

Paleoceanografia e a evolução do Atlântico Sul no Albiano¹

South Atlantic paleoceanography and evolution during the Albian

Ricardo Latgé Milward de Azevedo

resumo

Um vasto acervo de informações e interpretações geoquímicas, geofísicas, sedimentológicas e paleontológicas, associado a analogias às condições atuais do Mar Vermelho, suportam a idéia de que o Atlântico Sul manteve-se biparticionado durante o final do Aptiano ao mesoalbiano. O lineamento formado pelo Alto de Florianópolis e a Dorsal de São Paulo constituía-se na barreira restritiva à circulação de água entre o Atlântico Sul Meridional (ASM) e Atlântico Sul Central (ASC), que só foi superada de modo efetivo no neo-albiano. Até então, este último era alimentado fundamentalmente por águas vindas do Atlântico Norte, à época ligado ao Mar Tethys.

O ASC esteve totalmente inserido num cinturão climático árido, submetido a um balanço hídrico negativo, enquanto no ASM dominava o padrão de circulação estuarino. A comparação de resultados

de isótopos estáveis de carbono e oxigênio em carbonatos de diferentes regiões do planeta mostram que as águas do ASC eram mais quentes do que as que banhavam as Malvinas e as águas da região do Mar Tethys.

A evolução sedimentar no ASC se fez em meio a profundas mudanças paleoceanográficas induzidas, principalmente, por fenômenos tectônicos globais ligados à dinâmica de criação de crosta oceânica, que legaram a interligação marinha definitiva entre o Mar Tethys e o Índico, ao final do Albiano. Movimentações halocinéticas e variações orbitais foram responsáveis pelas oscilações do espaço deposicional, que proporcionaram o empilhamento de dezenas de ciclos de *shallowing-upward* em diferentes magnitudes.

(originais recebidos em 02.04.2004)

Palavras-chave: Albiano | Atlântico Sul | estratigrafia | paleoceanografia | correlações globais

¹ Contribuição ao projeto *Estratigrafia e paleoceanografia mesocretácea da Margem Continental Sudeste do Brasil* (nº 64.99.0380.00), apoiado pelo MCT/PADCT/CT-PETRO.

abstract

A vast array of geochemical, geophysical, sedimentological and paleontological data, together with modern environmental analogues in the Red Sea, support the view that the South Atlantic maintained its bipartitioned condition from latest Aptian to the middle Albian. The lineament comprising the Florianópolis High and São Paulo Dorsal formed an effective barrier to sea-water circulation between the Southern South Atlantic (SSA) and Central South Atlantic (CSA) until late Albian times. During that time, the latter communicated mainly with the North Atlantic, which in turn was connected to the Tethys Sea.

The CSA was then entirely located within an arid climatic belt, and subject to a negative hydric balance, whereas an estuarine circulation pattern prevailed in the SSA. The comparison of carbon and oxygen stable isotope results from limestones in various parts of the world demonstrates that the CSA waters were warmer than those of the Malvinas in the South, and the Tethyan Sea to the North.

The CSA sedimentary evolution was coeval with profound paleoceanographic changes. These were mainly induced by global tectonic phenomena related to the dynamics of oceanic crustal accretion, culminating with the definitive interconnection of the Tethyan and Indian oceanic waters by the end-Albian. Halokynetic movements and orbital variations brought about oscillations in accommodation space, which permitted the stacking of tens of shallowing-upward cycles with varied magnitudes.

(expanded abstract available at the end of the paper)

Keywords: Albian | South Atlantic | stratigraphy | paleoceanography | global correlations

introdução

Durante o Mesozóico, ocorreram importantes modificações na paleogeografia global, relacionadas à desintegração do supercontinente Pangea. Uma delas foi o desenvolvimento do rifteamento que levou à formação do Atlântico Sul. A evolução geotectônica da região provocou significativas alterações fisiográficas, induzin-

do mudanças climáticas, hidrológicas, sedimentológicas e biológicas.

Nesse artigo, são apresentadas interpretações sobre o complexo sistema marinho restrito estabelecido durante o processo de separação dos blocos continentais africano e sul-americano. Para isto, tornou-se importante apoiar-se em informações do singular Mar Vermelho, análogo atual do Atlântico Sul no Albiano.

As propriedades físicas e químicas da massa d'água desse mar, seu padrão de circulação, sua interação com a atmosfera, sua fauna e flora fornecem argumentos uniformitaristas que, suportados por grande número de referências bibliográficas, permitiram a reconstituição da paleoceanografia, paleogeografia e paleoclima dos primeiros momentos de instalação do Atlântico Sul.

limites geográficos, dimensões e aspectos estruturais

O modelo geodinâmico tradicional de separação dos continentes africano e sul-americano no Mesozóico considera a evolução de riftes independentes localizados nas regiões equatorial e leste do Gondwana. Estas fendas teriam avançado gradualmente em sentidos opostos, vindo a se encontrar numa região comum que representaria o último elo de ligação dos dois continentes (Asmus e Porto, 1972).

O processo se fez por etapas, tendo como primeiro estágio a ruptura da crosta continental no Triássico (Thomaz-Filho *et al.* 2000). O fenômeno teria se processado quase simultaneamente nas duas regiões, induzido por movimento de rotação na região meridional e o domínio transcorrente entre o norte-nordeste do Brasil e o Golfo de Guiné (fig. 1a). A fase seguinte ocorreu no Eocretáceo, e ficou limitada ao segmento entre as bacias de Santos e a de Sergipe/Alagoas no Brasil, e de Cuanza ao Gabão, na África. A restrição geográfica proposta para esta segunda etapa se sustenta na distribuição regional da sucção sedimentar flúvio/lacustrina e evaporítica presentes nas bacias da margem leste do Brasil e oeste da

África. No lado brasileiro, os limites sul e norte dessa seqüência se definem, aproximadamente, nos lineamentos de Florianópolis e de Maceió (Asmus e Guazelli, 1981). A Dorsal de Walvis e altos na região entre a Nigéria e Camarões marcam estes limites na África.

A presença de anomalias magnéticas pré-albianas observadas ao sul do Lineamento de Florianópolis e evidências geológicas nos sedimentos que as recobrem (Rabinowitz e LaBrecque, 1979) demonstram que condições marinhas normais, ou próximo disto, estavam estabelecidas na região mais meridional do Atlântico, no Aptiano. Destaca-se o fato deste lineamento orientar várias feições submarinas, como o limite meridional do Platô de São Paulo, o alinhamento de construções vulcânicas no Alto de Florianópolis, as dorsais de São Paulo e Walvis, e o limite norte da Elevação do Rio Grande (Kumar e Gambôa, 1979; Leyden *et al.* 1976; Asmus e Guazelli, 1981), o que permite atribuir-lhe um papel importante na história evolutiva do Atlântico Sul (fig. 1b).

Com menores larguras ao norte, ao final do Aptiano o ASC constituía-se num mar restrito, com formato triangular, tendo cerca de 2 400 km de comprimento por 400 km de largura máxima, localizada no extremo sul do Platô de São Paulo, considerado como uma crosta continental estirada (Leyden, 1976; Kowsmann *et al.* 1982; Chang *et al.* 1992; entre outros).

No modelo paleogeográfico global para o Albiano de Hay *et al.* (1999) esse segmento marinho do Atlântico Sul estaria localizado entre as latitudes 15° e 40°S, sob cinturão climático tropical a subtropical e com orientação dominante NNE/SSW. Esta condição o colocaria dentro da faixa latitudinal propensa a balanço hídrico negativo e salinidades superiores à média. Grandes massas continentais cercavam este mar restrito, com cadeias de montanhas bordejando principalmente a região sul, a julgar pela transição de fácies carbonáticas para clásticos terrígenos no sentido da costa (Asmus e Guazelli, 1981). Dados de traços de fissão de apatita levantados na margem sudeste do Brasil e sul da África (Fonseca e Poupeau *apud* Chang *et al.* 1992; Gallagher e Brown, 1999) também apontam intensa denudação no Albiano, mostrando o relevo escarpado à época. Este conjunto de características revela uma porção central do mar Atlântico

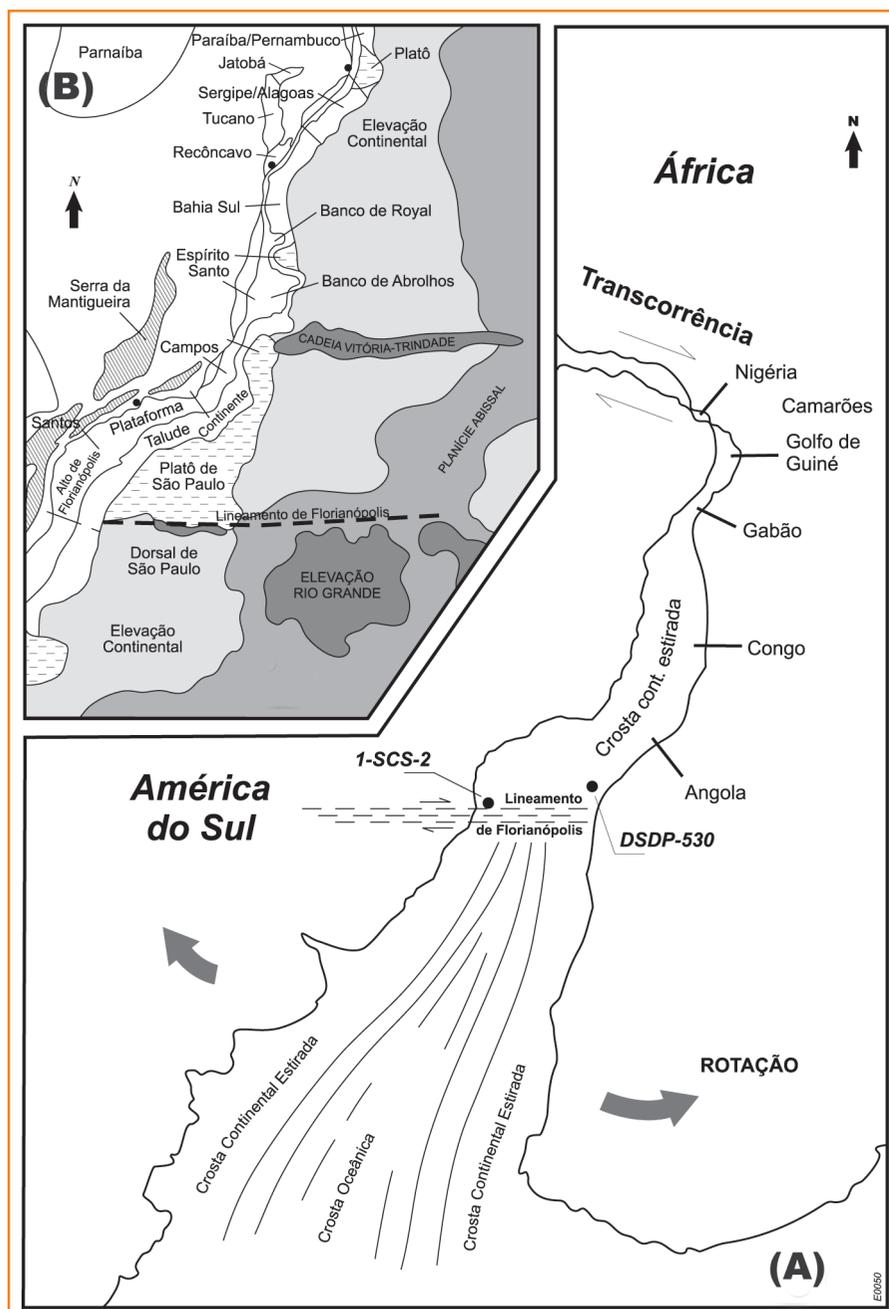


Figura 1 - Posição paleogeográfica dos continentes africano e sul-americano e do Atlântico Sul primitivo no Albiano (A), a partir do modelo geodinâmico tradicional, com rotação no sul e transcorrência no norte (modificado de Macedo, 1991). Em B, são apresentadas as principais feições fisiográficas da margem continental brasileira e bacias marinhas adjacentes (modificado de Palma *et al.* 1979).

Figure 1 - The paleogeographic position of the African and South American continents and the primitive South Atlantic in the Albian (A). Also note the traditional geodynamic model with rotation in the S and transcurrent movement in the N (modified from Macedo, 1991). The main physiographic trends presently observed on the Brazilian continental margin as well as the adjacent marine basins (modified from Palma *et al.* 1979) (B).

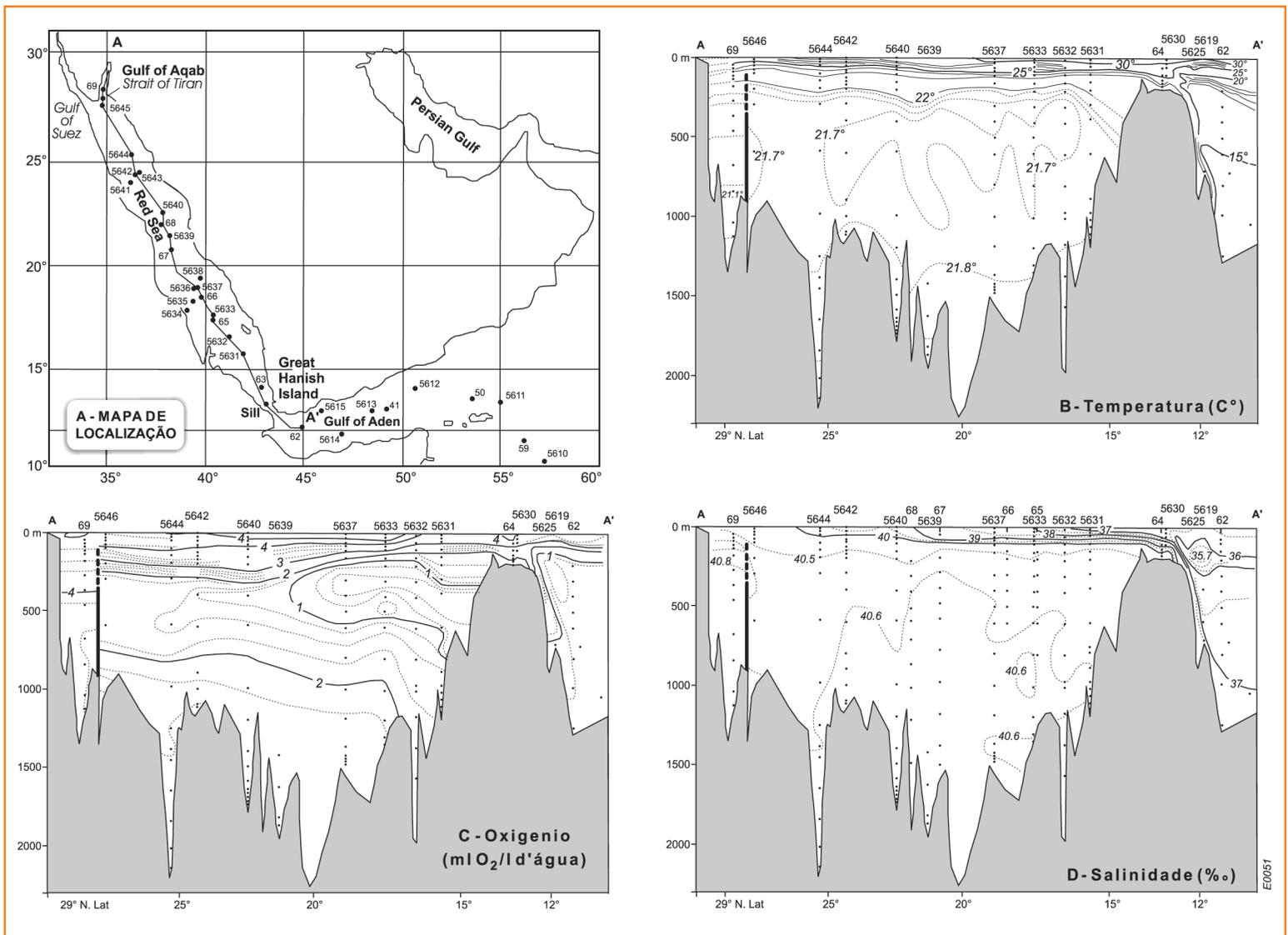


Figura 2

Perfis longitudinais ao Mar Vermelho (A) construídos por Neumann e McGill (1962), mostrando o comportamento das variáveis temperatura (B), oxigênio (C) e salinidade (D) (modificado de Neumann e McGill, 1962).

Figure 2

Map of the Red Sea (A) and longitudinal sections showing the temperature (B); the oxygen content (C); the salinity (D) of the waters (modified from Neumann and McGill, 1962).

Sul com dimensões similares e posicionamento hemisférico especular com relação ao Mar Vermelho (12°30' a 30°N).

Difere entre eles a posição da zona de acreção magmática, com a crosta oceânica no Atlântico Sul tendo se inserido de modo assimétrico na crosta continental estirada (Szatmari *et al.* 1984). Como consequência, a fisiografia das margens continentais se desenvolveu de modo diferenciado em função da distância do eixo de criação de crosta oceânica. Plataformas mais largas, apropriadas ao desenvolvimento de rampas carbonáticas, formaram-se em regiões submetidas a grande estiramento de crosta continental, como nas bacias de Santos e Campos, inseridas no Platô de São Paulo. Em compensação, a contraparte afri-

cana, a Bacia de Angola, registrava um sistema plataforma-talude bem mais estreito e com gradientes maiores.

Apesar das dissimetrias entre as margens do Atlântico Sul, não se justifica imaginar que as profundidades no Albiano fossem muito diferentes daquelas constatadas hoje no Mar Vermelho (fig. 2). Indicações paleobatimétricas obtidas em poços do DSDP (Magniez-Jannin e Muller, 1987) sugerem uma subsidência progressiva, levando a condições do batial superior a médio (200 m a 1 000 m) no final do Albiano. É razoável, portanto, imaginar que, ao longo da zona axial, as batimetrias pudessem alcançar os 3 000 m.

Outra afinidade na geo-história do Mar Vermelho e do Atlântico Sul está no fato de ambos terem

seus limites meridionais alinhados a duas das mais expressivas manifestações vulcânicas ocorridas no planeta durante o Fanerozóico. O cenário de soerguimento e vulcanismo em crosta continental, influenciado por pluma mantélica sob a região sul do Mar Vermelho (Chazot *et al.* 1998), se ajusta adequadamente à fase inicial do esquema genético evolutivo do rifte sul-atlântico sugerido por Estrella (1972) e reafirmado em artigos mais recentes que tratam do assunto (Standlee *et al.* 1996, e Thomaz-Filho *et al.* 2000).

As manifestações vulcânicas próximas ao limite meridional do Mar Vermelho contribuíram para a formação do alto estrutural que o separa do Golfo de Aden. Esta barreira submarina se ergue por mais de 1 000 m, fazendo com que o seu topo se encontre a 136 m abaixo do atual nível do mar (fig. 2). A largura limitada do Estreito de Bab-el-Mandab (36 km) e a batimetria rasa imposta por este alto estrutural levou a interrupções efêmeras no trânsito de águas durante os períodos glaciais do Quaternário. Demonstra-se, com este exemplo, a possibilidade de obstrução à circulação de água num mar restrito, encaixado em um sistema rifte, por barreiras localizadas no lado submetido a maior estiramento crustal.

A formação de um alto estrutural E-W ligando a África e América do Sul, restritivo à circulação de água vinda do sul, pode ser explicada também utilizando modelo termodinâmico evolutivo para margens transformantes (Bouillin *et al.* 1997). Em falhas ativas deste tipo, a fricção promovida entre crostas continentais produz um aquecimento que facilita o afinamento do bloco submetido a maiores tensões. O contato com uma contraparte menos estirada define um abrupto desnível entre ambas, com o abatimento da primeira em relação à última. No caso interpretado, a futura margem africana ao sul do Lineamento de Florianópolis representou a placa submetida inicialmente a maior aquecimento, e, portanto, a que sofreu abatimento relativamente à placa sul-americana, ao norte. A evolução do processo, modificando a posição relativa do centro de acreção de crosta oceânica, determina alterações batimétricas entre os blocos, ocorrendo falhamentos e/ou soerguimentos na crosta continental a depender dos contrastes reológicos das unidades litológicas faceadas.

Outra evidência indireta que reforça a tese sobre a hipotética barreira associada ao Lineamento de Florianópolis está na datação em $113,2 \pm 1$ Ma de um traquiandesito do poço 1-SCS-2, localizado no Alto de Florianópolis (Mizusaki, *apud* Dias *et al.* 1994). O resultado mostra que havia manifestação vulcânica na borda ocidental do lineamento ao final do Aptiano, permitindo pressupor um ajuste isostático contribuindo na obstrução da circulação marinha.

cenário paleogeográfico e paleoclimático

Do ponto de vista do cenário climático global, o mesocretáceo é visto, tradicionalmente, como um período de clima quente, desprovido de calotas polares permanentes, com menores gradientes de temperatura entre os pólos e o Equador (Barron, 1983). No entanto, Frakes *et al.* (1992), sintetizando estudos mais recentes, propuseram um modo frio² iniciado no Neojurássico e concluído no mesocretáceo, com a transição para condições climáticas mais quentes entre o Aptiano e o Albiano.

Em detalhamento da evolução climática do mesocretáceo, Chumakov *et al.* (1995) reafirmaram a idéia de que o período Aptiano/Albiano foi desprovido de coberturas glaciais permanentes (fig. 3). Para estes autores, as evidências de depósitos glácio-marinhos em altas latitudes representariam breves fases de resfriamento, próprio de um clima temperado em altas latitudes (60° a 90°). Somam-se à tese as indicações de paleotemperaturas da ordem de 5°C a 10°C, segundo resultados de análise de isótopos de oxigênio em conchas de moluscos da Ilha de Ross, Península Antártica (Ditchfield *et al.* 1994) e de Spicer *et al.* (1993) para a região do Alasca, com base em premissas uniformitaristas baseadas no tipo de vegetação.

Com relação às latitudes intermediárias (30° e 60°), Chumakov e colaboradores apontam um clima quente e com umidade variada. Particularmente em relação ao Hemisfério Sul, destacam o fato deste cinturão climático ser mais estreito, com indicações de aridez ao norte da paleolatidade 45°S. A

² Frakes *et al.* (1992) cunharam os termos "modo quente" e "modo frio" em substituição a *greenhouse* e *icehouse* propostos por Fischer (1982). Embora afirmem que o sentido é similar, o termo "modo" tem significado temporal mais restrito.

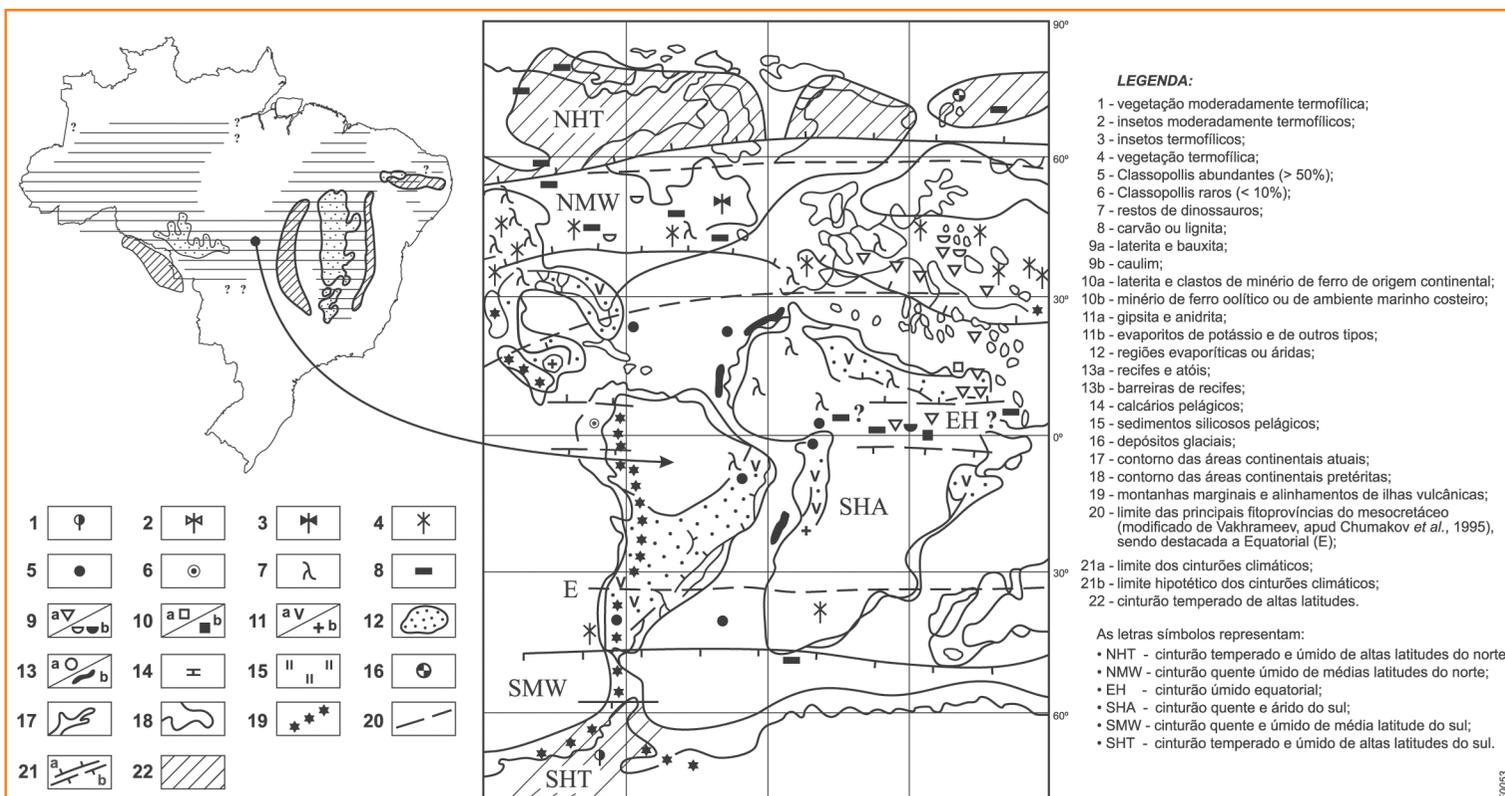


Figura 3 - Reconstituição paleogeográfica e paleoclimática para o Albiano proposta por Chumakov *et al.* (1995). No detalhe à esquerda, é apresentada a área de possível ocorrência do mar interior mesocretáceo no Brasil e a sua relação com as ocorrências atuais das chapadas cretácicas (Arai, 1999).

Figure 3 - Paleogeographic reconstruction and paleoclimate for the Albian proposed by Chumakov *et al.* (1995). The detail on the left shows the possible area in which there occurred mesocretaceous interior seas in Brazil, and the relationship of these to the present Cretaceous tablelands (Arai, 1999).

vasta área planetária compreendida entre esta latitude e a próxima dos 40°N definiria o cinturão árido ou tropical-equatorial, no Albiano (fig. 3). Não obstante, esses autores apontam particularidades relevantes, como a existência de segmentos de um cinturão úmido equatorial no nordeste da África e no noroeste do América do Sul. Na América do Sul a evidência dessa condição mais úmida é dada pela diversificação do espectro polínico e pela redução no número de *Classopollis*. A abundância desse gênero sugere condições climáticas quentes e secas, em áreas baixas e não muito distantes da costa (Srivastava, 1976).

O mapa construído por Chumakov *et al.* (1995) registra a presença de sedimentos de ambientes áridos por uma extensa faixa de direção NE/SW, acompanhando basicamente a margem da América do Sul. No lado africano, os depósitos similares são indicados numa área restrita do Gabão à Nigéria. Apesar das incertezas envolvendo esta interpretação, chama atenção a ausência de registros de sedimentos acumulados neste ambiente deposicional em boa

parte do Brasil central e norte. Essa particularidade não teria relevância não fosse o arranjo complementar que estabelece com o mapa construído por Arai (1999), que indica a distribuição aproximada do mar intracontinental que ocupou boa parte do interior brasileiro no mesocretáceo (detalhe na figura 2). A corroborar a hipótese há o fato da área desértica indicada por Chumakov e colaboradores na América do Sul registrar a presença do gênero *Classopollis*, um pólen oriundo de vegetação que tem afinidade com zonas costeiras.

Desenha-se, assim, um Atlântico Sul subdividido nos mares restritos ASC e ASM, localizados ao norte e ao sul da barreira formada pelo Alto de Florianópolis/Dorsal de São Paulo, posicionada em torno do limite sul do cinturão quente e árido do Sul (fig. 4). Por sua vez, o mar ao sul deste alto, que se estendia até o Platô das Malvinas, estaria submetido à transição do clima árido e quente ao norte para um pouco mais frio e úmido ao sul. Compondo o cenário para o Albiano, havia a interligação dos oceanos Atlântico

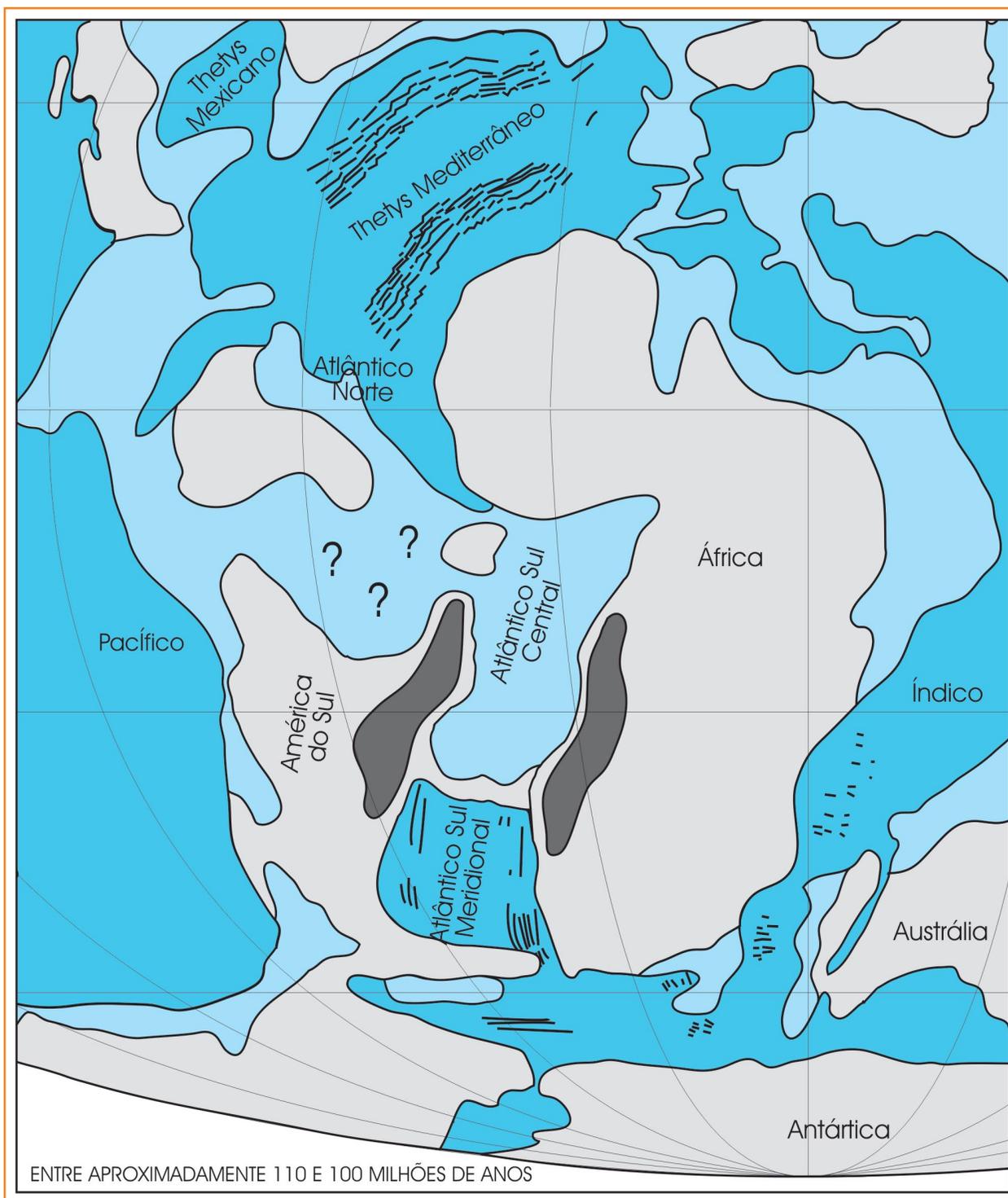


Figura 4 - Reconstituição paleogeográfica para o Albiano proposta neste trabalho, adotando como mapa-base o de Hay et al. (1999). Em cor cinza, as áreas continentais; em azul-claro os mares rasos intra- ou epicontinentais; em azul-escuro os oceanos ou mares mais profundos; em cinza-escuro as montanhas em torno do Atlântico Sul Central.

Figure 4 - Paleogeographic reconstruction for the Albian resulting from this study, adopting the Hay et al. (1999) base map. The grey colour indicates the continental areas; the intracontinental or epicontinental seas in light blue; the oceans or deeper seas in dark blue; the mountains around the South Central Atlantic in dark grey.

Norte e ASC, e destes com um mar intracontinental sobre vastas regiões do interior do Brasil e conexão com o Pacífico. Cadeias de montanhas limitavam as bordas meridionais do ASC, a partir do Alto de Florianópolis / Dorsal de São Paulo, com o relevo atenuando para o norte. A Bacia do Paraná permanecia emersa à época, mas com subsidência suficiente para receber e preservar sedimentos continentais.

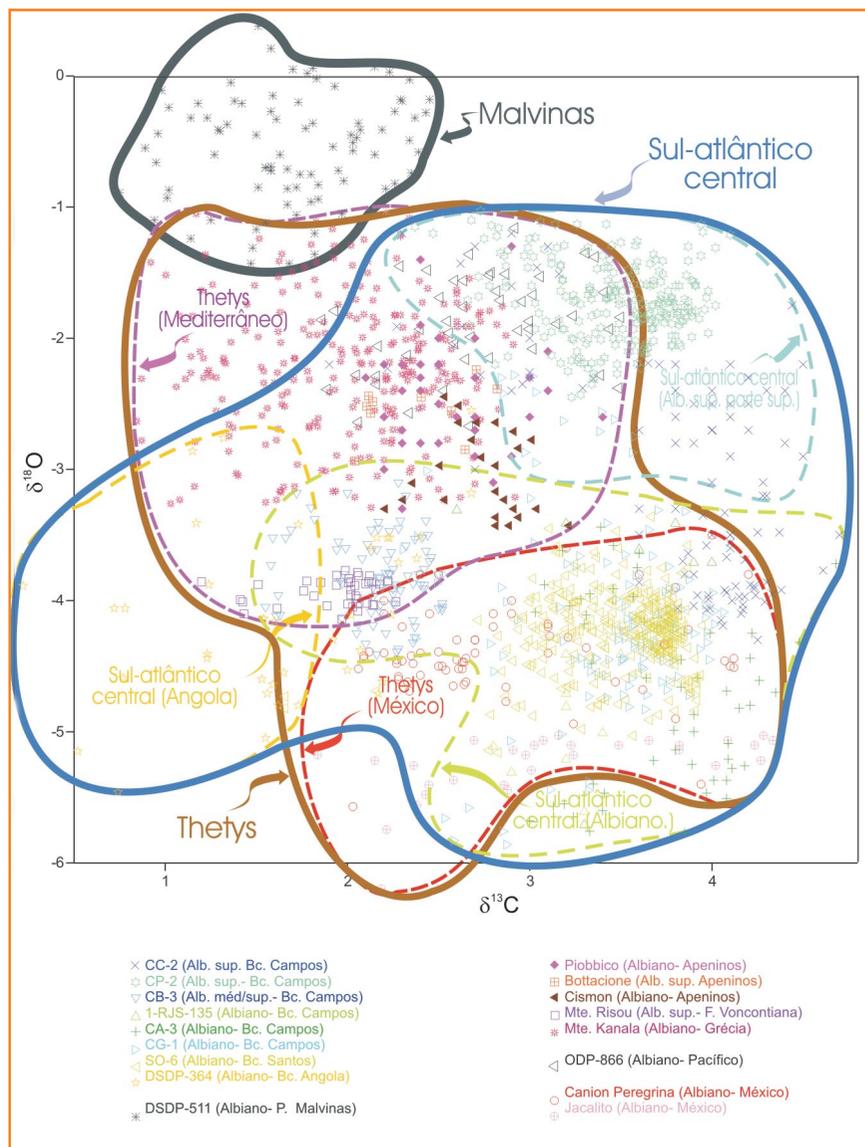
O domínio de áreas cobertas por mar equatorial com massas continentais mais ao sul permitiria imaginar a presença de monções similares às que atingem atualmente o Mar Vermelho. No entanto, o reduzido contraste climático entre os pólos e o Equador, indicado para o mesocretáceo, reduz a possibilidade de que houvesse fortes alte-

rações sazonais no padrão dos ventos nas baixas latitudes. O cenário mais factível está em admitir a existência de uma zona de baixa pressão atmosférica, decorrente da convergência do giro anti-horário no Hemisfério Sul e do giro horário no Hemisfério Norte. Esta zona de convergência intratropical transportaria a umidade necessária para oeste, favorecendo o desenvolvimento do clima equatorial úmido na porção ocidental da América do Sul e na região equatorial do leste da África, destino dos ventos leste originários da interseção dos paleoceanos Índico e Mar Tethys.

Imagina-se, também, que a condição planetária mais quente induziu o deslocamento da zona de alta pressão entre as células atmosféricas de Hadley e Ferrel para latitudes além dos 40° atuais. No modelo paleogeográfico adotado, esta região formadora de ventos ficaria um pouco ao sul da barreira do Alto de Florianópolis/Dorsal de São Paulo, justificando a condição climática árida na porção centro-sul do continente sul-americano.

Figura 5
Distribuição dos valores isotópicos, das diferentes seções trabalhadas, em diagrama $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$.

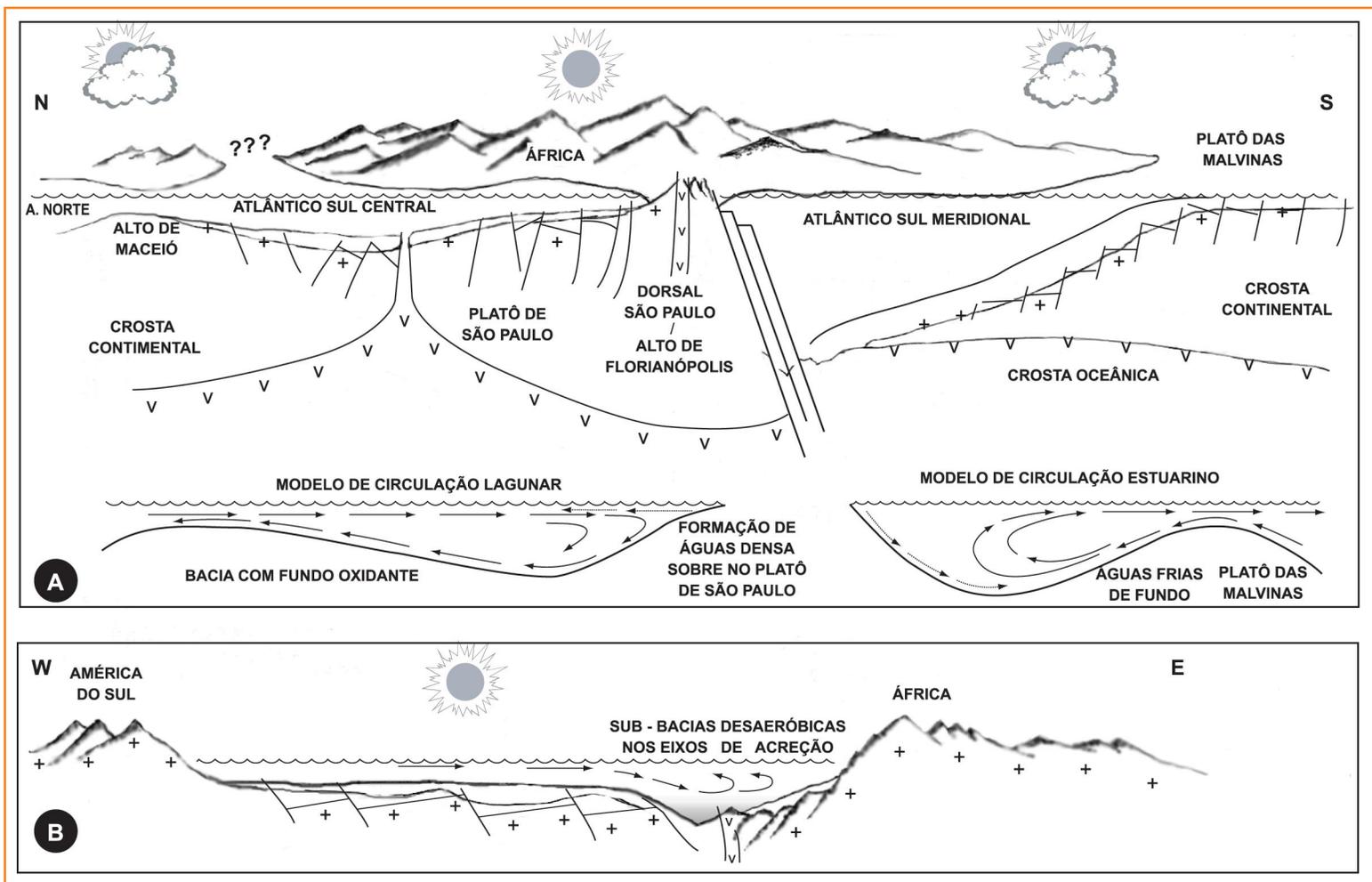
Figure 5
Distribution of isotope values $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ in the different sections studied.



cenário paleoceanográfico

Azevedo (2001), apoiado em inventário de dados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$, de carbonatos de várias partes do mundo (fig. 5), concluiu que, durante um longo período do Albiano, as águas do Atlântico Sul, ao norte da barreira formada pelo Alto de Florianópolis/Dorsal de São Paulo, eram mais quentes que as do Mar Tethys mediterrâneo e as que banhavam o Platô das Malvinas. Estes e outros dados e interpretações já comentadas o levaram a propor modelos diferentes de circulação para os mares restritos ASC e ASM no Albiano (fig. 6).

A tese de um mar restrito para o ASM fundamenta-se, primeiramente, na limitação paleogeográfica indicada para o extremo meridional do Atlântico Sul, devido à projeção latitudinal do Platô das Malvinas para leste (Hay *et al.* 1999). Neste mar imperava o balanço hídrico positivo, a julgar pelo modelo paleoclimático de Chumakov *et al.* (1995) e pelo expressivo volume de siliciclásticos pelíticos amostrados por poços do DSDP perfurados nessa região (Magniez-Jannin e Muller, 1987).



Por sua vez, a assembléia de foraminíferos do Albiano, recuperada no Platô das Malvinas, exibe forte vínculo com a Biogeoprovíncia Austral, característica de águas frias (Basov e Krasherininnkov, 1983). A idéia do ingresso intermitente de águas vindas do norte, que tivessem transposto o Alto de Florianópolis/Dorsal de São Paulo (seta segmentada no modelo de circulação do ASM, na figura 6), se baseia na ocorrência de algumas formas do Atlântico Norte, que também são encontradas no ASC. Por outro lado, a variação na diversidade dos foraminíferos planctônicos ao longo da seção indica flutuações climáticas durante o Albiano.

As medidas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ levantadas por Fassell e Bralower (1999), em carapaças de foraminíferos bentônicos e planctônicos, permitiram sugerir um contraste de temperatura da ordem de 5°C entre o fundo e a superfície marinha no ASM. Apesar de bem mais diminuta do que as

atuais, interpreta-se que essa diferença térmica tenha estimulado a circulação de fundo, com massas d'água mais frias, formadas no Platô das Malvinas, deslocando-se para o norte. Como o modelo paleofisiográfico desse mar restrito sugere um aprofundamento no mesmo sentido, é provável que estas águas mais oxigenadas tenham limitado a condição de preservação da matéria orgânica em boa parte do piso marinho. Os valores de COT, inferiores a 0,2% na seção albiana do DSDP-511 (Azevedo, 2001), comprovam a condição oxidante das águas de fundo.

Com relação ao padrão de circulação do ASC, o modelo geral admitido é o lagunar (fig. 6). A conclusão fundamenta-se em evidências paleontológicas, no clima árido da região e na sua forma de golfo, com obstrução à circulação em latitudes mais altas e abertura para o Mar Tethys, próxima à zona equatorial. As ombreiras marginais elevadas ampli-

Figura 6

Modelo esquemático das fisiografias e padrões de circulação dos mares Atlântico Sul Central e Atlântico Sul Meridional no eo-/meso-albiano (A). Em (B), a interpretação em uma seção transversal, estendendo-se da Bacia de Santos à de Angola.

Figure 6

Model of the physiography and circulation patterns of the Central South Atlantic and Southern South Atlantic seas in the Early-Middle-Albian (A); An interpretation of a cross section extending from the Santos basin to Angola (B).

ficaram a intensidade do balanço hídrico negativo para o ASC. O modelo não entra em conflito com a idéia de trocas efêmeras de massa d'água com o ASM antes da conexão definitiva.

As evidências paleontológicas e sedimentológicas oferecem os melhores argumentos para suportar a hipótese da conexão entre o ASC e o Atlântico Norte no Albiano, e do padrão de circulação lagunar com uma barreira ao sul. É bom lembrar que a idade atribuída à conexão entre os dois mares suscitava controvérsia até recentemente, como mostrou a retrospectiva histórica feita por Dias-Brito (1982). As opiniões sobre a superação da barreira ligando o Nordeste do Brasil à Nigéria/Camarões eram tão díspares ao ponto de posicioná-la desde o neo-aptiano (Widmann e Neugebauer, 1978) ao pós-maastrichtiano (Rand e Mabesoone, *apud* Dias-Brito, 1982).

Estudando as assembléias de foraminíferos e amonóides do Aptiano e Albiano da Bacia de Sergipe, Bengtson e Koutsoukos (1992) e Koutsoukos (1992) mostraram a clara afinidade destes grupos com aqueles presentes nas regiões tetianas de baixa latitude. Um aspecto destacado no segundo artigo foi a presença da fauna de foraminíferos do "tipo *flysch*", indicativa de ambientes nerítico profundo a batial superior, em sedimentos do Aptiano superior ao Albiano superior, comprovando a existência de batimetrias elevadas no Nordeste no Brasil, contemporâneas à deposição dos evaporitos.

Dias-Brito (1985a e 1985b), ao investigar a presença de pitonelidos em carbonatos finos do Albiano das bacias de Campos e Potiguar, concluiu que, desde o eo/meso-albiano o ASC e o Mar Tethys já estariam conectados. Segundo ele, no neo-albiano teria ocorrido uma intensificação do contato entre os dois mares, dessalinizando e normalizando as águas até então hipersalinas no Atlântico Sul. Estes argumentos foram reforçados em detalhada investigação dos pitonelidos ao longo da margem continental sul-atlântica e pela comparação com sua distribuição por outras regiões do planeta, o que levou Dias-Brito (1995) a concluir pela extensão das águas tetianas ao ASC a partir da deposição dos evaporitos aptianos.

A ausência de rudistas, corais e orbitolinidos, particularidades que faziam o Atlântico Sul ser visto, classicamente, como de domínio temperado (Kauffman, 1973; Gordon, 1973; Scheibnerová, 1978, entre outros), teve origem, principalmente, na escassez de nutrientes (Azevedo, 2001) e nos elevados índices de salinidade e temperatura que limitavam a solubilidade de O₂ (Dias-Brito, 1982 e 1995; Rodrigues e Takaki, 1987; entre outros). O fato das bacias de Sergipe e Potiguar apresentarem uma diversidade faunística e florística maior, ocorrendo alguns biolitos algálicos a solenoporáceas e raríssimos rudistas e orbitolinidos (Granier *et al. apud* Dias-Brito, 1995; Koutsoukos, 1992; Terra e Lemos, 1999), indicam que as águas destas regiões se encontravam em condições de temperatura e salinidade menos inóspitas, ainda que estressantes. Provavelmente, no extremo norte do ASC a oferta de nutrientes era menos crítica, acompanhando o padrão observado atualmente no sul do Mar Vermelho junto à abertura para o Golfo de Aden, onde a maior oferta desses insumos induz a um expressivo aumento na produtividade primária e a diversidade florística e faunística.

Os sedimentos pelágicos albianos da ampla área formada pelas bacias de Campos e Santos são *calcimudstones* e *wackstones*, fortemente litificados, pobres em macrofósseis e conteúdo planctônico dominado por pitonelidos, nanoconídeos, calpionelidos, radiolários, espícula de esponja e foraminíferos, com grande similaridade aos coevos do Golfo do México (Dias-Brito, 1994; 1995). Esta interpretação, ratificada na equivalência dos resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$, confirma a condição restritiva destes mares, submetidos a balanço hídrico negativo, que levaram a sua ocupação por espécies oportunistas, oligotróficas, tolerantes à salinidade e a águas quentes (Azevedo, 2001). A escassez de nutrientes do ASC se evidencia pela presença em grande número de nanoconídeos e pitonelidos, produtos biossinterizados por algas que respondem com encistamento à redução de insumos no meio marinho (Busson e Noël, 1991, Zonneveld *et al.* 2000). Simulações feitas por Crowley (1991) para as temperaturas das águas marinhas superficiais tropicais no mesocretáceo apontam valores mais elevados em 4 a 5°C, com

relação à amplitude média atual. Já as indicações de salinidade para o Atlântico Sul no mesocretáceo são da ordem de 41‰ (Hay, 1988), enquanto os cálculos de Woo *et al.* (1992) sugerem valores entre 37 e 41‰.

O padrão de circulação lagunar no ASC determinava o ingresso de águas na bacia pelo leito superficial, ocorrendo o enriquecimento progressivo da salinidade por evaporação no seu deslocamento para o interior do mar restrito. A partir de um determinado ponto na bacia, essa massa d'água tornava-se suficientemente densa para iniciar o seu retorno pelo fundo em direção à abertura ao norte, levando consigo nutrientes presentes nessa faixa d'água. Admite-se que a extensa plataforma de Campos e Santos poderia ser o local adequado à formação dessa pluma de águas mais densas, em face de sua condição relativamente rasa e a latitudes favoráveis a um balanço hídrico negativo mais intenso.

As microfácies oncolíticas/oolíticas/peloidais registradas em ambientes mais rasos e de alta energia em estratos eo/meso-albianos, a presença frequente de bioturbações e os teores baixos de COT dos carbonatos acumulados nessa área são evidências das condições hipersalina, quente e oxidante das águas de fundo (Dias-Brito, 1982; Spadini *et al.* 1988; entre outros). Apoiado no modelo atual do Mar Vermelho (fig. 2c), poder-se-ia apontar concentrações de oxigênio entre 2 e 5ml/l de água, descartando o estabelecimento generalizado de condições anóxicas de fundo.

As indicações de eventuais incursões de águas vindas do sul no ASC, durante o eo/meso-albiano, são dadas pela presença de foraminíferos bentônicos endêmicos ligados a Biogeoprovíncia Austral. A hipótese de um ingresso permanente de água, vinda das Malvinas, suscita objeções para explicar a formação do padrão de circulação lagunar numa latitude mais baixa, em frente à região Nordeste brasileira e sua contraparte africana, onde o balanço hídrico tende ao positivo em face da maior pluviosidade. Além do mais, a abertura ao sul tenderia a favorecer uma maior diversidade faunística em bacias como Campos e Santos, fato que não se confirma no registro sedimentar.

evolução do Atlântico Sul no Albiano

As interpretações apresentadas demonstram que a evolução sedimentar no interior do Mar ASC se fez em meio a profundas mudanças paleoceanográficas, sintetizadas em quatro fases principais (fig. 7).

A primeira delas representa o final do ciclo evaporítico que perdurou do Aptiano terminal ao início do Albiano. É caracterizada pela sucessão de evaporitos, dolomitos e carbonatos, que constituíram a primeira plataforma carbonática marinha na região. Sua acumulação ocorreu em meio à estabilidade tectônica, com a dolomitização por "Refluxo por Infiltração" (Terra, 1990), indicando uma relativa contemporaneidade destes sedimentos, formados *pari passu* ao decréscimo progressivo e rápido da salinidade no ASC. Cabe destacar que esta sucessão litológica não se coaduna com a tese do colapso do Alto de Florianópolis/Dorsal de São Paulo logo após o final da deposição evaporítica, no terminal Aptiano (Chang *et al.* 1992, entre outros). Se isto tivesse ocorrido, a menor salinidade da massa d'água vinda do sul induziria a estratificação da coluna d'água por salinidade, criando amplas perspectivas para a formação de uma bacia sapropélica no ASC.

Pulsos de abertura de crosta oceânica segmentada em alguns pontos do ASC induziram, numa segunda fase, ao aumento na taxa de subsidência e à criação de espaço para o crescimento do sistema carbonático, associado a processos de estiramento e compartimentação da cobertura sedimentar sobre o sal. Com isto, a movimentação halocinética ganhou relevância, facilitando o empilhamento de dezenas de ciclos de *shallowing-upward* modulados por variações orbitais durante boa parte do eo/meso-albiano e início do neo-albiano. A fábrica carbonática mantinha intensa produção na margem sudeste do Brasil, onde as taxas de acumulações chegam a 55 cm/ka, aproveitando a fisiografia em rampa determinada pela presença contígua do Platô de São Paulo. A margem angolana, por ter fisiografia bem mais estreita, teve um empilhamento mais limitado no período (Coward *et al.* 1999).

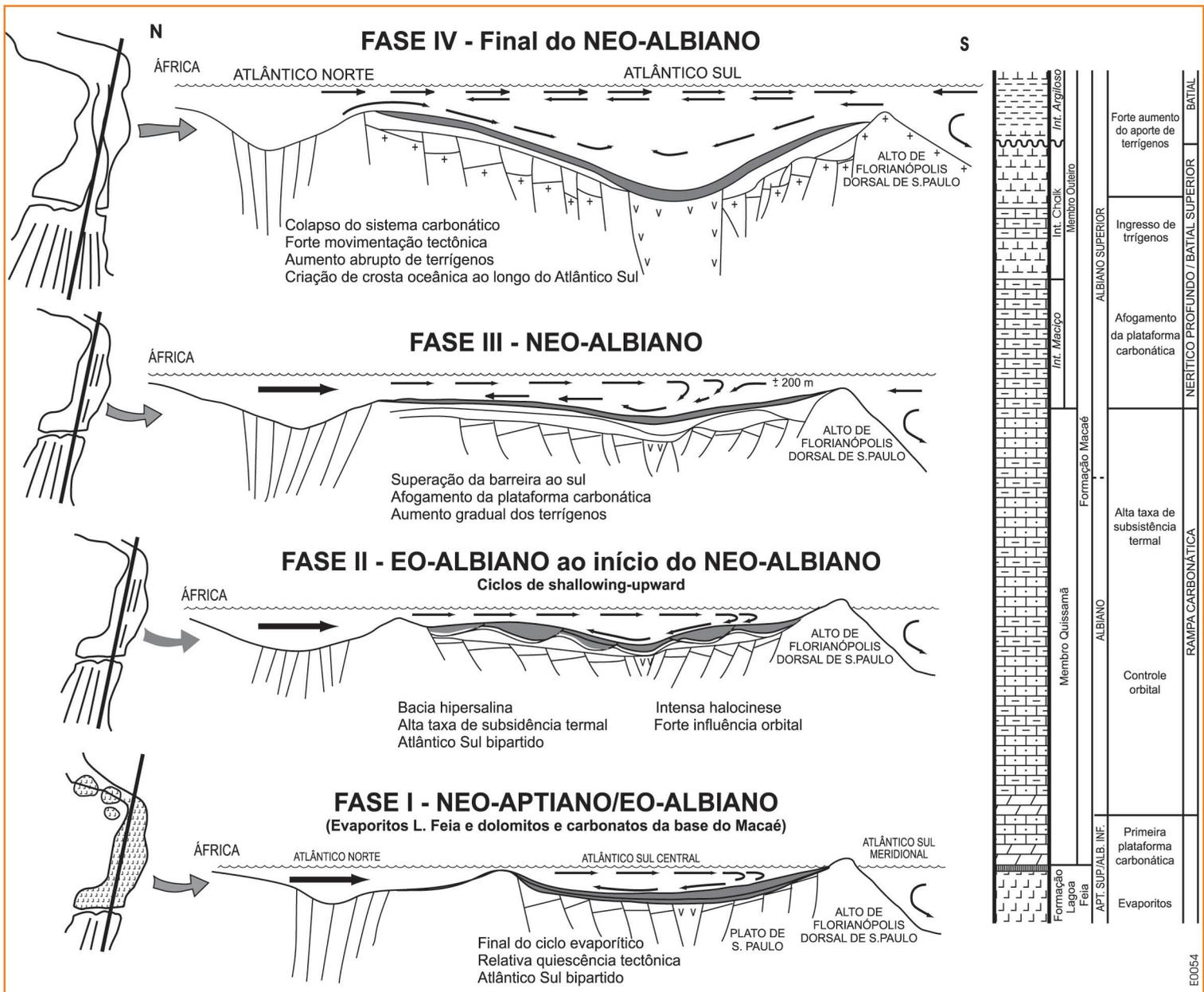


Figura 7 - Modelo esquemático evolutivo do Atlântico Sul no Albiano e sedimentação associada.

Figure 7 - Model showing the evolution of the South Atlantic and associated sedimentation during the Albian.

No neo-albiano, pelo menos dois eventos importantes impuseram drásticas mudanças no registro sedimentar. O primeiro deles marca a conexão definitiva do ASC e o ASM. O segundo é caracterizado pela ampliação substancial do aporte de siliciclastos, seguido por um evento erosivo que atingiu amplas regiões do planeta.

A conexão do ASC com o mar que recobria as Malvinas se processou em meio a um resfriamento global de segunda ordem, iniciado e concluído no neo-albiano. O evento tem equivalência em tem-

po à passagem do Superciclo UZA-1 para UZA-2, na curva "global" de Haq *et al.* (1988) e de outros limites de seqüências reconhecidos em outros locais do planeta (Azevedo, 2001). Essa equivalência em tempo permite supor que o evento tenha sua origem vinculada a um fenômeno tectônico de maior magnitude, cujo reflexo no Atlântico Sul foi o de permitir abatimento parcial da Dorsal de São Paulo/Alto de Florianópolis.

O ingresso de águas do sul é comprovado pelos incrementos de valores de $\delta^{18}\text{O}$ e menores de $\delta^{13}\text{C}$

comparativamente àqueles observados em seções coevas tetianas (fig. 5). No curso desse processo se insere o afogamento responsável pela deposição dos calcilitos a planctônicos que marcam a base do Membro Outeiro, na Bacia de Campos e na Formação Itanhaém, na Bacia de Santos. O evento ocorreu sem inviabilizar o sistema carbonático que continuava a registrar variações de mais altas frequências, induzidas por variações orbitais, mesmo após o episódio de afogamento.

Ao final do Albiano ocorreu uma outra importante mudança no sistema marinho sul-atlântico central, representado pelo incremento no aporte de siliciclastos à bacia e por uma maior instabilidade da plataforma carbonática, manifestada na presença de depósitos de fluxo de detritos, como o Arenito Namorado, na Bacia de Campos. Interpreta-se que, nesse período, houve a ruptura física e o abatimento de toda a crosta continental que ligava, até então, os continentes sul-americano e africano, incluindo a barreira Alto de Florianópolis/Dorsal de São Paulo. Também este episódio parece ter origem tectônica e dimensão planetária, posto que se equivale em tempo a discordâncias em diversas partes do mundo, estando posicionado em torno do limite de seqüência de terceira ordem UZA-2.2.3, da curva “global” de Haq *et al.* (1988).

Acompanhando a sugestão de Arai (1999), pode-se imaginar que o processo de recuo do nível marinho deu início à transferência de sedimentos acumulados no mar intracontinental do interior do Brasil para o ASC ao final do Albiano. As mudanças fisiográficas e a disponibilidade de sedimentos oferecidos à bacia pelo evento tectônico e erosivo garantiram a ampliação do aporte de argilas e justificam o domínio de margas e folhelhos nos estratos cenomanianos.

Obviamente, além dos sedimentos, a queda relativa do nível do mar carregou também nutrientes para o ASC. Estes insumos, acrescidos do fato da circulação ter sido alterada substancialmente com a implantação de crosta oceânica ao longo de toda a extensão do ASC, acabaram servindo de estímulo a um aumento na produtividade, expresso no incremento de $\delta^{13}\text{C}$ ao final desse tempo (fig. 5).

A abertura proporcionada pelo evento tectônico de expansão oceânica propiciou aumento da umidade sobre os continentes africano e sul-americano, estimulando alterações nos padrões florísticos e no intemperismo químico a partir do Cenomaniano (Dias-Brito, 1982; Rodrigues e Takaki, 1987). Outro aspecto relevante foi a efetivação da conexão do Mar Tethys ao Índico, circundando a África, fato que contribuiu para as importantes mudanças faunísticas que marcam a passagem do Eocretáceo para o Neocretáceo (Koutsoukos, 1992; Fischer e Arthur, 1977).

conclusões

Analogias com o Mar Vermelho e evidências estratigráficas, tectono-sedimentares, paleoceanográficas, geoquímicas e paleontológicas, consolidadas a partir de informações da literatura, reforçam a tese da bipartição do Atlântico Sul no Albiano e o vínculo principal ao Mar Tethys da massa d'água do seu segmento setentrional: o (ASC), mar limitado pela barreira do Alto de Florianópolis/Dorsal de São Paulo e o Lineamento de Maceió.

O modelo geodinâmico clássico de abertura do Atlântico Sul, via rotação das placas sul-americana e africana no sul e transcorrência no norte, não obriga, necessariamente, o estabelecimento de conexões marinhas com o sul. A formação de um alto estrutural E-W, ligando a África e América do Sul, sustenta-se não só no exemplo do Mar Vermelho como também em modelo termodinâmico evolutivo desenvolvido para margens transformantes, amplificado pela presença de vulcanismos no Alto de Florianópolis ao final do Aptiano.

A analogia com o Mar Vermelho auxilia sobremaneira nas reconstruções paleoclimáticas do ASC, a começar por considerá-lo um mar totalmente inserido dentro do cinturão climático árido. Este fato favorece a tese do ASC apresentar um balanço hídrico negativo. A causa desse balanço seria o ingresso de águas pelo extremo norte, o aquecimento e a elevação da salinidade dessa água no seu deslocamento para o sul. Sua orientação latitudinal, a forma alongada e estreita, com cer-

ca de 2 400 km de extensão e 400 km de largura, e as ombreiras marginais altas no seu extremo sul favoreceriam a drenagem para fora da bacia e a formação de águas mais densas no seu extremo sul, provavelmente na plataforma desenvolvida sobre o Platô de São Paulo. O retorno desta água pelo fundo marinho, alcançando profundidades batiais, completaria o ciclo hidrológico.

Para o ASM, o padrão de circulação dominante foi o estuarino. Estudos prévios, baseados em isótopos de oxigênio, indicam que as águas que banhavam as Malvinas, no Albiano, eram relativamente mais frias e com salinidades mais baixas. Considera-se, portanto, que o ingresso de águas com estas características no ASC tenderia a provocar a estratificação desse mar, levando à formação de uma bacia sapropélica, o que definitivamente não condiz com o registro sedimentar observado.

As conclusões relacionadas à paleoceanografia do Atlântico Sul têm sustentação estratigráfica baseada na apreciação integrada de um vasto acervo de informações geoquímicas, geofísicas, sedimentológicas e paleontológicas. O Andar Albiano, na margem sudeste do Brasil, registra uma plataforma carbonática espessa, com arranjo estratal decorrente da combinação de mecanismos aleatórios de caráter global ou local, e outros rítmicos, fortemente influenciados por fenômenos orbitais. As condições ambientais mantiveram-se ideais para a pujança da fábrica carbonática até um pouco antes do final do Albiano.

A evolução sedimentar no ASC se fez em meio a profundas mudanças paleoceanográficas, sintetizadas em quatro fases principais. A mais antiga representa o final do ciclo evaporítico e a primeira plataforma carbonática, tendo perdurado do Aptiano terminal ao início do Albiano. Pulsos de abertura de crosta oceânica segmentada em alguns pontos do ASC induziram, numa segunda fase, à movimentação halocinética, facilitando o empilhamento de dezenas de ciclos de *shallowing-upward*, modulados por variações orbitais durante boa parte do eo/meso-albiano e início do neo-albiano. As duas fases mais tardias representam o afogamento do sistema

carbonático por águas vindas do sul e a ampliação substancial do aporte de siliciclastos, seguido por um evento erosivo que atingiu amplas regiões do planeta. Este último evento interrompeu definitivamente o sistema carbonático no Atlântico Sul.

agradecimentos

À Petrobras, por ter autorizado a publicação deste trabalho e de grande parte das pesquisas que o suporta, aos revisores e aos colegas que ofereceram contribuições ao texto e na confecção das figuras.

referências bibliográficas

ARAI, M. A transgressão marinha mesocretácea: sua implicação no paradigma da reconstituição paleogeográfica do Cretáceo no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCEAS DO BRASIL, 5.; SIMPÓSIO SOBRE EL CRETÁCICO DE AMÉRICA DEL SUR, 1., 1999. **Boletim do...** Rio Claro: UNESP, 1999. p. 577-582.

ASMUS, H. E.; GUAZELLI, W. Descrição sumária das estruturas da margem continental brasileira e das áreas oceânicas e continentais adjacentes: hipótese sobre o tectonismo causador e implicações para os prognósticos do potencial de recursos minerais. In: _____. **Projeto REMAC:** estruturas e tectonismo da margem continental brasileira, e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1981. p. 187-269. (Série Projeto REMAC, 9).

_____; PORTO, R. Classificação das bacias sedimentares segundo a tectônica de placas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1972. v. 2, p. 67-90.

AZEVEDO, R. L. M. **O Albiano no Atlântico Sul:** estratigrafia, paleoceanografia e relações globais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 401 p. Tese (Doutorado).

BARRON, E. J. A warm, equable Cretaceous: the nature of the problem. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v. 19, p. 305-338, 1983.

BASOV, I. A.; KRASHENINNIKOV, V. A. Benthic foraminifers in Mesozoic and Cenozoic sediments of the southwestern Atlantic as an indicator of paleoenvironment, Deep Sea Drilling Project, Leg 71. **Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project**, Washington, v. 71, p. 739-788, 1983.

BENGTSON, P.; KOUTSOUKOS, E. A. M. Ammonite and foraminiferal dating of the first marine connection between the Central and South Atlantic. In: CURNELLE, R. (Ed.). **Géologie africaine**. Boussene: Elf-Aquitaine, 1992. Compte-rendu des Colloques de géologie de Lebrville, 6-8 mai 1991.

BOUILLIN, J. P.; POUOEAU, G.; LABRIN, E.; BASILE, C.; SABIL, N.; MASCLE, J.; MASCLE, G.; GILLOT, F.; RIOU, L. Fission track study: heating and denudation of marginal ridge of the Ivory Coast-Ghana transform margin. **Geo-Marine Letters**, Tokyo, v. 17, p. 55-61, 1997.

BUSSON, G.; NOË, D. Les nannoconidés, indicateur environnementaux des océans et mers épicontinentales du Jurassique terminal e du Crétacé inférieur. **Oceanologica Acta**, [S.l.], v. 14, n. 4, p. 333-356, 1991.

CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F.; BENDER, A. A. Tectonic and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 213, n. 1-2, p. 97-138, 1992.

CHAZOT, G.; MENZIES, M. A.; BAKER, J. Pre-, syn- and pos-rift volcanism on the south-western margin of the Arabian plate. In: PURSE, B. H.; BOSENCE, D. W. J. (Ed.). **Sedimentation and tectonics of the rift basin: Red Sea Gulf of Aden**. Londres: Chapman & Hall, 1998. p. 50-55.

CHUMAKOV, N. M.; ZHARKOV, M. A.; HERMAN, A. B.; DULUDENKO, M. P.; KALANDADZE, N. N.; LEBEDEV, E. L.; PONOMARENKO, A. G.; RAUTIAN, A. S. Climatic belts of the Mid-Cretaceous Time. **Stratigraphy and Geological Correlation**, [S.l.], v. 3, n. 3, p. 241-260, 1995.

COWARD, M. P.; PURDY, E. G.; RIES, A. C.; SMITH, D. G. The distribution of petroleum reserves in basin

of the South Atlantic margins. In: CAMERON, N. R.; BATE, R. H.; CLURE, V. S. (Ed.). **The oil and gas habitats of the South Atlantic**. Londres: Geological Society, 1999. p. 101-131. (Geological Society of London. Special publication, 153).

CROWLEY, T.J. Past CO2 changes and tropical sea surface temperatures. **Paleoceanography**, Washington, v. 6, p. 387-394, 1991.

DIAS, J. L.; SAAD, A. R. E.; FONTANA, R. L.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Pelotas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 235-247, 1994.

DIAS-BRITO, D. Evolução paleoecológica da Bacia de Campos durante a deposição dos calcilitos, margas e folhelhos da Formação Macaé (Albiano e Cenomaniano?). **Boletim Técnico da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 84-97, 1982.

_____. Calcisphaerulidae do Albiano da Bacia de Campos, Rio de Janeiro, Brasil. Investigações taxonômicas: biocronoestratigráficas e paleoambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 8., 1983, Rio de Janeiro. **Coletânea...** Brasília, DF: Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral, 1985a p. 295-306. (Geologia, 27; Paleontologia e estratigrafia, 2).

_____. Calcisphaerulidae e microfósseis associados da Formação Ponta do Mel – Bacia Potiguar, Brasil: considerações paleoecológicas e biocronoestratigráficas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 8., 1983, Rio de Janeiro. **Trabalhos apresentados...** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral, 1985b. p. 307-314.

_____. Comparação dos carbonatos pelágicos do cretáceo médio da Margem Atlântica Brasileira com os do Golfo do México: novas evidências do Tethys sul atlântico. In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCEAS DO BRASIL, 3., Rio Claro. **Boletim do...** Rio Claro: UNESP, 1994. p. 11-18.

_____. **Calcisferas e microfácies em rochas carbonáticas pelágicas mesocretáceas**. 1995. 688 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

DITCHFIELD, P.; MARSHALL, J. D.; PIERRE, D. High latitude paleotemperature variation: new data from the Thithonian to Eocene of James Ross Island, Antarctica. **Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology**. Amsterdam, v. 107, p. 79-101. [19—].

ESTRELLA, G. O. O estágio "rift" nas bacias marginais do leste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1972. v. 3, p. 29-34.

FASSELL, M. L.; BRALOWER, T. J.; Warm, equable mid-cretaceous: stable isotope evidence. In: BARRERA, E.; JOHNSON, C. C. (Ed.). **Evolution of the cretaceous ocean-climate system**. Boulder, Colo.: Geological Society of America, 1999. p. 121-142. (Geological Society of America. Special paper, 332).

FISCHER, A. G. Climatic rhythms recorded in strata. **Annual Review Earth Planetary Science**, Palo Alto, v. 14, p. 351-376. 1982.

_____.; ARTHUR, M. A. Secular variations in the pelagic realm. In: COOK, H. E.; ENOS, P. (Ed.). **Deep-water carbonate environments**. Tulsa, Okla.: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1977. p. 19-50. (Geological Society of America. Special paper, 25).

FRAKES, L. A.; FRANCIS, J. E.; SYKTUS, J. I. **Climate modes of the phanerozoic**: the history of the Earth's climate over past 600 millions years. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 274 p.

GALLAGHER, K.; BROWN, R. The Mesozoic denudation history of the Atlantic margins of southern Africa and southeast Brazil and the relationship to the offshore sedimentation. In: CAMERON, N. R.; BATE, R. H.; CLURE, V. S. (Ed.). **The oil and gas habitats of the South Atlantic**. Londres: Geological Society, 1999. (Special publications, 153).

GORDON, W. A. Marine life and ocean surface currents in cretaceous. **Journal of Geology**, Chicago, v. 81, 1973. p. 269-284.

HAQ, B. U.; HARDENBOL, J.; VAIL, P. R. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In: WILGUS, C. K.; HASTINGS, B. S.; KENDALL, C. G. S. C.; POSAMENTIER, H. W.; ROSS,

C. A.; VAN WAGONER, J. C. (Ed.). **Sea-level changes**: an integrated approach. Tulsa, Okla.: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1988. p. 71-108. (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special publications, 42).

HAY, W. W. Paleoceanography: a review from Geological Society of America Bulletin centennial. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 100, 1988. p. 1934-1956.

_____.; DeCONTO, R. M.; WOLD, C. N.; WILSON, K. I.; VOIGT, S.; SCHULZ, M.; WOLD, A. R.; DULLO, W. C.; RONO, A. B.; BALUKHOVSKY, A. N.; SÖDING, E. Alternative global cretaceous paleogeography. In: BARRERA, E.; JOHNSON, C. C. (Ed.). **Evolution of the cretaceous ocean-climate system**. Boulder, Colo.: Geological Society of America, 1999. p. 1-46. (Geological Society of America. Special paper, 332).

KAUFFMAN, E. G. Cretaceous bivalvia. In: HALLAN, A. (Ed.). **Atlas of paleobiogeography**. Amsterdam: Elsevier, 1973. p. 353-358.

KOWSMANN, R. O.; COSTA, M. P. A.; BOA HORA, M. P.; ALMEIDA, H. P.; GUIMARÃES, P. P. Geologia estrutural do Platô de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 4, p. 1558-1569.

KOUTSOUKOS, E. A. M. Late Aptian to Maastrichtian foraminiferal biogeography and paleoceanography of the Sergipe Basin, Brazil. **Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology**, Amsterdam, v. 92, p. 295-324.

KUMAR, N.; GAMBÔA, L. A. P. Evolution of the São Paulo Plateau (southeastern Brazilian margin) and implications for the early history of the South Atlantic. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, Colo., v. 90, part 1, p. 281-1979.

LEYDEN, R. Salt distribution and crustal models for the Eastern Brazil margin. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 48, 1976. p. 159-168. Suplemento.

_____.; ASMUS, H. E.; ZEMBRUSCKI, S. G.; BRYAN, G. M. South Atlantic diapiric structures. **American**

Association of Petroleum Geologists. Bulletin. Tulsa, Okla., v. 60, 1976. p. 196-212.

MACEDO, J. M. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E.J. (eds.). **Origem e evolução de bacias sedimentares.** Rio de Janeiro: PETROBRAS. p. 361-376. 1991.

MAGNIEZ-JANNIN, F.; MULLER, C. Cretaceous stratigraphic and paleoenvironmental data from the South Atlantic (Foraminifers and Nannoplankton). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 100-105, 1987.

NEUMANN, A. C.; MCGILL, D. A. Circulation of the Red Sea in early summer. **Deep-Sea Research**, Oxford, v. 8, p. 223-235, 1962.

PALMA, J. J. C.; FRANÇA, A. M. C.; ZEMBRUSCKI, S. G. **Brasil – Margem continental.** Rio de Janeiro, PETROBRAS. CENPES. DEPRO. REMAC. (Mapa fisiográfico). 1979.

RABINOWITZ, P. D.; LA BRECQUE, J. The Mesozoic South Atlantic Ocean and the evolution of its continental margins. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 84, p. 5973-6002, 1979.

RODRIGUES, R.; TAKAKI, T. O Cretáceo Inferior nas bacias sedimentares da costa sudeste do Brasil: análise isotópica e suas implicações paleoambientais. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, n.2, p. 177-179. 1987.

SCHEIBNEROVÁ, V. Aptian and Albian benthic foraminifers of leg 40, sites 363 and 364, Southern Atlantic. In: BOLLI, H.; RYAN, W. E. F. (Eds.) **Initial reports of the deep sea drilling project.** Washington: U. S. Government Printing Office, 1978. v. 40, p. 741-757. 1978.

SPADINI, A. R.; ESTEVES, F. R.; DIAS-BRITO, D.; AZEVEDO, R. L. M.; RODRIGUES, R. The Macaé Formation, Campos Basin, Brazil: its evolution in the context of the initial history of the South Atlantic. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 261-272. 1988.

SPICER, R. A.; REES, P. Mc. A.; CHAPMAN, J. L. Cretaceous phytogeography and climate signals. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, v. 341, p. 277-286. 1993.

SRIVASTAVA, S. K. The fossil pollen genus *Classopollis*. **Lethaia**, Copenhagen, v. 9, p. 437-457. 1976.

STANDLEE, L. A.; BRUMBAUGH, W. D.; CAMERON, N. R. Controlling factors in the initiation of the South Atlantic rift system. In: JARDINÉ, S.; KLASZ, I.; DEBENAY, J. P. (Eds.) **Géologie de l'Afrique et de l'Atlantique Sud: compte-rendu des colloques de géologie.** Pau: Elf-Aquitaine. 1994. p. 141-152.

SZATMARI, P.; CONCEIÇÃO, J. C.; LANA, M. C.; MILANI, M.; LOBO, A. P. Mecanismo tectônico do riftiamento sul-atlântico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984. p. 1589-1601.

TERRA, G. J. S. 1990. **Fácies, modelo deposicional e diagênese da seqüência carbonática albo-cenomaniana (Formação Ponta do Mel) da Bacia Potiguar.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990. 153 p. Dissertação (Mestrado).

_____; LEMOS, V. B. Algas solenoporáceas do albo-cenomaniano das bacias do nordeste do Brasil- Implicações paleoecológicas e paleobiogeográficas. In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCEAS DO BRASIL, 5.; SIMPÓSIO SOBRE EL CRETÁCICO DE AMÉRICA DEL SUR, 1., 1999, Serra Negra. **Boletim do...** Rio Claro: UNESP, 1999. p. 23-28.

THOMAZ-FILHO, A.; MIZUSAKI, A. M. P.; MILANI, E. J.; CESERO, P. Rifting and magmatism associated with the South America and Africa break up. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 17-19. 2000.

WOO, K. S.; ANDERSON, T. F.; RAILSBACK, L. B.; SANDERBERG, P. A. Oxygen isotope evidence for high-salinity surface sea water in mid-cretaceous Gulf of Mexico: implication for warm, saline deepwater formation. **Paleoceanography**, Washington, v. 7, n. 5, p. 673-685, 1992.

ZONNEVELD, K. A. F.; HÖLL, C.; JANOFKSKE, D.; KARWATH, B.; KERNTOPF, B.; RÜHLEMANN, C.; WILLEMS, H. Calcareous dinoflagellate cyste as paleo-environmental tools. In: FISCHER, G.; WEFER, G. (Ed.). **Use of proxies in paleoceanography: examples from the South Atlantic.** Berlin: Springer, 2000. p. 145-164.

expanded abstract

Present-day analogues from the Red Sea, coupled with stratigraphic, tectono-sedimentary, paleoceanographic, geochemical and paleontological evidence from the literature, support the view that the South Atlantic maintained its bipartitioned condition from latest Aptian to the middle Albian. The lineament comprising the Florianópolis High and São Paulo Ridge formed an effective barrier to sea-water circulation between the Southern South Atlantic (SSA) and Central South Atlantic (CSA) until late Albian times. During that time, the latter communicated mainly with the North Atlantic, which in turn was connected to the Tethys Sea.

The classic geodynamic model of South Atlantic opening, based on the rotation of the South Atlantic and African plates and wrenching in the North, does not necessarily imply the establishment of marine connections to the South. The presence of an E-W structural high linking Africa to South America during early phases of the opening is consistent with the Red Sea example, and also with a thermodynamic evolutive model for transform margins, further enhanced by latest Aptian volcanism on the Florianópolis High.

The analogy with the Red Sea is particularly useful in paleoclimatic reconstructions of the CSA, considering that the latter was likewise located within an arid climatic belt. This favors the hypothesis that the CSA was subject to a negative hydric balance, caused by the inflow of marine waters from the north, and their increased temperature and salinity southwards. Its latitudinal orientation, forming a narrow and elongate basin, ca. 2,400 km long but only 400 km wide, bounded to the south by effective marginal barriers, favored an exorheic condition and the concentration of denser waters in the basin's southernmost part, probably on a shallow platform developed on the São Paulo Plateau. The backflow of hypersaline waters in the form of bottom currents moving into bathyal depths would have completed the hydrological cycle.

In the case of the SSA, an essentially estuarine circulation pattern is inferred. Previous oxygen isotope studies indicate that the Malvinas sea waters were relatively cooler and less saline during the Albian. Most likely, the inflow of marine waters with same characteristics in the CSA would have tended to cause stratification of the water column with subsequent development of a sapropelic basin.

Such a hypothesis is definitely not supported by the sedimentary record.

The present conclusions about the South Atlantic paleoceanography rely on stratigraphic evidence provided by an array of integrated geochemical, geophysical, sedimentological and paleontological data. The Albian record in the southeastern Brazilian continental margin corresponds to thick carbonate platform deposits. Their stratal arrangement results from combined controlling mechanisms, partly random with regional or global extent, partly rhythmic and strongly conditioned by orbital phenomena. Ideal environmental conditions for the operation of this puissant "carbonate factory" lasted almost to the end of Albian times.

The sedimentary evolution in the CSA testified to profound paleoceanographic changes, which can be grouped into four main phases. The oldest of these comprises the end of the evaporitic cycle and onset of the earliest carbonate platform, during the Aptian / Albian transition. In a next phase, pulses of oceanic crust opening, segmented in some regions of the CSA, have triggered halokynetic movements that facilitated the stacking of tens of shallowing-upward cycles, in turn modulated by orbital variations during much of the early – middle Albian and until the early late Albian. The two latest phases document the flooding of the carbonate system by southerly sea waters and a significant increase in the siliciclastic supply, followed by an erosional event of worldwide extent. The latter eventually terminated the carbonate system in the South Atlantic.



Ricardo Latgé Milward de Azevedo

Diretoria de Exploração e Produção

e-mail: ricardolatge@petrobras.com.br

Ingressou na Petrobras em 22/01/1979 para trabalhar na área de bioestratigrafia e paleoecologia do antigo LACEX, em Botafogo, no Rio de Janeiro. Durante doze anos atuou nesta área da Geologia, contribuindo em projetos importantes como o que investigou o potencial petrolífero da Bacia do Espírito Santo, no início da década de 80, que revolucionou a interpretação dos sistemas petrolíferos das bacias marginais brasileiras. Realizou dezenas de comunicações técnicas e liderou projetos que tratavam das sucessões fossilíferas em poços das bacias de Campos, Espírito Santo, Santos, Sergipe e no lêmén do Sul. Em 1991, foi convidado a se transferir para o Setor de Estratigrafia, com o desafio de estender as atividades profissionais a outras áreas da Geologia. Nesta condição, pôde participar de estudos apoiados em estratigrafia de seqüências, em geologia de campo, descrições litofaciológicas, cicloestratigrafia e estratigrafia química. Especializou-se nestas duas últimas áreas, que suportaram os seus projetos de mestrado e doutorado, reconhecidos com louvor. Desde maio de 2003 atua como Assessor da Diretoria de Exploração e Produção da Companhia.

