



Comunicação oral

A ESTRATIGRAFIA DE SEQÜÊNCIAS NA EVOLUÇÃO DAS DUNAS COSTEIRAS DE SANTA CATARINA, SUL DO BRASIL

Paulo C. F. Giannini; André O. Sawakuchi; Caroline T. Martinho

Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, São Paulo, SP, CEP 05508-000, e-mail pcgianni@usp.br

Keywords: sequences stratigraphy, dunefield system, eolian sedimentation

Abstract: The dunefield systems in the Quaternary of Santa Catarina, South Brazil, possess four generations of eolian deposits. Generations 1 and 2 were correlated to the maxima relative sea level of upper Pleistocene and of Holocene, respectively. Generation 4 corresponds to the active dunes. Generation 3 would have intermediate age between 2 and 4. These eolian generations are distributed in two sequences: the lower corresponds to a transgressive systems tract, embracing eolian generation 1. The upper sequence includes a transgressive systems tract, with generation 2, and a highstand systems tract, with generations 3 and 4.

INTRODUÇÃO

O estudo da dinâmica de acúmulo, erosão e preservação de sistemas eólicos, baseado na análise de superfícies de descontinuidade física e na sua correlação com mudanças globais e bacinais ligadas a eustasia e tectônica, é condizente com o modelo conceitual da estratigrafia de seqüências, maior paradigma da estratigrafia moderna. A proposta de Kocurek & Havholm (1993), feita nesse sentido, centra seu enfoque nos fatores estabilizadores do sistema eólico, com destaque para a posição do nível freático relativa à superfície deposicional, controlada basicamente pelo clima, pela taxa de subsidência e, nos casos costeiros, pelo nível relativo do mar (NRM). Outro aspecto da influência do nível freático na dinâmica do sistema eólico, segundo mesmos autores, é que sua elevação, logo após a acumulação, é condição necessária para a preservação dos depósitos eólicos.

Como o padrão de variação do NRM no Quaternário é conhecido de modo relativamente detalhado, os exemplos quaternários costeiros são fundamentais para adaptar o modelo geral da estratigrafia de seqüências ao estudo de sistemas eólicos. Apesar disso, as abordagens voltadas para a estratigrafia de seqüências e para a dinâmica de sistemas eólicos costeiros no Quaternário ainda são raras e incipientes. Essa lacuna justifica a proposta básica deste artigo, que é a de reconstituir a evolução dos sistemas eólicos da costa sul-brasileira, no contexto do padrão regional de variação do NRM e do modelo conceitual da estratigrafia de seqüências. O método proposto envolve a análise de gerações eólicas, e o exame das fácies e elementos arquiteturais a elas associados, como ponto de partida para a dedução dos princípios controladores da deposição, acumulação e preservação de dunas costeiros.

GERAÇÕES DE DEPÓSITOS EÓLICOS NA COSTA DE SANTA CATARINA

Giannini & Suguió (1994) reconheceram a existência de pelo menos quatro gerações de depósitos eólicos na costa centro-sul de Santa Catarina. Basearam-se no uso combinado de informações sobre empilhamento estratigráfico, grau de dissecação e aspectos mineralógicos e texturais.

Na geração 1, mais antiga, predominam areias de aspecto maciço, com cimentação argilo-limonítica generalizada, e ocorrência freqüente de grânulos e/ou pequenos seixos dispersos. A dissecação é profunda, com ravinas de drenagem em V, transversais à costa. A geração 2 apresenta cimentação heterogênea, a qual pode formar manchas e bandas nodulares ou ressaltar estruturas primárias de geometria definida. Sob o aspecto textural, destaca-se a presença freqüente de grânulos e seixos concentrados em paleopavimentos e paleocanais. Seu aspecto geomorfológico mais marcante é a dissecação fluvial controlada por vales entre braços de dunas parabólicas alongadas segundo SW-NE. A geração 3 constitui-se de areias incoesas, colonizadas por vegetação, com sinais extensivos de pedogênese incipiente. Apresenta-se sob a forma de dunas parabólicas alongadas, imbricadas, ou como rastros lineares residuais de deflação, resultantes de deslocamento de dunas atuais. A geração 4 corresponde a dunas ativas. A geração 1 e as dunas parabólicas da geração 3, menos importantes em área, só foram identificados até agora na região entre Laguna e Garopaba, sobre depósitos de sistema planicie costeira (*strandplain*). Nessa região, os lençóis transgressivos das gerações 3 e 4 separam-se da praia e das dunas frontais por uma zona deflacionar, através da qual aflora o substrato de areias regressivas holocénicas. A sul, sobre o sistema deposicional barra-barreira, onde a plataforma interna se torna mais larga, a geração 4 é especialmente bem desenvolvida desde a praia, sem fácies deflacionares, e a geração 2 atinge altitudes maiores (dezenas de metros). Desse modo, pode-se dividir o sistema eólico em dois setores, norte e sul, separados pelo cabo de Santa Marta (município de Laguna).

O contato entre os depósitos das gerações 2, 3 e 4 é determinado apenas por mudanças de cor, textura ou coesão entre areias eólicas, a menos da existência localizada de paleossolos, com tubos preenchidos por óxidos de ferro, no topo da geração 2. O contato entre as gerações 1 e 2, em contraste, contém paleopavimentos grânulo-seixosos, paleossolos e paleocanais com preenchimento intraclástico.

A ocorrência da geração 1 limita-se a rampas eólicas ancoradas em morros testemunho do embasamento cristalino e a dunas neles empoleiradas. Suas exposições mais baixas e próximas da linha de costa atual encontram-se na ponta do Catalão e na rampa eólica de Guaiúba (município de Imbituba, setor norte). Na ponta do Catalão (Figura 1), um depósito rudáceo de 8 m de altura, interpretado como praial (Martin *et al.* 1988), ocorre embutido nos depósitos eólicos. A altitude dos depósitos não eólicos em meio às paleodunas da geração 1 em Guaiúba e no Catalão é superior ao máximo NRM holocênico de Santa Catarina (<3,5 m), mas coincide com o máximo do Pleistoceno superior (Riss-Würm) no Brasil (8,12 m). Em Guaiúba (Figura 2), o topo da geração 1 é marcado na porção interna da rampa, por paleossolo escuro, e na parte externa, por paleocanais, com concentração basal de fragmentos de madeira carbonizada. A altitude medida nos paleocanais varia de 5 a 8 m e a datação ¹⁴C de um tronco coletado no seu interior indica idade maior que 43 mil anos (Giannini *et al.* 1997). Estes dados permitem sugerir a formação e preenchimento dos paleocanais durante a regressão logo após o máximo NRM Riss-Würm, ao mesmo tempo em que a sedimentação eólica na parte interna da rampa era abandonada, dando vez ao desenvolvimento de solos. É bastante provável, portanto, que a erosão ou afogamento da geração 1 por este máximo tenha sido um evento marcante na evolução costeira regional.



Figura 1. Escarpa de abrasão marinha sobre depósitos da geração 1, na ponta do Catalão, com cascalho paleopraial pleistocênico. Notar cascalho de paleopraia holocênico à esquerda.



Figura 2. Escarpa na rampa eólica de Guaiúba, com depósitos das gerações 1, 2 e 3, parcialmente cobertos pela geração 4 (à direita).

Analogamente, a geração 2 foi afetada pelo sistema lagunar gerado na transgressão holocênica, cujo máximo NRM foi atingido por volta de 5.100 anos A.P. Nas margens do sistema lagunar, as formas parabólicas da geração eólica 2 encontram-se truncadas discordantemente em algumas áreas (Giannini & Santos 1994), ou afogadas ao longo de planícies interdunares NE-SW, em outras.

DINÂMICA DE SISTEMAS EÓLICOS COSTEIROS: UM COROLÁRIO DO PRINCÍPIO DE BRUUN

As informações de campo evidenciam que os depósitos eólicos das gerações eólicas 1 e 2 foram em parte alcançados pela linha de costa durante os dois últimos máximos transgressivos da costa sul brasileira. Como se trata de paleodunas costeiras, com área-fonte nas areias de praia e/ou em dunas frontais, a distância à linha de costa deve ter sido um fator controlador na formação inicial destes depósitos. Nesse sentido, o avanço da linha de costa rumo ao continente teria favorecido a deposição e sucessivo retrabalhamento de dunas costeiras cada vez mais interiores (transgressivas). O recuo dificultaria este retrabalhamento, devido ao crescente distanciamento entre fonte primária (praia e dunas frontais) e fonte secundária (dunas preexistentes).

O controle exercido pela posição da linha de costa sobre a origem do sistema eólico não se limita a sua *formação inicial* ou *deposição*, mas engloba, a mais longo prazo, seu *acúmulo* (saldo positivo entre deposição e erosão, ou influxo e efluxo) e sua *preservação* (*sensu* Kocurek & Havholm 1993). O acúmulo do sistema eólico pressupõe a manutenção da posição do sítio deposicional, em relação à área fonte na linha de costa, por tempo suficiente para haver cavalgamento de dunas e/ou aprisionamento sucessivo de sedimentos nas planícies interdunares úmidas ou subaquosas. Este último mecanismo, importante nos sistemas eólicos úmidos, depende de que o nível freático, e portanto o NRM, acompanhe a elevação gradual da superfície deposicional. A preservação do sistema eólico, por sua vez, requer que o lençol freático e o NRM se estabilizem ou continuem subindo após a acumulação. Assim, a regressão acelerada, provocada por queda de NRM, não é uma condição propícia a preservar sistemas eólicos. Da combinação entre os fatores de deposição, acúmulo e preservação, conclui-se que os sistemas eólicos costeiros são gerados preferencialmente durante o final de estágios

transgressivos, especialmente em sua fase de desaceleração. É provável, portanto, que as mesmas transgressões que destruíram parte das gerações 1 e 2 tenham contribuído para sua deposição, acúmulo e preservação.

A gênese de depósitos eólicos costeiros pode prosseguir mesmo após a transgressão, enquanto a linha de costa não tiver regredido o bastante para dispersar o influxo. Trata-se nesse caso de *aporte eólico transgressivo defasado* em relação à transgressão marinha (e ao máximo NRM). Neste contexto, cada máximo NRM pode determinar três momentos na história evolutiva do sistema eólico costeiro: primeiro, o aporte de areias eólicas durante a transgressão marinha, alcançando inclusive distâncias ao interior e altitudes depois não atingidas pelo mar; em seguida, a erosão e afogamento da parte mais externa do sistema eólico, integrando superfície de máxima inundação (SMI); e, por fim, recém-encerrada a transgressão marinha, a emersão gradual da SMI, acompanhada e/ou seguida de exposição ou de recobrimento por dunas eólicas da fase de aporte eólico defasado. Esta sucessão de eventos coincide com o registro deposicional do topo da geração 1 em Guaiúba.

A formação de dunas eólicas transgressivas, desencadeada pela elevação do NRM, pode ser deduzida como uma extensão do princípio de Bruun (1962). De acordo com este princípio, a elevação de NRM coloca os sedimentos da praia em desequilíbrio, prestes a ser carreados para a face litorânea e/ou para a zona de costa afora. Entretanto, a face litorânea e a costa afora não são os únicos destinos possíveis para o excesso de sedimentos surgido na praia após a subida de NRM. Se houver regime de ventos adequado para o transporte dos sedimentos de praia, parte deste excesso será deslocado rumo ao continente, onde dará origem a dunas eólicas. Deste modo, a formação preferencial de dunas eólicas costeiras em contexto de NRM ascendente é explicada pelo mesmo mecanismo de recuperação de equilíbrio de perfil costeiro postulado pelo princípio de Bruun, só que no rumo oposto (Giannini & Santos 1994). O desequilíbrio que constitui a força motriz do transporte retroalimentador de sedimentos é nos dois casos o mesmo: um excesso de sedimentos na zona de praia. O transporte só se torna efetivo a partir do momento em que a velocidade de retrabalhamento eólico se torna maior que a velocidade de ascensão do NRM, ou seja, por volta da estabilização de mar alto. Ainda de acordo com o princípio de Bruun, as costas de declive mais suave apresentam maior volume de areia em desequilíbrio e maior atraso na reposição do perfil de equilíbrio na zona submersa. No corolário eólico do princípio, isto significa que o aumento da dissipatividade da costa e/ou da largura da plataforma interna favorece o aporte eólico potencial.

EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS EÓLICOS COSTEIROS DE SANTA CATARINA, SEGUNDO A ESTRATIGRAFIA DE SEQÜÊNCIAS

Durante a elevação eustática global de cerca de 120 ka A.P. (Riss-Würm), a região seria caracterizada por uma costa de baías abertas, interrompida por baías estuarinas (ou vales incisos afogados), como a dos paleorios Itajaí e Tubarão. O grande volume de areias da zona litorânea colocado em desequilíbrio pela subida de NRM, e não erodido para costa afora de acordo com o enunciado clássico do princípio de Bruun (1962), teria sido forçado a sair dos sistemas dominados por ondas e/ou marés, para assim vir a implantar sistemas deposicionais eólicos (Giannini & Santos 1994). A atividade dos sistemas eólicos teria conseguido suprir areias sobre o embasamento cristalino emerso, em cotas muito acima do máximo NRM, com a construção de rampas eólicas e dunas empoleiradas da geração 1. Depósitos nessas condições, encontrados nas regiões de Florianópolis e Imbituba (Bigarella & Becker 1975; Giannini *et al.* 1997), possuem maior probabilidade de preservação em superfície, protegidos de fenômenos de erosão costeira ou dissecação fluvial, ainda que possam ser soterrados por sistemas eólicos mais novos. Sob o enfoque da estratigrafia de seqüências, o alto NRM correlato ao interglacial Riss-Würm corresponde à formação de um trato de sistemas transgressivos, coberto por uma SMI.

No período entre 120 a 20 ka A.P., tem-se o desenvolvimento de um trato de sistemas de mar baixo inicial (*early lowstand*), na terminologia de Posamentier & Allen (1994). Com o seguido e pronunciado abaixamento de NRM, implicando correspondente queda relativa do nível de base, caracteriza-se uma *regressão forçada*. A erosão atuante sobre a planície costeira formada durante a regressão forçada dá-se, na porção emersa, pela incisão fluvial e formação de um limite de seqüência. A presença eventual de sistema eólico, em meio a sedimentos específicos de planície costeira, deve ter ficado restrita à porção mais interior e mais antiga da planície litorânea, nos arredores da paleolinha de costa existente no máximo transgressivo. O sistema eólico pleistocênico pode ter continuado a formar draas costeiros transgressivos enquanto houver persistido o aporte eólico defasado. No entanto, com a continuação da regressão forçada, o crescente afastamento da paleolinha de costa e a queda do nível de base, virtuais dunas eólicas teriam condições desfavoráveis de acúmulo e preservação.

O estágio glacial Würm (20 a 15 ka A.P.), correspondente ao nível do mar mais baixo do período aqui relatado, é propício à formação de um trato de sistemas de mar baixo tardio (*late lowstand*). A característica básica deste trato, na zona costeira, é que o fim da queda de NRM e do nível de base permite a manutenção, sem erosão (mas com afogamento na etapa seguinte), de sistemas planície costeira e sistemas fluviais desenvolvidos nos vales incisos do trato de mar baixo inicial.

Com a rápida elevação do NRM iniciada após cerca de 15 ka A.P., tem-se a retomada do acúmulo e o início de nova seqüência deposicional, com o desenvolvimento de trato de sistema transgressivo. O preenchimento sedimentar dos vales incisos experimentaria a transição de sedimentos francamente continentais, na base, para sedimentos marinhos de plataforma cada vez mais profunda no topo.

A elevação do NRM aciona novamente o mecanismo do princípio de Bruun (1962) e favorece a erosão de sedimentos de praia. Nas regiões de mar aberto (não estuarinas) em que o excesso de sedimentos em desequilíbrio pelo princípio não é inteiramente erodido para costa afora, o vento começa a formar sistemas eólicos transgressivos, correlacionáveis à geração 2. Esta situação predomina a sul da ponta das Canoas (ilha de Santa Catarina), onde a costa de baías estuarinas dá lugar a planícies costeiras e barreiras extensas.

No final desta fase, o sistema lagunar começa a distribuir-se segundo sua geografia atual, truncando erosivamente ou afogando parte das dunas eólicas da geração 2. Os sistemas barra-barreira cujos remanescentes encontram-se hoje na morfologia da costa atual também iniciam sua formação, preferencialmente nas zonas litorâneas de gradiente mais suave a sul do cabo de Santa Marta. Em outras áreas, não havendo aporte fluvial significativo, a transgressão holocênica esculpiu falésias sobre os terraços pleistocênicos e/ou dunas eólicas das gerações 1 e 2.

A rápida elevação de NRM após 15.000 A.P. propicia a formação de trato de sistemas transgressivos, na terminologia da estratigrafia de seqüências, culminando numa SMI. Supondo-se aporte nulo, a SMI teria coincidido no tempo com o máximo NRM. Como esta condição é improvável, a SMI deve ter-se formado antes disso, em algum momento da desaceleração da subida de NRM.

Após a máxima inundação, com a desaceleração e/ou término da subida do NRM, o aporte torna-se maior que a taxa de criação de espaço na bacia, fazendo com que ocorra regressão. Nas áreas favoráveis ao domínio da deposição fluvial, como na desembocadura do rio Tubarão no sistema lagunar, sistemas deltaicos se desenvolvem. Este cenário caracteriza o trato de sistemas deposicionais de mar alto. Ele é completado pelo desenvolvimento do aporte eólico defasado da geração 2 e por novos pulsos de deposição eólica, correspondentes às gerações 3 e 4 (Giannini & Suguio 1994).

CONCLUSÕES FINAIS

Os sistemas eólicos quaternários costeiros de Santa Catarina fazem parte de duas seqüências. A seqüência inferior, pleistocênica, engloba a geração eólica 1, integrante de trato de sistemas transgressivo, e os depósitos costeiros subaquosos do trato de sistemas de mar alto, finalizados por uma SMI. A seqüência superior, pleistocênica-holocênica, inclui um trato de sistemas transgressivo, no qual se enquadra a geração 2, e o atual trato de sistemas de mar alto, com as gerações 3 e 4. A superfície irregular do topo da geração 1 materializaria o limite de seqüências. Do ponto de vista da estratigrafia de seqüências, as gerações eólicas 1, 2 e 3/4 pertencem a tratos de sistemas distintos em tipo e/ou idade, e são portanto, sistemas deposicionais distintos. Por pertencerem à mesma seqüência, as gerações 2 e 3/4 podem apresentar uma passagem transicional nas áreas de maior aporte eólico defasado. Estas áreas, situadas ao sul do cabo de Santa Marta, coincidem com o mais extenso sistema barra-barreira da costa catarinense. Tal coincidência é um indício de que a formação de barreiras e a construção de depósitos eólicos estão relacionados, de modo sistêmico, a um só mesmo princípio sobre o destino dos sedimentos litorâneos colocados em desequilíbrio pela subida do NRM.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da FAPESP (98/00161-2, 99/05740-3, 01/01013-1, 01/1732-8).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIGARELLA, J.J. & BECKER, R.D. (1975) - Correlative deposits. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE QUATERNARY, Curitiba. *Topics for Discussion*, X... *Bol. Paranaense de Geociências*, 33: 225-230.
- BRUUN, P. (1962) - Sea level rise as a cause of shore erosion. *Am. Soc. Civil Engin. Proc., J. Waterways Harbors Div.*, 88: 117-130.
- GIANNINI, P.C.F. & SANTOS, E.R. (1994) - Padrões de variação espacial e temporal na morfologia de dunas de orla costeira no centro-sul catarinense. *Bol. Paranaense de Geociências* 42: 73-95.
- GIANNINI, P.C.F. & SUGUIO, K. (1994) - Diferenciação entre gerações de depósitos eólicos quaternários na costa centro-sul de Santa Catarina. In: CONGR. BRAS. GEOL., 38, Balneário Camboriú, SC. *Resumos Expandidos...* Balneário Camboriú. SBG, p.402-403.
- GIANNINI, P.C.F.; SUGUIO, K.; SANTOS-GIANNINI, E.R (1997) - Gerações de areias eólicas na escarpa de Guaiúba, Imbituba, SC. In: CONGR. ASSOC. BRASIL. DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 6. Curitiba. *Resumos Expandidos...* Curitiba. Abequa, p.63-67.
- KOCUREK, G. & HAVHOLM, K.G. (1993) - Eolian Sequence Stratigraphy - A Conceptual Framework. In: *Siliciclastic Sequence Stratigraphy*. AAPG Memoir 58, cap.16. p.393-409.
- MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M.; AZEVEDO, A.E.G. (1988) - Mapa Geológico do Quaternário Costeiro dos Estados do Paraná e Santa Catarina. Brasília, DNPM, 40 p, 2 mapas. (Série Geologia, 28).
- POSAMENTIER, H.W. & ALLEN, G.P. (1994) - *Siliciclastic Sequence Stratigraphy. Concepts and Applications*. AAPG Short Course, 89 p.