- Mort, H., 2006. Biogeochemical changes during the Cenomanian-Turonian Oceanic Anoxic Event (OAE 2). Tese de Doutorado. Universidade de Neuchâtel, Suíça.
- Mort, H., Jaquat, O., Adatte, T., Steinmann, P., Föllmi, K., Matera, V., Berner, Z., Stüben, D. 2007. The Cenomanian/Turonian anoxic event at the Bonarelli Level in Italy and Spain: enhanced productivity and/or better preservation? *Cretaceous Research*, 28: 597-612.
- Mort, H., Adatte, T., Keller, G., Föllmi, K. B., Gertsch, B., Steinmann, P., Berner, Z., Stueben, D. 2009. The Role of Productivity and Nutrient Regeneration at the Cenomanian-Turonian Boundary (OAE 2). *Paleoceanography*, 24: n/a
- Nzoussi-Mbassani, P., Disnar, J. R., Laggoun-Défarge, F. 2003. Organic matter characteristics of Cenomanian-Turonian source rocks: Implications for petroleum and gas exploration onshore Senegal. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 411-427.
- Onoue, T., Sato, H., Yamashita, D., Ikehara, M., Yasukawa, K., Fujinaga, K., Kato, Y., Matsuoka, A., 2016. Bolide impact triggered the Late Triassic extinction event in equatorial Panthalassa. *Scientific reports*, 6, p. 29609.
- Pessoa Neto, O. C., Soares, U. M., Silva, J. G. F., Roesner, E. H., Florencio, C. P., Souza, C. A. V. 2007. Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15: 357-369
- Ramirez, J. D. V. 2017. Inferências paleoambientais da Bacia Pernambuco com base em análise de palinofácies do furo Iate 1 LABIO-PE3, Cretáceo transição Albiano-Maastrichtiano. Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Geociências, UFPE, 73p.
- Riedel, P. R. 2017. Mapeamento geológico baseado em dados de campo e de poços da área norte da Bacia Pernambuco e quimioestratigrafia de fósforo do testemunho de sondagem 1-LABIO-PE3 (Furo Iate): Investigação sobre evento de anoxia oceânica. Monografia de dissertação, Departamento de Geologia, UFPE, 64p.
- Ruttenberg, K. C. 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and oceanography*. 37: 1460-1482.
- Schlanger, S. O., Jenkyns, H. C. 1976. Cretaceous oceanic anoxic events:

- causes and consequences. *Geologie en Mijnbouw*, 55: 179-184.
- Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Santos, L., Armstrong, R., Van Schus, W. R. 2016. Geochemistry, U–Pb geochronology, Sm–Nd and O isotopes of ca. 50 Ma long Ediacaran High-K Syn-Collisional Magmatism in the Pernambuco Alagoas Domain, Borborema Province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 68: 134-154.
- Turgeon, S., Creaser, R.A. 2008. Cretaceous oceanic anoxic event 2 triggered by a massive magmatic episode. *Nature*, 454(7202), p 323.
- Wang, C., Hu, X., Huang, Y., Wangreich, M., Scott, R., Hay, W. 2011. Cretaceous oceanic red beds as possible consequence of oceanic anoxic events. *Sedimentary Geology*, 235: 27-37
- Yu, H., Chin, M., Yuan, T., Bian, H., Remer, L. A., Prospero, J. M., Omar, A., Winker, D., Yang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Zhao, C. 2015. The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations. *Geophysical Research Letters*, 42: 1984-1991.