

CONTROLES LIMNOLÓGICOS SOBRE A FORMAÇÃO DE ROCHAS GERADORAS DE PETRÓLEO LACUSTRES: O EXEMPLO DA BACIA DE CAMAMU, NORDESTE DO BRASIL

Félix Thadeu Teixeira GONÇALVES

Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRÁS), Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, Centro de Excelência em Geoquímica. Cidade Universitária, Quadra 7 – Ilha do Fundão. CEP 21.949-900. Rio de Janeiro, RJ. Endereço atual: Instituto Colombiano do Petróleo (ICP-Ecopetrol). Autopista Piedecuesta km 7. AA 4185 Bucaramanga, Colombia. Fax: 577 644-544. Endereço eletrônico: goncalv@ecopetrol.com.co.

Introdução

Aspectos Geológicos e Físico-Químicos dos Lagos

Acumulação da Matéria Orgânica em Lagos

Características Geoquímicas e Modelos de Formação de Rochas Geradoras Lacustres

Geoquímica Orgânica e Isotópica Aplicada ao Estudo de Rochas Geradoras Lacustres:

o Exemplo da Bacia de Camamu

Sumário da Evolução Tectono-Sedimentar

Discussão dos Dados Geoquímicos, Isotópicos e Moleculares

Modelo Paleolimnológico e Controles sobre a Formação das Rochas Geradoras

Considerações Finais

Agradecimentos

Referências Bibliográficas

RESUMO – Sedimentos ricos em matéria orgânica de origem lacustre são responsáveis por mais de 90% das reservas de petróleo do Brasil. Devido a maior suscetibilidade das bacias lacustres às mudanças ambientais, rochas geradoras de petróleo lacustres tendem a apresentar variações laterais e verticais de fácies e de características geoquímicas mais abruptas do que as mostradas pelas de origem marinha. A produção e a preservação da matéria orgânica nos sistemas lacustres são condicionadas por uma série de fatores, tais como o padrão de estratificação da coluna d'água, salinidade e temperatura, os quais por sua vez dependem da história tectônica, climática e hidrológica da bacia. Como reflexo da complexidade e variedade de ambientes encontrados nas bacias lacustres, diversos modelos de formação de rochas geradoras têm sido propostos nas últimas décadas. A utilização de parâmetros geoquímicos integrados a dados geológicos constitui uma poderosa ferramenta para a reconstrução da evolução paleoambiental dessas bacias. A aplicação desta abordagem na seqüência rifte da Bacia de Camamu (Nordeste do Brasil) permitiu reconhecer a existência de modelos paleolimnológicos distintos para as rochas geradoras das formações Morro do Barro (Idade Rio da Serra) e Rio de Contas (Aratu/Buracica). Enquanto as primeiras se depositaram num lago profundo, meromítico e anóxico, as outras estão relacionadas a uma fase de lago mais raso e amplo e altos níveis de produtividade primária.

Palavras chave : Lago, rifte, geoquímica, petróleo, Bacia de Camamu.

ABSTRACT – *F.T.T. Gonçalves - Limnological controls on the formation of lacustrine source rocks: the example of the Camamu Basin, Northeast Brazil.* Organic-rich lacustrine sediments account for over 90% of the petroleum reserves from Brazil. Due to the higher sensitivity of lacustrine basins to environmental changes, lateral and vertical changes in facies and geochemical characteristics of lacustrine source rocks tend to be more abrupt than the ones displayed by marine sequences. Organic matter production and preservation in lacustrine systems are controlled by a number of factors, such as water column stratification pattern, salinity and temperature, which in turn depends on the tectonic, climatic and hydrologic history of the basin. Due to the complexity and diversity of lacustrine environments, a number of lacustrine source rocks models have been proposed during the last decades. The integration of geochemical parameters and geologic data represents a powerful tool for the reconstruction of the paleoenvironmental evolution of these basins. The application of such approach in the Camamu Basin (Northeast Brazil) allowed the identification of distinct paleolimnological models for the petroleum source rocks of the Morro do Barro (Rio da Serra stage) and Rio de Contas (Aratu/Buracica) formations. While the former were deposited within a deep, stratified anoxic lake, the later are related to a shallower lake phase with higher levels of primary productivity.

Keywords: Lake, rift, geochemistry, petroleum, Camamu Basin.

INTRODUÇÃO

Sedimentos ricos em matéria orgânica de origem lacustre são responsáveis pela geração de apenas uma pequena parte das reservas mundiais de petróleo, majoritariamente geradas por sedimentos marinhos (Tissot & Welte, 1984). Entretanto, em algumas regiões como Indonésia, China, Sumatra, oeste da África e Austrália, rochas sedimentares lacustres podem constituir as principais geradoras de hidrocarbonetos (Katz, 1990, 1995). No Brasil, em particular, os sedimentos lacustres depositados nas bacias rifte eocretácicas da margem continental deram origem a

mais de 90% das reservas de petróleo (Mello & Maxwell, 1990).

Devido a seu menor tamanho, os corpos d'água lacustres são mais suscetíveis a mudanças ambientais, apresentando variações laterais e verticais de fácies mais abruptas do que as mostradas pelas bacias marinhas (Soreghan & Cohen, 1996). Fatores tectônicos e climáticos podem afetar drasticamente os sistemas deposicionais, as características físico-químicas da coluna d'água, a natureza da biota, a produção e as condições de preservação da matéria

orgânica (Kelts, 1988). Como resultado, as rochas geradoras lacustres costumam apresentar uma menor extensão geográfica e um maior grau de variabilidade composicional e de potencial petrolífero (Katz, 1995).

Este artigo apresenta uma revisão do estado atual do conhecimento dos sistemas lacustres, com ênfase nos fatores que direta e indiretamente controlam a produção e preservação da matéria orgânica e a

formação de rochas geradoras de petróleo. Usando como exemplo a seção rifte eocretácica da Bacia de Camamu (costa do Nordeste do Brasil), demonstra-se como a análise integrada de diversos parâmetros geoquímicos e dados geológicos pode servir de base para a reconstrução da história paleolimnológica e o seu controle sobre o potencial gerador de petróleo de uma seqüência lacustre.

ASPECTOS GEOLÓGICOS E FÍSICO-QUÍMICOS DOS LAGOS

Lagos são corpos d'água sem ligação direta com o mar, cuja formação depende basicamente da existência de uma depressão na superfície da Terra e de um balanço hidrológico favorável (Esteves, 1988). Cobrindo atualmente menos de 1% da superfície e contendo cerca de 0,02% da água do planeta (Allen & Collinson, 1986), os lagos são objetos de estudo da limnologia (do grego *limné* = lago). Dentre os diversos tipos de bacias lacustres (p. ex., vulcânicas, fluviais, glaciais etc.; Allen & Collinson, 1986), as de origem tectônica em geral são as mais duradouras no tempo geológico e apresentam as maiores áreas superficiais e profundidade, possuindo, portanto, um maior potencial petrolífero (Katz, 1995).

Trabalhos recentes têm demonstrado que os lagos de origem tectônica não devem ser tratados como "pequenos oceanos". A aplicação direta, em lagos, dos conceitos normalmente usados no estudo de bacias marinhas é dificultada pelas diferentes taxas de mudança nos fatores que controlam o desenvolvimento das seqüências sedimentares e pelas características intrínsecas desses ambientes (Scholz et al., 1998). No Lago Malawi (África Oriental), por exemplo, Buoniconti & Scholz (2001) propõem que fases de nível de lago baixo correspondem a períodos de menor escoamento superficial e, conseqüentemente, de retenção de sedimentos nas áreas de drenagem, enquanto fases de nível de lago alto estão relacionadas a períodos de maior fluxo de água e aporte sedimentar para o lago. De acordo com este modelo, a deposição de lobos turbidíticos ocorreria durante fases de nível de lago alto, ao contrário do que se observa nas bacias marinhas.

Nos lagos tectônicos, a interação entre subsidência, aporte sedimentar e balanço hidrológico, controlam as características físicas e químicas da massa d'água, a natureza e arquitetura dos depósitos sedimentares, e a distribuição e potencial das rochas geradoras de petróleo (Lambiase, 1990; Carrol & Bohacs, 1999). No que se refere ao equilíbrio entre aporte sedimentar e subsidência, nas bacias em que o primeiro é preponderante, tendem a formar-se lagos rasos e/ou pântanos, enquanto nas bacias em que o último fator

prevalece é favorecida a implantação de lagos profundos. Já com relação ao balanço hidrológico, lagos em que o efluxo supera o influxo de água (balanço negativo) costumam ser salinos e efêmeros, enquanto lagos em que o influxo predomina (balanço positivo) são dominados por progradações deltaicas (Olsen, 1990). Os sistemas lacustres podem ser classificados quanto ao regime hidrológico como abertos ou fechados. Os primeiros possuem efluxo superficial de água e linhas de praia relativamente estáveis, enquanto os últimos não têm efluxo superficial, estando sujeitos a grandes variações de nível do lago em função do balanço entre influxo e evaporação. Evidências sedimentológicas e geoquímicas de lagos atuais indicam que as flutuações de nível nos lagos é mais dramática do que nos oceanos, podendo alcançar centenas de metros em poucos milhares de anos (e.g., Scholz & Rosendhal, 1988; Owen et al., 1990; Scholz et al., 1998).

Um fenômeno fundamental na dinâmica dos sistemas lacustres é a estratificação térmica da coluna d'água (Figura 1). Como resultado da má distribuição do calor solar absorvido pelas camadas superficiais para o restante da massa d'água, se desenvolve uma camada superficial de águas menos densas e temperatura relativamente uniforme e quente (epilímnio), uma porção intermediária (metalímnio) caracterizada por uma marcante queda de temperatura com a profundidade (termoclina), e uma camada de águas mais densas com temperaturas relativamente uniformes e mais frias (hipolímnio) (Wetzel, 1983).

A persistência da estratificação térmica dos lagos depende de diversos fatores como clima, temperatura e salinidade da água, área e profundidade do lago, e regime de ventos (Esteves, 1988). Nos lagos situados em regiões temperadas, o aquecimento das águas superficiais durante o verão provoca a estratificação da coluna d'água, enquanto a diminuição da radiação solar no outono, resfria o epilímnio, homogeneizando a temperatura e provocando a circulação da massa d'água (Figura 2). Em regiões tropicais, por outro lado, os lagos tendem a permanecer estratificados durante a maior parte do ano, com eventuais períodos de circulação nas

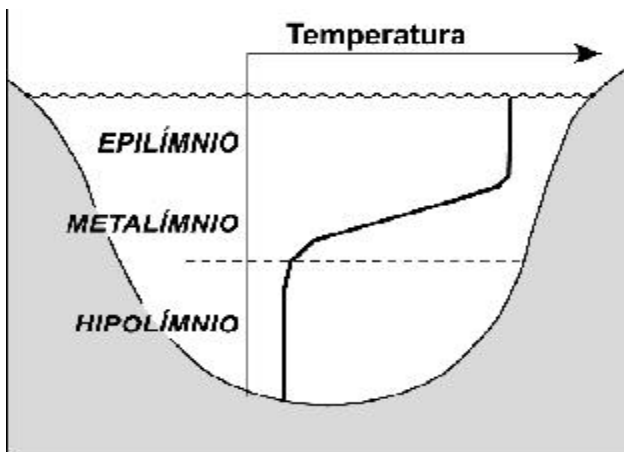


FIGURA 1. Representação esquemática da estratificação térmica da coluna d'água de um lago.

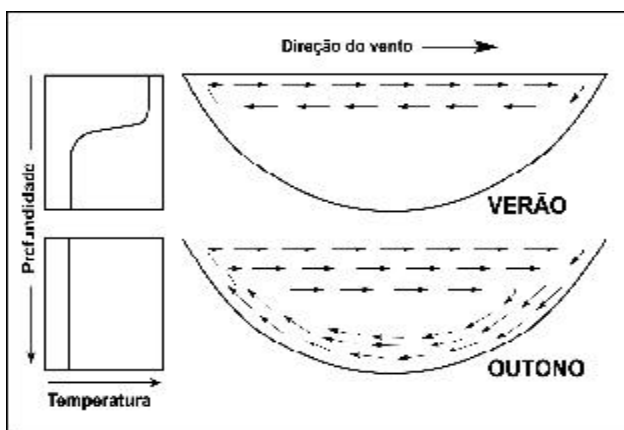


FIGURA 2. Padrão de circulação da massa d'água em lagos de regiões de clima temperado durante o verão e o outono. Modificado de Wetzel (1983).

fases de clima mais ameno (Esteves, 1988). Em lagos muito profundos, a estratificação da coluna d'água pode manter-se estável por longos períodos de tempo (p. ex., Lago Tanganika; Katz, 1990). Da mesma forma, nos lagos onde a camada mais profunda da coluna d'água é mais salina do que a rasa, o contraste de densidade também pode impedir a circulação. Tal contraste pode ser causado pelo aporte de águas salinas provenientes de fontes hidrotermais (e.g., Lago Kivu; Degens et al., 1973) ou por um influxo de água doce subsequente a uma fase de aridez acentuada.

Em relação ao padrão de estratificação/circulação de água (Wetzel, 1983), os lagos são classificados como holomícticos quando a circulação envolve toda a coluna d'água, ou meromícticos nos casos em que apenas parte da coluna d'água é renovada. Neste último tipo de lago, a termoclina separa uma parte da coluna d'água que regularmente é submetida a renovação (mixolímnio)

de outra parte mais profunda que se mantém isolada (monimolímnio). A profundidade da termoclina é função direta da velocidade e da distância percorrida pelo vento sobre a superfície do lago (denominada de *fetch*; Margalef, 1983). Mantidas constantes as condições climáticas e a intensidade dos ventos, quanto maior a área superficial do lago, maior é a distância (*fetch*) percorrida pelo vento e, conseqüentemente, mais profunda está a termoclina (Tilzer, 1990; Serruya, 1990). Nos lagos atuais observa-se uma relação direta entre a área do lago e a profundidade da termoclina (Olsen, 1990; Patalas, 1990).

Como o transporte do oxigênio na água por difusão molecular é pouco eficiente (Esteves, 1988), sua quantidade ao longo da coluna d'água é fortemente controlada pelo padrão de estratificação e circulação da massa d'água (Wetzel, 1983; Esteves, 1988). Nos lagos meromícticos, como a circulação não envolve toda a coluna d'água, a camada mais profunda pode permanecer isolada, acarretando o desenvolvimento de condições anóxicas permanentes (Figura 3a). A atividade dos organismos também influencia diretamente o grau de oxigenação. Em lagos com alta produtividade primária, a decomposição da matéria orgânica formada na zona fótica resulta num grande aumento de consumo de oxigênio no hipolímnio, que pode se tornar anóxico (Figura 3b). Por outro lado, em lagos com baixa produtividade primária, podem prevalecer condições óxicas ao longo de toda coluna d'água (Figura 3c).

Ao contrário dos sistemas marinhos, onde os íons cloreto (Cl) e sódio (Na²⁺) são predominantes, nos lagos podem ocorrer elevadas proporções de outros íons como cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), potássio (K⁺), bicarbonato (HCO₃⁻) e sulfato (SO₄²⁻) (Wetzel, 1983). A água dos lagos pode variar de doce a hipersalina em função de uma série de fatores, dentre os quais se destacam a composição das rochas na área de drenagem e o balanço hidrológico do lago. Variações de salinidade ao longo da coluna d'água de um único lago, por sua vez, dependem de sua profundidade e seu padrão de estratificação e circulação. Em lagos rasos, a salinidade é geralmente homogênea, enquanto em lagos profundos e estratificados, pode haver um acentuado aumento na concentração de sais no hipolímnio. A salinidade da água condiciona fortemente a abundância e variedade de organismos dos ecossistemas lacustres, observando-se, de modo geral, um decréscimo da produtividade primária com o aumento de salinidade (Katz, 1995). Em alguns casos, entretanto, organismos adaptados às condições de alta salinidade podem ser favorecidos, como as algas verdes do gênero *Dunaliella*, que produzem "explosões" de produtividade em lagos hipersalinos (Kelts, 1988; Katz, 1990).

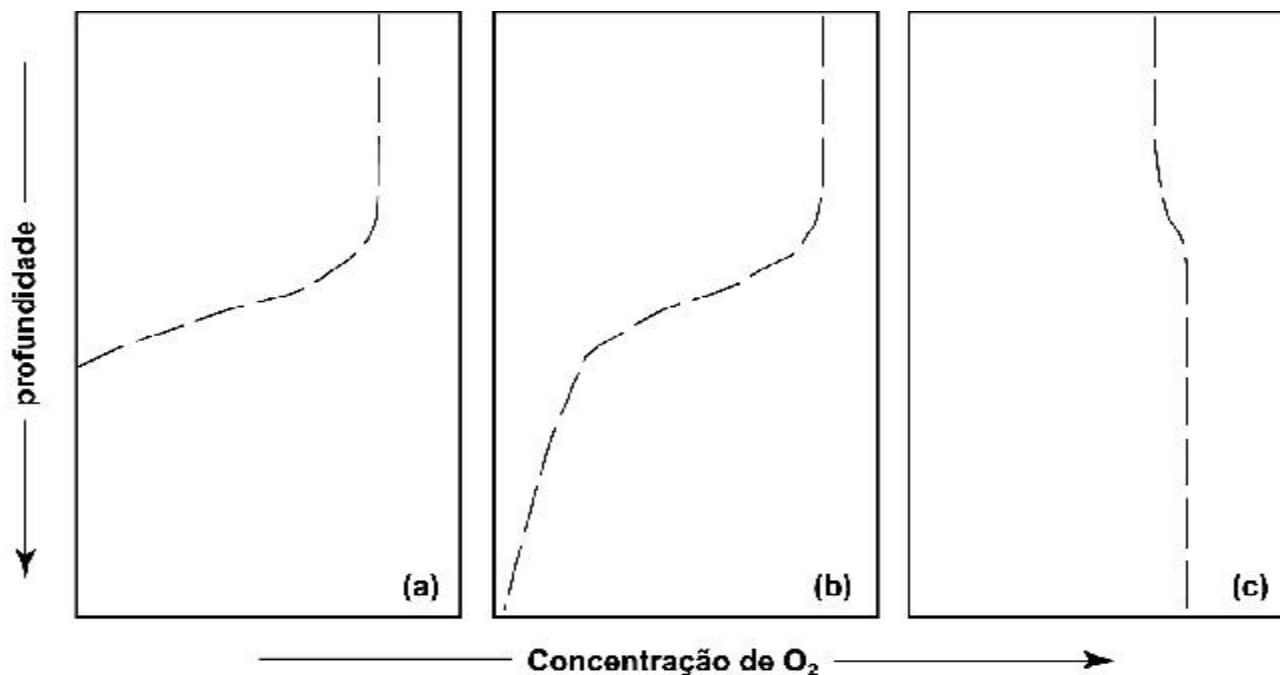


FIGURA 3. Perfis esquemáticos de concentração de oxigênio em diferentes tipos de lagos: (a) meromítico, e com altos (b) e baixos (c) níveis de produtividade primária no epilímnio. Adaptado de Esteves (1988).

ACUMULAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM LAGOS

A quantidade de matéria orgânica preservada num sistema lacustre é basicamente o resultado do balanço entre (1) a biomassa produzida dentro do lago (autóctone) e/ou trazida de sua área de drenagem (alóctone), e (2) a quantidade de biomassa alterada e reciclada na coluna d'água e nos sedimentos. O ciclo do carbono nos sistemas lacustres na verdade é muito complexo, envolvendo a interação entre diversas formas de carbono orgânico e inorgânico particulados e dissolvidos (Figura 4). O tipo de matéria orgânica preservada nos depósitos lacustres é controlado por diversos fatores tais como o clima, tamanho e profundidade do lago, e topografia de sua área de drenagem (Kelts, 1988), podendo variar desde completamente autóctone até quase toda proveniente de fora do lago (Meyers & Ishiwatari, 1993). A principal fonte de matéria orgânica autóctone nos lagos são os organismos primários, principalmente algas. Evidências moleculares e isotópicas entretanto indicam que bactérias químico- e fotossintéticas também podem representar uma importante fração da matéria orgânica primária preservada nos sedimentos (Kelts, 1988; Meyers & Ishiwatari, 1993; Hollander et al., 1991).

A produtividade primária é condicionada por uma série de fatores, tais como luminosidade, temperatura, disponibilidade de nutrientes (especialmente fósforo e nitrogênio), salinidade, pH etc. (Wetzel, 1983; Kelts,

1988; Katz, 1990, 1995). Os fatores luminosidade e temperatura são críticos, como demonstrado pelos níveis de produtividade mais altos em lagos de regiões tropicais quando comparados aos de zonas temperadas ou frias (Wetzel, 1983). No entanto, dentre todos os fatores, o mais importante é a disponibilidade de nutrientes (Katz, 1990). Enquanto em pequenos lagos o escoamento superficial e os rios podem representar importantes fontes de nutrientes, em corpos d'água de grandes dimensões, a manutenção de altos níveis de produtividade depende principalmente da eficiência da reciclagem de nutrientes a partir da biomassa depositada no fundo do lago. Em lagos atuais, Fee (1979) demonstrou a existência de uma correlação linear positiva entre produtividade primária e a razão entre a área de sedimento exposta ao epilímnio e o volume de epilímnio do lago.

O grau de preservação da matéria orgânica depende da concentração de oxigênio ao longo da coluna d'água e na interface água/sedimento (Demaison & Moore, 1980). Sob condições óxicas, bactérias aeróbicas e metazoários degradam a biomassa. Já sob condições disóxicas/anóxicas, a ação desses organismos é restringida, e as bactérias anaeróbicas que empregam nitratos e sulfatos como agentes oxidantes passam a ser as responsáveis pela alteração da matéria orgânica. Em lagos anóxicos de água doce, devido à pouca

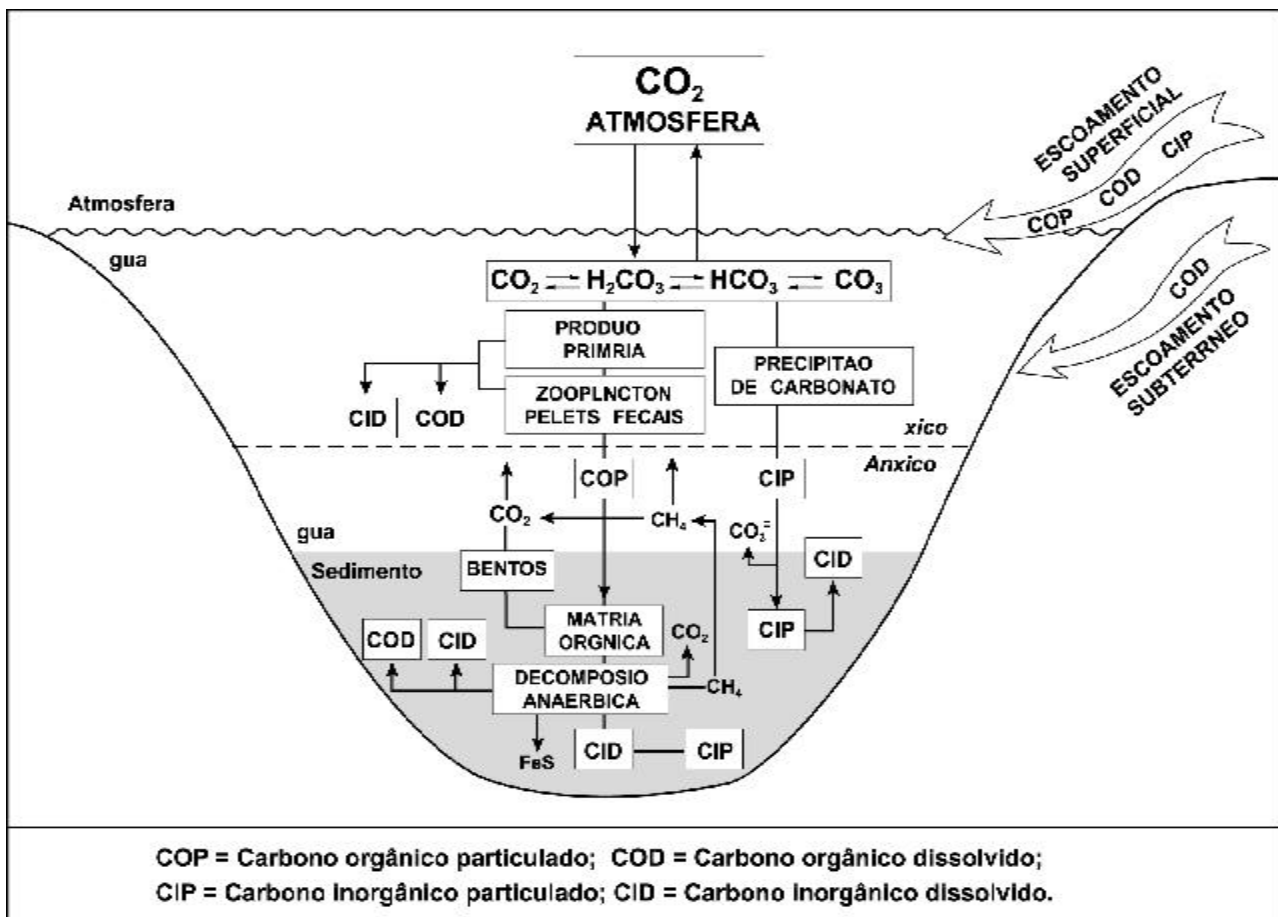


FIGURA 4. Diagrama mostrando o ciclo do carbono numa bacia lacustre (Kelts 1988).

disponibilidade desses agentes oxidantes (oxigênio, sulfato etc.), a biomassa é alterada principalmente por bactérias metanogênicas (Katz, 1990). Existem controvérsias sobre a influência do nível de oxigenação sobre o grau de alteração da matéria orgânica, já que experimentos de laboratório reportam taxas similares de decomposição sob condições óxicas ou anóxicas, enquanto estudos geológicos mostram que a taxa de decomposição parece ser significativamente menor sob condições anóxicas (Demaison & Moore, 1980; Pederson & Calvert, 1990; Canfield, 1994; e Harvey et al., 1995). Conforme destacado por Peters & Moldowan (1993), entretanto, ao contrário dos experimentos de laboratório, onde não há restrição no suprimento de agentes oxidantes, sob condições naturais esses agentes são supridos principalmente pela ação dos organismos bentônicos que escavam os sedimentos. Como em ambientes anóxicos tais organismos estão ausentes, não há uma renovação adequada dos oxidantes, o que acaba resultando em menores taxas de decomposição e num produto final mais rico em hidrogênio.

O tempo de exposição da biomassa ao longo da coluna d'água e na interface água-sedimento também afeta o grau de preservação da matéria orgânica. Enquanto o tempo de trânsito da biomassa entre a superfície e o fundo do lago é reflexo da profundidade e do contraste de densidade entre a água e a matéria orgânica, o tempo de permanência na interface água/sedimento é condicionado principalmente pela taxa de sedimentação. Em lagos cuja a coluna d'água é toda óxica, altas taxas de sedimentação podem auxiliar na preservação da matéria orgânica, retirando-a da interface água/sedimento. Por outro lado, em lagos onde a porção inferior da coluna d'água é anóxica, a matéria orgânica é degradada apenas ao longo da parte óxica da coluna e a taxa de sedimentação já não representa um fator tão crítico para sua preservação (Katz, 1990). Cabe ressaltar que, em ambos casos (ambiente óxico ou anóxico), altas taxas de sedimentação podem afetar drasticamente o conteúdo orgânico final devido ao efeito de diluição da matéria orgânica pelos sedimentos.

CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS E MODELOS DE FORMAÇÃO DE ROCHAS GERADORAS LACUSTRES

As rochas geradoras de petróleo de origem lacustre são tidas como constituídas por querogênio do tipo I (Espitalié et al., 1977; Tissot & Welte, 1984), caracterizado por ser mais rico em hidrogênio e, portanto, apresentar maior potencial para a geração de hidrocarbonetos líquidos quando comparado aos querogênios dos tipos II (marinho) e III (de origem terrestre). Os folhelhos oleígenos eocênicos da Formação Green River (Wyoming, EUA) constituem o exemplo clássico de rocha geradora lacustre portadora de querogênio do tipo I (Van Krevelen, 1961; Tissot & Welte, 1984). Embora diversas outras seções lacustres apresentem características geoquímicas indicativas do predomínio desse tipo de querogênio (e.g., Burwood et al., 1992; Mello et al., 1988; Kuo, 1994; Trindade et al., 1995), há também inúmeros casos de rochas geradoras lacustres portadoras de outros tipos de querogênio.

Talbot (1988), por exemplo, observou um predomínio de querogênio do tipo II nos sedimentos recentes de alguns lagos do sistema rifte do leste africano. Ariztegui et al. (1994) também reportaram uma alternância de querogênios dos tipos I e II nos sedimentos de lagos na Suíça, atribuindo o fato a variações nas condições físico-químicas da coluna d'água e na natureza da biota dominante (diatomáceas vs. dinoflagelados). A presença em variadas proporções de querogênio do tipo III também tem sido reportada por diversos autores em diferentes sistemas lacustres (e.g., Powell, 1986; Horsfield et al., 1994). Também é importante mencionar a existência de uma variedade particular de querogênio do tipo I, denominado como tipo I-S por seu elevado conteúdo de enxofre (Sinninghe Damsté et al., 1993), encontrada em rochas geradoras lacustres de água salina/hipersalina (e.g., Terciário da China; Peters et al., 1996).

Rochas geradoras de origem lacustre são responsáveis pela origem de uma parcela significativa das reservas de petróleo em várias regiões do mundo (e.g., Indonésia, China, Brasil, Sumatra, oeste da África e Austrália; Katz, 1990). No Brasil em particular, estas rochas são responsáveis por cerca de 95% das reservas de petróleo descobertas até o momento (Mello & Maxwell, 1990), tendo gerado todo o petróleo das bacias de Campos, Camamu-Almada, Recôncavo e Tucano, e parte do petróleo encontrado nas bacias de Santos, Espírito Santo, Cumuruxatiba, Sergipe-Alagoas, Potiguar e Ceará. Com a crescente importância das rochas geradoras lacustres para a exploração de petróleo em diversas partes do mundo, aumentou a busca de modelos que permitissem prever sua

ocorrência e distribuição. Ao longo das últimas três décadas diversos modelos foram gerados com base no estudo de lagos recentes e seqüências lacustres antigas.

Eugster & Hardie (1978) e Kirkland & Evans (1981) consideraram os lagos hipersalinos como ambientes propícios para o desenvolvimento de rochas ricas em matéria orgânica devido a freqüente “explosão” de produtividade primária de organismos fitoplanctônicos adaptados a condições ambientais extremas.

Demaison & Moore (1980), usando como base o Lago Tanganika (África Oriental), desenvolveram o modelo de grandes lagos profundos e anóxicos como ambiente ideal para a formação de rochas geradoras lacustres.

Powell (1986), a partir do estudo de lagos australianos e chineses, concluiu que a maioria das rochas potencialmente geradoras se depositam em lagos meromíticos, com produtividade moderada/baixa e significativo aporte de matéria orgânica terrestre.

Kelts (1988), com base em uma extensa discussão teórica e tendo em conta dados de diversos lagos recentes e antigos, considera que o lago ideal para a formação de rochas geradoras deve ser de clima subtropical, grande, relativamente profundo, mesosalino e alcalino, de modo a favorecer a concentração de nutrientes, a estratificação da coluna d'água e a manutenção de um grande volume de biomassa.

Talbot (1988) reuniu dados sobre o padrão de estratificação/circulação de água de diversos lagos africanos atuais e de teores médios de carbono orgânico (COT) nos sedimentos, verificando que os lagos permanentemente estratificados (Tanganika, Kivu, Malawi e Bosumtwi) ou com circulação episódica (Edward e Victoria) apresentam, de modo geral, altos teores de COT, enquanto que os lagos não-estratificados, mesmo possuindo altos níveis de produtividade primária, apresentam baixos teores de COT (Chad e Turkana). De acordo com este autor, os valores mais baixos de COT são encontrados nos sedimentos depositados sob condições de clima seco e nível de lago baixo, enquanto que valores mais elevados de COT se encontram nos sedimentos depositados em condições de clima úmido e nível de lago alto.

Katz (1990), igualmente baseado em dados dos sedimentos recentes de lagos da África Oriental (Tanganika, Albert, Edward e Kivu), concluiu que a preservação constitui um fator chave para a formação de rochas geradoras lacustres.

Mello & Maxwell (1990), suportados por dados geológicos e geoquímicos de seções lacustres

eocretácicas de bacias da margem continental brasileira, propõem dois modelos de formação de rochas geradoras lacustres: (1) lagos de água doce/salobra anóxicos e (2) lagos salinos, alcalinos, com alta produtividade primária e estratificados.

Burwood et al. (1992) e Kuo (1994) encontraram condições similares às brasileiras para a formação de rochas geradoras lacustres eocretácicas das bacias do Gabão, Congo e Cabinda, na margem continental oeste da África.

Horsfield et al. (1994) observaram na Formação Green River (Bacia de Washakie, EUA) que os sedimentos depositados sob condições de clima árido e água alcalina apresentam altos teores de matéria orgânica e índices de hidrogênio, enquanto os depósitos de paleolago de água doce e clima úmido são geralmente pobres em matéria orgânica.

Soreghan & Cohen (1996), baseados em estudos sedimentológicos e geoquímicos de sedimentos recentes do Lago Tanganika, observaram que os valores de COT tendem aumentar sob condições de nível de lago crescente.

Guzzo & Arienti (1998), por sua vez, sustentam com base em evidências sedimentológicas e geoquímicas que níveis ricos em matéria orgânica da seqüência

rifte nas bacias do Recôncavo e Sergipe-Alagoas foram depositados em fases de nível de lago baixo.

Pode-se constatar, pela descrição dos diversos modelos, que existem algumas semelhanças, muitas diferenças e contradições importantes. Tal diversidade reflete a complexa interação entre os vários fatores que controlam a formação de rochas geradoras de petróleo nos lagos (Figura 5), a qual dificulta a elaboração de modelos de caráter universal que possam descrever e prever a distribuição e as características dessas rochas para qualquer bacia lacustre.

Numa tentativa recente de sistematizar e classificar as fácies lacustres propícias à presença de rochas geradoras de petróleo, Carrol & Bohacs (2001) propõem a existência de três tipos: (1) flúvio-lacustre, caracterizada por depósitos de água doce e com matéria orgânica dos tipos I e III; (2) lacustre profunda, composta por fácies de água doce/salobra e com querogênio predominantemente do tipo I; e (3) evaporítica, constituída por depósitos de água salina a hipersalina e com matéria orgânica dos tipos I e I-S. O predomínio de uma fácies em detrimento de outra é definido pelo balanço entre espaço de acomodação (controlado pela tectônica) e aporte sedimentar e de água (condicionados pelo clima) (Carrol & Bohacs, 1999; Carrol & Bohacs, 2001).

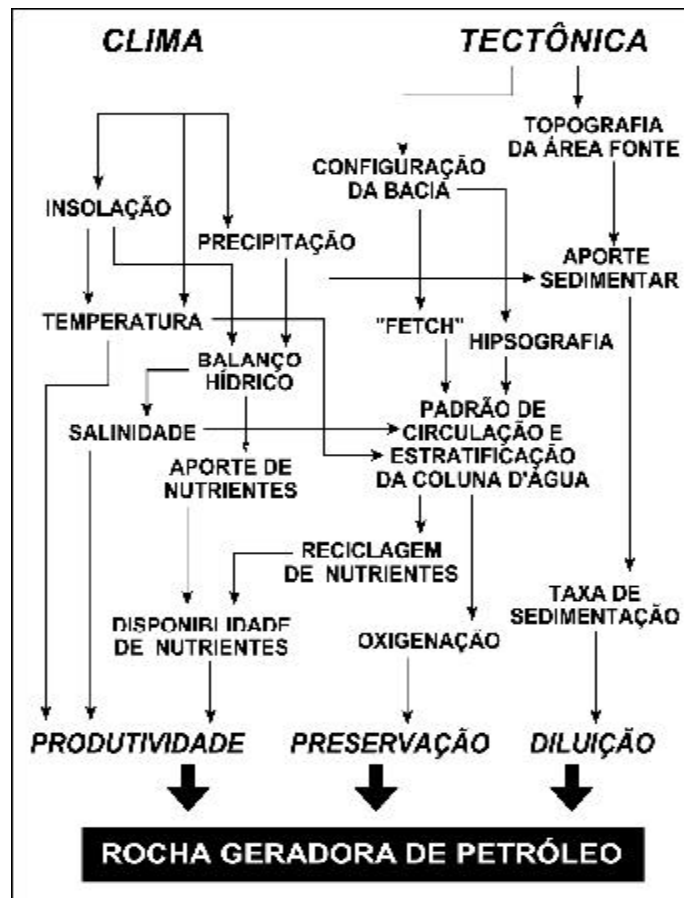


FIGURA 5. Representação esquemática da interação de fatores geológicos, climáticos, físico-químicos e biológicos que controlam direta ou indiretamente a formação de rochas geradoras de petróleo lacustres. Adaptado de Kelts (1988) e Katz (1995).

GEOQUÍMICA ORGÂNICA E ISOTÓPICA APLICADAS AO ESTUDO DE ROCHAS GERADORAS LACUSTRES: O EXEMPLO DA BACIA DE CAMAMU

Ao longo da última década, a aplicação da geoquímica orgânica e isotópica tem sido de grande utilidade na reconstrução das condições ambientais, hidrológicas e tróficas de lagos antigos (e.g., Mello & Maxwell, 1990; Kelts & Talbot, 1990; Hollander et al., 1993), fornecendo importantes subsídios para a compreensão da influência destas condições sobre a química do corpo aquoso, o balanço entre produção e preservação da matéria orgânica e a formação das rochas geradoras de petróleo. Em seguida é apresentado, de modo resumido, um exemplo de aplicação dessa abordagem no estudo da seção rifte eocretácica da Bacia de Camamu. A análise integrada dos dados geoquímicos de um poço e do modelo de evolução tectono-sedimentar e paleoclimática da bacia (Gonçalves, 1997 e 2002; Gonçalves et al. 1997 e 2000), à luz dos conceitos discutidos nos itens anteriores, deu

base à proposta de um modelo de evolução paleolimnológica, além de permitir delinear o conjunto de condições que favoreceram a deposição de espessas camadas de rochas ricas em matéria orgânica nesta seção.

SUMÁRIO DA EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR

A Bacia de Camamu está situada na faixa costeira do Estado da Bahia, entre os paralelos 13° e 14°S, constituindo o prolongamento sul do sistema rifte Recôncavo-Tucano (Figura 6). Com uma área de cerca de 10.000 km² (dos quais 2.000 km² emersos), a Bacia de Camamu contém algumas acumulações de óleo e gás em terra e no mar, todas consideradas como originadas a partir das rochas geradoras lacustres eocretáceas da Formação Morro do Barro (Gonçalves et al., 2000).

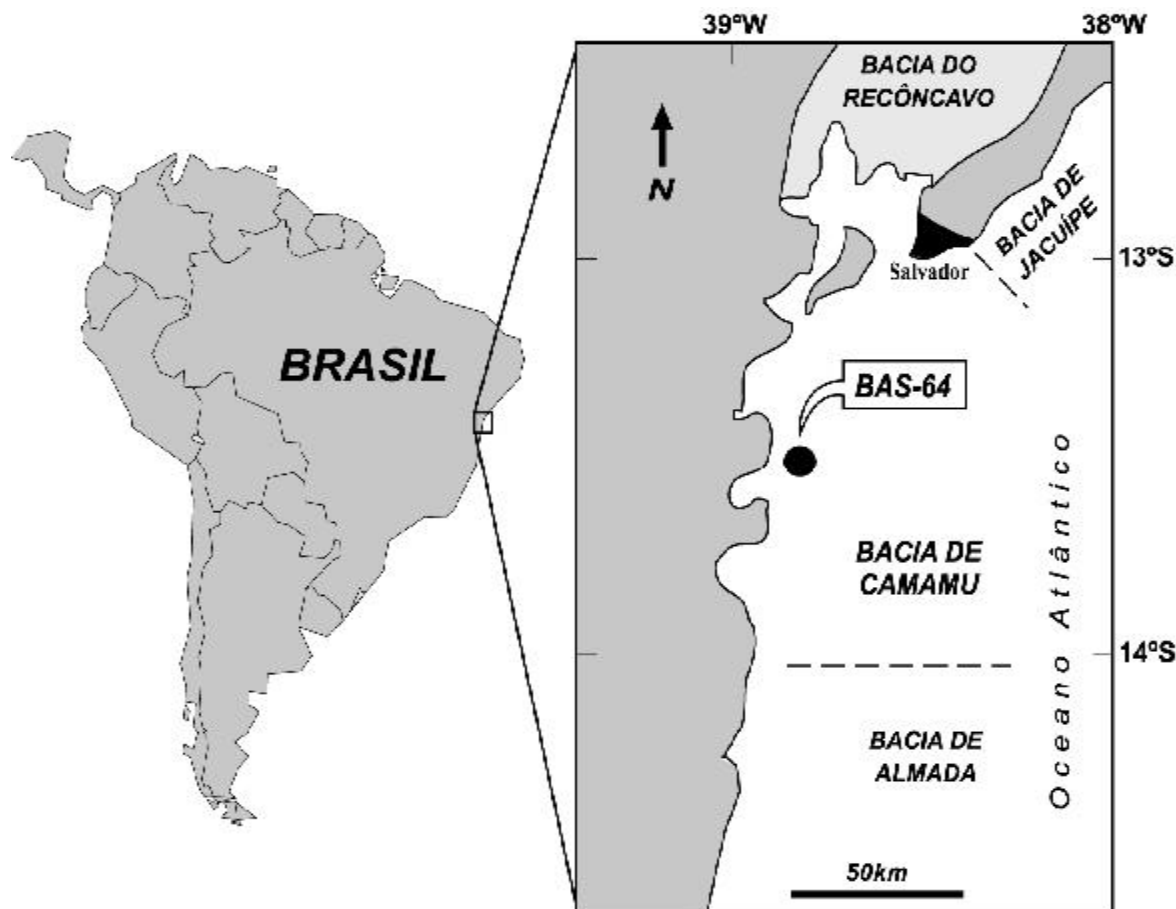


FIGURA 6. Localização da Bacia de Camamu e do poço (1-BAS-64) submetido a análises geoquímicas e usado como base para reconstrução paleolimnológica da seqüência rifte.

A origem da Bacia de Camamu, assim como das demais bacias meso-cenozóicas da margem continental brasileira, está relacionada ao processo de estiramento crustal que culminou com a ruptura do continente Gondwana e a formação do Oceano Atlântico. Seguindo o modelo da margem continental brasileira (Ponte & Asmus, 1976), a evolução tectono-sedimentar da Bacia de Camamu pode ser descrita como uma sucessão dos seguintes estágios: (1) pré-rifte, que agrupa os sedimentos flúvio-lacustres juro-eocretáceos das formações Aliança, Sergi e Itaípe; (2) rifte, representado pelas depósitos lacustres eocretáceos das formações Morro do Barro e Rio de Contas; e (3) drift, que compreende os sedimentos transicionais aptianos da Formação Taipus-Mirim e os estratos marinhos cretáceos e terciários, das formações Algodões, Urucutuca, Rio Doce e Caravelas (Figura 7; Netto & Ragagnin, 1990; Gonçalves et al., 2000).

CRONO-ESTRATIGRAFIA		EVOLUÇÃO TECTÔNICA		
		FORMAÇÕES		
TERCIÁRIO	Plioc.	RIO DOCE CARAVELAS		PÓS-RIFT
	Mioc.			
	Oligoc.			
	Eoc.			
	Paleoc.			
CRETÁCEO	Super.	Senon.	URUCUTUCA	
		Conlac.		
		Turon.		
	Infer.	Genom.	ALGODÕES	
		Albiano		
		Aptiano	TAIPUS-MIRIM	
		Barrem.	RIO DE CONTAS	
		Neocom.	MORRO DO BARRO	
JURÁSSICO		ITAÍPE	PRÉ-RIFT	
		SERGI		
		ALIANÇA		

FIGURA 7. Coluna estratigráfica generalizada da Bacia de Camamu. Adaptado de Netto et al. (1994) e Gonçalves et al. (2000).

A ausência de fósseis marinhos associada à presença de ostracodes não-marinhos e ao contexto geológico regional indicam que as formações Morro do Barro e Rio de Contas depositaram-se numa bacia lacustre formada durante a fase de extensão crustal

(Netto & Ragagnin, 1990). A Formação Morro do Barro é interpretada como produto da sedimentação num ambiente subaquoso dominado por fluxos gravitacionais em lago profundo, enquanto a Formação Rio de Contas apresenta uma seqüência de fácies, da área proximal para a distal, que indica uma sucessão de ambientes de leques deltaicos, plataforma e talude (Netto et al., 1994).

No poço em que foram realizadas análises geoquímicas (1-BAS-64; Figura 6), as formações Rio de Contas e Morro do Barro alcançam uma espessura total de 1.451 m, sendo constituídas essencialmente por folhelhos cinza-escuros a esverdeados, com pequenas intercalações de arenitos finos (Figura 8). Na Formação Rio de Contas há um intervalo com cerca de 90 m de espessura (aproximadamente entre 1.070 e 1.160 m de profundidade) onde predominam calcilitos e margas de coloração creme e cinza-claro. A ausência de fósseis-guias marinhos na seção rifte dificulta sua correlação com os andares da escala cronoestratigráfica internacional. Este problema, comum a todas as bacias da margem continental brasileira, levou à definição por Schaller (1969) e Viana et al. (1971) de unidades locais baseadas na seqüência bioestratigráfica de ostracodes não-marinhos. Embora a correlação destes andares locais com a escala internacional ainda seja motivo de controvérsias, foi usada neste trabalho a proposta de Arai et al. (1989). De acordo com a análise bioestratigráfica realizada por Picarelli & Grillo (1996), a seção correspondente as formações Morro do Barro e Rio de Contas no poço 1-BAS-64 inclui depósitos de idade Rio da Serra, Aratu, Buracica e, possivelmente, Jiquiá e Alagoas (Figura 8).

Dados palinológicos de poços de Bacia de Camamu (Picarelli & Grillo, 1996) integrados a dados obtidos nas bacias do Recôncavo e Tucano (Picarelli et al., 1993) indicam que a passagem do Rio da Serra inferior para o Rio da Serra médio caracteriza-se por uma redução brusca na abundância de conchostráceos, acompanhada pelo aumento na proporção de esporos triletes, indicando uma mudança para um clima mais úmido. O Andar Aratu, por sua vez, é caracterizado pela baixa diversidade palinológica e presença abundante de *Classopolis sp.*, indicando um clima seco. Os andares Buracica e Jiquiá apresentam um aumento relativo na diversidade e na abundância de esporos de pteridófitas, indicando condições climáticas novamente mais úmidas. O Andar Jiquiá também mostra um aumento da abundância de algas do gênero *Botryococcus*, sugerindo um clima ainda mais úmido, com um aporte crescente de água doce. Ou seja, em linhas gerais o nível de umidade na região de Camamu e do Recôncavo diminuiu do Rio da Serra ao Aratu, voltando a aumentar do Buracica para o Jiquiá.

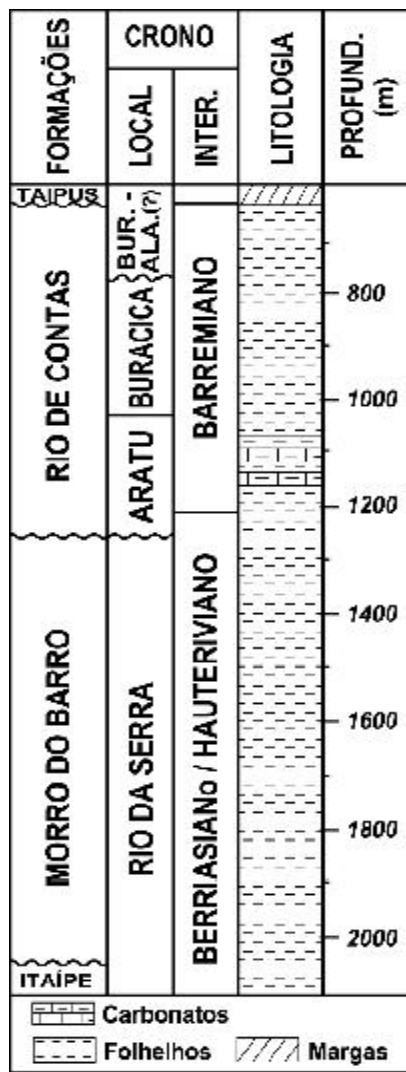


FIGURA 8. Coluna estratigráfica da seqüência rifte no poço estudado da Bacia de Camamu (Gonçalves, 1997).

DISCUSSÃO DOS DADOS GEOQUÍMICOS, ISOTÓPICOS E MOLECULARES

Um total de 94 amostras foram submetidas a análises para a determinação dos teores de carbono orgânico total, carbonato total, análises de pirólise Rock-Eval, petrografia orgânica, isótopos estáveis de oxigênio dos carbonatos, isótopos estáveis de carbono dos carbonatos e da matéria orgânica, e biomarcadores (ver detalhes metodológicos em Gonçalves, 1997). Com relação ao conteúdo orgânico (Figura 9), há uma tendência geral de aumento dos teores de carbono orgânico total (COT) da base da seção rifte (1-2%) até a porção média-superior da Formação Morro do Barro (4-5%), enquanto que na Formação Rio de Contas os teores de fundo são de modo geral mais baixos (1-2%), com três picos de enriquecimento orgânico (em torno de 1.170, 1.050 e 920 m de profundidade), alcançando um máximo de 9% de COT.

Os dados de pirólise revelam, como tendência geral, um aumento do índice hidrogênio (IH) da base da seção rifte (200-300mgHC/gCOT) até a parte média-superior da Formação Morro do Barro, seguido por uma diminuição progressiva até o topo da seção (Figura 9). Na Formação Rio de Contas, superposta a essa tendência geral, observa-se três intervalos com valores de IH mais elevados, cujas profundidades coincidem com os picos de enriquecimento orgânico indicado pelo perfil de COT. Variações no IH podem refletir mudanças na natureza da matéria orgânica (lacustre vs. terrestre), maturação térmica e condições paleoambientais (ambiente óxico vs. anóxico) (Tissot & Welte, 1984). As análises de petrografia orgânica indicam que os pelitos da seção rifte no poço estudado são constituídos essencialmente por matéria orgânica amorfa (>90%), seguidos pelos macerais do grupo da liptinita e pela matéria orgânica lenhosa (traços até 5%; Gonçalves, 1997). Estes resultados sugerem uma origem preponderantemente autóctone (fitoplantônica e/ou bacteriana), sem aporte significativo de vegetais terrestres. Com relação ao nível de maturação, os dados de índice de coloração de esporos e reflectância da vitrinita determinados através das análises petrográficas e os valores de temperatura máxima (Tmax) medidos pela pirólise indicam que a seção estudada apresenta um baixo grau de evolução térmica (Gonçalves, 1997). Adicionalmente, estudos de séries naturais (Gonçalves et al., 1997) indicam que, regionalmente, a seqüência rifte é afetada pelos processos de geração e expulsão de petróleo apenas a partir de 2.500-3.000 m de profundidade na área de plataforma da Bacia de Camamu. Portanto, as variações de IH observadas na seção investigada devem-se provavelmente a mudanças nas condições de preservação vigentes durante a deposição.

A composição isotópica ($\delta^{13}C_{MO}$) da matéria orgânica varia significativamente ao longo da seção rifte (Figura 9). Os valores de $\delta^{13}C_{MO}$ mantêm-se relativamente estáveis em torno de -30‰ da base até a porção centro-superior da Formação Morro do Barro passando, então, a apresentar repetidos desvios para valores mais positivos (até -22‰) até a parte mediana da Formação Rio de Contas. Valores de $\delta^{13}C$ marcadamente negativos (em torno de -29/-30‰) têm sido atribuídos à incorporação, aos sedimentos, de bactérias autotróficas e metanotróficas que consomem o metano depletado em ^{13}C produzido por organismos metanogênicos (Freeman, 1991; Hollander et al., 1991). A associação de altos valores de IH com valores negativos de $\delta^{13}C_{MO}$ ao longo de grande parte da Formação Morro do Barro (Figura 9) pode ser interpretada como resultante da deposição num paleoambiente de lago de água doce e anóxico, condições favoráveis à atividade de organismos metanogênicos.

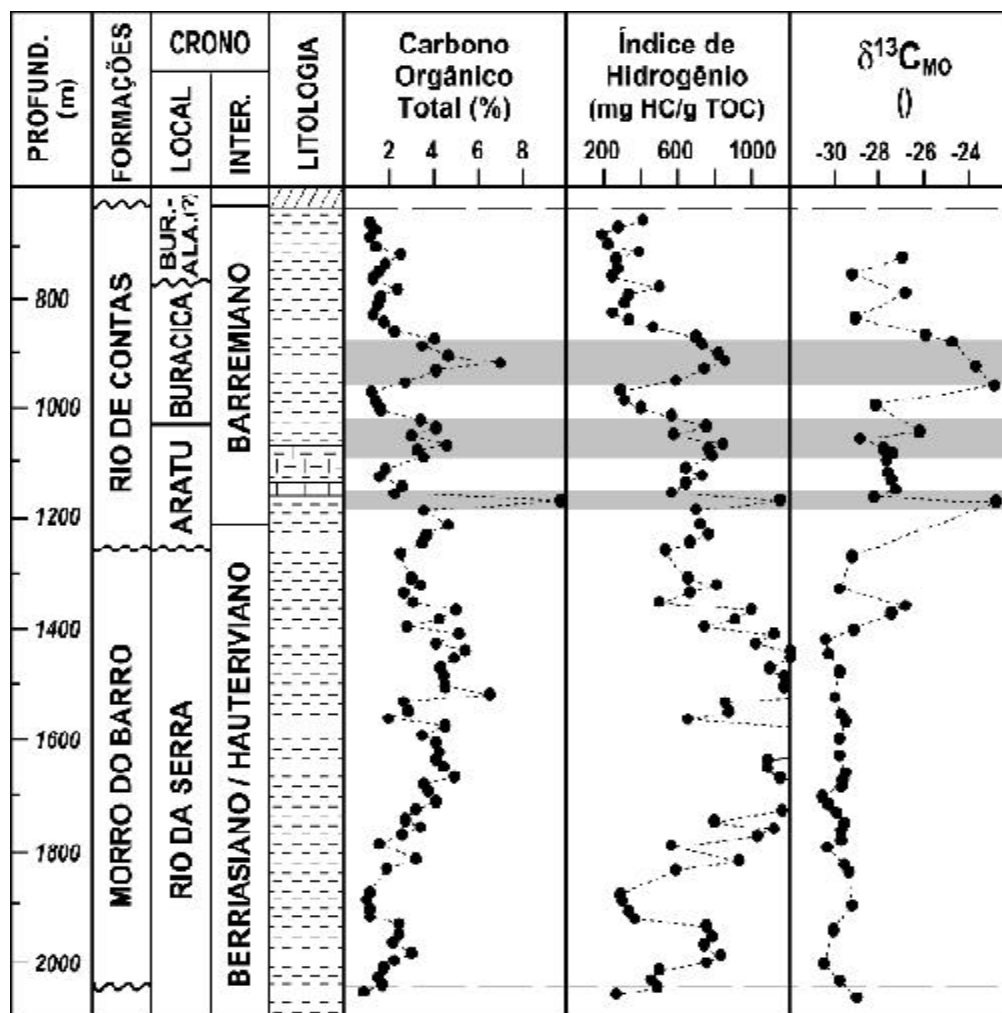


FIGURA 9. Variação dos teores de carbono orgânico total, índice de hidrogênio e razão isotópica do carbono da matéria orgânica ($\delta^{13}C_{MO}$) ao longo da seqüência rifte no poço estudado da Bacia de Camamu (modificado de Gonçalves, 1997, 2002). As faixas em tom cinza claro correspondem aos eventos de enriquecimento orgânico associados a excursões isotópicas positivas.

Por outro lado, diversos estudos (Deuser, 1970; Wong & Sacket, 1978; Freeman, 1991; Hollander et al., 1993) têm apontado o aumento da produtividade primária como responsável por valores positivos de $\delta^{13}C_{MO}$ encontrados em sedimentos marinhos e lacustres. O aumento na demanda por carbono causado pelo incremento da produtividade diminui a concentração de CO_2 nas águas superficiais e o grau de fracionamento isotópico, resultando em uma biomassa progressivamente enriquecida em ^{13}C . A boa concordância entre as excursões isotópicas positivas da curva de $\delta^{13}C_{MO}$ e os picos de enriquecimento orgânico e de IH na Formação Rio de Contas (Figura 9) permite postular a ocorrência de fases de alta produtividade primária durante a deposição desta unidade.

Os teores de carbonato total variam em torno de 23% na Formação Morro do Barro, aumentam na base da Formação Rio de Contas (até 56%) e retornam a

valores baixos (20-15%) nos terços médio e superior desta unidade (Figura 10). A análise isotópica do carbono e do oxigênio dos carbonatos lacustres tem se mostrado uma ferramenta de grande utilidade em estudos paleolimnológicos (e.g., Talbot, 1990; Talbot & Kelts, 1990; Kelts & Talbot, 1990). Por representar uma média do sinal isotópico de todos os tipos de carbonato (carapaças de organismos, carbonatos primários, diagenéticos etc.), o uso da razão isotópica medida em rocha total é vista com reservas por alguns autores (e.g., Talbot, 1990). Diversos trabalhos, entretanto, têm demonstrado a validade da aplicação deste método em estudos paleoambientais (Rodrigues & Takaki, 1987; Shackleton et al., 1993; Azevedo, 1994; Azevedo et al., 1997).

Os dados de $\delta^{18}O$ da fração de carbonato total ($\delta^{18}O_{CARB}$) na seção rifte do 1-BAS-64 revelam uma tendência geral de aumento de cerca de -2 a +3‰ da

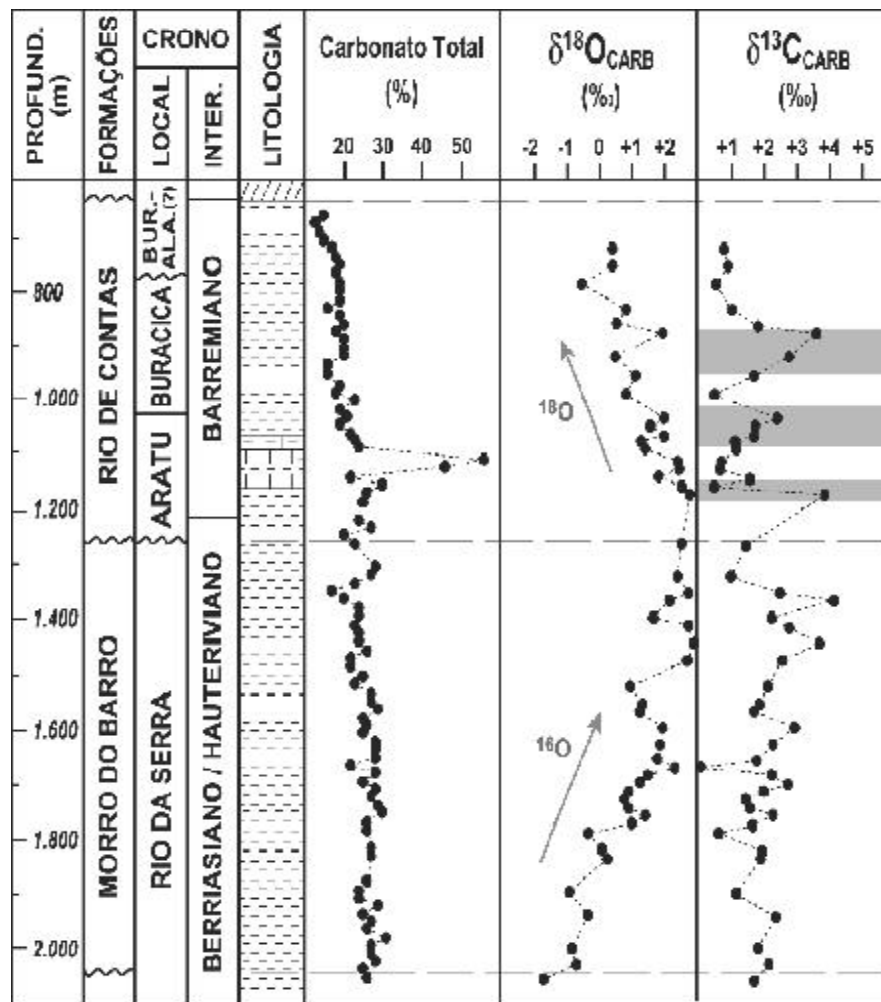


FIGURA 10. Variação dos teores de carbonato total e das relações isotópicas do oxigênio ($\delta^{18}\text{O}_{\text{CARB}}$) e do carbono ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CARB}}$) do carbonato ao longo da seqüência rifte no poço estudado da Bacia de Camamu (modificado de Gonçalves, 1997, 2002). As faixas em tom cinza claro na coluna de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CARB}}$ correspondem aos mesmos intervalos assinalados na figura anterior, enquanto as setas na coluna de $\delta^{18}\text{O}_{\text{CARB}}$ representam as tendências gerais de enriquecimento no isótopo mais pesado (^{18}O) e mais leve (^{16}O).

base ao topo da Formação Morro do Barro, e de decréscimo de cerca de +3 a 0‰ até o topo da Formação Rio de Contas (Figura 10). O balanço hídrico (influxo vs. evaporação) é considerado como o fator mais importante no controle da evolução isotópica do oxigênio nos carbonatos lacustres (Talbot, 1990; Kelts & Talbot, 1990; Talbot & Kelts, 1990; Lister et al., 1991; Talbot, 1994; Anadón et al., 1994; Mohammed et al., 1995; Valero Garcés et al., 1995). De modo geral o aumento da evaporação em relação ao influxo tende a produzir um enriquecimento no isótopo ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}_{\text{CARB}}$ mais positivo), enquanto o aumento do influxo acarreta um enriquecimento em ^{16}O ($\delta^{18}\text{O}_{\text{CARB}}$ mais negativo). A tendência geral da curva de $\delta^{18}\text{O}_{\text{CARB}}$ obtida no poço 1-BAS-64 está de acordo portanto com os dados palinológicos de Picarelli & Grillo (1996), segundo os quais a seqüência *rift* da Bacia de Camamu depositou-

se sob condições de aridez crescente (maior evaporação) do Rio da Serra ao Aratu, e sob condições de aumento da umidade (maior influxo de água) do Buracica ao Jiquiá. Com base neste modelo evolutivo se pode inferir que a salinidade da água do paleolago de Camamu aumentou da base da seqüência rifte até a parte basal da Formação Rio de Contas, voltando a diminuir em direção ao topo da seqüência, o que também é coerente com a variação nos teores de carbonato total (Figura 10).

A curva de $\delta^{13}\text{C}$ da fração de carbonato total ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CARB}}$), por sua vez, tem início com valores relativamente estáveis (entre 1 e 3‰) nos terços basal e médio da Formação Morro do Barro, passando a oscilar bruscamente (de 0,5 a 4,0‰) ao longo da parte superior desta unidade e da Formação Rio de Contas (Figura 10). Hollander et al. (1993) observaram uma

estreita relação entre a disponibilidade de nutrientes, a quantidade de CO₂ dissolvido na água, a produtividade primária e o fracionamento isotópico do carbono na coluna d'água expresso através do parâmetro $\Delta\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CARB}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{MO}}$). Em períodos de baixa a moderada produtividade associada a condições anóxicas, os autores mencionados observaram uma correlação positiva entre os valores de IH e de $\Delta\delta^{13}\text{C}$, enquanto nas fases de alta produtividade primária, há uma correlação inversa. A aplicação desta abordagem na seção estudada revela a existência de uma correlação positiva na Formação Morro do Barro e uma correlação inversa na Formação Rio de Contas (Figura 11), sugerindo que o grau de preservação foi o fator determinante na formação dos depósitos ricos em matéria orgânica da primeira, enquanto a produtividade primária exerceu papel preponderante na deposição dos sedimentos da segunda.

A utilização de parâmetros moleculares (biomarcadores) tem se revelado fundamental no estudo dos organismos que contribuíram para a matéria orgânica sedimentar e das condições paleoambientais das rochas geradoras de petróleo (*e.g.*, Moldowan et al. 1985; Mello et al., 1988). Dentre os diversos parâmetros moleculares que podem ser usados em estudos geoquímicos, três foram selecionados para auxiliar na caracterização paleoambiental da seção rifte da Bacia de Camamu (Figura 12). A relação pristano/fitano (Pri/Fit) reflete a natureza dos organismos e/ou a salinidade e o Eh do ambiente deposicional (Didyk et al., 1978; Ten Haven et al., 1988). A razão esteranos/hopanos

(Est/Hop), por sua vez, reflete a proporção entre o aporte de algas e vegetais superiores (representadas pelos esteranos) e a contribuição de biomassa bacteriana (Peters & Moldowan, 1993). Finalmente a relação gamacerano/hopano (Gam/Hop) é proporcional à salinidade do ambiente (Moldowan et al., 1985; Mello et al., 1988).

A falta de coincidência entre as excursões positivas da curva de $\delta^{13}\text{C}$ e os valores mais baixos da razão Pri/Fit (comparar figuras 9 e 12) e a ausência de variações significativas na proporção de matéria orgânica terrestre ao longo da coluna do 1-BAS-64 indicam que, no caso da seqüência rifte de Camamu, este parâmetro molecular não está refletindo as condições de salinidade ou a natureza dos organismos, mas provavelmente as variações de Eh do paleolago. Os valores mais elevados de Pri/Fit portanto estariam indicando que a Formação Rio de Contas se depositou sob condições em geral mais oxidantes do que as que prevaleceram durante a sedimentação da Formação Morro do Barro. Por outro lado, o aumento da razão Est/Hop em direção ao topo da seqüência rifte (Figura 12) é coerente com o importante aporte de biomassa bacteriana inferido para a Formação Morro do Barro e com os altos níveis de produtividade primária propostos para a Formação Rio de Contas. Finalmente, os valores mais altos de Gam/Hop ocorrem justamente na passagem entre as formações Morro do Barro e Rio de Contas (Figura 12), o que está de acordo com o máximo de salinidade do lago inferido para este intervalo.

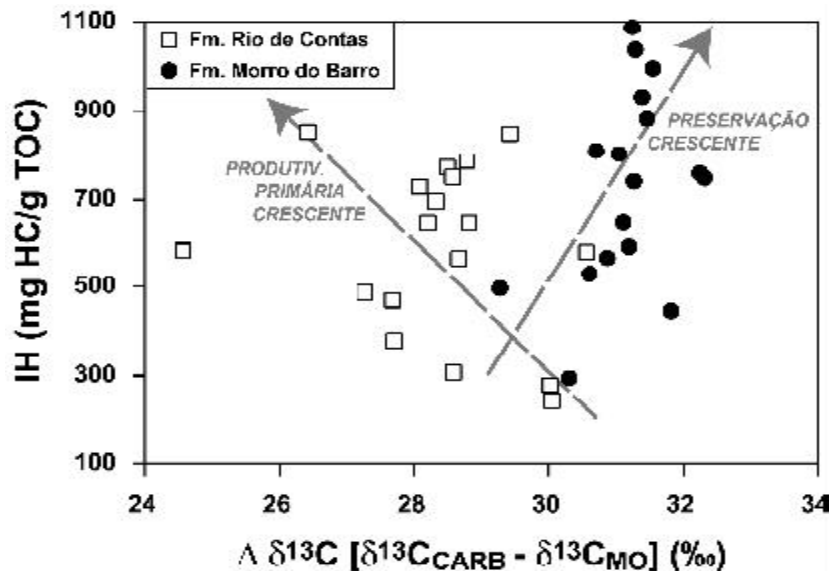


FIGURA 11. Gráfico mostrando os diferentes padrões de correlação entre o índice de hidrogênio (IH) e o parâmetro $\Delta\delta^{13}\text{C}$ (ver explicação no texto) obtidos para as formações Morro do Barro e Rio de Contas, indicativos respectivamente da influência da preservação e da produtividade primária sobre a formação das rochas geradoras. Modificado de Gonçalves (1997).

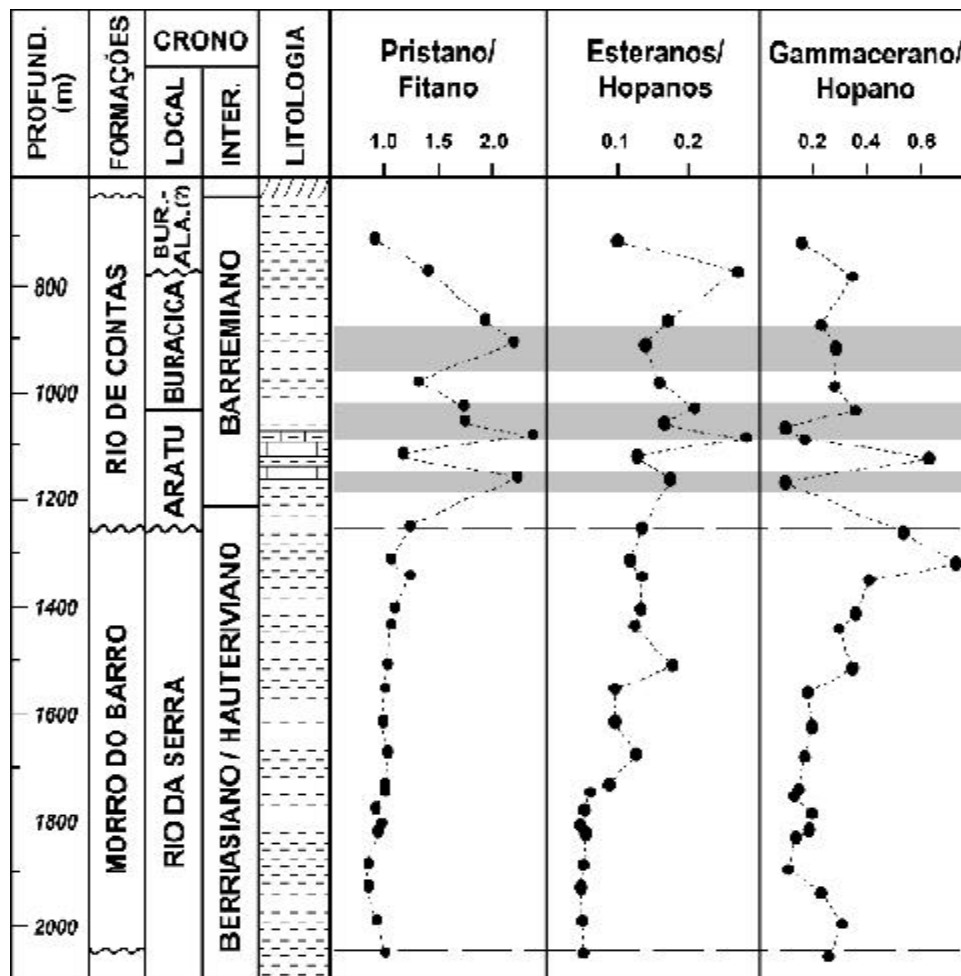


FIGURA 12. Variação das relações Pristano/Fitano, Esteranos/Hopanos e Gamacerano/ Hopano ao longo da seqüência rifte no poço estudado da Bacia de Camamu (adaptado de Gonçalves, 2002). As faixas em tom cinza claro correspondem aos mesmos intervalos assinalados na Figura 9.

MODELO PALEOLIMNOLÓGICO E CONTROLES SOBRE A FORMAÇÃO DAS ROCHAS GERADORAS

Conforme constatado por vários autores (*e.g.*, Lambiase, 1990; Scholz et al., 1998) a evolução tectônica e seus reflexos sobre a fisiografia dos rifte e o relevo das áreas de drenagem adjacentes exercem um forte controle sobre a história deposicional da bacia lacustre. O conhecimento desta evolução, portanto, é fundamental para reconstruções paleolimnológicas. No caso da Bacia de Camamu, estudos estratigráficos e de subsidência (Picarelli & Grillo, 1996; Gonçalves et al., 2000) indicam que a deposição dos sedimentos Rio da Serra caracterizou-se por intensa atividade das falhas de borda do rifte e rápida subsidência, enquanto a sedimentação correspondentes aos andares Aratu e Buracica correspondeu a uma fase de relativa quiescência e menores taxas de subsidência. Com base nestes estudos é possível inferir que durante o tempo Rio da Serra a bacia rifte de Camamu constituiu um lago profundo, estreito e limitado por falhas (baixa razão área/

profundidade) que evoluiu para um lago mais raso e amplo na fase Aratu/Buracica (alta razão área/profundidade).

A menor razão área/profundidade do paleolago Rio da Serra provavelmente dificultou a circulação do corpo aquoso, favorecendo a meromixia e o estabelecimento de condições anóxicas em grande parte da coluna d'água. O modelo de evolução climática e de salinidade sugere que durante este período o lago possuía águas variando de doce a salobras. Por outro lado, a maior razão área/profundidade do paleolago Aratu/Buracica possivelmente permitiu uma circulação mais eficiente da massa d'água, o que limitou a implantação de condições anóxicas mas favoreceu a reciclagem de nutrientes e o aumento da produção primária. De acordo com o modelo de evolução climática e de salinidade neste último período, o lago possuía águas variando de salobra/salina (Aratu) a doces (Buracica/Jiquiá). Tendo como base este cenário evolutivo, são propostos modelos paleolimnológicos distintos para as rochas geradoras das formações Morro do Barro e Rio de Contas.

As rochas potencialmente geradoras da Formação Morro do Barro (Figura 13) depositaram-se num lago profundo, de águas doces a salobras, e sob condições climáticas de aridez crescente. A coluna d'água manteve-se estratificada, com uma termoclina estável e relativamente rasa. Deste modo, a maior parte da coluna d'água era anóxica, o que favorecia a preservação da matéria orgânica, porém não possibilitava o retorno dos nutrientes incorporados à biomassa. Como resultado do baixo influxo de água e da ineficiência da reciclagem de nutrientes, a produtividade primária manteve-se em níveis moderados a baixos. O processo de metanogênese constituiu o principal mecanismo de degradação da matéria orgânica produzida no nível trófico primário, o que deve ter resultado na incorporação de uma quantidade significativa de biomassa

de origem bacteriana (bactérias metanogênicas e metanotróficas). Nestas condições, formaram-se rochas geradoras com altos índices de hidrogênio, teores de carbono orgânico moderados a altos e matéria orgânica depletada em ^{13}C .

Já as rochas geradoras da Formação Rio de Contas (Figura 13) depositaram-se num lago mais raso e amplo, de águas variando de salobras a doces, e clima progressivamente mais úmido. Com a maior área superficial e o conseqüente aumento do *fetch*, a termoclina do lago tornou-se mais profunda, favorecendo a reciclagem dos nutrientes e proporcionando uma melhor oxigenação da massa d'água. O maior influxo de água doce e o retorno mais eficiente dos nutrientes para zona fótica acarretaram um aumento significativo da produtividade primária, gerando uma grande

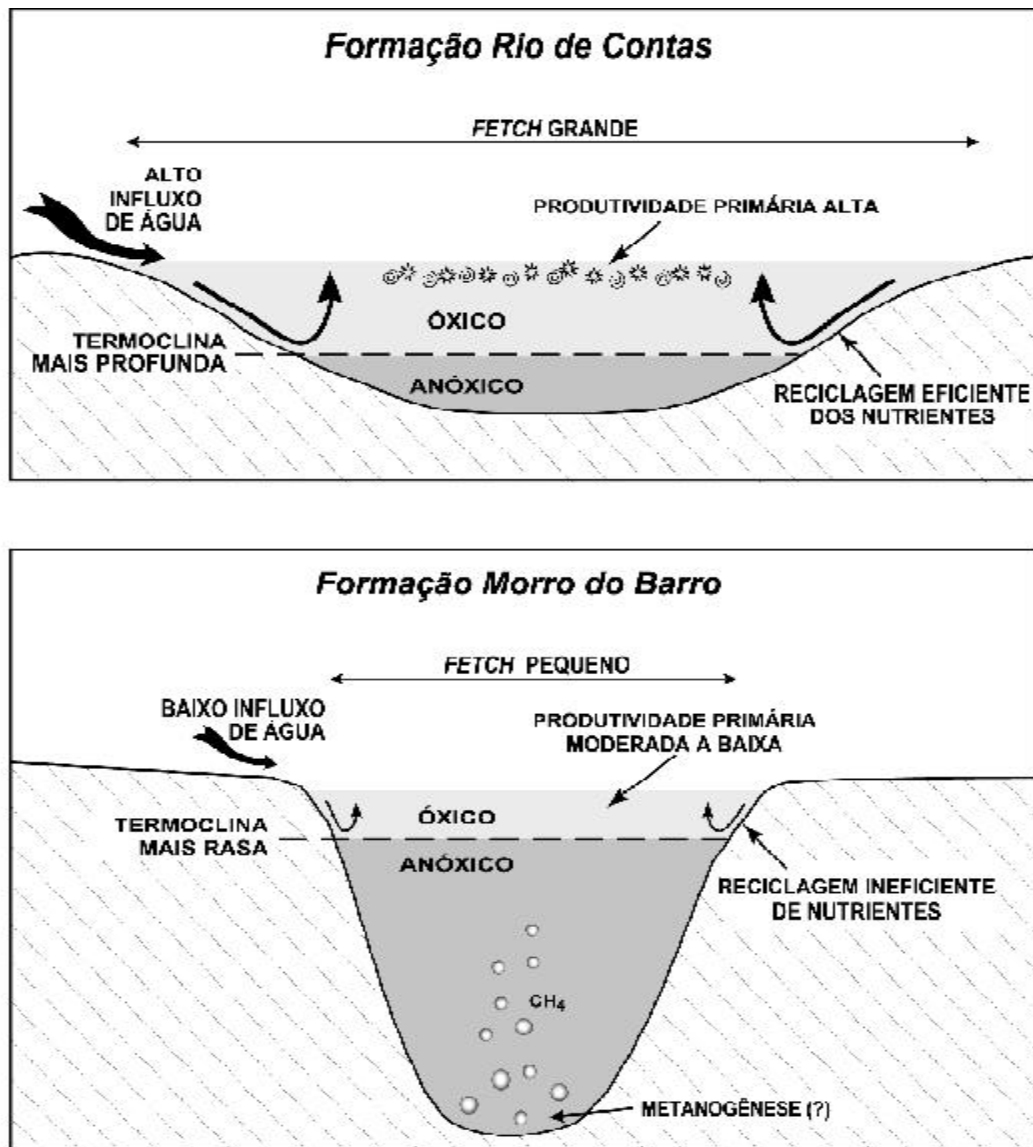


FIGURA 13. Representação esquemática dos modelos paleolimnológicos propostos para o desenvolvimentos das rochas geradoras das formações Morro do Barro e Rio de Contas. daptado de Gonçalves (1997, 2002).

quantidade de biomassa de origem essencialmente algálica. Por outro lado, com o aumento da parte óxica da coluna d'água, pioraram as condições de preservação da matéria orgânica em relação àquelas

vigentes durante o Rio da Serra. Como resultado, formaram-se rochas geradoras com altos teores de carbono orgânico, índices de hidrogênio moderados a altos, e matéria orgânica enriquecida em ^{13}C .

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os lagos constituem ambientes cujas particularidades impõem o uso de modelos sedimentológicos, estratigráficos e geoquímicos adequados às suas características. No caso dos lagos rifte, um importante avanço na compreensão da interação entre tectônica e clima na definição da sucessão sedimentar e da arquitetura de fácies vem ocorrendo nos últimos 10 anos. A aplicação de ferramentas geoquímicas no estudo de seqüências lacustres também avançou muito neste período. Pouco tem sido feito, entretanto, no sentido de integrar os avanços obtidos nessas duas áreas do conhecimento visando a melhoria no entendimento dos processos que controlam a distribuição lateral e vertical das rochas geradoras e as variações de composição e potencial petrolífero. A diversidade dos modelos de formação de rochas geradoras lacustres apresentados nesta revisão dá uma idéia do quanto ainda é necessário progredir.

É importante também mencionar que praticamente todos os modelos de rochas geradoras que têm sido gerados (inclusive o proposto neste trabalho) são

estáticos, isto é, tratam de buscar um conjunto de condições apropriadas para explicar uma determinada distribuição de fácies e uma associação de parâmetros geoquímicos, sem elucidar, realmente, a resposta dinâmica de processos limnológicos específicos sobre o registro sedimentar e geoquímico. A aplicação de modelos matemáticos determinísticos que possam levar em conta simultaneamente os principais fatores geológicos, climáticos, hidrológicos e bióticos e que sejam restringidos pelas leis básicas da física e química poderão colaborar bastante para aprofundar este conhecimento. Alguns esforços têm sido feitos nesse sentido, ainda que até o momento estes tenham se limitado apenas a aspectos particulares dos sistemas lacustres (Yan et al., no prelo; Tsuchida et al., 2002). No futuro, modelos matemáticos mais abrangentes certamente desempenharão um papel fundamental no entendimento da dinâmica dos sistemas lacustres e sua influência sobre a deposição de rochas geradoras de petróleo.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRÁS pela permissão para o uso das amostras de poço e o suporte laboratorial prestado durante a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, P.A. & COLLINSON, J.D. Lakes. In: H.G. Reading (Ed.), **Sedimentary Environments and Facies**. Oxford: Blackwell, 1986, p. 63-94.
2. ANADÓN, P.; UTRILLA, R.; JULIÀ, R. Palaeoenvironmental reconstruction of a Pleistocene lacustrine sequence from faunal assemblages and ostracod shell geochemistry, Baza Basin, SE Spain. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 111, p. 191-205, 1994.
3. ARAI, M.; HASHIMOTO, A.T.; UESUGUI, N. Significado cronoestratigráfico da associação microflorística do Cretáceo Inferior do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 3, n. 1-2, p. 87-103, 1989.
4. ARIZTEGUI, D.; HOLLANDER, D.J.; MCKENZIE, J.A. Algal dominated lacustrine matter can be either type I or type II: evidence for biological, chemical and physical controls on organic matter quality. In: **LATIN AMERICAN CONGRESS ON ORGANIC GEOCHEMISTRY**, 4, 1994, Bucaramanga, (Colômbia). **Resumos Expandidos...** Bucaramanga: Latin American Association of Organic Geochemistry, 1994, p. 25-27.
5. AZEVEDO, R.L.M. **Isótopos de Oxigênio e Carbono e estudos estratigráficos de detalhe na Bacia de Campos: aplicações no Quaternário e Oligoceno**. Rio de Janeiro, 1994. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
6. AZEVEDO, R.L.M.; RODRIGUES, R.; TAKAKI, T. Aplicação dos dados isotópicos de carbono e oxigênio, de rocha-total, em estudos paleoambientais. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 11, n. 1-2, p. 19-32, 1997.
7. BUONICONTI, M.R. & SCHOLZ, C.A. The role of lake level dynamics in lacustrine stratal architecture and sequence development: evidence from the Songwe Delta, Lake Malawi, East Africa. In: **ANNUAL CONVENTION OF THE AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS**, 2001, Denver (Colorado, EUA). **Abstracts...** Denver: American Association of Petroleum Geologists, 2001, p. A-29.
8. BURWOOD, R.; LEPLAT, P.; MYCKE, B.; PAULET, J. Rifted margin source deposition: a carbon isotope and biomarker study of a West African Lower Cretaceous "lacustrine" section. **Organic Geochemistry**, v. 19, p. 41-52, 1992.

9. CANFIELD, D.E. Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments. **Chemical Geology**, v. 114, p. 315-329, 1994.
10. CARROL, A.R. & BOHACS, K.M. Stratigraphic classification of ancient lakes: balancing tectonic and climatic controls. **Geology**, v. 27, n. 2, p. 99-102, 1999.
11. CARROL, A.R. & BOHACS, K.M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 85, n. 6, p. 1033-1053, 2001.
12. DEGENS, E.T.; VON HERZEN, R.P.; WONG, H.W.; DEUSER, W.G.; JANNASH, H.W. Lake Kivu – structure, chemistry and biology of an east African rift lake. **Geologische Rundschau**, v. 62, p. 245-277, 1973.
13. DEMAISON, G.J. & MOORE, G.T. Anoxic environments and oil source bed genesis. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 64, n. 8, p. 1179-1209, 1980.
14. DEUSER, W.G. Isotopic evidence for diminishing supply of available carbon during diatom bloom in the Black Sea. **Nature**, v. 225, p. 1069-1071, 1970.
15. DIDYK, B.M.; SIMONEIT, B.R.T.; BRASSEL, S.C.; EGLINTON, G. Organic geochemical indicators of paleoenvironmental conditions of sedimentation. **Nature**, v. 272, p. 216-222, 1978.
16. ESPITALIÉ, J.; LAPORTE, J.L.; MADEC, M.; MARQUIS, F.; LEPAT, P.; PAULET, J.; BOUTEFEU, A. Méthode rapide de caractérisation des roches mère, de leur potentiel pétrolier et leur degré d'évolution. **Revue de l'Institut Français du Pétrole**, v. 32, p. 23-42, 1977.
17. ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 1988, 575p.
18. EUGSTER, H.P. & HARDIE, L.A. Saline Lakes. In: A. Lerman (Ed.), **Lakes: Chemistry, Geology and Physics**. New York, Springer-Verlag, 1978, p. 237-294.
19. FEE, E.J. A relation between morphometry and primary productivity and its use in interpreting whole-lake eutrophication experiments. **Limnology and Oceanography**, v. 24, n. 3, p. 401-416, 1979.
20. FREEMAN, K.H. **The carbon isotopic compositions of individual compounds from ancient and modern environments**. Bloomington, 1991, 146 p. Tese (Ph.D.) – Indiana University.
21. GONÇALVES, F.T.T. **Caracterização geoquímica e paleoambiental do Cretáceo Inferior da Bacia de Camamu, Bahia**. Rio de Janeiro, 1997, 97 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
22. GONÇALVES, F.T.T.; ARAÚJO, C.V.; PENTEADO, H.L.B.; FROTA, E.S.T.; HANSI JR., G.P.; SOLDAN, A.L. Séries Naturais: aplicação no estudo da geração e expulsão do petróleo e no mapeamento de oil-kitchens. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 11, n. 1-2, p. 116-131, 1997.
23. GONÇALVES, F.T.T.; BEDREGAL, R.P.; COUTINHO, L.F.C.; MELLO, M.R. Petroleum system of the Camamu-Almada Basin: a quantitative modeling approach. In: M.R. Mello & B.J. Katz (Eds.), **Petroleum Systems of South Atlantic Margins**. American Association of Petroleum Geologists Memoir, n. 73, p. 257-271, 2000.
24. GONÇALVES, F.T.T. Organic and isotope geochemistry of the Early Cretaceous rift sequence in the Camamu Basin, Brazil: paleolimnological inferences and source rock models. **Organic Geochemistry**, v. 33, n. 1, p. 67-80, 2002.
25. GUZZO, J.P. & ARIENTI, L.M. Depositional significance of lacustrine black shales: falsifying a paradigm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION OF THE AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS, 1998, Rio de Janeiro. **Extended Abstracts...** Rio de Janeiro, American Association of Petroleum Geologists, 1998, p. 308-309.
26. HARVEY, H.R.; TUTTLE, J.H.; BELL, J.T. Kinetics of phytoplankton decay during simulated sedimentation: changes in biochemical composition and microbial activity under oxic and anoxic conditions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, n. 16, p. 3367-3377, 1995.
27. HOLLANDER, D.; BEHAR, F.; VANDENBROUKE, M.; BERTRAND, P.; MCKENZIE J.A. Geochemical alteration of organic matter in eutrophic Lake Greifen: implications for the determination of organic facies and the origin of lacustrine source rocks. In: A.Y. Huc (Ed.), **Deposition of Organic Facies**. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, 1991, n. 30, p. 181-193.
28. HOLLANDER, D.J.; MCKENZIE, J.A.; HSU, K.J.; HUC, A.Y. Application of an eutrophic lake model to the origin of ancient organic carbon-rich sediments. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 1, p. 157-179, 1993.
29. HORSFIELD, B.; CURRY, D.J.; BOHACS, K.M.; LITTKER, R.; RULLKOTTER, J.; SCHENK, H.J.; RADKE, M.; SCHAEFER, R.G.; CARROL, A.R.; ISAKSEN, G.; WITTE, E.G. Organic geochemistry of freshwater and alkaline lacustrine sediments in the Green River Formation of the Washakie Basin, Wyoming, USA. **Organic Geochemistry**, v. 22, n. 3-5, p. 415-440, 1994.
30. KATZ, B.J. Controls on distribution of lacustrine source rocks through time and space. In: B.J. Katz (Ed.), **Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs**. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, n. 50, p. 61-76, 1990.
31. KATZ, B.J. Factors controlling the development of lacustrine petroleum source rocks – an update. In: A.Y. HUC (Ed.), **Paleogeography, Paleoclimate and Source Rocks**. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, 1995, n. 40, p. 61-80.
32. KELTS, K. Environments of deposition of lacustrine source rocks: an introduction. In: A.J. Fleet; K. Kelts; M.R. Talbot (Eds.), **Lacustrine petroleum source rocks**. Geological Society Special Publication, 1988, n. 40, p. 3-26.
33. KELTS, K. & TALBOT, M.R. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions. In: M.M. Tilzer & C. Serruya (Eds.), **Large Lakes: Ecological Structure and Function**. Berlin: Springer-Verlag, 1990, p. 288-315.
34. KIRKLAND, D.W. & EVANS, R. Source-rock potential of evaporitic environment. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 65, p. 181-190, 1981.
35. KUO, L.C. Lower Cretaceous source rocks in northern Gabon: effect of organic facies and thermal maturity on crude oil quality. **Organic Geochemistry**, v. 22, n. 2, p. 257-273, 1994.
36. LAMBIASE, J.J. A model for tectonic control of lacustrine stratigraphic sequences in continental rift basins. In: B.J. Katz (Ed.), **Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs**. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 1990, n. 50, p. 265-276.
37. LISTER, G.S.; KELTS, K.; ZAO, C.K.; YU, J.Q.; NISSEN, F. Lake Qinghai, China: closed basin lake levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the latest Pleistocene. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 84, p. 141-162, 1991.
38. MARGALEF, R. **Limnología**. Barcelona: Ediciones Omega, 1983, 250 p.
39. MELLO, M.R.; TELNAES, N.; GAGLIANONE, P.C.; CHICARELLI, M.I.; BRASSEL, S.C.; MAXWELL, J.R.

- Organic geochemical characterization of depositional environments of source rocks and oils in Brazilian marginal basins. **Organic Geochemistry**, v. 13, p. 31-45, 1988.
40. MELLO, M.R. & MAXWELL, J.R. Organic Geochemical and biological marker characterization of source rocks and oils derived from lacustrine environments in the Brazilian continental margin. In: B.J. Katz (Ed.), **Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs**. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, n. 50, p. 77-98, 1990.
 41. MEYERS, P.A. & ISHIWATARI, R. Lacustrine organic geochemistry – an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. **Organic Geochemistry**, v. 20, n. 7, p. 867-900, 1993.
 42. MOHAMMED, M.U.; BONNEFILLE, R.; JOHNSON, T.C. Pollen and isotopic records in Late Holocene sediments from Lake Turkana, Kenya. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 119, p. 371-383, 1995.
 43. MOLDOWAN, J.M.; SEIFERT, W.K.; GALLEGOS, E.J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 69, p. 1255-1268, 1985.
 44. NETTO, A.S.T. & RAGAGNIN, G.M. Compartimentação exploratória da Bacia de Camamu, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal. **Anais... Natal: Sociedade Brasileira de Geologia**, 1990, v. 1, p. 171-182.
 45. NETTO, A.S.T.; WANDERLEY FILHO, J.R.F.; FEIJÓ, F.J. Bacias de Jacuípe, Camamu e Almada. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n. 1, p. 173-184, 1994.
 46. OLSEN, P.E. Tectonic, climatic, and biotic modulation of lacustrine ecosystems - examples from Newark Supergroup of Eastern North America. In: B.J. Katz (Ed.), **Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs**. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, n. 50, p. 209-224, 1990.
 47. OWEN, R.B.; CROSSLEY, R.; JOHNSON, T.C.; TWEEDLE, D.; KORNFIELD, I.; DAVISON, S.; ECCLES, D.H. Major low levels of Lake Malawi and their implications for speciation rates in cichlid fishes. **Proceedings of the Royal Society of London, B: Biological Science Letters**, v. 122, p. 221-238, 1990.
 48. PATALAS, K. Patterns in zooplankton distribution and their causes in North American great lakes. In: M.M. Tilzer & C. Serruya (Eds.), **Large Lakes: Ecological Structure and Function**. Berlin: Springer-Verlag, 1990, p. 441-456.
 49. PEDERSON, T.F. & CALVERT, S.E. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 74, n. 4, p. 454-466, 1990.
 50. PETERS, K.E. & MOLDOWAN, J.M. **The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments**. New Jersey: Prentice-Hall, 1993, 363 p.
 51. PETERS, K.E.; CUNNINGHAM, A.E.; WALTERS, C.C.; JIGANG, J.; ZHAOAN, F. Petroleum systems in the Jiangling-Dangyang area, Jiangnan Basin, China. **Organic Geochemistry**, v. 24, n. 10-11, p. 1035-1060, 1996.
 52. PICARELLI, A.T.; LANA, C.L.; GUZZO, J.; MILHOMEM, P. **Correlação e refinamento estratigráfico da sequência "rift" das bacias do Recôncavo, Tucano e Potiguar**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, Divisão de Exploração, Relatório Interno, 1993, 187 p.
 53. PICARELLI, A.T. & GRILLO, J.L. **Considerações sobre a paleogeografia da seção "rift" das bacias de Camamu- Almada e Recôncavo com base em dados micropaleontológicos**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, Divisão de Exploração, Relatório Interno, 1996, 102 p.
 54. PONTE, F.C. & ASMUS, H.E. The Brazilian Marginal Basins: current state of knowledge. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 48, p. 215-239, 1976.
 55. POWELL, T.G. Petroleum geochemistry and depositional setting of lacustrine source rocks. **Marine and Petroleum Geology**, v. 3, p. 200-219, 1986.
 56. RODRIGUES, R. & TAKAKI, T. Estratigrafia isotópica de seqüências carbonáticas da costa norte do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 1, n. 2, p. 177-182, 1987.
 57. SCHALLER, H. Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe/Alagoas. **Boletim Técnico da Petrobrás**, v. 12, n. 1, p. 21-86, 1969.
 58. SCHOLZ, C.A. & ROSENDHAL, B.R. Low lake stands in Lakes Malawi and Tanganika, East Africa, delineated with multifold seismic data. **Science**, v. 240, p. 1645-1648, 1988.
 59. SCHOLZ, C.A.; MOORE, T.C.; HUTCHINSON, D.R.; GOLMSHTOK, A.J.; KLITGORD, K.D.; KUROTKIN, A.G. Comparative sequence stratigraphy of low-latitude versus high-latitude lacustrine rift basins: seismic data examples from the East African Basins and Baikal rifts. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology**, v. 140, p. 401-420, 1998.
 60. SERRUYA, C. Overview: an appraisal of concepts. In: M.M. Tilzer & C. Serruya (Eds.), **Large Lakes: Ecological Structure and Function**. Berlin: Springer-Verlag, 1990, p. 663-673.
 61. SHACKLETON, N.J.; HALL, M.A.; PATE, D. High-resolution stable isotope stratigraphy from bulk sediment. **Paleoceanography**, v. 8, n. 2, p. 141-148, 1993.
 62. SINNINGHE DAMSTÉ, J.S.; HERAS, F.X.C.; VAN BERGEN, P.F.; DE LEEUW, J.W. Characterization of Tertiary Catalan lacustrine oil shales: discovery of extremely organic sulphur-rich Type I kerogens. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, p. 389-415, 1993.
 63. SOREGHAN, M.J. & COHEN, A.S. Textural and compositional variability across litoral segments of Lake Tanganika: the effect of asymmetric basin structure on sedimentation in large rift lakes. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 80, n. 3, p. 382-409, 1996.
 64. TALBOT, M.R. The origin of lacustrine source rocks: evidence from the lakes of tropical Africa. In: A.J. Fleet; K. Kelts; M.R. Talbot (Eds.), **Lacustrine petroleum source rocks**. Geological Society Special Publication, 1988, n. 40, p. 29-43.
 65. TALBOT, M.R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates. **Chemical Geology**, (Isotope Geoscience Section), v. 80, p. 261-279, 1990.
 66. TALBOT, M.R. Paleohydrology of the Late Miocene Ridge basin lake, California. **Geological Society of America Bulletin**, v. 106, p. 1121-1129, 1994.
 67. TALBOT, M.R. & KELTS, K. Paleolimnological signatures from carbon and oxygen isotopic ratios in carbonates from carbon-rich lacustrine sediments. In: B.J. Katz (Ed.), **Lacustrine Basin Exploration: Case Studies and Modern Analogs**. American Association of Petroleum Geologists, Memoir n. 50, p. 99-112, 1990.
 68. TEN HAVEN, H.L.; DE LEEUW, J.W.; RULLKOTTER, J.; SINNINGHE DAMSTÉ, J.S. Application of biological markers in the recognition of paleohypersaline environments. In: A.J. Fleet; K. Kelts; M.R. Talbot (Eds.), **Lacustrine petroleum source rocks**. Geological Society Special Publication, 1988, n. 40, p. 3-26.

69. TILZER, M.M. Specific properties of large lakes. In: M.M. TILZER & C. SERRUYA (Eds.), **Large Lakes: Ecological Structure and Function**. Berlin: Springer-Verlag, 1990, p. 39-43.
70. TISSOT, B.P. & WELTE, D.H. **Petroleum Formation and Occurrence**. Berlin: Springer-Verlag, 1984, 699 p.
71. TRINDADE, L.A.F.; DIAS, J.L.; MELLO, M.R. Sedimentological and geochemical characterization of the Lagoa Feia Formation, rift phase of the Campos Basin, Brazil. In: B. J. Katz (Ed.), **Petroleum Source Rocks. Casebooks in Earth Sciences**, Springer-Verlag, 1995, p. 149-166.
72. TSUCHIDA, K.; OKUI, A.; YAMADE, Y.; YAMAZAKI, N.; IWAHASHI, R. Computer simulation of organic matter sedimentation in lacustrine environment: a case study on present Lake Tanganika. In: ANNUAL CONVENTION OF THE AMERICAN ASSOCIATION OF PETROLEUM GEOLOGISTS, 2002, Houston, Texas, EUA. **Abstracts...** Houston: American Association of Petroleum Geologists, 2002, p. A-179.
73. VALERO GARCÉS, B.L.; KELTS, K.; ITO, E. Oxygen and carbon isotope trends and sedimentological evolution of a meromitic and saline lacustrine system: the Holocene Medicine Lake basin, North American Great Plains, USA. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 117, p. 253-278, 1995.
74. VAN KREVELEN, D.W. **Coal: tipology-chemistry-physics-composition**. Amsterdam: Elsevier, 514 p, 1961.
75. VIANA, C.F.; GAMA JR., E.G.; SIMÕES, I.A.; MOURA, J.A.; FONSECA, J.R.; ALVES, R.J. Revisão estratigráfica da Bacia do Recôncavo/Tucano. **Boletim Técnico da Petrobrás**, v. 14, n. 3-4, p. 157-192, 1971.
76. WETZEL, R.G. **Limnology**. Philadelphia: Saunders College, 1983, 767 p.
77. WONG, W.W. & SACKET, W.M. Fractionation of stable carbon isotopes by marine phytoplankton. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 42, p. 1809-1815, 1978.
78. YAN, J.P.; HINDERER, M.; EINSELE, G. Geochemical evolution of closed-basin lakes: general model and application to Lakes Qinghai and Turkana. **Sedimentary Geology**. (No prelo).