

Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Baía São Luís, Maranhão, Brasil

Evolution of the Post-Barreiras Sediments in the coastal zone of São Luís Basin, Maranhão, Brazil

Dilce de Fátima Rossetti^I, Renê Rojas Rocca^{II}, Sonia Hatsue Tatum^{III}

^IInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo, Brasil

^{II}Universidade de São Paulo. São Paulo, São Paulo, Brasil

^{III}Universidade Federal de São Paulo. Santos, São Paulo, Brasil

Resumo: Os Sedimentos Pós-Barreiras têm sido pouco estudados, apesar do interesse em reconstituições do nível do mar e da tectônica no Quaternário. Esses estratos registram mais de um episódio de deposição, que permanecem por ser investigados. Este trabalho apresenta resultados de datação por luminescência opticamente estimulada (LOE) de Sedimentos Pós-Barreiras expostos no litoral maranhense. As idades indicam deposição do Neopleistoceno ao Neo-holoceno. Foram registradas três sucessões sedimentares de idades entre 84.000 e 38.000 anos, 29.000 e 16.000 anos, e 11.000 a 500 anos. A sucessão 1, mais antiga, iniciou-se após o Último Interglacial, coincidente com elevação do nível do mar de alta frequência entre 84.000 e 70.000 anos e pode incluir contribuição marinha. O restante dessa sucessão, bem como a sucessão 2, ocorreu durante rebaixamento do nível do mar, que culminou com o Último Máximo Glacial. Esses depósitos são relacionados com o retrabalhamento eólico de areias provavelmente marinhas, expostas no litoral. A sucessão 3 foi formada durante a elevação do nível do mar que culminou com a transgressão do Meso-holoceno. Somente depósitos formados em dunas eólicas foram registrados nesta sucessão. Estes preencheram depressões e reentrâncias na Formação Barreiras e, eventualmente, avançaram em áreas onde esta unidade é topograficamente elevada.

Palavras-chave: Luminescência opticamente estimulada. Sedimentos Pós-Barreiras. Idade. Neopleistoceno-Neo-holoceno.

Abstract: The Post-Barreiras Sediments have been poorly studied, despite their interest for reconstituting sea-level fluctuations and the tectonic history in the Quaternary. These strata record more than a single depositional episode, which remain to be investigated. This work presents the results of optically stimulated luminescence (OSL) of the Post-Barreiras Sediments exposed in the littoral of the State of Maranhão, Brazil. The ages indicate deposition between the Late Pleistocene and Late Holocene. Three sedimentary successions were recorded between 84,000 and 38,000 years, 29,000 and 16,000 years, and 11,000 and 500 years. Succession 1, which is the oldest one, started after the Last Interglacial, being coincident with the high frequency-rise in sea level between 84,000 and 70,000 years, and might include a marine contribution. The remainder of this succession, as well as succession 2, occurred during the sea-level fall that culminated with the Last Glacial Maximum. These deposits are related to the aeolian sand reworking of coastal dunes exposed in the littoral. Succession 3 was formed during the sea-level rise that culminated with the mid-Holocene transgression. Only deposits formed in coastal dunes were recorded in this succession. These deposits filled depressions and embayment in the Barreiras Formation, and eventually advanced over areas where this unit is topographically elevated.

Keywords: Optically stimulated luminescence. Post-Barreiras Sediments. Age. Late Pleistocene-Late Holocene.

ROSSETTI, D. F., R. R. ROCCA & S. H. TATUMI, 2013. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Baía São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 8(1): 11-25.

Autor para correspondência: Dilce de Fátima Rossetti. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Divisão de Sensoriamento Remoto. Rua dos Astronautas, 1758. São José dos Campos, SP, Brasil. CEP 12245-970 (rossetti@dsr.inpe.br).

Recebido em 19/02/2013

Aprovado em 15/04/2013

Responsabilidade editorial: Hilton Tulio Costi



INTRODUÇÃO

Depósitos arenosos finos a médios e, em geral, maciços ocorrem sistematicamente sobrejacentes à Formação Barreiras (Mioceno) em várias localidades da costa brasileira. Esses estratos são ainda pouco estudados, o que se deve principalmente ao fato de terem sido tradicionalmente considerados como resultantes de espesso manto de alteração intempélica da Formação Barreiras (Mabesoone *et al.*, 1972; Mabesoone, 1984). Estudos enfocando detalhamento sedimentológico e estratigráfico no nordeste do Pará e litoral maranhense levaram à proposição de que estes correspondem a depósitos sedimentares (Rossetti *et al.*, 1989; Rossetti, 2004). Como referência informal, tais autores aproveitaram o termo Sedimentos Pós-Barreiras (Sá, 1969) para esses estratos, que foram separados da Formação Barreiras subjacente. Esses autores reconheceram, ainda, a importância de processos eólicos e gravitacionais (isto é, fluxos de detritos), além de possível influência de processos marinhos em reentrâncias costeiras, na deposição dessa unidade.

Pelo menos duas unidades limitadas por superfícies de descontinuidade de natureza erosiva são reconhecidas nos Sedimentos Pós-Barreiras do litoral norte do Brasil. Datações prévias por luminescência opticamente estimulada (LOE) desses estratos registraram idades entre 430.000 ± 60.000 e 3.400 ± 400 anos (Tatumi *et al.*, 2008). Este trabalho não detectou hiato significativo entre os Sedimentos Pós-Barreiras 1 e 2, havendo progressivo decréscimo de idades para cima.

Estudos detalhados realizados na Bacia Paraíba, Nordeste do Brasil, também resultaram na diferenciação de dois intervalos deposicionais dentro dos Sedimentos Pós-Barreiras. Os Sedimentos Pós-Barreiras 1, com datações LOE entre $74.800 \pm 9,3$ e $30.800 \pm 6,9$ anos (Rossetti *et al.*, 2011a), foram relacionados com eventos de sismicidade contemporânea à sedimentação, afetando depósitos formados, pelo menos em parte, na zona litorânea (Rossetti *et al.*, 2011b). Os Sedimentos Pós-Barreiras 2 incluem areias formadas por processos principalmente eólicos entre $8.800 \pm 0,9$ e $1.800 \pm 0,2$ anos.

Suguio *et al.* (2011) reconheceram vários terraços marinhos representativos das zonas de praia e antepraia superior ao longo do litoral nordeste brasileiro apresentando idades LOE entre 220.000 e 130.000 anos, temporalmente compatíveis com parte dos Sedimentos Pós-Barreiras do norte do Brasil.

Os sedimentos que se depositaram sobre a Formação Barreiras, mais do que representativos de um evento de sedimentação único e contínuo, podem incorporar uma complexidade de eventos deposicionais. O estudo desses depósitos é de grande relevância para a reconstituição dos eventos de oscilação do nível do mar e também da evolução climática e tectônica da costa brasileira no final do Quaternário. Apesar desse interesse, um esforço ainda maior permanece por ser feito, visando ampliar o registro desses depósitos, a fim de que eles possam ser utilizados em reconstituições de variação do nível do mar e de evolução tectônica quaternária tardia da margem brasileira. Em particular, ênfase deve ser dada à obtenção de um volume maior de datações, tendo em vista a correlação estratigráfica entre as várias áreas de ocorrência desses estratos.

Este trabalho tem o objetivo de discutir a evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira do litoral maranhense. Para isso, são apresentadas idades de luminescência opticamente estimulada de grãos de quartzo desses depósitos. O domínio de sedimentos arenosos quartzosos formados, pelo menos em parte, por processos eólicos favorece a aplicação desse método para o estabelecimento da cronologia desses estratos. Com base nesse registro cronológico, combinado com dados sedimentológicos, foi possível analisar, pela primeira vez, eventos deposicionais presentes nesta unidade dentro do contexto de variações climáticas e flutuações do nível do mar no Quaternário tardio.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO

A área de estudo situa-se na borda norte da porção emersa da Bacia de São Luís-Grajaú (Figura 1). Essa bacia localiza-se,



em sua grande maioria, no estado do Maranhão, estando imediatamente ao norte da Bacia do Parnaíba, da qual se destaca pelo Lineamento Estrutural Xambioá. Além desse limite sul, essa bacia é definida pelo Lineamento do rio Parnaíba, a leste, Arco do Capim, a noroeste, e Graben de ilha Nova, a norte.

A gênese da Bacia de São Luís-Grajaú acha-se ligada a esforços combinando cisalhamento puro e transcorrência. Estes teriam ocorrido com a formação de um sistema *rift* intracontinental abandonado (Góes & Rossetti, 2001), desenvolvido ao longo da Margem Equatorial Brasileira durante o processo de separação dos continentes africano e sul-americano, no Neojurássico/Eocretáceo. Previamente referida como Bacia do Alto Parnaíba e Bacia de Codó, a Bacia do Grajaú foi unida à Bacia de São Luís a norte, tendo-se em vista afinidades no arcabouço estrutural e no preenchimento sedimentar (Góes & Rossetti, 2001; Rossetti, 2001). Estudos faciológicos e estratigráficos utilizando dados de superfície e subsuperfície demonstram que estas bacias se comportaram como depressões individualizadas somente até o Albiano (cerca de 112 milhões de anos), quando, então, houve a transposição de altos estruturais que serviam de barreiras ao avanço da sedimentação para sul.

O embasamento da Bacia de São Luís-Grajaú é representado por rochas paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Parnaíba, assim como rochas pré-cambrianas das faixas de dobramentos Gurupi e Tocantins-Araguaia e do Cráton São Luís (Góes e Rossetti, 2001). O preenchimento sedimentar é representado por três sequências deposicionais, designadas S1, S2 e S3 (Rossetti, 2001), que incorporam rochas aptianas das formações Grajaú e Codó, bem como rochas eo/mesoalbianas e neocretáceas do Grupo Itapecuru (Rossetti & Truckenbrodt, 1997) (Figura 1).

Sobrejacente discordantemente às rochas cretáceas, ocorre uma sucessão neógeno-quadernária, predominantemente siliciclástica, representada pela Formação Barreiras e pelos Sedimentos Pós-Barreiras. Apesar de

delgados (em geral inferior a 60 m de espessura), esses depósitos são excepcionalmente bem representados em afloramentos, constituindo um registro importante da evolução geológica neógena a quadernária dessa bacia. A Formação Barreiras (Mioceno) foi depositada em sistemas estuarinos de vales incisos durante fase de mar transgressivo a alto (Rossetti, 2000, 2001). Os Sedimentos Pós-Barreiras foram agrupados em duas unidades estratigráficas. A unidade inferior, designada informalmente de Sedimentos Pós-Barreiras 1, consiste predominantemente em areias de coloração vermelho-clara a alaranjada, maciças, localmente bioturbadas de forma intensa, de seleção moderada a boa, granulometrias em geral finas a médias, podendo ser localmente grossas a conglomeráticas. Pelitos e argilitos bioturbados são também localmente registrados. A unidade superior, designada de Pós-Barreiras 2, consiste em areias finas a muito finas e bem selecionadas, com fragmentos de carvão dispersos e, eventualmente, fragmentos de cerâmica. As cores variam desde tipicamente amarelo-clara a amarelo-dourada, laranja-acinzentada, marrom-amarelada e amarelo-amarronzada. Ambas as unidades são predominantemente maciças, sendo diferenciadas por superfície de descontinuidade de natureza erosiva.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi coletado um total de 15 amostras ao longo de falésias costeiras entre as cidades de Alcântara e Guimarães, no litoral maranhense (Figura 1). Três falésias foram amostradas nesta localidade, que incluíram Mamuna Grande, Praia da Base e Praia do Peru. As amostras foram coletadas considerando diferentes profundidades ao longo de um mesmo perfil, de forma a registrar as variações de idade durante a deposição dos Sedimentos Pós-Barreiras. Durante a coleta, as amostras foram protegidas da luz solar, utilizando-se tubos de PVC de 5 cm de diâmetro e 33 cm de comprimento, a fim de evitar qualquer decaimento do sinal luminescente natural dos grãos que poderiam interferir na datação final. No laboratório, as amostras foram manipuladas sob iluminação vermelha. As

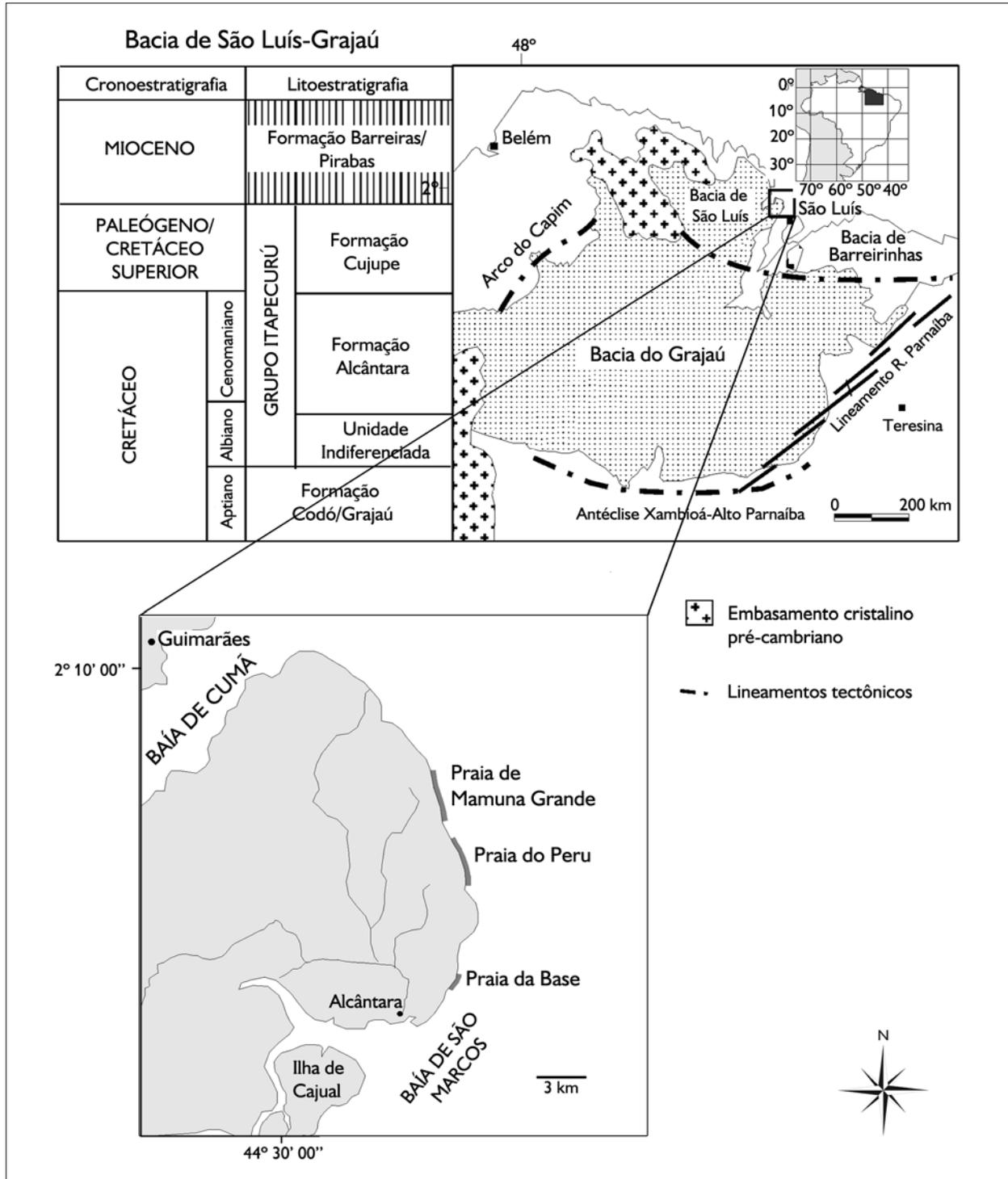


Figura 1. Localização da área de estudo no litoral do Estado do Maranhão, com indicação das falésias de onde provieram as amostras de Sedimentos Pós-Barreiras datadas por LOE/SAR. Também inserida nesta figura está a coluna estratigráfica simplificada da Bacia de São Luís-Grajaú (quadro à esquerda do mapa; modificado de Rossetti & Truckenbrodt, 1997).

amostras foram peneiradas para obtenção da fração entre 0,075 e 0,150 mm, e os grãos de quartzo foram separados utilizando-se H_2O_2 , HCl, HF (Aitken, 1998) e líquido denso (Politungstato de Sódio).

As datações foram obtidas por LOE, utilizando-se protocolo *Single Aliquot Regeneration* (SAR). Esse procedimento foi empregado porque, entre os métodos de análise por luminescência, é o que tem mostrado maior precisão na datação de depósitos sedimentares (Murray & Wintle, 2000; Wintle & Murray, 2006; Buylaert *et al.*, 2008; Lomax *et al.*, 2007). Além disso, publicação anterior objetivando comparações dos protocolos SAR e *Multiple Aliquot Regeneration* (MAR), utilizando as mesmas amostras do presente trabalho, evidenciou a maior precisão dos resultados obtidos pelo protocolo SAR (Rocca *et al.*, 2012). Sendo assim, optou-se por utilizar o protocolo SAR para estabelecer o arcabouço cronológico dos Sedimentos Pós-Barreiras em estudo e, assim, atingir o objetivo proposto de analisar sua evolução geológica dentro do contexto de variações climáticas e do nível do mar no Quaternário tardio.

As análises SAR foram realizadas com o sistema de leitura automática de LOE da RISO, modelo TL/OSL-DA-20, equipado com um fotomultiplicador EMI 9635QB e com diodos de luz azul (470 nm) para excitação das amostras. Assim, os experimentos de LOE foram realizados produzindo estímulos com luz azul e usando filtro U-340. A temperatura, durante estas medidas, foi de 120 °C, a fim de evitar o rearmadilhamento de elétrons. As curvas de decaimento de LOE foram obtidas usando um tempo total de 40 s, com o tempo de 160 ms em cada canal. As irradiações com radiação-beta foram realizadas à temperatura ambiente usando fonte de $^{90}Sr/^{90}Y$, acoplada no leitor RISO, com taxa de dose de 0,089 Gy/s no carrossel para porta-amostra em forma de copos. As concentrações de radioisótopos foram determinadas por espectroscopia-gama com um detector NaI(Tl) de Canberra INC e com amostras padrões de solo (JR-1, JG-1a, JB-3 e JG-3). A taxa de dose anual foi calculada

levando em conta as concentrações de radioisótopos de cada amostra e a radiação cósmica do local. Estas foram calculadas teoricamente segundo a equação de Prescott & Hutton (1988), substituindo as respectivas coordenadas geográficas do local e a profundidade da coleta. Foi feita também a correção da taxa, levando-se em consideração o teor de água das amostras. Cerca de 2 mg de grãos de quartzo foram utilizados em cada alíquota.

SEDIMENTOLOGIA, ESTRATIGRAFIA E IDADES

Um das exposições mais expressivas de Sedimentos Pós-Barreiras do Norte e Nordeste do Brasil estão representadas no litoral maranhense, principalmente entre as cidades de Alcântara e Guimarães, onde o presente estudo foi realizado. Nessa região, são considerados estratos correspondentes aos Sedimentos Pós-Barreiras todos os depósitos que ocorrem sistematicamente sobre a discordância do topo da Formação Barreiras. Essa discordância é facilmente reconhecida por superfície contendo relevo erosivo pronunciado de vários metros na escala de afloramento e pela presença de paleossolo laterítico subjacente bem desenvolvido, caracterizado por horizonte concrecional em colunas verticais ou resíduos de seu retrabalhamento sob forma de blocos de concreções lateríticas.

Para fins descritivos, os depósitos presentes nos quatro perfis litoestratigráficos datados consistem basicamente em três sucessões litológicas (Figuras 2 a 5), que incluem da base para o topo: sucessão 1 - arenito fino a médio, bem a moderadamente selecionado, com grânulos de quartzo dispersos, alaranjado ou vermelho intenso, raramente branco, litificado maciço, com paleossolo laterítico incipiente, localmente com intensa bioturbação (isto é, base da sucessão) e fragmentos de concreções lateríticas dispersos ou em níveis descontínuos delgados; sucessão 2 - arenito fino a médio, bem a moderadamente selecionado, amarelo intenso a amarelo pálido, pouco litificado, maciço ou com estruturas de dissipação de dunas (Bigarella, 1975), localmente com fragmentos de carvão dispersos; e sucessão 3 - areias finas a médias, bem selecionadas, não

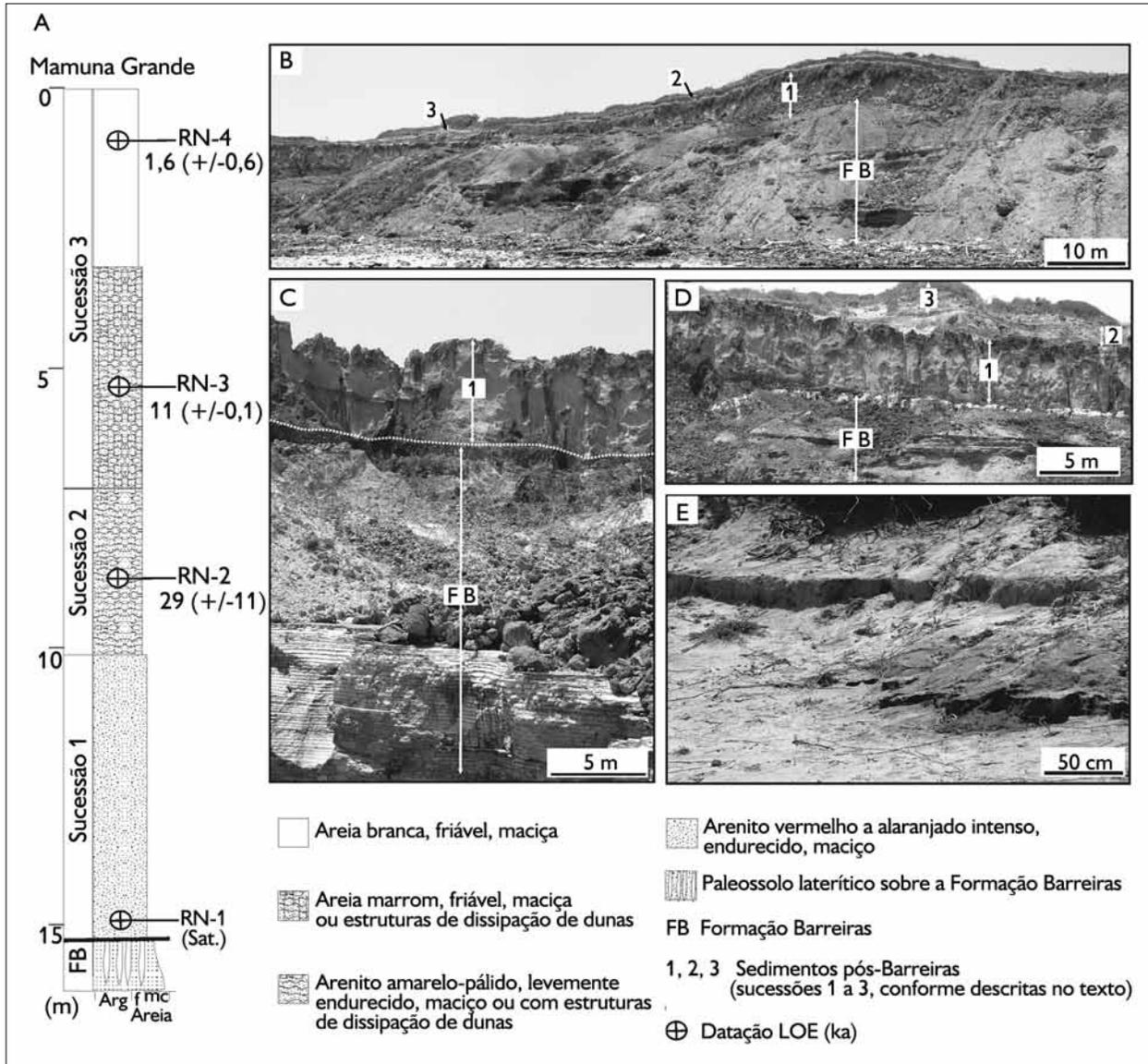


Figura 2. Falésia da Praia de Mamuna Grande. A) Perfil litoestratigráfico, com indicação das sucessões sedimentares, bem como posicionamento das amostras datadas com respectivas idades LOE/SAR (sat = amostra saturada). B) Vista geral da falésia. C e D) Vista em detalhe dos Sedimentos Pós-Barreiras depositados diretamente sobre a Formação Barreiras. E) Vista em detalhe de areias da sucessão 3.

litificadas, em geral brancas, porém localmente marrom-escuras ou branco-amareladas, maciças ou com estruturas de dissipação de dunas. Essas sucessões são delimitadas por superfícies de discontinuidades, que podem ser seguidas lateralmente por toda a extensão dos afloramentos. Essas superfícies têm, em geral, natureza erosiva, sendo, por

vezes, salientada por acúmulos de fragmentos de laterita e grânulos de quartzo. A sucessão 1 posiciona-se até cerca de 30 m acima do nível do mar atual, enquanto que as sucessões 2 e 3 têm cotas variáveis, dependendo se ocorrem no topo das falésias ou em áreas deprimidas entre estas.

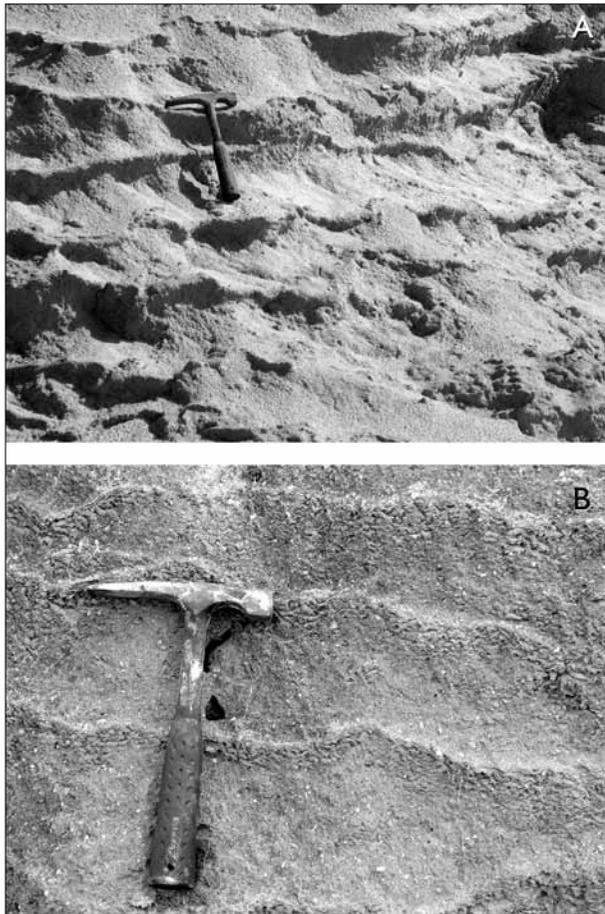


Figura 3. Vista geral (A) e detalhe (B) de estruturas de dissipação de dunas presentes nas sucessões 2 e 3.

A praia de Mamuna Grande possui quatro falésias contendo a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras. A falésia localizada no extremo noroeste desta praia foi escolhida para datação (Figuras 2A-2E). Nesse local, as três sucessões litológicas dos Sedimentos Pós-Barreiras estão bem representadas. A sucessão 1 (Figuras 2A-2C) é homogênea, apresentando evidências de paleossolo laterítico incipiente, com desenvolvimento de feições colunares verticais com início de nucleação de óxidos e hidróxidos de ferro. Esta sucessão possui cerca de 5 m de espessura e tem relevo erosivo expressivo, sendo que, onde a erosão é mais intensa, as sucessões 2 e 3 tornam-se mais espessas. A análise de LOE de amostra derivada

da base desta sucessão resultou em amostra saturada. Isto pode ser devido à idade superior ao limite do método utilizado ou, ainda, à deposição em ambiente subaquoso, por exemplo na antepraia, o que teria tornado a amostra desfavorável para que os grãos de quartzo tivessem seu sinal luminescente zerado. A sucessão 2 (Figuras 2A, 2B e 2D), que pode atingir até 5 m nessa localidade, é, em geral, maciça, porém localmente possui estruturas de dissipação de dunas eólicas, como interpretadas por Bigarella (1975) (Figura 3A-3B). A datação desses estratos (Tabela 1; Figura 2A) indicou idade de 29.000 (± 1) anos. A sucessão 3 (Figuras 2A e 2E) pode ter até 10 m de espessura, sendo a principal sucessão a ocorrer onde a discordância do topo da Formação Barreiras rebaixa ao nível da praia. Esses depósitos possuem idades da base para o topo de 11.000 ($\pm 0,1$) e 1.600 ($\pm 0,6$) anos.

Os Sedimentos Pós-Barreiras da falésia da Praia da Base (Figuras 4A-4B) são principalmente constituídos pela sucessão 1, que forma um pacote homogêneo, de espessura variável, com até 8 m de espessura. A datação de duas amostras derivadas da base e topo dessa sucessão indicou idades de 84.000 (± 6.000) e 83.600 (± 7.000) anos, respectivamente (Tabela 1, Figura 4A), que são as idades mais antigas registradas para essa unidade na área de estudo. A sucessão 1, cuja base neste local é bastante bioturbada (Figuras 4C e 4D), está exposta na superfície ou é coberta pela sucessão 2, que forma uma camada delgada de 2 a 3 m, com idade de 16.000 (± 1) anos.

Dois perfis foram datados na Praia do Peru, os quais distam cerca de 3,5 km um do outro, sendo o perfil 1 localizado a sudeste do perfil 2. O perfil 1 (Figuras 5A-5D) deriva de um local onde a Formação Barreiras acha-se fortemente deprimida, atingindo o nível da praia, configurando uma ampla morfologia côncava onde os Sedimentos Pós-Barreiras foram acumulados (Figura 5B). Nesse local, o paleossolo do topo da Formação Barreiras foi retrabalhado, sendo representado por depósito residual de até 50 cm de espessura, formado por clastos de concreções lateríticas (ver Pl na Figura 5C). Lateralmente, esse

Tabela 1. Dados de radioatividade, valores de dose anual e idades LOE/SAR das amostras estudadas. Legendas: ID = identificação da amostra; Th = tório; U = urânio; K = potássio; T = razão da dose anual; ka = mil anos; Sat = amostra saturada.

ID	Massa (g)	Água (%)	Tempo (s)	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)	T (mGy/y)	Alíquotas usadas para cálculo dose	Dose (Gy)	Idade LOE/SAR (ka)
RN01	80	2,29	41439	13,7±0,5	3,31 ± 0,26	0,89 ± 0,13	2,9 ± 0,2	7/24	Sat	Sat
RN02	80	1,32	51006	4,9±0,2	0,79 ± 0,85	0,31 ± 0,05	1,1 ± 0,3	8/24	31,4 ± 0,7	29 ± 11
RN03	82	1,39	35888	3,6±0,1	0,80 ± 0,19	0,11 ± 0,02	0,8 ± 0,1	16/24	8,3 ± 0,1	11 ± 1
RN04	79	0,29	44909	2,3±0,1	0,96 ± 0,50	0,11 ± 0,02	0,7 ± 0,2	13/24	1,1 ± 0,1	1,6 ± 0,6
RN05	79	4,41	40312	10,8 ± 0,4	3,06 ± 0,04	0,05 ± 0,01	1,8 ± 0,1	5/24	149 ± 6	84 ± 6
RN06	70	5,07	41239	13,4 ± 0,5	3,00 ± 0,27	0,02 ± 0,01	1,9 ± 0,1	6/24	162 ± 4	83,6 ± 7,1
RN07	74	3,10	45809	11,5 ± 0,4	2,82 ± 0,21	0,08 ± 0,01	1,9 ± 0,1	5/24	29 ± 0,6	16 ± 1
RN08	82	1,47	86407	5,6 ± 0,2	1,53 ± 0,09	0,06 ± 0,01	1,0 ± 0,1	16/24	36,9 ± 0,5	38 ± 3
RN09	87	0,24	39563	8,0 ± 0,3	2,00 ± 0,06	0,80 ± 0,12	2,1 ± 0,2	17/24	37,3 ± 0,9	18 ± 2
RN10	82	0,27	45769	8,2 ± 0,3	2,44 ± 0,22	0,30 ± 0,04	1,7 ± 0,1	15/24	8,6 ± 0,2	5,1 ± 0,5
RN11	70	4,16	46502	10,9 ± 0,4	2,37 ± 0,19	0,95 ± 0,14	2,6 ± 0,2	19/24	1,9 ± 0,1	0,8 ± 0,1
RN12	68	1,99	40132	7,7 ± 0,3	2,58 ± 0,11	0,07 ± 0,01	1,5 ± 0,1	8/24	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1
RN13	69	4,81	42219	12,9 ± 0,5	3,31 ± 0,41	0,98 ± 0,14	3,0 ± 0,3	12/24	11,1 ± 0,2	3,7 ± 0,5
RN14	66	4,98	43215	17,1 ± 0,6	4,18 ± 0,50	0,51 ± 0,07	3,0 ± 0,3	6/24	70 ± 2	23 ± 3
RN15	75	3,32	41014	12,4 ± 0,4	2,98 ± 0,03	0,71 ± 0,10	2,5 ± 0,1	7/24	154 ± 4	61 ± 5

depósito residual torna-se progressivamente mais delgado até desaparecer; onde presente, ocorre sobreposto ao paleossolo laterítico *in situ* (Figura 5D). A sucessão 1 (Figuras 5A, 5B e 5D) é bem representada nessa localidade, sendo de coloração branca onde ocorre a depressão, e vermelha com colunas de concreções ferruginosas verticais incipientes, onde a Formação Barreiras ocorre em níveis topográficos mais elevados. Na depressão, a sucessão 1 é delgada (1 a 2 m de espessura) e descontínua, sendo seu topo marcado por depósitos residuais de seixos de quartzo. Amostra derivada da base da sucessão 1 na base da depressão registrou idade de 38.000 ± 3 anos (Tabela 1, Figura 5A). A sucessão 2 (Figuras 5A-5C) é bem representada ao longo de toda a depressão, formando pacote com espessura média de 2,5 m. O topo desses depósitos é bem definido por sua natureza fortemente irregular. Amostra derivada dessa sucessão indicou idade de 18.000 ± 2 anos (Tabela 1, Figura 5A). A sucessão 3 (Figuras 5A-5C), de até 3 m de espessura, representa a finalização do processo de preenchimento da

depressão, sendo sua deposição influenciada por processos eólicos, como evidenciado pela presença de estruturas de dissipação de dunas. Idades obtidas desses estratos são, da base para o topo, de 5.100 ± 500 e 800 ± 100 anos (Tabela 1, Figura 5A). O perfil 2 da Praia do Peru (Figuras 6A-6C) é principalmente constituído pela sucessão 1, que forma um pacote de até 7 m de espessura, também com evidência de formação incipiente de concreções lateríticas em colunas verticais. Duas idades foram obtidas desses depósitos, sendo essas de 61.000 ± 5 anos na base e de 23.000 ± 3 anos em seu topo (Tabela 1, Figura 6A). A sucessão 1 aflora na superfície, ou pode ser coberta diretamente pela sucessão 3, que registra idades de 3.700 ± 500 e 500 ± 100 anos, da base para o topo (Tabela 1, Figura 6A).

DISCUSSÃO

Como apresentado no item precedente, as idades dos Sedimentos Pós-Barreiras do litoral do Maranhão são consistentes ao longo dos perfis e entre os perfis analisados.



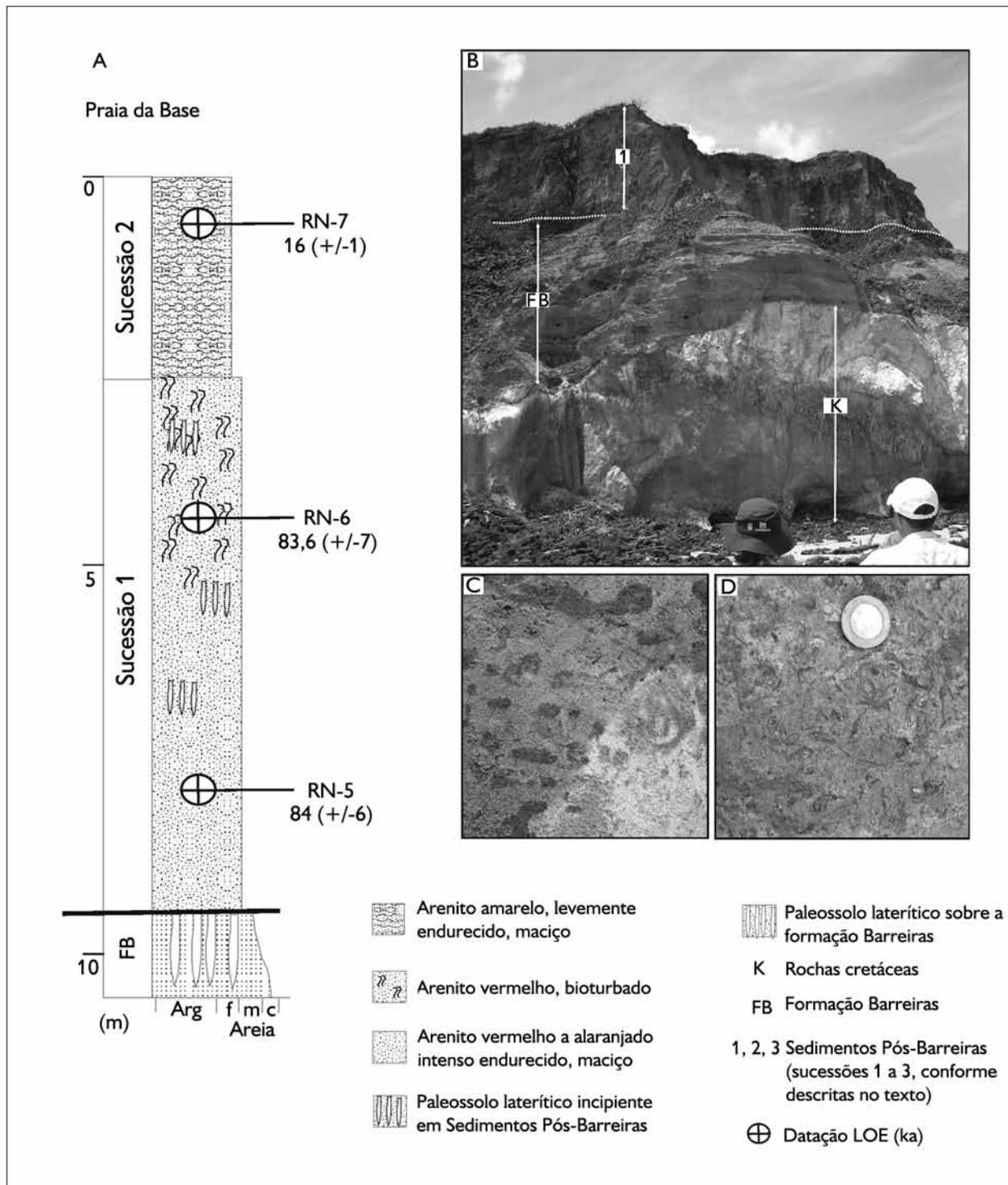


Figura 4. Falésia da Praia da Base. A) Perfil litoestratigráfico, com indicação das sucessões sedimentares, bem como posicionamento das amostras datadas com respectivas idades LOE/SAR. B) Vista geral da falésia, com Sedimentos Pós-Barreiras (sucessão 1) sobrepondo discordantemente à Formação Barreiras. C e D) Detalhes do padrão de bioturbação presente na base da sucessão 1.

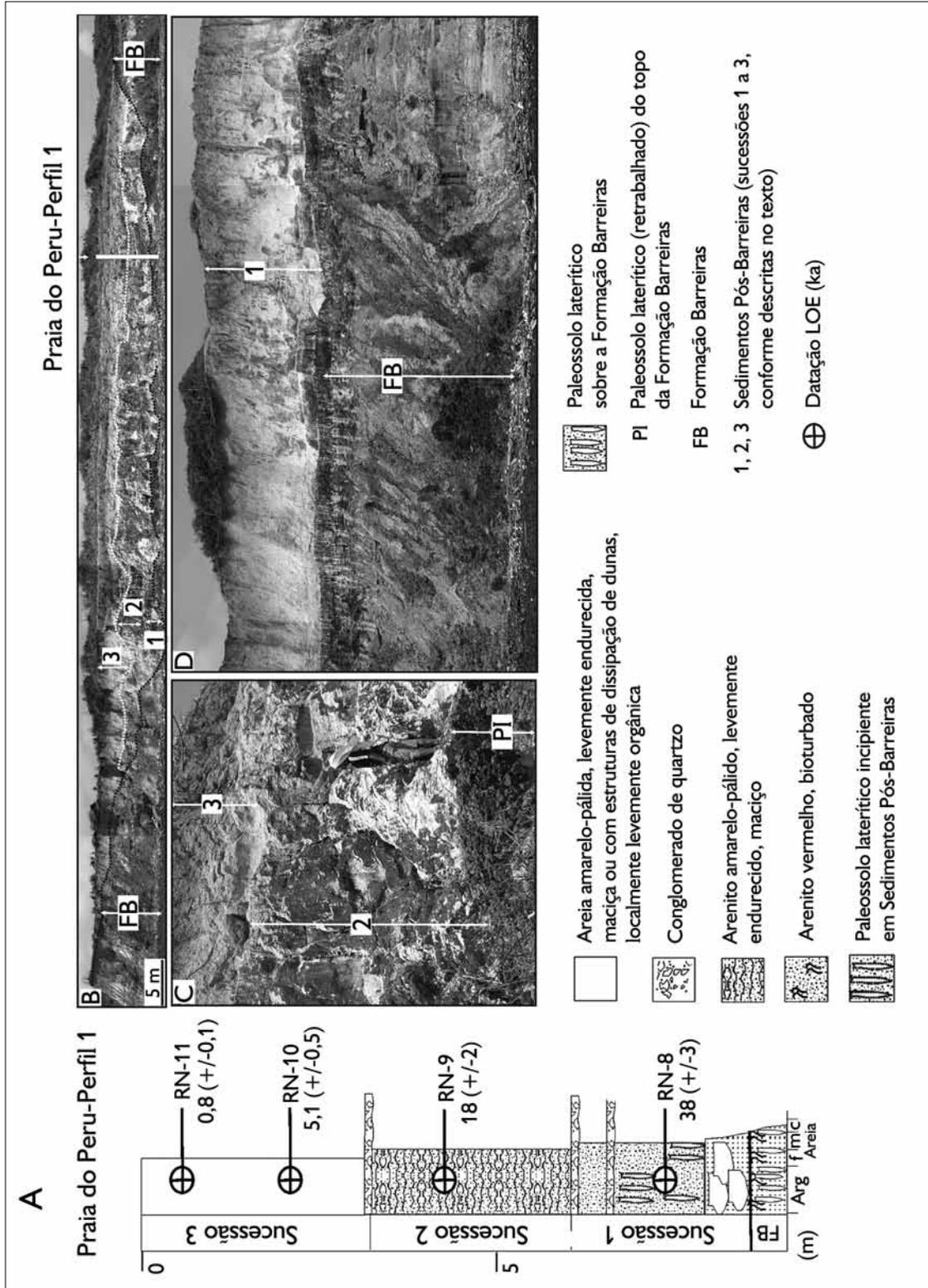


Figura 5. Falésia da Praia do Peru, perfil 1. A) Perfil litoestratigráfico, com indicação das sucessões sedimentares, bem como posicionamento das amostras datadas com respectivas idades LOE/SAR. B) Vista geral da falésia, ilustrando a depressão na Formação Barreiras, onde os Sedimentos Pós-Barreiras (sucessões 1 a 3) foram depositados. C) Detalhe da base dos Sedimentos Pós-Barreiras sobrepostos discordantemente ao depósito residual de clastos de concreções lateríticas derivados de erosão do paleossolo do topo da Formação Barreiras. D) Vista geral da Formação Barreiras sobreposta pelos Sedimentos Pós-Barreiras (sucessão 1) a sudeste da depressão ilustrada em B.

Os dados registram idades entre 84.000 ± 6.000 e 500 ± 100 anos, o que indica deposição entre o Neopleistoceno e Neo-holoceno. Esse intervalo de tempo é condizente com idades obtidas para os Sedimentos Pós-Barreiras do litoral paraense (Tatumi *et al.*, 2008). A comparação das concentrações das idades entre esses depósitos leva a inserir a sucessão 1 (84.000 a 38.000 anos) mais proximamente nos Sedimentos Pós-Barreiras 1 (191.000 a 67.000 anos) daquela região, e as sucessões 2 (29.000 a 16.000 anos) e 3 (11.000 a 500 anos) nos Sedimentos Pós-Barreiras 2 (34.000 a 3.400 anos).

A comparação entre as idades dos depósitos sedimentares reconhecidos na área de estudo mostra que a sucessão 1 é a que incorpora sedimentos formados em intervalo de tempo maior. Essa sucessão registra o intervalo de tempo que se seguiu ao Último Interglacial, este com ápice entre 130.000 a 120.000 anos (Lambeck & Nakada, 1992; Stirling *et al.*, 1995), e o período inicial do Último Glacial (Figura 7). Durante esse intervalo de tempo, o nível do mar apresentava tendência geral de queda. Entretanto, parte da deposição da sucessão 1 coincide com o período de elevação do nível do mar de alta frequência (~84.000 a 70.000 anos) que se sobrepôs à tendência geral de queda, quando o nível do mar estava ainda somente 25 m, em média, abaixo do atual (Figura 7). Então, é possível conceber que essa elevação de alta frequência possa ter influenciado a deposição da sucessão 1, pelo menos em sua porção basal. O entendimento do ambiente deposicional dessa unidade é dificultado pela falta de estruturas sedimentares. O predomínio absoluto de areias finas a médias e a presença de bioturbação intensa lembra estratos depositados na zona litorânea, porém icnofósseis individuais não puderam ser identificados, impedindo interpretações conclusivas. Entretanto, esta interpretação é possível, principalmente levando-se em consideração que os estratos bioturbados foram observados somente na base dessa sucessão, onde ocorrem as idades mais antigas, que são compatíveis com o final do Último Interglacial.

A tendência de queda do nível do mar prosseguiu até o pico de queda (isto é, mais de 100 m abaixo do nível do mar atual – conforme Shackleton, 1988) durante o Último Máximo Glacial (23.000 a 18.000 anos) (Figura 7). As porções intermediária e superior da sucessão 1 e a sucessão 2 registram este intervalo de tempo. A sucessão 2 foi formada em um intervalo bem mais curto que aquela, apenas 13.000 anos. Dada a grande ocorrência de estruturas sugestivas de processos eólicos na sucessão 2, interpreta-se gênese das areias provavelmente como dunas formadas por retrabalhamento subaéreo de depósitos de ambiente marinho raso expostos na zona litorânea em consequência do rebaixamento do nível do mar. Especula-se, ainda, origem similar para as areias das porções intermediária e média da sucessão 3, considerando que o nível do mar já estava baixo durante sua deposição.

A sucessão 3 registra intervalo deposicional compreendido nos últimos 11.000 anos. A formação dessas areias ocorreu concomitante à tendência de elevação do nível do mar holocênico, resultante do derretimento das geleiras formadas durante o *Younger Dryas* (~12.600 a 11.800 anos; Shackleton, 1988). Ao longo da costa brasileira, tem sido proposto o aumento do nível do mar entre 1 m (Angulo & Lessa, 1997; Lessa & Angulo, 1998; Angulo *et al.*, 2006) e 4 m (Bezerra *et al.*, 2003; Martin *et al.*, 1986; Suguio *et al.*, 1985) acima do atual durante o máximo da transgressão ocorrida no Meso-holoceno. Apesar de a sucessão 3 ter sido depositada durante a fase de elevação do nível do mar e durante o pico da transgressão do Meso-holoceno, é interessante observar que, pelo menos nessa parte do Brasil, não se registram depósitos representativos dessa transgressão. Isso é demonstrado pela natureza da sucessão 3, que também contém evidências de sedimentação eólica, sugerindo origem provavelmente similar à sucessão subjacente, isto é, também sob forma de dunas eólicas, neste caso possivelmente próximas da zona costeira. As dunas teriam preenchido depressões e reentrâncias na costa, tendo eventualmente avançado sobre a Formação Barreiras e demais estratos da sucessão 1.

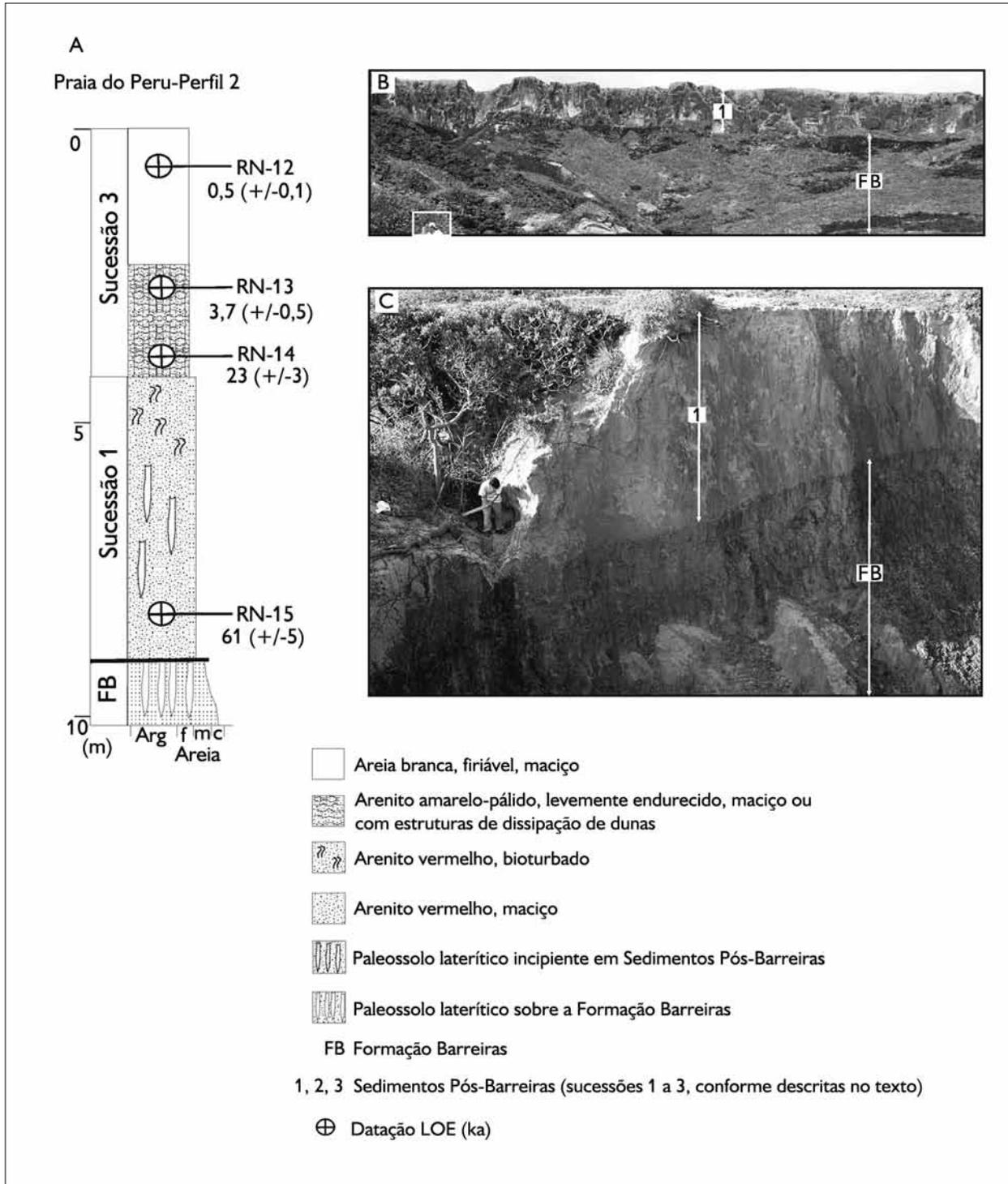


Figura 6. Falésia da Praia do Peru, perfil 2. A) Perfil litoestratigráfico, com indicação das sucessões sedimentares, bem como posicionamento das amostras datadas com respectivas idades LOE/SAR. B) Vista geral da falésia e C) detalhe, ilustrando a sucessão 1 dos Sedimentos Pós-Barreiras sobrepostos discordantemente ao paleossolo laterítico da Formação Barreiras.

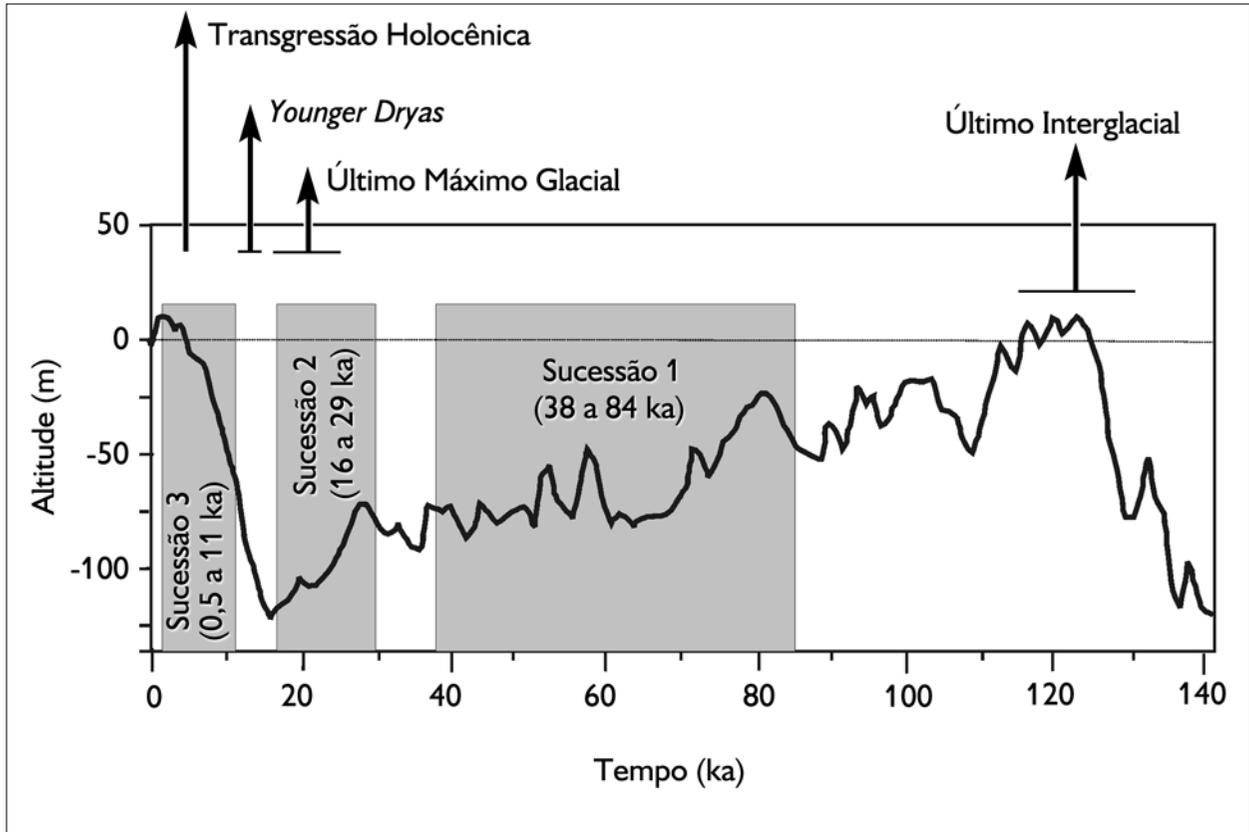


Figura 7. Eventos sedimentares registrados na área de estudo em relação à curva de variação do nível do mar global fornecida em Shackleton (1988) (ver texto para discussões).

CONCLUSÕES

Datação por luminescência opticamente estimulada (LOE) utilizando grãos de quartzo sob o protocolo de *Single Aliquot Regeneration* (SAR) mostrou-se eficiente para o estabelecimento da cronologia de depósitos sedimentares que ocorrem sobrejacentes à Formação Barreiras no litoral maranhense. Tal método é fundamental para o estabelecimento da cronologia desses estratos, uma vez que eles são constituídos predominantemente por arenitos e areias quartzosas desprovidas de matéria orgânica, portanto não passíveis de datação pelo método de radiocarbono. Além disso, como registrado no presente trabalho, esses depósitos foram formados em um intervalo de tempo que extrapola o limite alcançado pelo método de ^{14}C . A consistência obtida para as idades ao longo dos

perfis estudados e entre eles leva a propor a intensificação deste tipo de abordagem como forma de estabelecer a cronologia dos Sedimentos Pós-Barreiras expostos ao longo das margens norte e nordeste do Brasil. Os resultados aqui apresentados indicam que esses estratos registram pelo menos três episódios de sedimentação ocorridos entre o Neopleistoceno e o Holoceno. As sucessões arenosas estudadas se depositaram durante a tendência de rebaixamento do nível do mar que se seguiu ao Penúltimo Interglacial. A porção inferior da sucessão 1, depositada durante elevação do nível do mar de alta frequência sobreposta à tendência de queda com pico no Último Máximo Glacial, pode ter tido alguma contribuição marinha. Entretanto, o restante dessa unidade, bem com a unidade 2, corresponde a areias formadas por processos

eólicos, tendo fonte provavelmente em depósitos expostos ao longo do litoral pelo rebaixamento do nível do mar. Embora formada sob condições de elevação do nível do mar com pico de poucos metros acima do atual no Meso-holoceno, não se registrou depósito marinho na sucessão 3, que também mostra evidência de deposição em dunas eólicas. Estas preencheram depressões e reentrâncias na Formação Barreiras e, eventualmente, avançaram em áreas onde esta unidade se acha topograficamente mais elevada.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fornecimento de bolsa de produtividade em pesquisa (Processo #300276/2008-7), cuja reserva técnica se destinou a cobrir campanha de campo para coleta de amostras. Agradecimentos são extensivos a E. Somessari e C. Gaia, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), por auxiliarem nas análises laboratoriais.

REFERÊNCIAS

AITKEN, M. J., 1998. **An introduction to optical dating**: the dating of Quaternary sediments by the use of Photon-Stimulated Luminescence: 1-267. Oxford University Press, Oxford.

ANGULO, R. J. & G. LESSA, 1997. The Brazilian sea-level curves: a critical review with emphasis on the curves from Paranaguá and Cananéia regions. **Marine Geology** 140: 141-166.

ANGULO, R. J., G. C. LESSA & M. C. SOUZA, 2006. A critical review of Mid- to Late-holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. **Quaternary Science** 25(5-6): 486-506.

BEZERRA, F. H. R., A. M. F. BARRETO & K. SUGUIO, 2003. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. **Marine Geology** 196(1-2): 73-89.

BIGARELLA, J. J., 1975. Structures developed by dissipation of dune and beach ridge deposits. **Catena** 2: 107-152.

BUYLAERT, J. P., A. S. MURRAY, D. VANDENBERGHE, M. VRIEND, F. DE CORTE & P. VAN DEN HAUTE, 2008. Optical dating of Chinese loess using sand-sized quartz: establishing a time frame for Late Pleistocene climate changes in the western part of the Chinese Loess Plateau. **Quaternary Geochronology** 3(1-2): 99-113.

GÓES, A. M. & D. F. ROSSETTI, 2001. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, meio norte do Brasil. In: D. F. ROSSETTI, A. M. GÓES & W. TRUCKENBRODT (Eds.): **O Cretáceo da Bacia de São Luís-Grajaú**: 15-31. Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friedrich Katzer), Belém.

LAMBECK, K. & M. NAKADA, 1992. Constraints on the age and duration of the last interglacial period and on sea-level variations. **Nature** 357: 125-128.

LESSA, G. C. & R. J. ANGULO, 1998. Oscillations or not oscillations, that is the question – reply. **Marine Geology** 150: 189-196.

LOMAX, J., A. HILGERS, C. R. TWIDALE, J. A. BOURNE & U. RADTKE, 2007. Treatment of broad palaeodose distributions in OSL dating of dune sands from the western Murray Basin, South Australia. **Quaternary Geochronology** 2(1-4): 51-56.

MABESOONE, J. M., 1984. Cenozóico nordestino: sistemas e seqüências deposicionais. In: **Atas do Simpósio de Geologia do Nordeste** 11: 142-150.

MABESOONE, J. M., A. CAMPOS SILVA & K. BUERLEN, 1972. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geologia** 2(3): 173-188.

MARTIN, L., K. SUGUIO & J. M. FLEXOR, 1986. Shell middens as a source for additional information in Holocene shoreline and sea-level reconstruction: examples from the coast of Brazil. In: O. VAND DE PLASSECHE (Ed.): **Sea-Level Research: a manual for the collection and evaluation of data**: 503-521. Geo Books, Norwich.

MURRAY, A. S. & A. G. WINTLE, 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. **Radiation Measurements** 32(1): 57-73.

PRESCOTT, J. R. & J. T. HUTTON, 1988. Cosmic ray and gamma ray dosimetry for TL and ESR. **Nuclear Tracks and Radiation Measurement** 14(1-2): 223-227.

ROCCA, R. R., S. H. TATUMI, S. WATANABE & D. F. ROSSETTI, 2012. OSL dating of coastal Post-Barreiras Sediments from northern Brazil. **Journal of Earth Science and Engineering** 2: 515-521.

ROSSETTI, D. F., 2000. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. **Sedimentary Geology** 133(3-4): 295-324.

ROSSETTI, D. F., 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, within the context of sea level changes. **Journal of South American Earth Sciences** 14(1): 77-89.

ROSSETTI, D. F., 2004. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. **Sedimentary Geology** 169(3-4): 151-174.



- ROSSETTI, D. F., W. TRUCKENBRODT & A. M. GÓES, 1989. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra** 1(1): 25-74.
- ROSSETTI, D. F. & W. TRUCKENBRODT, 1997. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, Maranhão. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra** 9: 29-41.
- ROSSETTI, D. F., F. H. BEZERRA, A. M. GÓES, M. M. VALERIANO, C. O. ANDRADES-FILHO, J. C. R. MITTANI, S. H. TATUMI & B. B. BRITO-NEVES, 2011a. Late Quaternary sedimentation in the Paraiba Basin, Northeastern Brazil: landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 300(1-4): 191-204.
- ROSSETTI, D. F., F. H. BEZERRA, A. M. GÓES & B. B. BRITO-NEVES, 2011b. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: evidence for paleoseismicity in a passive margin. **Sedimentary Geology** 235(3-4): 172-187.
- SÁ, J. H. S., 1969. Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, estado do Pará. **Boletim de Geologia** 3: 20-36.
- SHACKLETON, N. J., 1988. Oxygen isotopes, ice volume, and sea level. **Quaternary Science Reviews** 6(3-4): 183-190.
- STIRLING, C. H., T. M. ESAT, M. T. MCCULLOCH & K. LAMBECK, 1995. High-precision U-series dating of corals from Western Australia and implications for the timing and duration of the Last Interglacial. **Earth and Planetary Science Letters** 135: 115-130.
- SUGUIO, K., L. MARTIN, A. C. S. P. BITTENCOURT, J. M. L. DOMINGUEZ, J. M. FLEXOR & A. E. G. AZEVEDO, 1985. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. **Revista Brasileira de Geociências** 15(4): 273-286.
- SUGUIO, K., F. H. R. BEZERRA & A. M. F. BARRETO, 2011. Luminescence dated Late Pleistocene wave-built terraces in northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 83(3): 907-920.
- TATUMI, S. H., L. P. SILVA, E. L. PIRES, D. F. ROSSETTI & A. M. GÓES, 2008. Datação de Sedimentos Pós-Barreiras no norte do Brasil: implicações paleogeográficas. **Revista Brasileira de Geociências** 38(3): 514-524.
- WINTLE, A. G. & A. S. MURRAY, 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. **Radiation Measurements** 41(4): 369-391.

