

Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil

Depositional sequences of the Alagoas Stage, Araripe Basin, Northeastern Brazil

Mario Luis Assine | José Alexandre de Jesus Perinotto | Michele Andriolli Custódio | Virgínio Henrique Neumann | Filipe Giovanini Varejão | Patricia Colombo Mescolotti

resumo

A Bacia do Araripe é composta por unidades estratigráficas associadas à fragmentação de Gondwana e abertura do Atlântico Sul. O registro do Andar Alagoas (Aptiano superior – Albiano inferior) é a megassequência pós-rifte da bacia, que litoestratigraficamente corresponde ao Grupo Santana, constituído, da base para o topo, pelas formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo. Duas desconformidades internas permitiram a subdivisão do registro estratigráfico do Andar Alagoas em três sequências deposicionais. A sequência inferior, pertencente à parte inferior da Formação Barbalha, apresenta sucessão vertical de fácies de canais fluviais que se encerram com a deposição de pelitos lacustres, os quais apresentam grande continuidade lateral e espessuras reduzidas de no máximo 10m. A sequência intermediária inicia com níveis delgados de conglomerado, sobrepostos por arenitos com intercalações de pelitos, pertencentes à porção superior da Formação Barbalha. Estas fácies, organizadas em ciclos fluviais, dão lugar a folhelhos cinza escuros/esverdeados e a calcários laminados de origem lacustre da Formação Crato, numa sucessão vertical de fácies atribuída a trato de sistemas transgressivo. A sucessão mista da Formação Crato, caracterizada

pela alternância de bancos de calcários laminados e de fácies siliciclásticas, correspondente a trato de sistemas de nível alto, que termina com a deposição dos evaporitos (gipsita/anidrita) da Formação Ipubi em condições de extrema aridez. A sequência superior, que corresponde litoestratigraficamente à Formação Romualdo, é constituída por arenitos costeiros em sua porção inferior, podendo estar presentes, nas porções proximais da bacia, delgadas camadas de conglomerado e arenito conglomerático sobre a desconformidade basal. O empilhamento é de caráter transgressivo, com onlap costeiro de sudeste para noroeste e deposição de fácies marinhas diretamente sobre o embasamento a oeste e noroeste. Camadas delgadas de coquina e calcário coquinoide recobrem a seção de folhelhos marinhos, onde se encontram níveis com concreções fossilíferas. Arenitos regressivos depositados em sistemas costeiros com influência de marés completam a sequência, constituindo trato de nível de mar alto e registrando o retorno das condições continentais à bacia. O topo do Andar Alagoas na bacia é uma discordância erosiva regional, sobre a qual jazem fácies fluviais mesocretáceas do Grupo Araripe (formações Araripina e Exu).

Palavras-chave: Andar Alagoas | Aptiano | Bacia do Araripe | Grupo Santana

abstract

The Araripe Basin is composed of stratigraphic units associated to the Gondwana break-up and the South Atlantic Ocean opening. The record of the Alagoas Stage (late Aptian to very early Albian) is materialized by the post-rift megasequence of the basin, which corresponds to the Santana Group comprising, from base to top, the Barbalha, Crato, Ipubi and Romualdo formations. Two internal unconformities allow us to subdivide the Alagoas Stage into three depositional sequences. The lower sequence comprises the Barbalha Formation and includes a vertical facies succession of fluvial channels that culminate with lacustrine shales with great lateral extension and up to 10m thick. The middle sequence begins with thin conglomerate beds, followed by sandstones interbedded with fine-grained rocks, belonging to the upper portion of the Barbalha Formation. These facies are organized in fluvial cycles and replaced by lacustrine dark/greenish gray shales and laminated limestones from the Crato Formation, arranged in a vertical facies succession of transgressive systems tract. The mixed Crato succession is composed of laminated limestone beds and siliciclastic facies typical of highstand system tract and ends up with deposition of evaporites (gypsum/anhydrite) of the Ipubi Formation under extreme aridity conditions. The upper sequence, which corresponds to the Romualdo Formation, is characterized by coastal sandstones in its lower portion, that interfinger with thin conglomerate and gravelly sandstone beds towards the basin margin. The stacking pattern is transgressive, with coastal onlap from southeast to northwest. Marine facies occur directly over the basement rocks at the west and northwest basin margins, where thin shell beds and bioclastic limestones overly fossiliferous marine shales. Regressive sandstones deposited in tidally influenced highstand coastal systems complete the sequence and record the return to continental environments. The top of the Alagoas Stage is a regional unconformity between the Santana Group and the overlying mid-Cretaceous fluvial facies of the Araripe Group (Araripina and Exu formations).

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: Alagoas Stage | Aptian | Araripe Basin | Santana Group

introdução

A Bacia do Araripe é a mais extensa dentre as bacias interiores do Nordeste do Brasil. Está implantada em terrenos pré-cambrianos situados a sul da Zona de Cisalhamento de Patos. Seu arcabouço estratigráfico é constituído por megassequências geradas em regimes tectônicos distintos, o que a configura como bacia de evolução poligenética (Assine, 1990, 1992, 2007; Ponte e Appi, 1990; Ponte e Ponte Filho, 1996). As diferentes sequências foram formadas em cenários paleogeográficos diferentes, integrando o contexto da evolução geológica regional das bacias do Nordeste do Brasil (Assine, 1994).

As unidades estratigráficas das megassequências pré-rifte e rifte (Assine, 2007) afloram somente na porção leste da bacia, numa área topograficamente deprimida conhecida como Vale do Cariri, onde os estratos se encontram movimentados por falhas associadas aos horstes e grabens da Sub-bacia do Cariri (fig. 1). As unidades das megassequências pós-rifte I e pós-rifte II (Assine, 2007) afloram nas escarpas e sopé da Chapada do Araripe. A Chapada se destaca no relevo do interior da região Nordeste do Brasil por ser feição geomorfológica elevada, limitada por escarpas de erosão íngremes, de topo plano e com mergulho suave para oeste (Morales e Assine, 2015).

A megassequência pós-rifte I, cronoestratigraficamente pertencente ao Andar Alagoas (Aptiano superior / Albiano inferior), é composta, da base para o topo, pelas formações Barbalha e Santana. A Formação Barbalha é formada essencialmente por arenitos, mas engloba também importante intervalo pelítico que recebeu a denominação “Camadas Batateira” (Hashimoto *et al.*, 1987). Por possuir grande extensão lateral e espessura reduzida, as Camadas Batateira constituem importante marco estratigráfico pertencente à biozona P-270.

A Formação Santana foi proposta por Beurlen (1962), que posteriormente a subdividiu, da base para o topo, nos membros Crato, Ipubi e Romualdo (Beurlen, 1971). A denominação Formação Santana, bem como sua subdivisão tripartite, foi adotada com variações na maioria dos trabalhos publicados posteriormente (e.g. Mabesoone e Tinoco, 1973; Ponte e Appi, 1990; Assine, 1992; Fara *et al.*, 2005; Kellner, 2002; Arai, 2006; Assine, 2007; Scherer *et al.*, 2015). Registra-se que alguns autores (e.g. Maissey, 2000; Martill, 2007) restringiram a designação Formação Santana para o intervalo correspondente ao Membro Romualdo.

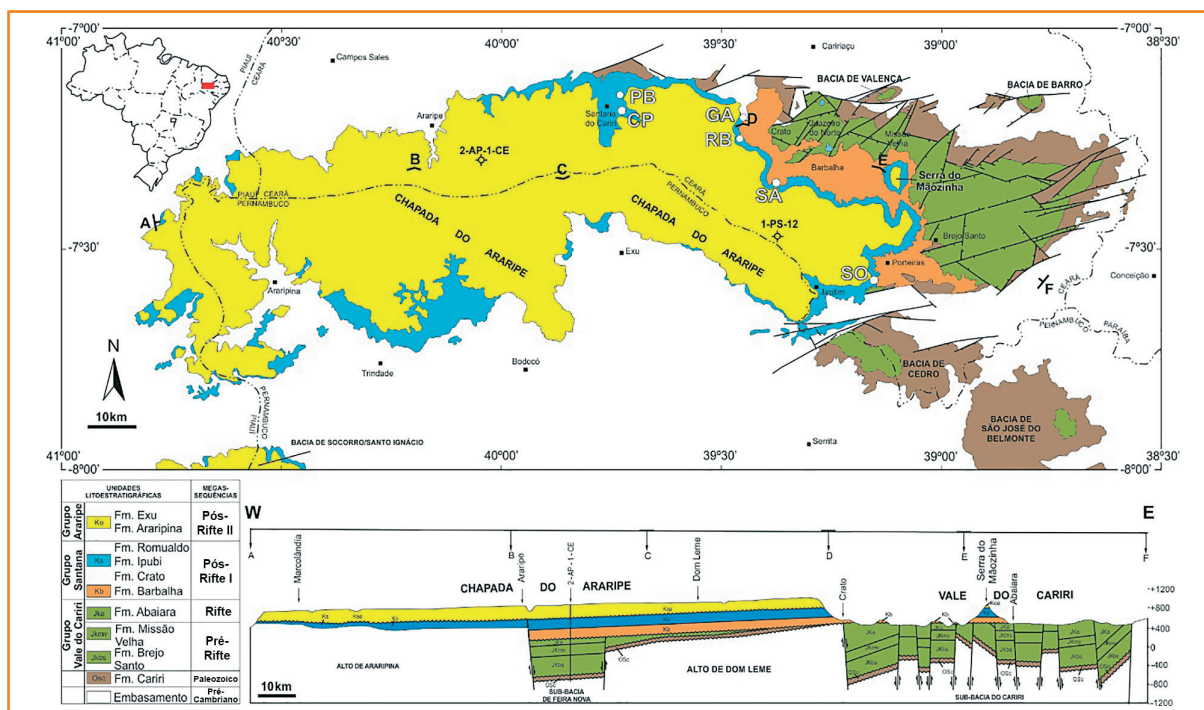


Figura 1
Mapa geológico (modificado por Assine, 2007), com indicação das seções colunares apresentadas neste trabalho: CP = Conceição Preta; GA = Guaribas; PB = Pedra Branca; RB = Rio da Batateira; SA = Salamanca; SO = Sobradinho.

Figure 1
Geological map (modified from Assine 2007), showing the location of the columnar sections presented in this work: CP = Conceição Preta; GA = Guaribas; PB = Pedra Branca; RB = Rio da Batateira; SA = Salamanca; SO = Sobradinho.

Numa outra vertente, Neumann (1999) e Neumann e Cabrera (1999) propuseram a elevação da hierarquia estratigráfica dos membros propostos por Beurlen (1971), incluindo-os no que denominaram Grupo Santana. A elevação de hierarquia para Grupo Santana foi adotada neste trabalho de forma ampliada, ou seja, para designar todo o registro estratigráfico da megassequência pos-rifte I de Assine (2007). Nesta concepção, o Grupo Santana é constituído, da base para o topo, pelas formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo.

Este trabalho apresenta resultados da análise estratigráfica do Andar Alagoas na Bacia do Araripe, realizada com base no levantamento de seções-colunares em exposições existentes no sopé das escarpas que contornam a Chapada do Araripe na Sub-bacia do Cariri. O Andar Alagoas, analisado sob a ótica da estratigrafia de seqüências, é aqui definido como uma megassequência pós-rifte, constituída por três seqüências deposicionais. Estas são caracterizadas por superfícies-chave, tais como discontinuidades no registro e superfícies de inundação máxima, bem como por padrões de empilhamento sedimentar definidores de tratos de sistemas deposicionais.

Andar Alagoas

O contato basal do Andar Alagoas é uma discordância angular na porção leste da bacia, evidente

em seções sísmicas (fig. 2). Tal discordância não foi constatada em superfície por estar encoberta por depósitos cenozoicos associados à regressão das escarpas da Chapada do Araripe. Na porção ocidental da bacia, os estratos do Andar Alagoas repousam em discordância litológica diretamente sobre o embasamento cristalino pré-cambriano, evidente na seção geológica EW apresentada na figura 1. A discordância presente no topo do Andar Alagoas constitui o contato entre os grupos Santana e Araripe (fig. 2).

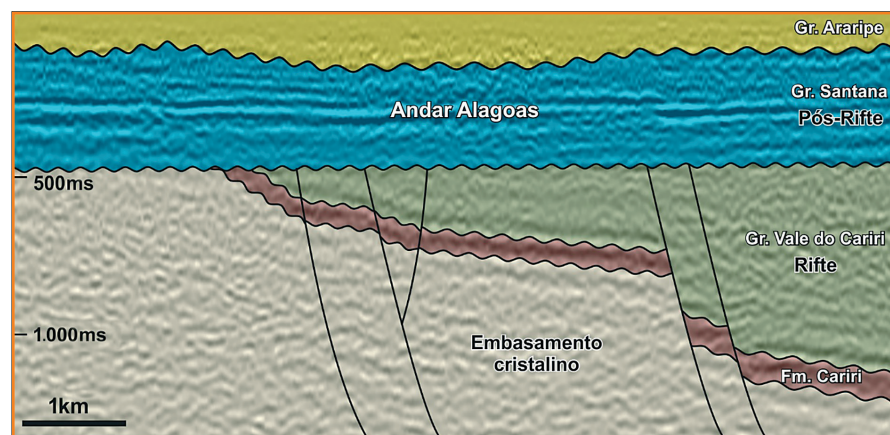


Figura 2 – O Andar Alagoas (Grupo Araripe) da Bacia do Araripe, correspondente à seqüência pós-rifte I de Assine (2007), é limitado no topo e na base por discordâncias. A discordância inferior é do tipo angular e a superior uma desconformidade regional (seção sísmica 141-RL-003, com escala vertical em milissegundos (ms); localização na fig. 1).

Figure 2 - The Alagoas Stage (Araripe Group) in the Araripe Basin corresponds to the post-rift sequence I from Assine (2007). The lower boundary is an angular unconformity and the upper boundary is a regional unconformity, (seismic section 141-RL-003; vertical scale in milliseconds (ms); location on fig. 1).

Duas desconformidades importantes foram identificadas na bacia dentro da sucessão estratigráfica do Andar Alagoas. Uma desconformidade foi identificada no topo das Camadas Batateira, cujos folhelhos cinza escuros a pretos são sobrepostos em contato erosivo por ortoconglomerados polimíticos, com seixos de rochas cristalinas (granito, gnaiss e quartzito; fig. 3). Outra desconformidade

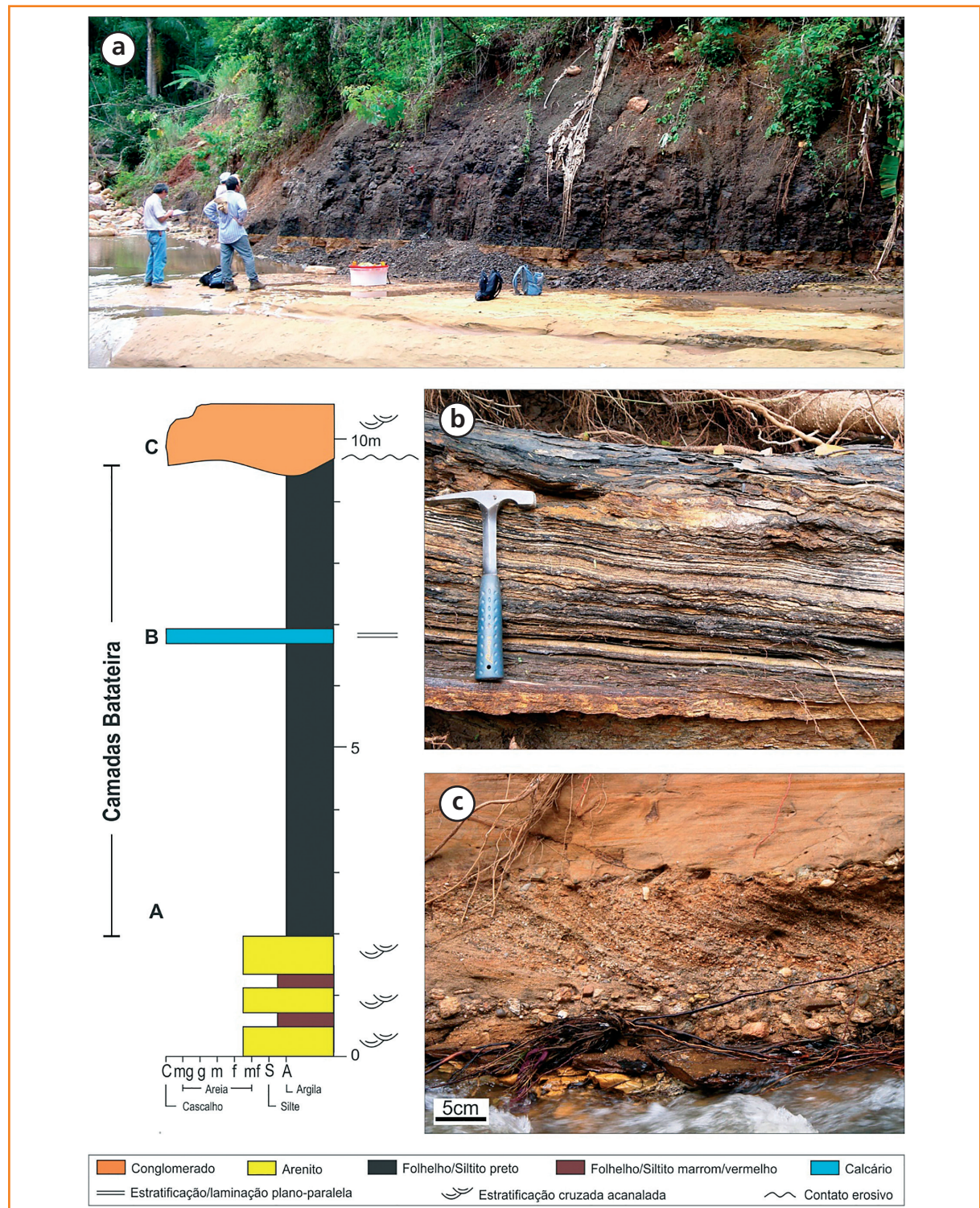
foi identificada no topo da Formação Ipubi, definida pelo contato irregular e erosivo de arenitos e conglomerados da porção inferior da Formação Romualdo por sobre camadas de gipsita e de folhelhos pretos a cinza-escuros da Formação Ipubi (fig. 4). Estas duas desconformidades internas permitiram subdividir o Andar Alagoas em três seqüências deposicionais (fig. 5).

Figura 3

Camadas Batateira na seção do Rio da Batateira (RB). (a) Contato dos folhelhos das Camadas Batateira com os arenitos fluviais subjacentes (leito do rio); (b) Folhelhos ricos em matéria orgânica com lâminas de calcário; (c) Conglomerado basal e arenitos com estratificação cruzada sobrepondo a desconformidade no topo dos folhelhos (topo da seqüência SD-1).

Figure 3

Batateira layers in the Rio de Batateira (RB) section. (a) Contact between dark shales from the Batateira layers and the underlying fluvial sandstones of the Barbalha Formation (river bed); (b) Organic-rich dark shales interbedded with thin limestone laminae; (c) Basal conglomerate and cross-bedded sandstones overlying shales from the depositional sequence 1 (SD-1).



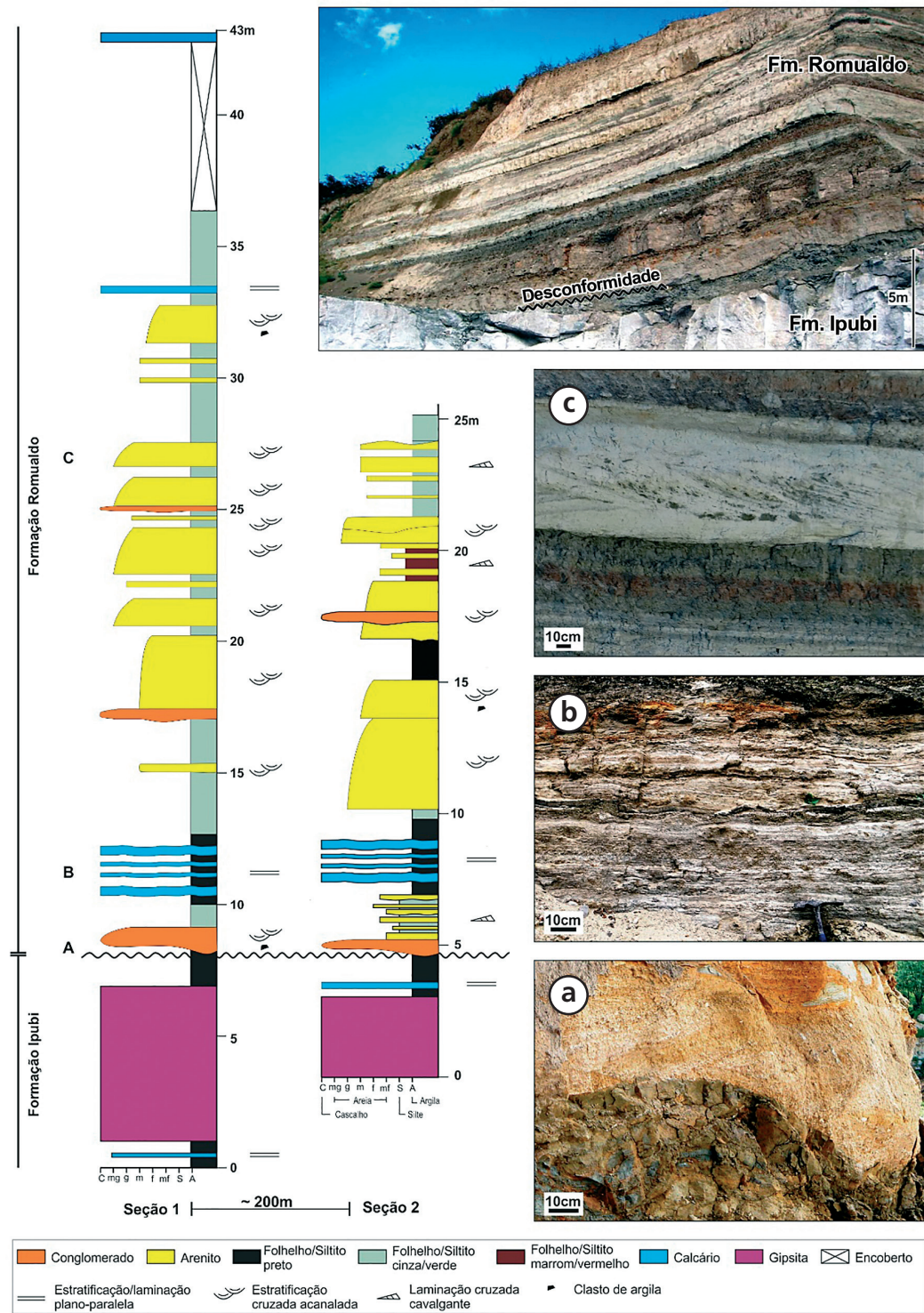


Figura 4 - Contato erosivo entre as formações Ipubi e Romualdo, correspondente à desconformidade entre as seqüências SD-2 e SD-3, na mina Pedra Branca em Nova Olinda – CE (localização das figuras a, b e c na seção colunar 1). (a) Arenitos conglomeráticos sobre a desconformidade que limita as duas seqüências; (b) Folhelhos com intercalações de lâminas carbonáticas, ricas em ostracodes, presentes na porção inferior da seqüência SD-3; (c) Clastos de argila na base de estratos cruzados e filmes de argila nos foresets, comuns nos arenitos finos, são indicativos da atuação de correntes de maré.

Figure 4 - Erosive contact between the Ipubi and Romualdo formations in the Pedra Branca mine in Nova Olinda – CE. This limit is marked by a disconformity between the sequences SD-2 and SD-3, (location of figures a, b and c in the columnar section 1). (a) Conglomeratic sandstones on the disconformity; (b) Shales interbedded with limestone laminae in the lower portion of the sequence SD-3; (c) Cross-bedded fine sandstones with mud clasts and drapes in its foresets suggesting the action of tidal currents.

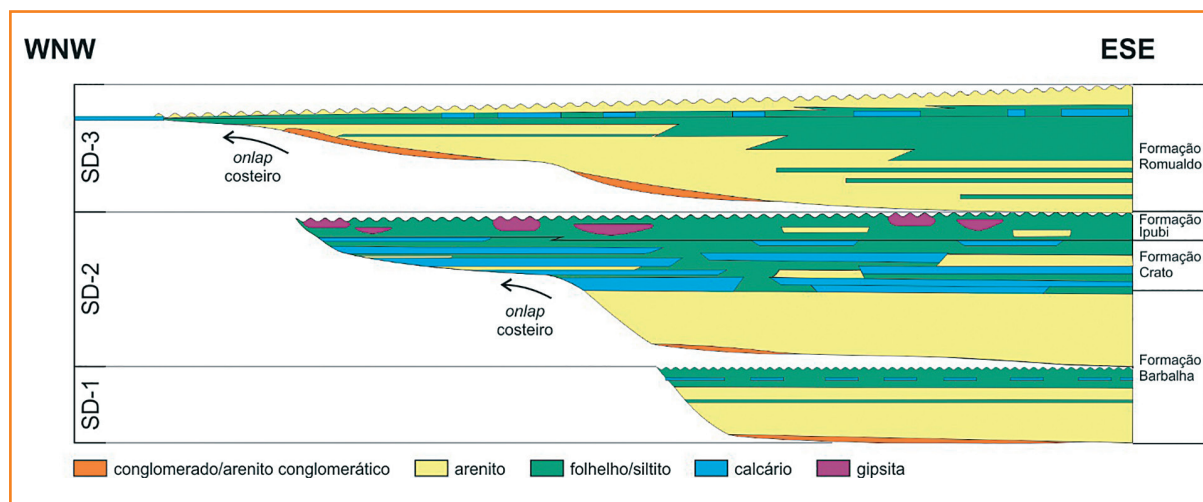


Figura 5 - Arcabouço estratigráfico do Andar Alagoas na Bacia do Araripe representado por três sequências deposicionais limitadas por desconformidades, com onlap costeiro de ESE para WNW (SD-1 = sequência deposicional 1; SD-2 = sequência deposicional 2; SD-3 = sequência deposicional 3).

Figure 5 - Stratigraphic framework of the Alagoas Stage in the Araripe Basin composed of three depositional sequences bounded by disconformities. The coastal onlap is from ESE to WNW (SD-1 = depositional sequence 1; SD-2 = depositional sequence 2; SD-3 = depositional sequence 3).

sequência deposicional 1

A sequência deposicional 1 (SD-1) corresponde à metade inferior da Formação Barbalha. A unidade aflora apenas na Sub-bacia do Cariri, estando bem exposta nas seções levantadas nos rios da Batateira, Guaribas e Salamanca (fig. 6). A sequência é essencialmente siliciclástica, com predomínio de fácies de arenitos finos a muito grossos, muitas vezes apresentando grânulos e seixos polimíticos, em sets de dimensões variadas (decímetros a alguns metros), com estratificação cruzada planar ou acanalada, localmente plano-paralela (fig. 7). Na parte inferior ocorrem níveis descontínuos de arenito conglomerático. Os arenitos se tornam mais finos para cima, apresentando níveis com clastos de argila, centimétricos a decimétricos, tanto na base dos estratos como nos foresets das estratificações cruzadas. Também ocorrem níveis delgados de pelito intercalados aos arenitos. Arranjos verticais de fácies com afinamento textural para o topo compõem ciclos produzidos pela migração de canais fluviais (Chagas *et al.*, 2007; Scherer *et al.*, 2015).

Os folhelhos das Camadas Batateira, presentes na parte superior da sequência, apresentam continuidade lateral de dezenas de quilômetros e espessura que raramente ultrapassa 10m (fig. 3). Os folhelhos são cinza-escuros a pretos, calcíferos, sendo comum a presença de ostracodes,

conchostráceos, restos de peixes e fragmentos vegetais carbonificados. A matéria orgânica é do tipo I e o conteúdo de carbono orgânico total atinge valores de 28,5% nos intervalos mais ricos (Spigolon *et al.*, 2015). Notável é a presença de um nível carbonático, com menos de um metro de espessura, constituído por alternância de lâminas calcárias e organo-argilosas, ricas em ostracodes (Dias-Brito *et al.*, 2015b). A camada carbonática apresenta feições brechoides e é enriquecida em sulfetos (Farina, 1974), tendo sido objeto de pesquisa mineral na década de 1970, quando foram perfurados os poços do Projeto Santana (Scheid, 1978).

A associação vertical de fácies é típica de trato de sistemas transgressivo, materializado por fácies de canais fluviais, que gradativamente perdem energia, e são recobertos por fácies pelíticas lacustres. Os folhelhos das Camadas Batateira constituem importante marco estratigráfico na bacia (Assine, 2007), e representam a implantação de um lago pautado por flutuações do nível d'água, com eventos de anoxia registrados nos intervalos de folhelhos pretos.

Além de sua ocorrência na Sub-bacia do Cariri, essa sequência se encontra presente também na Sub-bacia de Feira Nova, constatada no registro do poço 2-AP-1-CE (fig. 1). O fato de que a ocorrência está praticamente restrita às sub-bacias é sugestivo de reativação tectônica de falhas da fase rifte na conformação dos sítios deposicionais.

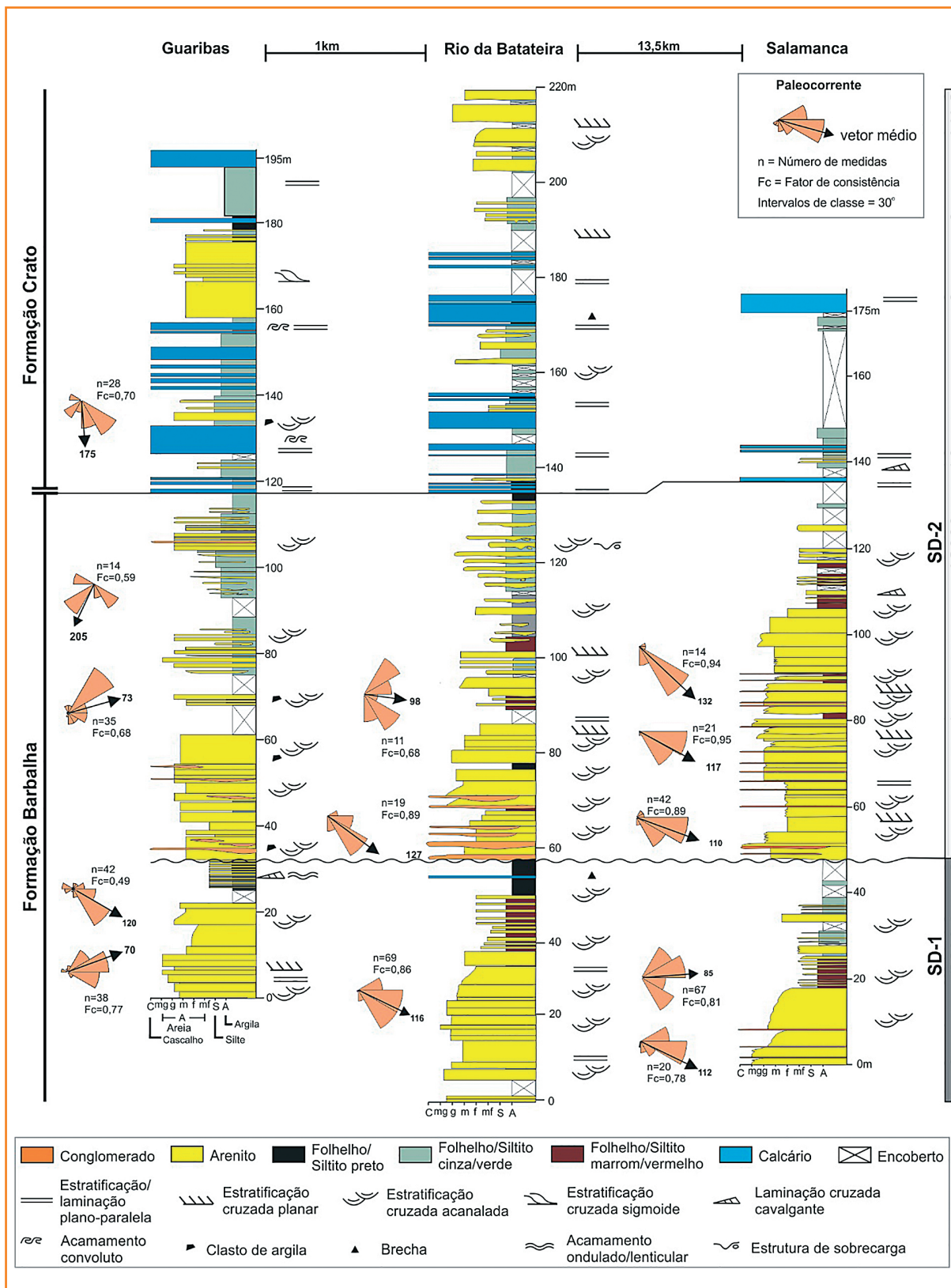


Figura 6 - Correlação estratigráfica das seções-colunas levantadas nos rios Guaribas, da Batateira e Salamanca (localização das seções na figura 1).

Figure 6 - Stratigraphic correlation of the columnar sections measured in the Rivers Guaribas, da Batateira and Salamanca (see figure 1 for the location of the columnar sections).

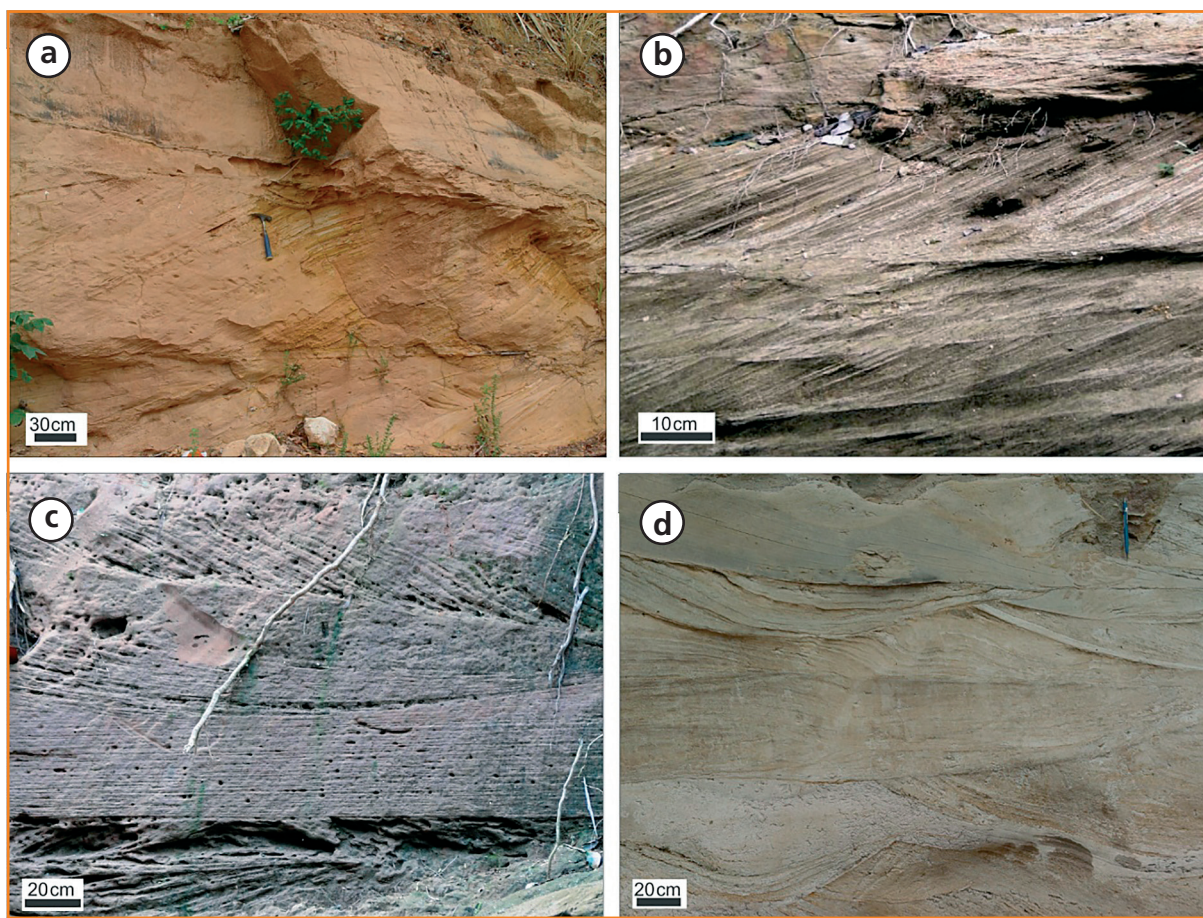


Figura 7 - Fácies de arenitos da sequência SD-1 formam sets decimétricos a métricos, com estratificações cruzadas planares (a e b) e acanaladas (c e d).

Figure 7 - Planar (a and b) and trough (c and d) cross-bedded sandstone facies of the sequence SD-1.

sequência deposicional 2

A base da sequência deposicional 2 (SD-2) é marcada pela presença de delgadas e descontínuas camadas de conglomerado, que lateralmente passam para arenitos grossos, em contato erosivo sobre os folhelhos das Camadas Batateira (figs. 3 e 6). Os conglomerados são maciços, clasto-suportados, com clastos de variadas dimensões (seixos e calhaus) e polimíticos (granito, gnaixe, quartzito, quartzo de veio e filito). Os arenitos são finos a muito grossos, organizados em sets decimétricos a métricos, com estratificações cruzadas acanaladas e planares, organizados em ciclos de afinamento para o topo, onde é possível reconhecer formas de acreção lateral produzidas pela migração de barras fluviais (Chagas *et al.*, 2007; Assine, 2007; Scherer *et al.*, 2015).

A porcentagem de conglomerados e de arenitos grossos decresce para o topo. Os arenitos

se tornam progressivamente mais finos e apresentam intercalações de folhelhos de cores variadas, localmente calcíferos e ricos em ostracodes. Os arenitos apresentam formas lenticulares e/ou sigmoides, sendo comum a presença de arenitos finos com estratificação cruzada cavalgante e de níveis com concentração de clastos de argila, além de filmes de argila nos foresets. Feições de sobrecarga são comuns, com arenitos deformados e estruturas em chama, bolas e almofadas (fig. 8). A associação de fácies é interpretada como de barras de desembocadura em sistemas deltáicos, que progravam em direção a lagos rasos, provavelmente com nível d'água oscilante, o que é evidenciado pela presença de estruturas de ressecamento preservadas nos pelitos. As camadas de arenitos tornam-se progressivamente mais delgadas para o topo, dando lugar a folhelhos cinza-escuros a esverdeados.

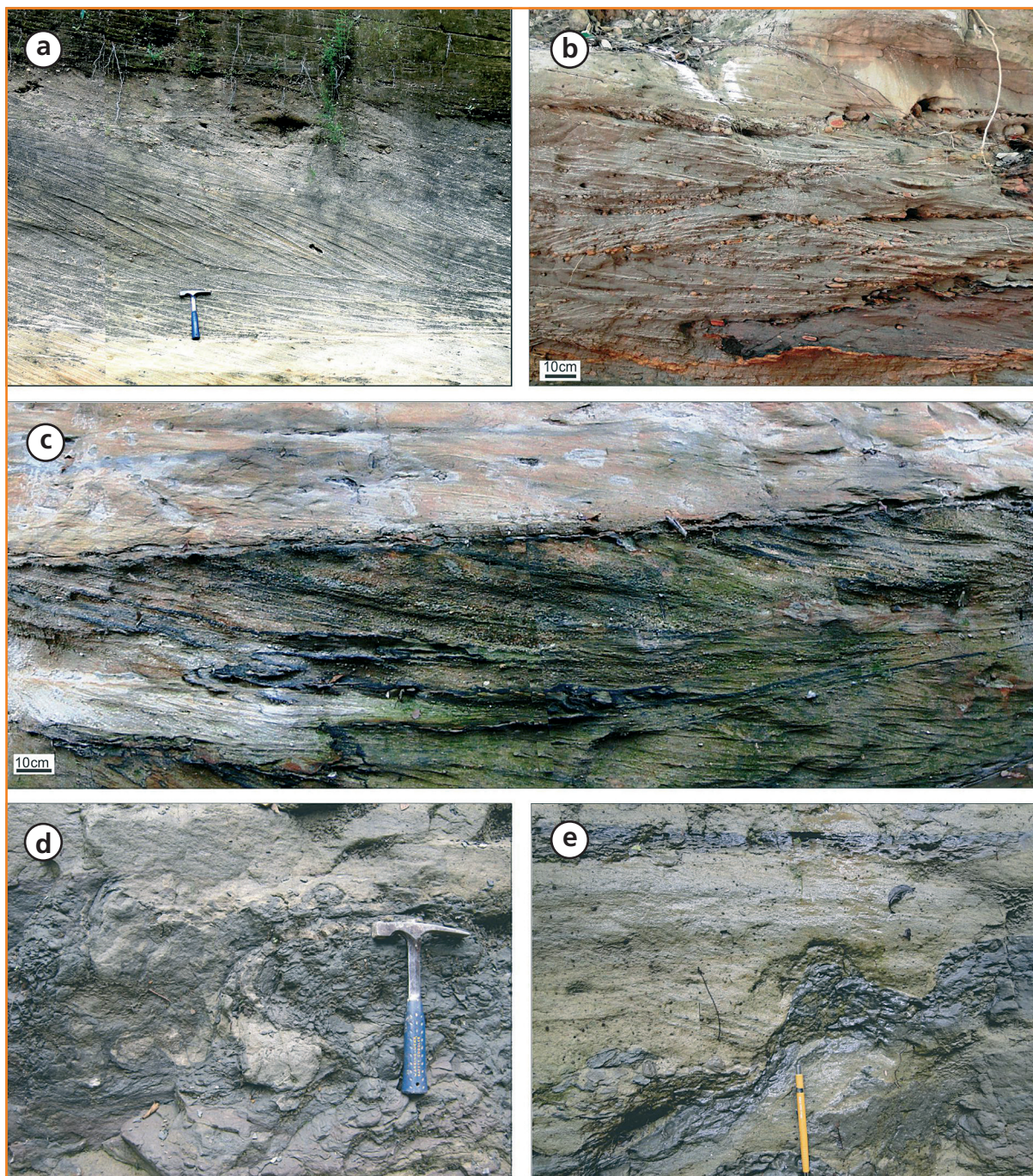


Figura 8

Fácies de arenitos finos a médios, com intercalações de fácies pelíticas, são comuns na sequência SD-2. (a) Arenitos com estratificação cruzada sigmoide em sets decimétricos; (b) Arenitos com clastos de argila concentrados na base dos sets e na parte inferior dos foresets; (c) Arenitos com estratificação cruzada e lâminas de folhelho cinza escuro nos foresets; (d) Arenitos deformados com estruturas em chama, bolas e almofadas; (e) Estruturas de sobrecarga formando diápiros de argila na base de arenitos sigmoides.

Figure 8

Fine- to medium grained sandstones are common facies in the depositional sequence SD-2. (a) Sigmoidal cross-bedded sandstones; (b) Mud clasts deposited over the foresets and bottomsets; (c) Cross-bedded sandstones with mud drapes in foresets; (d and e) Load structures at the base of sigmoidal sandstones.

A deposição de calcários laminados consolida a implantação de sistemas lacustres na bacia. A base da primeira camada de calcário é definida como contato entre as formações Barbalha e Crato. Segundo Neumann (1999), os calcários laminados formam bancos métricos e são essencialmente lacustres, com rico conteúdo fóssilífero (Mabesoone e Tinoco, 1973). Os calcários são recorrentes na vertical e ocorrem intercalados com seções igualmente espessas de folhelhos verdes e arenitos finos

a grossos (fig. 9), formando seção sedimentar de até 70m de espessura.

Os calcários laminados, ricos em fósseis continentais (Martill *et al.*, 2007a), atestam a ampliação do sítio deposicional para além dos limites das áreas das sub-bacias rifte, sendo constatada deposição direta sobre o embasamento cristalino. A alternância de bancos de calcários laminados e de intervalos dominados por fácies siliciclásticas registra eventos de expansão e retração dos sistemas lacustres.

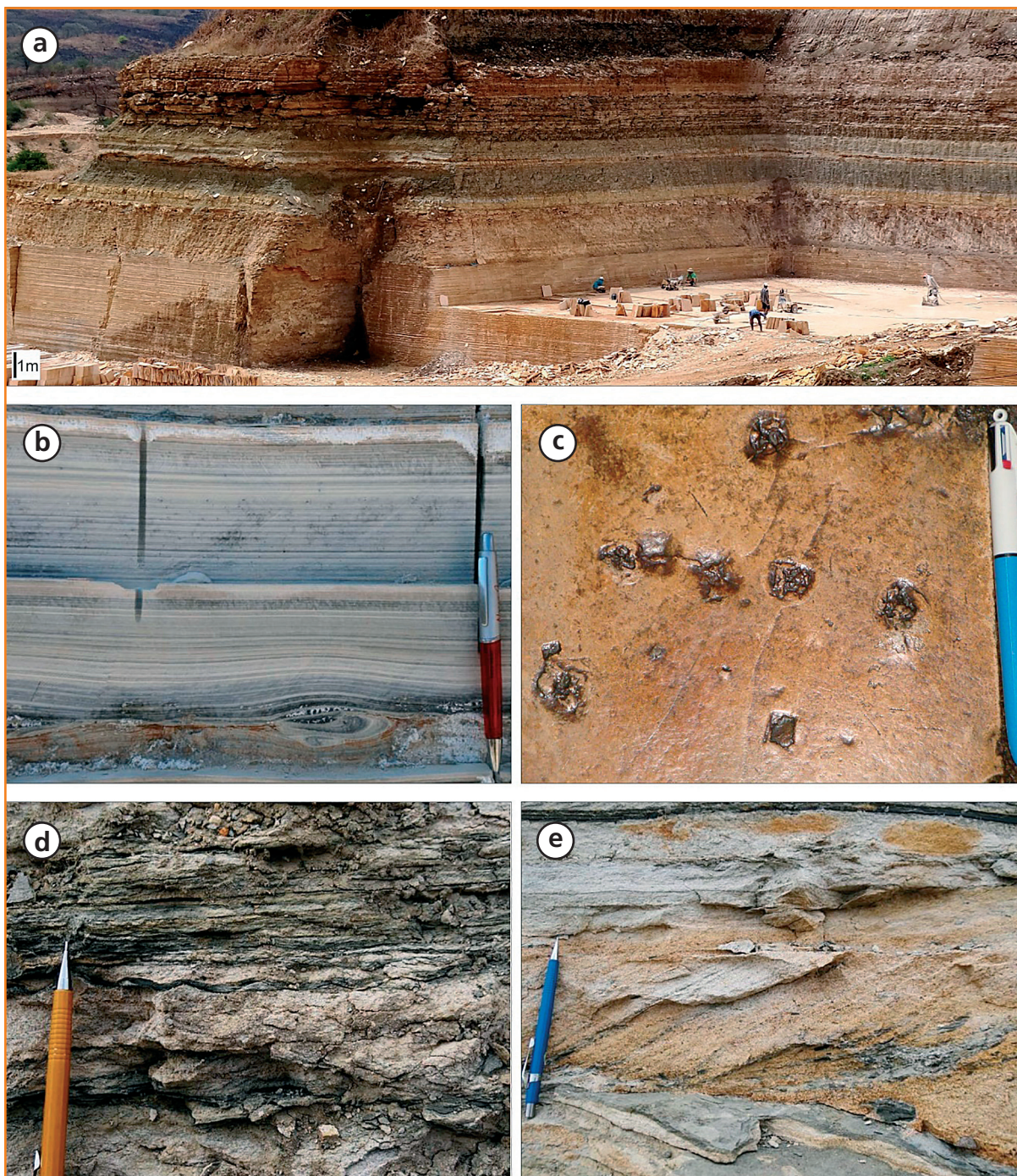


Figura 9 - Seção carbonático-siliciclástica da parte superior da sequência SD-2, litoestratigraficamente pertencente à Formação Crato. (a) Vista geral de frente de lavra em Nova Olinda - CE, exibindo calcários laminados na parte inferior e sucessão de arenitos com folhelhos interestratificados na parte superior; (b) Calcários finamente laminados micríticos, com marcada ritmicidade em alguns intervalos; (c) Pseudomorfos (hoppers) de halita estão presentes em alguns níveis indicando condições de aridez; (d) Arenitos com clastos e lâminas de argila nos foresets, recobertos por fácies heterolíticas com acamamento ondulado e lenticular; (e) Camadas de arenitos médios a grossos ocasionalmente presentes nos intervalos siliciclásticos.

Figure 9 - Mixed carbonate-siliciclastic succession from the sequence SD-2 (Crato Formation). (a) Overview of the Nova Olinda quarry - CE evidencing the lower laminated limestone bank covered by sandstones and shales; (b) Rhythmic laminated limestones; (c) Halite hoppers are present locally in limestone beds; (d) Sandstones and heterolithic facies with wavy and lenticular bedding; (e) Medium- to coarse-grained sandstones are occasionally present in the siliciclastic intervals.

A existência de pseudomorfos de halita nos calcários laminados evidencia que a bacia experimentou condições de crescente aridez (Martill *et al.*, 2007b; Heimhofer *et al.*, 2010). Calcários brechados no topo de vários bancos carbonáticos, bem como a presença de caliche na parte superior dos bancos calcários da Formação Crato (Silva, 1986), indicam eventos de queda do nível dos lagos, com exposição subaérea de áreas marginais.

Toda a sucessão vertical descrita, desde os conglomerados e arenitos da Formação Barbalha até a seção carbonático-siliciclástica da Formação Crato, é interpretada como associação de fácies de trato de sistemas transgressivo. O posicionamento da superfície de inundação máxima não pôde ser feito com base nos dados levantados em campo.

Corpos descontínuos de gipsita, com espessura variável (5-15m) e associados a folhelhos verdes e/ou pretos (pirobetuminosos), ocorrem sobre a seção mista carbonático-siliciclástica da Formação Crato. As camadas de gipsita podem apresentar laminação, por vezes com dobras internas e feições dômicas. Gipsita secundária é representada pelas variedades alabastro, porfiroblástica (rosetas de selenita) e nodular. Variedades fibrosas constituem a última geração, sendo produto de recristalização a partir de soluções ricas em sulfato de cálcio mobilizadas nos processos de diagênese. Além das formas primárias e secundárias de gipsita, também ocorre anidrita laminada e nodular (Silva, 1983; 1988). Folhelhos pretos associados aos evaporitos são muito ricos em matéria orgânica e também muito fossilíferos, sendo portadores de ostracodes, peixes e troncos de madeira carbonificada.

Mais de uma camada evaporítica pode ocorrer, como na mina Conceição Preta (município de Santana do Cariri – CE; fig. 10) e em minas existentes na porção oeste da bacia (municípios de Ipubi e Araripina – PE), nas quais duas camadas métricas de gipsita/anidrita ocorrem separadas por seção em que dominam folhelhos verdes, ocasionalmente com a presença de delgadas camadas de calcário e arenito fino.

Os evaporitos e as fácies associadas compõem seção sedimentar de até 30m de espessura, litoestratigraficamente denominada Formação Ipubi. Em grande parte da bacia, os evaporitos nem sempre estão presentes. Na porção oeste da bacia, a unidade apresenta-se bem desenvolvida, especialmente nos municípios pernambucanos de Ipubi, Trindade e Araripina, onde é contínua e mapeável na escala 1:25.000.

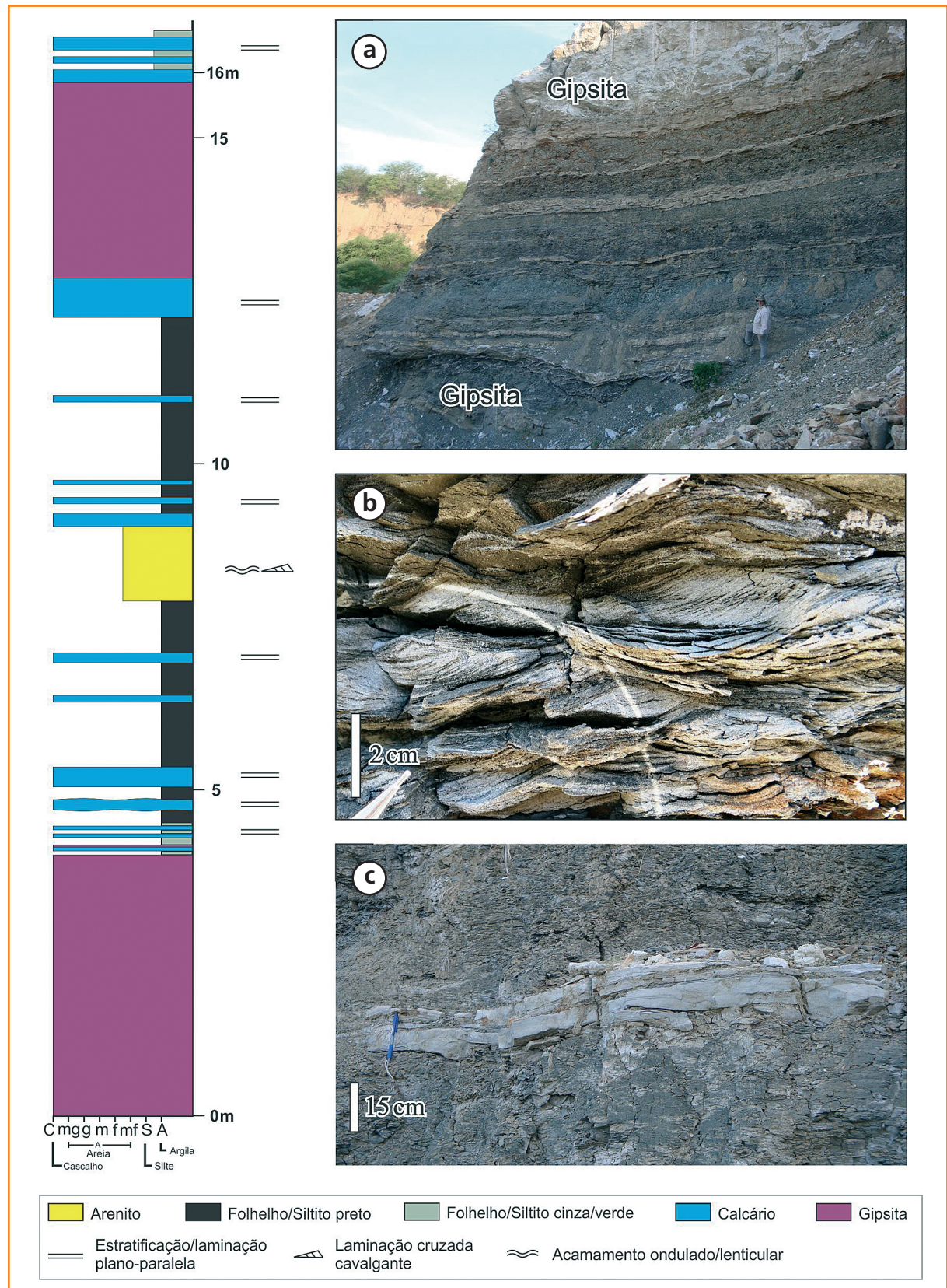
A seção evaporítica presente na parte superior no final da SD-2 registra aumento das condições de aridez, sendo interpretada como trato de sistemas de nível alto. Mesmo considerando dados geoquímicos que indicam ambientes não marinhos (Silva 1983), a associação de fácies sedimentares e a geometria dos corpos evaporíticos permitem aventar a possibilidade de que os evaporitos foram gerados em planícies costeiras em ambiente de clima árido. Embora seu conteúdo fossilífero seja composto por formas predominantemente não marinhas, alguns autores consideraram que a associação inclui também palinomorfos de origem marinha (Lima, 1978a, b). Um possível cenário paleogeográfico é o de ambientes subaquosos costeiras, com alguns quilômetros quadrados de extensão, mas sem conexão com o mar, à semelhança das modernas salinas existentes no sul da Austrália (Warren e Kendall, 1985).

Figura 10

A seção evaporítica (Formação Ipubi) pode apresentar mais de uma camada de gipsita/anidrita, como mostrado na seção colunar levantada na mina Conceição Preta em Santana do Cariri - CE (localização na figura 1). (a) Seção heterolítica entre as duas camadas de gipsita é predominantemente constituída por folhelhos pretos a cinza escuros, com intercalações de delgadas camadas de calcários; (b) Arenitos finos com estratificação cruzada cavalgante podem ocorrer ocasionalmente, mas não são fácies comumente encontradas neste intervalo estratigráfico; (c) As camadas de calcário são delgadas e descontínuas.

Figure 10

As observed in the Conceição Preta quarry, Santana de Cariri - CE (location on figure 1), the evaporite succession (Ipubi Formation) at the top of the sequence SD-2 can be constituted by two distinct gypsum/anhydrite layers. (a) The heterolithic succession between two gypsum banks are composed of black to dark gray shales interbedded with thin layers of limestones; (b) Climbing-ripple cross-stratified sandstones are rare in this stratigraphic interval; (c) The limestone layers are thin and laterally discontinuous.



sequência deposicional 3

A sequência deposicional 3 (SD-3) corresponde integralmente à Formação Romualdo, que é caracterizada por ampla gama de litologias (conglomerados estratificados, arenitos finos a grossos, calcários laminados, margas, folhelhos, calcários coquinoídeos e coquinas). Esta formação é conhecida internacionalmente pelo seu rico conteúdo fóssilífero, especialmente de peixes encontrados em concreções fóssilíferas (Maisey, 1991; Kellner, 2002; Fara *et al.*, 2005).

Os arenitos costeiros da porção inferior da Formação Romualdo tornam-se mais grossos em direção às porções mais proximais da bacia, onde a descontinuidade é marcada por contato erosivo sobre a associação de fácies evaporítica da Formação Ipubi. A descontinuidade já havia sido reconhecida por Silva (1986), que relatou feições de exposição no topo das camadas de gipsita. Sobre os evaporitos ocorrem níveis delgados de conglomerados, constatados em minas existentes nas porções centro-norte (Nova Olinda e Santana do Cariri – CE) e oeste (Araripina – PE) da bacia (Assine, 1992, 2007).

Na porção centro-norte da bacia, os arenitos conglomeráticos e conglomerados com geometrias canalizadas e padrão de afinamento textural para o topo, presentes na base da SD-3, são fácies de origem aluvial. Sobre os conglomerados e arenitos conglomeráticos, podem ocorrer folhelhos pretos, calcíferos, fóssilíferos, com intercalações de calcários nodulares intercalados, caracterizando fácies heterolíticas (fig. 4).

As fácies psamito-pséfiticas existentes na base da sequência são recobertas por arenitos com intercalações de siltitos e lamitos verdes. Os arenitos se tornam progressivamente mais finos para o topo, com filmes e clastos de argila nos foresets e entre os sets, interpretados como barras de canais de maré. Os arenitos se tornam mais delgados e desaparecem para cima, passando a predominar folhelhos verdes e cinza-escuros.

Nas porções mais distais da bacia, situadas a leste, a descontinuidade da base da sequência é marcada por brusca mudança de fácies, de calcários laminados da Formação Crato para arenitos da Formação Romualdo, muitas vezes sem a

presença da seção evaporítica da Formação Ipubi. Folhelhos cinza-escuros/esverdeados a pretos, ricos em ostracodes e com espessuras entre 40 e 50m, ocorrem sobre os arenitos, como, por exemplo, na seção colunar levantada na localidade de Sobradinho (fig. 11) e no poço 1-PS-12-CE (Scheid, 1978), ambos localizados no município de Jardim - CE (localização na fig. 1).

A assembleia de microfósseis apresenta grande diversidade, com grãos de pólen, esporos e ostracodes. Dinocistos (Arai e Coimbra, 1990; Coimbra *et al.*, 2002) e foraminíferos miliolídeos (Dias-Brito *et al.*, 2015b) indicam ambientes deposicionais com inquestionável influência marinha.

Destaca-se a existência de intervalos de folhelhos cinza-escuros a pretos, ricos em matéria orgânica e com espessura de até 5m, caracterizados pela presença de concreções carbonáticas fóssilíferas, portadores de rica paleoictiofauna considerada marinha (Silva Santos e Valença, 1968; Fara *et al.*, 2005). A excelente preservação dos peixes nas concreções indica que as águas eram muito calmas e que a mortandade em massa deveu-se a mudanças drásticas da salinidade ou da temperatura nas águas superficiais (Martill, 1988; Martill *et al.*, 2008).

Camadas de calcários bioclásticos encontram-se presentes na porção superior da sucessão pelítica (figs. 4 e 11), ocorrendo no entorno de toda a Chapada do Araripe. As camadas de calcários bioclásticos, muitas vezes coquinas, têm espessuras centimétricas a decimétricas e são portadoras de acumulações de fósseis de invertebrados, tais como gastrópodes (turritelídeos), bivalves e equinóides (fig. 12). A presença de representantes inequivocamente marinhos, como os equinóides, confirma a ingressão marinha na bacia (Beurlen, 1966, 1971). A maior parte dos depósitos é atribuída a tempestitos, à exceção de duas localidades no leste da bacia, interpretadas como lag residual e depósito de sufocamento (Sales, 2005). Os depósitos foram também alternativamente interpretados como lags residuais sobre superfície de ravinamento e considerados um marco estratigráfico (Assine, 2007). Na seção colunar de Sobradinho, foram constatadas quatro camadas com espessuras de 30-50cm de espessura, posicionadas sobre a seção de folhelhos e cerca de 30-40m acima do nível com concreções fóssilíferas (fig. 11).

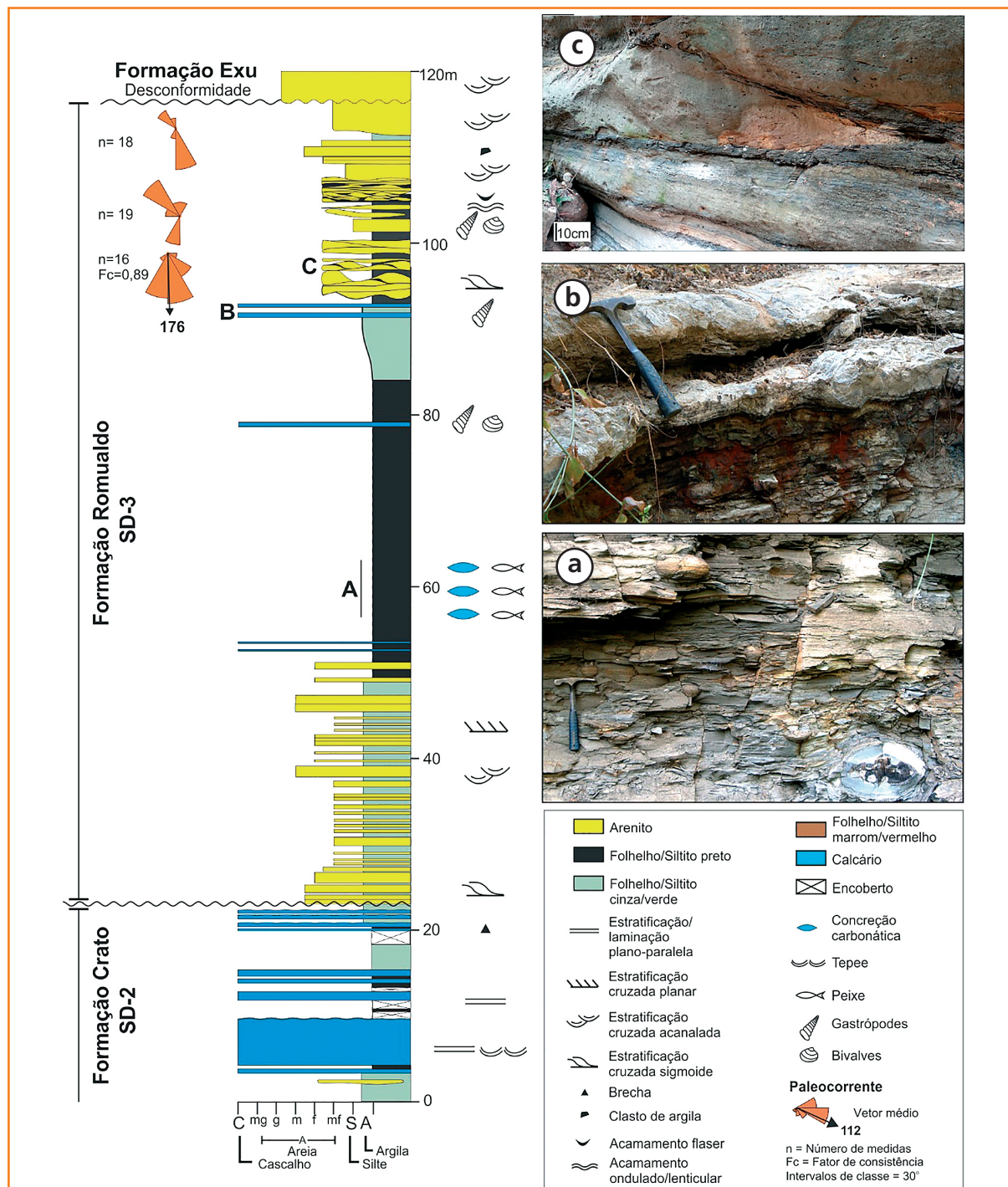


Figura 11 - A sequência SD-3 (Formação Romualdo) apresenta ciclo transgressivo-regressivo completo na seção colunar de Sobradinho, município de Jardim – CE (localização na figura 1). (a) Concreções fossilíferas (ictiolitos) na parte inferior do intervalo de folhelhos marinhos; (b) Níveis de calcários bioclásticos, com gastrópodes marinhos, estão presentes encimando os folhelhos marinhos; (c) A seção regressiva do topo da sequência apresenta fácies heterolíticas e arenitos sigmoides com lâminas de argila nos foresets e entre os sets.

Figure 11 - The sequence SD-3 (Romualdo Formation) is a transgressive-regressive cycle, as observed in the columnar section measured at the Sobradinho locality, Jardim – CE (location on figure 1). (a) Fossiliferous concretions (ichthyolithos) in the lower Romualdo Formation characterized by marine black shales; (b) Bioclastic limestones composed of marine gastropods occur over the interval of marine shales; (c) The regressive succession of the upper portion of the sequence is characterized by heterolithic facies and sandstones with tidal-bundles.

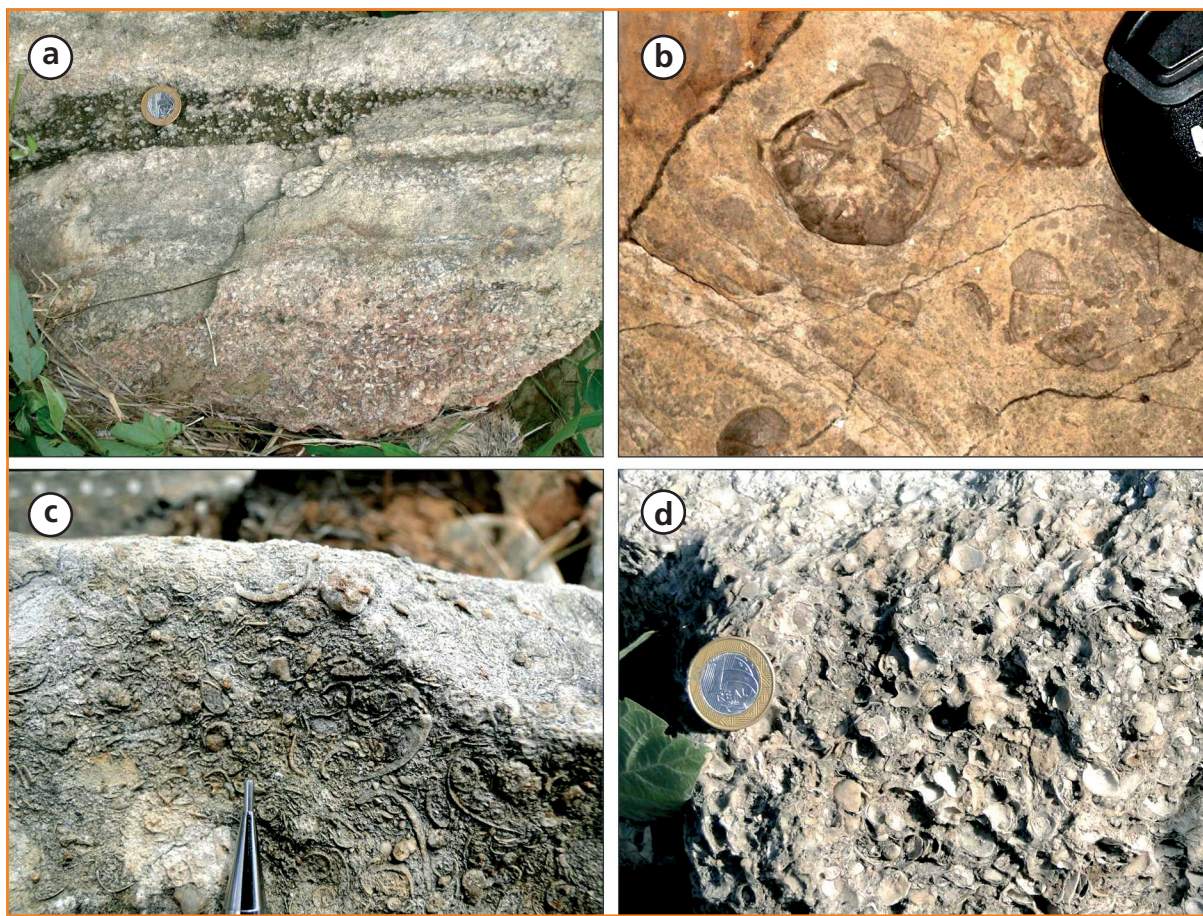


Figura 12
 Calcários bioclásticos da Formação Romualdo: (a) Concentrações de fósseis de gastrópodes em camadas com granodrecrescência ascendente (localidade de Romualdo, município de Crato – CE); (b) Fósseis de equinoides articulados (município de Araripina – PE); (c) Coquina de gastrópodes e bivalves (município de Araripina – PE); (d) Coquina de bivalves (município de Araripe – CE).

Figure 12
 Bioclastic limestones from the Romualdo Formation: (a) Gastropod bearing concentrations with fining-upward pattern (Romualdo locality, Crato – CE); (b) Articulated equinoid fossils (Araripina – PE); (c) Coquina of gastropods and bivalves (Araripina – PE); (d) Bivalve-rich coquina (Araripe – CE).

O empilhamento da sequência é retrogradacional, desde os arenitos basais até os folhelhos marinhos do topo. A arquitetura estratigráfica da sequência aponta para onlap costeiro de sudeste para noroeste, com deposição de fácies marinhas diretamente sobre o embasamento nas porções oeste e noroeste da bacia. Sobre as camadas de calcário bioclástico tem início a associação de fácies de trato de nível alto, que é constituído por arenitos finos com intercalação de siltitos e folhelhos portadores de fósseis de água doce, como conchostráceos e moluscos (Beurlen, 1971). Os arenitos apresentam concentração de clastos de argila na base das camadas e lâminas de argila nos foresets e são interpretados como fácies produzidas pela migração de barras de marés (fig. 11). Esta seção progradacional nem sempre ocorre, podendo estar ausente na parte superior da Formação Romualdo devido à erosão durante a geração da discordância no topo da SD-3.

O reconhecimento de uma superfície de máxima inundação marinha no final da megassequência (Formação Romualdo) permitiu a caracterização

de um ciclo transgressivo-regressivo. Fácies fluviais do Grupo Araripe sobrepõem em discordância erosiva regional os estratos do Grupo Santana, marcando o topo do Andar Alagoas na bacia.

correlações e paleogeografia

Duas discontinuidades dentro do registro da megassequência Alagoas na Bacia do Araripe são limites naturais de três sequências deposicionais, que correspondem a três ciclos transgressivo-regressivos. As três sequências foram identificadas também na seção sedimentar do poço 2-AP-1-CE, perfurado na Sub-bacia de Feira Nova (fig. 13, localização na fig. 1), mostrando que a arquitetura estratigráfica delineada tem expressão bacinal. O empilhamento geral da megassequência é nitidamente transgressivo, sendo a superfície de inundação máxima da sequência deposicional superior (SD-3) a mais expressiva de todas.

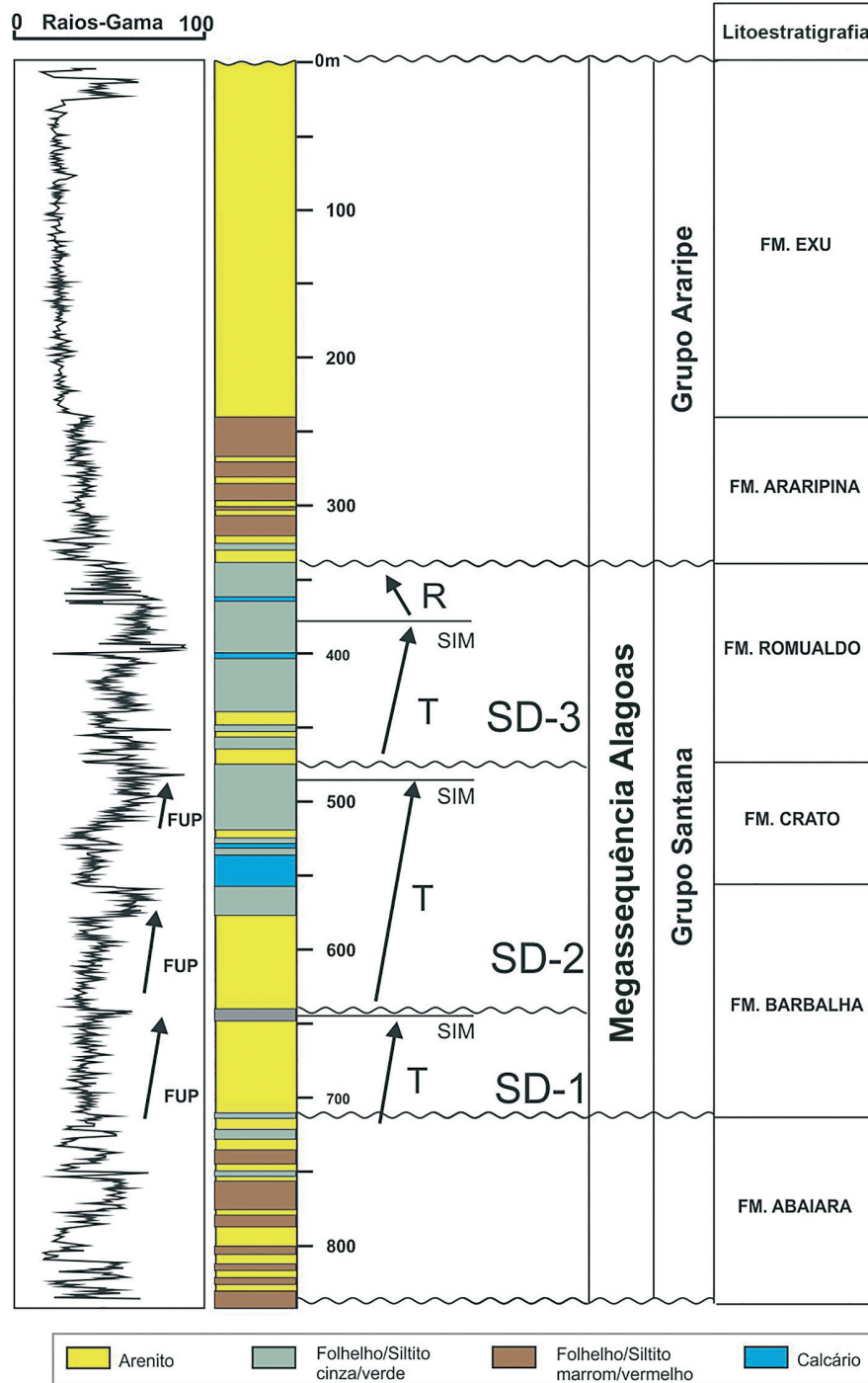


Figura 13 - As três seqüências caracterizadas em superfície na Sub-bacia do Cariri foram tentativamente definidas no perfil do poço 2-AP-1-CE (Sub-bacia de Feira Nova; localização na fig. 1). As superfícies de inundação máxima (SIM), marcadas com base no perfil de raios gama, foram posicionadas na porção superior das seqüências, que apresentam trato de sistemas dominantemente transgressivos (T), evidenciados por empilhamento com granodecrescência ascendente (FUP). A seção regressiva (R) dos ciclos é incompleta, estando mais bem preservada na seqüência SD-3.

Figure 13 - The three sequences interpreted in the Cariri Sub-basin were tentatively recognized in the 2-AP-1-CE well (Feira Nova Sub-basin; see Fig. 1 for the location). The maximum flooding surfaces (SIM) were interpreted in the upper portion of the three sequences based in the gamma-ray log data. All sequences are mainly composed by transgressive systems tracts (T), characterized by fining-upward pattern (FUP). The regressive section (R) of the cycles is incomplete, and is better preserved in the sequence SD-3.

O arcabouço estratigráfico do Andar Alagoas na Bacia do Araripe revela que a sedimentação ocorreu em condições de quiescência tectônica pós-rifte, com onlap das unidades superiores sobre o embasamento. Entretanto, a distribuição espacial da SD-1 e da parte inferior da SD-2 (formações Barbalha e Crato), cuja ocorrência coincide com as áreas das duas sub-bacias rifte, indica controle tectônico da subsidência, provavelmente por reativação pós-rifte das falhas geradas na fase rifte.

O Andar Alagoas caracteriza-se por empilhamento predominantemente retrogradacional nas bacias da margem leste brasileira, as quais são compostas por várias sequências deposicionais predominantemente transgressivas, predominando sedimentação continental nas margens e deposição evaporítica e marinha carbonático-siliciclástica nas porções mais distais (Dias, 2004). A sedimentação é inicialmente fluvial, passando para carbonático-evaporítica marginal com tendência a marinha franca em direção ao topo da sucessão.

Sob esse cenário, a Bacia do Araripe apresenta a mesma lógica de empilhamento estratigráfico, embora em contexto paleogeográfico proximal em relação às bacias marginais nordestinas. Desta forma, os evaporitos da bacia (Formação Ipubi) têm correlação cronoestratigráfica com os das bacias da margem leste (Regali, 1989a). No entanto, foram formados geograficamente distantes dos oceanos originados da ruptura de Gondwana e apresentam características sedimentares de ambientes marginais a continentais.

Na Bacia de Sergipe/Alagoas, a sedimentação pós-rifte inicia-se com os depósitos aluviais e deltaicos do Membro Carmópolis, que compõem tratos de sistemas de nível baixo e transgressivo (Campos Neto *et al.*, 2007). As fácies siliciclásticas das sequências inferiores são sobrepostas por rochas carbonáticas microbiais, evaporitos e folhelhos marinhos. As fácies fluviais têm espessura aumentada nos baixos deposicionais, ao passo que calcários laminados/brechados e a complexa seção evaporítica (principalmente anidrita e halita) foram depositados diretamente sobre altos do embasamento, como no campo de Carmópolis (Araújo *et al.*, 2009). Folhelhos marinhos do Membro Oiteirinhos recobrem a seção carbonático-evaporítica, compondo sucessão transgressiva muito semelhante à do Andar Alagoas (Grupo Santana) da Bacia do Araripe.

A Bacia Potiguar apresenta arcabouço estratigráfico similar. Como na Bacia do Araripe, depósitos

fluviais da base da Formação Alagamar apresentam controle tectônico, indicando que algumas falhas herdadas da fase rifte continuaram ativas no Aptiano, conforme relato de Pessoa Neto *et al.* (2007). Segundo estes autores, o empilhamento é marcadamente retrogradacional, com afogamento dos sistemas fluviais dos membros Upanema e Canto do Amaro por folhelhos transicionais do Membro Galinhos. A superfície de máxima inundação foi posicionada sobre intervalo composto por folhelhos pretos e calcilitos ostracoidais, de ampla distribuição na bacia, denominado Camadas Ponta do Tubarão.

As Camadas Ponta do Tubarão da Bacia Potiguar, assim como o Membro Trairi da Bacia do Ceará, foram correlacionadas às Camadas Batateira da Bacia do Araripe (Hashimoto *et al.*, 1987). Entretanto, considerando as características litológicas dos três intervalos e o empilhamento estratigráfico das três bacias, propõe-se aqui correlação do Membro Trairi e das Camadas Ponta do Tubarão com a seção de calcários laminados e folhelhos da Formação Crato da Bacia do Araripe.

Na Bacia do Ceará, o empilhamento estratigráfico do Andar Alagoas é igualmente retrogradacional (Condé *et al.*, 2007). A Formação Paracuru é constituída predominantemente por arenitos fluviais na sua metade inferior, com afogamentos representados por intervalos de folhelhos de boa continuidade lateral, prevalecendo condições marinhas marginais na porção superior (Regali, 1989b). Os folhelhos carbonosos e calcilitos do Membro Trairi, unidade situada na porção mediana da Formação Paracuru, têm associação lateral com folhelhos ricos em matéria orgânica e com níveis de evaporito, predominante compostos por halita (Condé *et al.*, 2007).

Evidências de sedimentação marinha são relatadas para os calcários que sucedem os depósitos fluviais presentes na porção inferior do Andar Alagoas, tanto na Bacia de Sergipe (Campos Neto *et al.*, 2007) quanto na Potiguar (Pessoa Neto *et al.*, 2007). Na Bacia do Araripe, a seção carbonática da Formação Crato tem sido invariavelmente considerada lacustre (e. g. Neumann, 1999; Neumann e Cabrera, 1999), com exceção de apenas uma referência relatando a existência de formas marinhas de foraminíferos (Arai, 2012). Interpretase que, devido à posição geográfica no interior do continente, a ingressão marinha na Bacia do Araripe ocorreu com relativo atraso em relação às bacias marginais.

A seção pós-evaporítica da Bacia do Araripe (SD-03; Formação Romualdo) constitui um ciclo transgressivo-regressivo, com superfície de inundação máxima marinha na porção superior do Andar Alagoas. A presença de equinóides (Beurlen, 1966; Manso e Hessel, 2007) nos calcários coquinoídes e nas coquinas é evidência inequívoca de ingressão marinha em toda a bacia. Os folhelhos sotopostos a estas rochas carbonáticas bioclásticas registram também a incursão marinha, pois são portadores de fósseis diversos, incluindo tartarugas (Hirayama, 1998) e peixes marinhos (Silva Santos e Valença, 1968; Martill, 1988; Maisey, 1991, 2000; Saraiva, 2008), bem como dinoflagelados (Arai e Coimbra, 1990). A transgressão marinha foi de curta duração e consequência dos eventos eustáticos globais de elevação do nível do mar no Aptiano.

O sentido da ingressão marinha é tema controverso, tendo sido já propostos três possíveis caminhos: 1) de sudeste, a partir das bacias de Sergipe-Alagoas e do Recôncavo-Tucano (Beurlen, 1971; Mabesoone e Tinoco, 1973; Assine, 1990, 1994); 2) de nordeste, a partir da Bacia Potiguar (Beurlen 1962; Lima 1978b; Petri 1987; Machado *et al.*, 1989); e 3) de oeste, a partir da Bacia do Parnaíba (Braun, 1966; Beurlen e Mabesoone, 1969; Medeiros, 1990).

Em trabalhos publicados nos últimos anos, Arai (2009, 2014) interpretou que o mar atingiu a Bacia do Araripe através de seaway conectado à Bacia do Parnaíba (também denominada Grajaú), situada a oeste da Bacia do Araripe. De fato, o Andar Alagoas na Bacia do Parnaíba exibe empilhamento estratigráfico similar ao das outras bacias do Nordeste do Brasil. As fácies fluviais da Formação Grajaú são sobrepostas pela seção mista carbonático-evaporítico-siliciclástica da Formação Codó, compondo ciclo transgressivo-regressivo com domínio de ambientes marinhos a norte e fluviais/deltaicos a sul (Rossetti *et al.*, 2000).

Entretanto, a arquitetura estratigráfica do Andar Alagoas apresentada no presente trabalho não se coaduna com a interpretação de Arai (2009, 2014). O arranjo das três sequências identificadas revelaram onlap costeiro de sudeste para noroeste (fig. 5), o que indica mergulho deposicional da bacia para sudeste e áreas-fonte a noroeste. Esta reconstituição paleogeográfica é corroborada pelos dados de paleocorrentes fluviais das sequências inferiores, que indicam paleofluxo para sudeste. Com base nestes dados e na argumentação de que as ingressões marinhas ocorrem no sentido

oposto ao da drenagem continental, apresentada por Assine (1994), conclui-se que a ingressão marinha neaptiana na Bacia do Araripe foi de sudeste para noroeste. Para oeste estão progressivamente representadas apenas as unidades mais jovens do Andar Alagoas, fato constatado por diversos autores (e.g. Beurlen, 1971; Santos, 1982). Nas porções mais ocidentais da bacia, fácies marinhas da parte superior da Formação Romualdo recobrem diretamente o embasamento pré-cambriano, como se observa em afloramentos existentes nas cidades de Araripe (CE) e de Araripina (PE).

A deposição das unidades aluviais do Grupo Araripe (formações Araripina e Exu) revela retorno às condições de sedimentação continental após o Andar Alagoas. Esta evolução contrasta com a das bacias marginais, as quais registram sedimentação em ambientes marinhos e empilhamento estratigráfico predominantemente transgressivo no Albiano e Cenomaniano, resultantes da subsidência térmica experimentada por essas bacias e da subida global do nível dos oceanos. Paleocorrentes para oeste na Formação Exu testemunham mudança radical na paleodrenagem continental, interpretada como evidência de soerguimento epirogênico da Região Nordeste do Brasil a partir do Albiano (Assine, 1994).

conclusão

O registro estratigráfico do Andar Alagoas da Bacia do Araripe tem relação genética com os eventos geológicos que culminaram com a fragmentação de Gondwana, abertura do Atlântico Sul e geração das sequências aptiano-albianas das bacias marginais brasileiras. Assim como nas bacias da margem leste, é notável a presença de uma discordância angular regional entre os estratos subhorizontalizados do Andar Alagoas e os estratos das unidades mais antigas. Embora em contexto paleogeográfico proximal, o empilhamento estratigráfico na Bacia do Araripe é similar ao das bacias marginais e da Bacia do Parnaíba. O reconhecimento de duas desconformidades internas, de extensão bacinal, permite a subdivisão do Andar na Bacia do Araripe em três sequências deposicionais. A sequência mais antiga (parte inferior da Formação Barbalha) mostra empilhamento geral retrogradacional, terminando com o estabelecimento de um amplo sistema lacustre caracterizado por condições

anóxicas, que deu ensejo à deposição dos folhelhos pretos das Camadas Batateira. A segunda sequência representa a mudança de ambientes predominantemente de sedimentação aluvial (parte superior da Formação Barbalha) para sistemas deposicionais lacustres e costeiros, com a presença de expressiva seção carbonática-evaporítica (formações Crato e Ipubi). A terceira sequência é um ciclo transgressivo-regressivo completo (Formação Romualdo), com folhelhos ricos em matéria orgânica e ingressão marinha de idade neoaptiana. A arquitetura deposicional e as paleocorrentes das três sequências revelam onlap costeiro de sudeste para noroeste, interpretado como o sentido de ingressão marinha na bacia durante o Andar Alagoas.

agradecimentos

Os autores são gratos à Rede de Estratigrafia e Sedimentologia da Petrobras (convênio nº 0050.0023165.06.4 - SAP nº 46.00321584), pelo apoio ao projeto “Análise Estratigráfica do Andar Alagoas nas Bacias do Araripe, Tucano-Jatobá, Parnaíba e Sanfranciscana”; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) (proc. 2004/15786-0) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (proc. 476727/2004-9) por apoios a projetos de pesquisa na Bacia do Araripe; à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela concessão de dados de subsuperfície; ao Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo – Unespetro, IGCE/Unesp/Rio Claro, pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa; ao CNPq pela concessão de bolsas de produtividade em pesquisa (MLA, JAJP e VHN); a José Cândido Stevaux e Bruno Cesar Araújo pela colaboração nos trabalhos de campo. Os autores são gratos também a Fernanda Quaglio e a Valéria Centurion Córdoba pela revisão do texto e sugestões apresentadas.

referências bibliográficas

ARAI, M. Revisão estratigráfica do Cretáceo Inferior das bacias interiores do Nordeste do Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 7-15, 2006.

ARAI, M. Paleogeografia do Atlântico Sul no Aptiano: um novo modelo a partir de dados micropaleontológicos recentes. **Boletim de Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 331-351, maio/nov. 2009.

ARAI, M. Evidência micropaleontológica da ingressão marinha aptiana (pré-evaporítica) na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos. **Anais...** Santos: Sociedade Brasileira de Geologia, 2012. CD-ROM.

ARAI, M. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, v. 44, n. 2, p. 339-350, June 2014.

ARAI, M.; COIMBRA, J. C. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). In: SIMPÓSIO DA BACIA DO ARARIPE E BACIAS INTERIORES DO NORDESTE, 1., 1990, Crato. **Anais...** Crato: DNPM, 1990. p. 225-239.

ARAÚJO, C. C. ; JÚNIOR, P. A. M.; MADRUCCI, V.; CARRAMAL, N. G.; TOCZECK, A.; ALMEIDA, A. B. Carbonatos aptianos do Campo de Carmópolis, Bacia de Sergipe-Alagoas: estratigrafia e modelo deposicional. **Boletim Geociências Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 311-330, maio/nov. 2009.

ASSINE, M. L. **Sedimentação e tectônica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil**. 1990. 124 f. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade do Estado de São Paulo, Rio Claro, 1990.

ASSINE, M. L. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 289-300, set. 1992.

ASSINE, M. L. Paleocorrentes e Paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 223-232, dez. 1994.

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

BEURLEN, K. A geologia da Chapada do Araripe. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 3, p. 365-370, 1962.

- BEURLEN, K. Novos equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 389, n. 3/4, p. 455-464, 1966.
- BEURLEN, K. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 43, Suplemento, p. 411-415, 1971.
- BEURLEN, K.; MABESOONE, J. M. Bacias cretáceas intracontinentais do Nordeste do Brasil. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 9, n. 18, p. 19-34, 1969.
- BRAUN, O. P. G. **Estratigrafia dos sedimentos da parte interior da Região Nordeste do Brasil (Bacias de Tucano-Jatobá, Mirandiba e Araripe)**. Rio de Janeiro: Divisão de Geologia e mineralogia, 1966. 75 p. Boletim (Brazil. Divisão de Geologia e Mineralogia, 236).
- CAMPOS NETO, O. P. A.; LIMA, W. S.; CRUZ, F. E. G. Bacia de Sergipe-Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 405-415, maio/nov. 2007.
- CHAGAS, D. B.; ASSINE, M. L.; FREITAS, F. I. Facies sedimentares e ambientes deposicionais da Formação Barbalha no Vale do Cariri, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 313-322, 2007.
- COIMBRA, J. C.; ARAI, M.; CARREÑO, A. L. Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from the Araripe Basin, northeastern Brazil. **Geobios**, Lyon, v. 35, p. 687-698, 2002.
- CONDÉ, V. C.; LANA, C. C.; PESSOA NETO, O. C.; ROESNER, E. H.; MORAIS NETO, J. M.; DUTRA, D. C. Bacia do Ceará. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 347-355, maio/nov. 2007.
- DIAS, J. L. Tectônica, estratigrafia e sedimentação no Andar Aptiano da margem leste brasileira. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 7-25, nov. 2004/maio 2005.
- DIAS-BRITO, D.; TIBANA, P.; ASSINE, M.; ROSSETTI, D. Laminitos lacustres organo-calcários neoaptianos ricos em ostracodes no Nordeste do Brasil: bacias do Araripe, Potiguar e Parnaíba, Aptiano superior (Alagoas superior). In: DIAS-BRITO, D.; TIBANA, P. (Ed.). **Calcários do Cretáceo do Brasil: um Atlas**. Rio Claro: UNESP/UNESPetro, 2015a. p. 49-119.
- DIAS-BRITO, D.; TIBANA, P.; ASSINE, M.; NEUMANN, V. H. L. Calcários lagunares Romualdo: Bacia do Araripe, Aptiano superior - Albiano inferior. In: DIAS-BRITO, D.; TIBANA, P. (Ed.). **Calcários do Cretáceo do Brasil: um Atlas**. Rio Claro: UNESP/UNESPetro, 2015b. p.135-157.
- FARA, E.; SARAIVA, Á. A. F.; CAMPOS, D. A.; MOREIRA, J. K. R.; SIEBRA, D. C.; KELLNER, A. W. A. Controlled excavations in the Romualdo Member of the Santana Formation (Early Cretaceous, Araripe Basin, northeastern Brazil): stratigraphic, palaeoenvironmental and palaeoecological implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 218, n. 1/2, p. 145-160, Mar. 2005.
- FARINA, M. Seqüência plumbífera do Araripe - mineralização sulfetada no Cretáceo sedimentar brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v. 6, p. 61-77.
- HASHIMOTO, A. T.; APPI, C. J.; SOLDAN, A. L.; CERQUEIRA, J. R. O neo-Alagoas nas bacias do Ceará, Araripe e Potiguar (Brasil): caracterização estratigráfica e paleoambiental. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 118-122, 1987.
- HEIMHOFER, U.; ARIZTEGUI, D.; LENNIGER, M.; HESSELBO, S. P.; MARTILL, D. M.; RIOS-NETTO, A. M. Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, North-eastern Brazil). **Sedimentology**, Oxford, v. 57, n. 2, p. 677-694, Feb. 2010.
- HIRAYAMA, R. Oldest known sea turtle. **Nature**, London, v. 392, n. 6677, p. 705-708, Apr. 1998.
- KELLNER, A. W. A. Membro Romualdo da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE. Um dos mais importantes depósitos fossilíferos do Cretáceo brasileiro. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A. QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. (Ed.). **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. Brasília: DNPM/CPRM/SIGEP, 2002. v. 1. p. 121-130.
- LIMA, M. R. O Paleoambiente deposicional da Formação Santana (Grupo Araripe) segundo evidências palinológicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

- GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978a. p. 970-974.
- LIMA, M. R. **Palinologia da Formação Santana (Cretáceo do Nordeste do Brasil)**. 1978b. 335 f. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.
- LIMA, M. R. Considerações sobre a subdivisão estratigráfica da Formação Santana - Cretáceo do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 116 -121, 1979.
- MABESOONE, J. M.; TINOCO, I. M. Paleogeology of Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 14, n. 2, p. 97-118, Oct. 1973.
- MACHADO JUNIOR, D. L.; DEHIRA, L. K., CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M. Reconstruções paleoambientais do Juro-Cretáceo do Nordeste oriental brasileiro. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 19, n. 4, p. 470-485, 1989.
- MAISEY, J. G. **Santana Fossils: an Illustrated Atlas**. Neptune: TFH Publications, 1991. 459 p.
- MAISEY, J. G. Continental break up and the distribution of fishes of Western Gondwana during the Early Cretaceous. **Cretaceous Research**, London, v. 21, n. 2/3, p. 281-314, Apr. 2000.
- MANSO, C. L. C.; HESSEL, M. H. Novos equinóides (Echinodermata: Echinoidea) do Albiano da Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 42, n. 1, p. 187-197, 2012.
- MARTILL, D. M. Preservation of fish in the Cretaceous Santana Formation of Brazil. **Palaeontology**, Cambridge, v. 31, n. 1, p. 1-18, Jan. 1988.
- MARTILL, D. M. The age of the Cretaceous Santana Formation fossil Konservat Lagerstätte of northeast Brazil: a historical review and an appraisal of the biostratigraphic utility of its palaeobiota. **Cretaceous Research**, London, v. 28, n. 6, p. 895-920, Dec. 2007.
- MARTILL, D. M.; BECHLY, G.; LOVERIDGE, R. F. (Ed.). **The Crato Fossil beds of Brazil - Window into an Ancient World**. New York: Cambridge University Press, 2007. 625 p.
- MARTILL, D. M.; BRITO, P. M.; WASHINGTON-EVANS, J. Mass mortality of fishes in the Santana Formation (Lower Cretaceous, ?Albian) of northeast Brazil. **Cretaceous Research**, London, v. 29, n. 4, p. 649-658, Aug. 2008.
- MARTILL, D. M.; LOVERIDGE, R.; HEIMHOFER, U. Halite pseudomorphs in the Crato Formation (Early Cretaceous, Late Aptian-Early Albian), Araripe Basin, northeast Brazil: further evidence for hypersalinity. **Cretaceous Research**, London, v. 28, n. 4, p. 613-620, Aug. 2007.
- MEDEIROS, R. A. Estratigrafia da Chapada do Araripe: o estado da arte. In: SIMPÓSIO SOBRE A BACIA DO ARARIPE E BACIAS INTERIORES DO NORDESTE, 1., 1990, Crato. **Anais...** Crato: DNPM, 1990. p. 43-51.
- MORALES, N.; ASSINE, M. Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R., SANTOS, L. J. C. (Ed.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. Netherlands: Springer, 2015. (World Geomorphological Landscapes). Cap. 21, p. 231-242.
- NEUMANN, V. H. **Estratigrafia, Sedimentologia, Geoquímica y Diagénesis de los Sistemas Lacustres Aptienses-Albienses de la Cuenca de Araripe (Nordeste do Brasil)**. 233 f. 1999. Tese (Doutorado) Universidade de Barcelona, Barcelona, 1999.
- NEUMANN, V. H.; CABRERA, L. Uma nueva propuesta estratigráfica para la tectono-secuencia post-rifte de la Cuenca de Araripe, Nordeste de Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 5., 1999, Rio Claro. **Boletim...** Rio Claro: UNESP, 1999. p. 279-285.
- PESSOA NETO, O. C.; SOARES, U. M.; SILVA, J. G. F.; ROESNER, E. H.; FLORENCIO, C. P.; SOUZA, C. A. V. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 357-369, maio/nov. 2007.
- PETRI, S. Cretaceous paleogeographic maps of Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 59, n. 1/3, p. 117-168, Mar. 1987.
- PONTE, F. C.; APPI, C. J. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. In:

- CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. **Anais...** Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. p. 211-226.
- PONTE, F. C.; PONTE FILHO, F. C. **Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe**. Recife: Departamento Nacional de Produção Mineral, 1996. 68 p.
- REGALI, M. S. P. A idade dos evaporitos da plataforma continental do Ceará, Brasil, e sua relação com os outros evaporitos das bacias nordestinas. **Boletim IG-USP**: publicação especial, São Paulo, n. 7, p. 139-143, 1989a.
- REGALI, M. S. P. Primeiros registros da transgressão neoaptiana na margem equatorial brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 11., 1989, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 1989b. v.1. p. 275-293.
- ROSSETTI, D. F.; PAZ, J. D.; GOES, A. M.; MACAMBIRA, M. J. B. Sequential analysis of the Aptian deposits from the São Luís and Grajaú Basins, Maranhão State (Brazil) and its implication for unraveling the origin of evaporites. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 466-469, Sept. 2000.
- SALES, A. M. F. **Análise tafonômica das ocorrências fossilíferas de macroinvertebrados do Membro Romualdo (Albiano) da Formação Santana, Bacia do Araripe, NE do Brasil**: significado estratigráfico e paleoambiental. 2005. 131 f. Tese (Doutorado)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- SANTOS, M. E. M. Ambiente deposicional da Formação Santana, Chapada do Araripe (PE/PI/CE). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32., 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 4. p.1412-1426.
- SARAIVA, A. A. F. **Caracterização paleoambiental e paleo-oceanográfica da Formação Romualdo, Bacia sedimentar do Araripe**. 2008. 96 f. Tese (Doutorado)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- SCHIED, C.; MUNIS, M. B.; PAULINO, J. **Projeto Santana**: relatório final da etapa II. Recife: DNPM/CPRM, 1978. 136 p.
- SCHERER, C. M. S.; GOLDBERG, K.; BARDOLA, T. Facies architecture and sequence stratigraphy of an early post-rift fluvial succession, Aptian Barbalha Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 322, p. 43-62, June 2015.
- SILVA, M. A. M. **The Araripe Basin, Northeastern Brazil: regional geology and facies analysis of a Lower Cretaceous evaporitic depositional complex**. 1983. 290 f. Tese (Doutorado)–Universidade de Columbia, Nova York, 1983.
- SILVA, M. A. M. Lower Cretaceous unconformity truncating evaporite-carbonate sequence, Araripe Basin, Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 306-310, 1986.
- SILVA, M. A. M. Evaporitos do Cretáceo da Bacia do Araripe: ambientes de deposição e história diagenética. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 53-63, 1988.
- SILVA SANTOS, R.; VALENÇA, J. G. A Formação Santana e sua Paleoictiofauna. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 3, p. 336-360, 1968.
- SPIGOLON, A. L. D.; LEWAN, M. D.; PENTEADO, H. L. B.; COUTINHO, L. F. C.; MENDONÇA FILHO, J. G. Evaluation of the petroleum composition and quality with increasing thermal maturity as simulated by hydrous pyrolysis: A case study using a Brazilian source rock with Type I kerogen. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 83/84, p. 27-53, June/July 2015.

expanded abstract

The Araripe Basin is composed of Mesozoic stratigraphic units correlated to rift sequences associated to the break-up of Gondwana. The post-rift megasequence (Santana Group) corresponds to the stratigraphic record of the Alagoas Stage (late Aptian to very early Albian) of the Brazilian marginal basins. The Santana Group comprises the Barbalha, Crato, Ipubi and Romualdo formations, from base to top, and encompasses important fossiliferous beds known worldwide due to the extraordinary fossil preservation. The Alagoas strata in the Araripe Basin rest unconformably on the rift megasequences similarly to that observed in the Brazilian marginal basins, but the facies associations reveal evidence of a proximal paleogeographic context. Two internal unconformities allow us to subdivide the Alagoas Stage into three depositional sequences. The lower sequence belongs to the Barbalha Formation and comprises a vertical facies succession of fluvial channels, culminating with lacustrine shales that exhibit great lateral extension and thickness up to 10m. This black shale interval is known as "Batateira Beds" and constitutes an important stratigraphic mark in the basin, because they record the establishment of a large lake characterized by severe water level fluctuations and anoxic events. The middle sequence begins with thin conglomerate beds that are overlain by sandstones interbedded

with fine-grained rocks organized in fluvial cycles, and in turn by laminated limestones from the base of the Crato Formation, composing a vertical succession interpreted as a transgressive systems tract. The highstand systems tract is composed of laminated limestone beds and siliciclastic facies, recording distinct cycles of expansion and retraction of the lacustrine system. The highstand tract culminates with the deposition of the Ipubi evaporites, mainly characterized by gypsum precipitation under extreme aridity. The upper sequence corresponds to the Romualdo Formation, which lower portion is characterized by sandstones, and locally thin conglomerate and gravelly sandstone beds that overlie the basal unconformity in the basin margins. The stacking pattern is transgressive, with coastal onlap from southeast to northwest and marine facies overlying the Precambrian basement rocks in the west and northwest portions. Thin beds of coquinoid limestones overlie fossiliferous marine black shales. The marine maximum flooding surface in the upper depositional sequence (Romualdo Formation) characterizes an asymmetric transgressive-regressive cycle, mainly composed by transgressive deposits. Regressive highstand sandstones deposited in tidally influenced coastal systems complete the sequence and record the return to continental deposition. The top of the Alagoas Stage is a regional unconformity between the Santana Group and the overlying mid-Cretaceous fluvial facies of the Araripe Group (Araripina and Exu formations).

autores



Mario Luis Assine

Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Departamento de Geologia Aplicada

assine@rc.unesp.br

Mario Luis Assine graduou-se em Geologia pela Universidade Estadual Paulista (Unesp) em 1979. Atuou como geólogo na Petrobras (1980-1981), no IPT (1982-1985) e na Construtora Andrade Gutierrez (1985-1986). De 1987 a 1997 exerceu o cargo de professor do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Obteve título de Mestre em Geologia Regional pela Universidade Estadual Paulista (Unesp) em 1990 e de Doutor em Geociências (Geologia Sedimentar) pela Universidade de São Paulo (USP) em 1996. Desde 1997 é docente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (Unesp), instituição na qual exerce a função de professor adjunto desde 2003, quando obteve o título de Professor Livre-Docente em Estratigrafia e Sedimentação. Tem como linhas de pesquisa a análise de bacias sedimentares (bacias do Araripe e do Paraná) e o estudo da Geologia do Quaternário continental (Bacia do Pantanal).



José Alexandre de Jesus Perinotto

Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Departamento de Geologia Aplicada

perinotto@rc.unesp.br

José Alexandre de Jesus Perinotto é graduado em Geologia (1979) pela Universidade Estadual Paulista (Unesp); Geólogo da Petrobras (1980); Mestre em Geologia Sedimentar pela USP; Doutor em Geologia Regional e Livre-Docente em Análise Estratigráfica pela Unesp. Professor do Departamento de Geologia Aplicada do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, da Unesp - Rio Claro, desde 1981. Pesquisas com ênfase em Análise de Bacias Sedimentares, Estratigrafia e Sedimentologia Siliciclástica, atuando principalmente na Bacia do Paraná e bacias interiores do nordeste brasileiro. Pesquisador do Programa Antártico Brasileiro (Proantar/CNPq) e do Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo (Unespetro/Unesp).



Michele Andriolli Custódio

Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Programa de Pós-graduação em
Geociências e Meio Ambiente
Mestranda

mi.andriolli@gmail.com

Michele Andriolli Custódio é graduada em Geologia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp) em 2015. Foi bolsista de iniciação científica CNPq junto ao grupo de pesquisa Sistemas Depositionais do Quaternário (Pleistoceno Tardio/Holoceno) da Bacia do Pantanal Mato-Grossense. Estagiária do projeto Petrobras/Unesp "Análise Estratigráfica do Andar Alagoas nas Bacias do Araripe, Tucano/Jatobá, Parnaíba e Sanfranciscana". Bolsista ANP/PRH-05 – Unespectro, com pesquisa na estratigrafia de sequências da Bacia do Araripe. É mestranda no Programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente da Unesp, atuando nas áreas de sedimentologia e estratigrafia.



Virgínio Henrique Neumann

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Departamento de Geologia

neumann@ufpe.br

Virgínio Henrique Neumann é bacharel em Geologia e Mestre pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Doutor em Análise de Bacias Sedimentares pela Universidade de Barcelona, e Pós-Doutorado em estudos de Diagênese Estrutural em Fraturas no Bureau de Geologia Econômica da Universidade do Texas, em Austin, EUA. Desde 1992 é docente no Departamento de Geologia da UFPE. É membro atuante das seguintes associações: American Association of Petroleum Geologists (AAPG), International Association of Sedimentologists (IAS) e Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), Associação Brasileira de Petróleo e Gás (ABPG), Associação Brasileira de Geólogos de Petróleo (ABGP) e da Sociedade Brasileira de Geologia (SBG). Atualmente desenvolve projetos relacionados às sequências carbonáticas das bacias do Araripe, Jatobá e Tucano Norte, aplicados na caracterização de reservatórios análogos de hidrocarbonetos e, sistemas de fraturas na Bacia do Araripe e nos carbonatos da Bacia da Paraíba.



Filipe Giovanini Varejão
Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em
Geociências e Meio Ambiente
Mestrando

filipe.varejao@hotmail.com

Filipe Giovanini Varejão é graduado em Geologia (2013) pela Universidade Estadual Paulista (Unesp). Durante a graduação foi bolsista CNPq, trabalhando com SIG em feições geomorfológicas na Bacia do Pantanal; estagiário no projeto “Análise Estratigráfica do Andar Alagoas nas bacias do Araripe, Tucano/Jatobá, Parnaíba e Sanfranciscana”, convênio Petrobras/Unesp; bolsista do Programa de Formação de Recursos Humanos em Geologia e Ciências Ambientais Aplicadas ao Setor de Petróleo e Gás (PRH 05/Petrobras), com pesquisa nos depósitos pós-rifte da Bacia do Tucano. Possui cursos de aperfeiçoamento em geologia do petróleo, caracterização petrofísica de reservatórios carbonáticos, e em petrologia sedimentar carbonática. É bolsista nível de mestrado do PRH 05, apoio PFRH/Petrobras, desenvolvendo pesquisa com ênfase na sedimentologia e estratigrafia de sucessões mistas carbonático-siliciclásticas do Aptiano da Bacia do Tucano.



Patricia Colombo Mescolotti
Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Programa de Pós-graduação em
Geociências e Meio Ambiente
Mestranda

pamesco@ig.com.br

Patricia Colombo Mescolotti é graduada em Geologia (2015) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp). Estagiária do projeto Petrobras /Unesp – “Análise Estratigráfica do Andar Alagoas nas Bacias do Araripe, Tucano/Jatobá, Parnaíba e Sanfranciscana”. Bolsista ANP/PRH-05 - Unespetro, desenvolvendo pesquisa com rochas siliciclásticas cretáceas da Bacia Sanfranciscana. Possui cursos de aperfeiçoamento em geologia do petróleo. É bolsista CNPq, nível de mestrado, no Programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente da Unesp, com pesquisa em tectonossedimentação do Grupo Areado na Bacia Sanfranciscana.