Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

**Morfologia, Organização e Evolução do Campo Eólico Costeiro do
Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil**

Luiz Tomazelli

Pesquisas em Geociências, 21 (1): 64-71, set./dez., 1994.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21252>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - set./dez., 1994.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Morfologia, Organização e Evolução do Campo Eólico Costeiro do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil

LUIZ J. TOMAZELLI

CECO, Instituto de Geociências, UFRGS, Caixa Postal 15001, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil

(Recebido em 03/06/94. Aceito para publicação em 20/09/94.)

Abstract – The Holocene coastal dunefield of Rio Grande do Sul North Littoral has a large variety of aeolian bedforms including vegetated dunes (embryonic dunes, foredunes and nebkas), unvegetated (free) dunes (barchans, transverse dunes and barchanoid ridges), sand sheets, linear dunes and parabolic dunes. The barchanoid ridge is the dominant dune type. The spatial distribution and morphologic characteristics of the dunes throughout the dunefield are subjected to the interaction of various factors like the proximity of the source (the sandy beach), the direction of the dominant wind (blowing from NE), the distribution and kind of vegetation and the grade of human interference. The free dunes actively transgress the hinterland in a SW direction, over Holocene and Pleistocene terrain. Taking into account the high migration rates (10-38 m/yr) and the probable trajectory of the dunes, it is possible to infer that this active transgressive dunefield is a relatively young feature (probably younger than 1000-1500 years). The present aeolian activity could be a consequence of a relative rise in sea level that appears to be occurring in this coastal region nowadays.

Resumo – O campo de dunas holocênicas costeiras do Litoral Norte do Rio Grande do Sul possui uma grande variedade de feições eólicas que incluem dunas vegetadas (dunas embrionárias, dunas frontais e dunas do tipo "nebkas"), dunas livres (barcanas, dunas transversais e cadeias barcanóides), lençóis de areia, dunas lineares e dunas parabólicas. As cadeias barcanóides correspondem ao tipo dominante de duna. A distribuição espacial e as características morfológicas das dunas através do campo eólico estão sujeitas à interação de vários fatores como a proximidade da fonte (a praia arenosa), a direção do vento dominante (proveniente de NE), o tipo e a densidade da vegetação e o grau de interferência humana. O campo de dunas livres transgride ativamente a região costeira, no sentido SW, cobrindo terrenos holocênicos e pleistocênicos. Considerando-se as altas taxas de migração (10-38 m/ano) e o provável caminho percorrido pelas dunas, é possível de se inferir que o campo de dunas livres da costa do Rio Grande do Sul é uma feição relativamente jovem (provavelmente mais jovem do que 1000-1500 anos). Esta atividade eólica pode ser um dos resultados do processo de elevação relativa do nível do mar que parece estar ocorrendo, nos dias de hoje, nesta região costeira.

INTRODUÇÃO

O campo de dunas holocênicas da costa do Rio Grande do Sul, com uma largura média de 5 a 8 km e mais de 600 km de extensão, corresponde a um dos mais expressivos sistemas eólicos ativos do Brasil. A investigação detalhada da parte norte deste sistema (Litoral Norte) (Fig. 1) revelou a ocorrência de uma grande variedade de feições eólicas. Pretende-se, neste trabalho, apresentar as principais características morfológicas destas feições, descrever sua distribuição espacial bem como tecer considerações sobre a origem e evolução do sistema eólico como um todo.

O campo eólico em estudo é controlado por um regime de ventos bimodal, de alta energia. O vento NE, dominante, sopra o ano todo, enquanto o vento secundário, proveniente de W, se torna mais importante nos meses de outono e inverno. Sob a ação do vento dominante, as dunas livres migram para o interior da costa, em sentido SW, a taxas variáveis entre 10-38 m/ano (Tomazelli, 1990, 1993). À medida que avançam para o interior, as dunas transgridem um complexo de lagos, lagunas e outros ambientes desenvolvidos nesta região costeira.

Outras características do campo eólico em estudo, não abordadas neste trabalho, podem ser encontradas em Martins (1967) e Tomazelli (1990, 1993).

A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA MORFOGÊNESE DAS DUNAS COSTEIRAS

Grande parte das dunas costeiras da área em estudo se forma na presença de vegetação cuja influência se traduz,

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo: o Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

basicamente, no estabelecimento de condições propícias à deposição de parte da carga sedimentar arenosa transportada

pelo vento desde a praia adjacente. A cobertura vegetal é, assim, o principal critério para a separação entre os tipos fundamentais de dunas existentes na área de estudo, determinando o reconhecimento de dois grupos principais de dunas: as dunas vegetadas e as dunas livres. A vegetação diferencia completamente os processos de gênese e evolução destes dois grupos de dunas.

Ao soprar sobre a superfície arenosa da praia o vento sofre uma acentuada diminuição de velocidade em direção a esta superfície, devido ao efeito de fricção. Estabelece-se, assim, um gradiente de velocidade que, como demonstrou Bagnold (1941), segue uma curva logarítmica. A velocidade zero é alcançada a uma altura da superfície do terreno que, embora pequena, possui um considerável significado. Esta altura - convencionalmente designada de Zo. - abaixo da qual o ar mantém-se parado, possui um valor que independe da velocidade do vento e que é controlado somente pela rugosidade da superfície do terreno. Quanto mais rugosa for, maior será seu valor. A função básica desenvolvida pela cobertura vegetal na gênese e estabilização das dunas costeiras reside exatamente na sua capacidade de aumentar esta rugosidade aerodinâmica, ou seja, ampliar o valor de Zo.

Uma importante interação que ocorre entre a vegetação costeira e o vento com sua carga de areia se manifesta junto à praia supamarés (= pós-praia), próximo à linha de maré alta. Quando a “nuvem” de grãos em saltação proveniente da praia encontra neste local algum anteparo, são criadas, a sotavento destes obstáculos, as condições adequadas para a deposição de parte da carga sedimentar carregada pelo vento, levando à formação de corpos arenosos alongados, denominados de dunas de sombra (“shadow dunes”). Embora este papel de obstáculo possa ser exercido por qualquer tipo de material estranho existente na praia (latas, garrafas, pedaços de madeira, etc...), o mais comum é que ele seja desempenhado por núcleos isolados de vegetação. A presença destes núcleos de vegetação propicia, assim, o crescimento das primeiras e incipientes dunas junto à praia: as dunas embrionárias.

Após o estabelecimento de uma cobertura vegetal relativamente densa sobre estas dunas embrionárias, o efeito desta cobertura sobre a “nuvem” em saltação é enorme e se traduz, basicamente, pela criação de uma falsa superfície de solo que deixa abaixo de si uma espessa camada de ar estagnado. A cobertura vegetal atua, assim, como elemento rugoso estabelecendo um novo valor, bem mais elevado, para Zo. Este valor varia, na dependência das espécies vegetais e de sua densidade, mas as observações mostram que ele é aproximadamente igual a 2/3 do tamanho médio das plantas (Carter, 1988). Este fenômeno propicia a deposição, por queda livre, da maior parte dos grãos que se encontram na “nuvem” em saltação proveniente da praia e que penetram nesta camada de ar parado. Somente aqueles poucos grãos cuja altura de salto consegue ultrapassar o valor de Zo. (em torno de 10 a 20cm) continuarão a ser transportados para frente, impulsionados pelo vento.

Um outro aspecto importante a considerar quanto à influência da cobertura vegetal na morfogênese das dunas costeiras é que, devido ao elevado valor de Zo. mesmo os ventos de maior velocidade não conseguem iniciar o processo de transporte dos grãos que se encontram depositados nesta zona vegetada. Explica-se, assim, o papel fundamental desempenhado pela vegetação na estabilização das dunas

costeiras.

Além do profundo efeito sobre o valor de Zo. a cobertura vegetal contribui também na diminuição da carga em transporte pelo vento por efeito do amortecimento que ocorre quando os grãos se chocam contra as folhas e ramos das plantas perdendo sua energia e se depositam.

Como resultado final dos efeitos acima descritos, as dunas vegetadas tendem a crescer a partir de uma deposição vertical das areias transportadas pelo vento.

Sintetizando, pode-se dizer que o efeito básico que a vegetação costeira exerce sobre a carga sedimentar transportada em saltação pelo vento consiste na deposição da maior parte desta carga através de três mecanismos principais:

- (1) efeito de anteparo permeável à trajetória do vento, conduzindo à formação de dunas de sombra (“shadow dunes”);
- (2) aumento significativo no valor de Zo, estabelecendo espessa camada de ar estagnado junto à base da vegetação;
- (3) amortecimento, por parte das folhas e ramos, do impacto dos grãos, absorvendo sua energia.

As dunas costeiras vegetadas se desenvolvem, portanto, graças a estas múltiplas interações que se estabelecem entre o vento, com sua carga arenosa, e a cobertura vegetal. Obviamente, todos estes processos aqui descritos variam muito, na dependência do tipo e da densidade desta cobertura vegetal.

CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS
FEIÇÕES EÓLICAS DA COSTA DO
RIO GRANDE DO SUL

Ao longo dos anos, as feições eólicas têm sido objeto de numerosas classificações que se encontram disponíveis na literatura especializada. Veja-se, por exemplo, Bagnold (1941), Mckee (1966, 1979), Wilson (1972), Davies (1980), Short & Hesp (1982) e Goldsmith (1985). Algumas destas classificações tomam como base critérios puramente descritivos (morfologia externa, tamanho, número de faces de deslizamento, etc.); outras, critérios de ordem genética (orien-

A. Dunas Vegetadas

- 1. Dunas embrionárias
- 2. Dunas frontais (“foredunes”)
- 3. Dunas do tipo “nebka”

B. Dunas Livres

- 1. Barcanas
- 2. Cadeias barcanóides
- 3. Dunas transversais

C. Lençóis de Areia

D. Feições Associadas à Deflação Eólica

- 1. Bacias de deflação (“blow-outs”)
- 2. Dunas parabólicas
- 3. Dunas lineares
- 4. Lençóis arenosos parabólicos

Tabela 1 - Classificação das principais feições eólicas do Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

tação em relação ao vento, grau de influência da vegetação, etc.). Em geral os esquemas classificatórios têm sido desenvolvidos para serem aplicados a dunas de ambientes desérticos ou dunas costeiras, não se adaptando muito bem para aqueles campos eólicos que apresentam dunas com características encontradas nestes ambientes, como é o caso do campo eólico da costa do Rio Grande do Sul.

No estudo das feições eólicas da área investigada, optou-se por um esquema próprio de classificação, tendo em vista a dificuldade de aplicação dos esquemas até agora propostos. Procurou-se, no entanto, evitar a criação de nomes novos. O quadro de classificação proposto (Tabela 1) foi construído, então, a partir das diversas classificações já existentes, mesclando-se critérios genéticos e descritivos.

Dunas Vegetadas

As dunas vegetadas compreendem feições eólicas cuja gênese é controlada, basicamente, pela interação do vento, com sua carga arenosa proveniente da praia, e a vegetação costeira. Sob o ponto de vista de mobilidade, estas dunas migram pouco, podendo ser consideradas como fixas ou parcialmente fixas, na dependência da densidade da cobertura vegetal.

As dunas vegetadas da área de estudo abrangem três tipos principais que embora sejam, às vezes, de difícil separação entre si mostram, em geral, uma tendência evolutiva bem definida expressa, basicamente, nas suas relações espaciais (distância relativa até a fonte da areia - a praia) e nas caracte-

Figura 2 - Processo de transporte eólico de areia da praia supramarés para as dunas vegetadas, através de saltação. Observe-se a presença de duna frontal com densa cobertura vegetal (*Panicum racemosum*) e, em sua frente, o desenvolvimento de dunas embrionárias (colonizadas por *Blutaparon portulacoides*).

rísticas da cobertura vegetal. (1) Dunas embrionárias, (2) Duna frontais e (3) Dunas do tipo "nebka".

As dunas embrionárias (Fig. 2) desenvolvem-se junto à praia supramarés, próximo ao limite da maré alta, na base das dunas frontais, graças à areia trazida pelo vento e que se acumula ao encontrar algum obstáculo em seu caminho. Na região estudada, as dunas embrionárias passam a ser rapidamente colonizadas principalmente por *Blutaparon portulacoides* e *Paspalum vaginatum* (Pfadenhauer, 1978). Estas plantas rasteiras, estoloníferas, apresentam alta tolerância às condições inóspitas do ambiente (elevada salinidade, flutuações de temperatura, mobilidade da areia, etc.). Os estolões rastejantes cobrem a areia com um manto esparsos de vegetação fazendo com que este tipo de duna não se desenvol-

va com a morfologia de cristas ou de montes elevados mas sim como uma plataforma suave, relativamente baixa (cerca de 0,5 a 1m acima do nível do mar). Nos locais, mais raros, em que as dunas embrionárias crescem associadas à presença de outro tipo de vegetação, representada, por exemplo, por tufo compactos de *Panicum racemosum* a acumulação, devido ao hábito desta planta, será mais localizada desenvolvendo dunas embrionárias com morfologia de montículos de areia inicialmente desconectados entre si. Portanto, a morfologia desenvolvida pelas dunas embrionárias depende fundamentalmente do tipo de vegetação pioneira responsável pela sua colonização (Pfadenhauer, 1978).

Um importante aspecto a ser considerado a respeito das dunas embrionárias que atualmente se desenvolvem na área investigada é o seu caráter aparentemente efêmero. Durante o período abrangido por este estudo (4 anos), constatou-se este caráter efêmero ao se observar que, após alcançar um certo grau de desenvolvimento, estas dunas são completamente destruídas por ocasião dos eventos de tempestade maiores (períodos de ressaca do mar), quando as ondas atingem a base das dunas frontais. Fenômeno idêntico foi registrado por Bernardi *et al.* (1987) em dunas embrionárias situadas ao sul da cidade de Rio Grande.

As dunas frontais ("foredune") da área investigada correspondem a um cordão arenoso que se estende, de maneira praticamente contínua, paralelo à linha de costa e imediatamente após a praia supramarés. As eventuais interrupções na continuidade da duna frontal se devem a causas naturais (presença de bacias de deflação ("blow-outs") naturais, desembocaduras de sangradouros) ou artificiais (bacias de deflação induzidas por destruição da vegetação, remoção das dunas pelo homem). As dunas frontais geralmente apresentam alturas expressivas, que podem alcançar de 5 a 10 m, o que faz com que o cordão arenoso se destaque claramente na topografia da região, entre a praia e o campo de dunas do tipo "nebka".

As dunas frontais se desenvolvem a partir de dunas embrionárias que cresceram em altura e coalesceram lateralmente formando o cordão arenoso. Acompanhando este aumento na altura das dunas ocorre uma modificação substancial no tipo de vegetação. A vegetação típica das dunas frontais da área de estudo é representada, basicamente, pela gramínea *Panicum racemosum*, considerada como a planta mais eficaz no trapeamento de areia e, portanto, na fixação das dunas ao longo da costa do Rio Grande do Sul (Pfadenhauer, 1978; Soares, 1984; Costa *et al.*, 1984; Cordazzo & Seeliger, 1988). A densidade da cobertura vegetal varia bastante, sendo que, em alguns locais, pode alcançar valores muito elevados, reduzindo sensivelmente o transporte de areia pelo vento e estabilizando completamente a duna frontal (Fig. 2).

Durante os eventos de tempestade, as ondas atingem diretamente as dunas frontais, erodindo boa parte da face voltada para a praia. Com isto, o perfil da duna é modificado, transformando-se em uma escarpa (Fig. 3). Os processos de acumulação gradual de areia junto à base desta escarpa - correspondendo à fase de crescimento das dunas embrionárias - suavizam novamente o perfil até que um novo evento de tempestade recomece o processo. Assim, percebe-se que a situação atual, ao mesmo tempo em que inibe a transformação das dunas embrionárias em dunas frontais desencorajando, deste modo, a progradação da linha de costa, faz, também,

Figura 3 - Escarpa erosiva esculpida por ondas de tempestade na face oceânica das dunas frontais.

Figura 4 - Dunas do tipo "nebka" (dunas monticulares vegetadas) cortadas por uma faixa arenosa de vegetação escassa e que atua como um "corredor de alimentação" suprido de areia as dunas livres mais interiorizadas.

com que as dunas frontais se mantenham em posição fixa em relação à praia mas, em termos absolutos, em lento recuo em relação ao continente. Este movimento transgressivo das dunas frontais - muito lento e de difícil monitoramento - é acompanhado de um aumento de altura destas dunas, resultando daí o grande contraste altimétrico que as mesmas apresentam em relação aos terrenos adjacentes. As areias que as ondas de tempestade erodem das dunas frontais são gradualmente repostas à praia durante os períodos de regime normal. Parte destas areias é reincorporada às dunas frontais pelo vento que sopra desde a praia mas grande parte dela é transferida para as dunas interiorizadas, abandonando definitivamente o prisma ativo de sedimentação praial.

As considerações acima ressaltam o importante papel desempenhado pelas dunas frontais na proteção da costa contra os efeitos das ondas de tempestade e na manutenção do equilíbrio entre os sistemas praial e eólico. Infelizmente, em vários locais, ao longo da área de estudo, pode-se constatar que a ação antrópica tem promovido ou acelerado a destruição destas dunas, seja pela eliminação de sua cobertura vegetal ou então, pela remoção direta de areia. Tais atitudes, extremamente danosas ao equilíbrio do sistema, têm sido, inevitavelmente, retribuídas por efeitos assoladores, como os verificados ao longo das praias de Imbé, Tramandaí e Cidreira durante os mais violentos períodos de ressaca do mar. Nos trechos em que as dunas frontais foram removidas, ou ocupadas por construções, as ondas de tempestade têm causado destruições de inúmeras casas, edifícios, ruas, etc.

As dunas do tipo "nebka" (também conhecidas na

literatura como "coppice dunes", "hummock dunes" ou "hillock dunes") ocupam uma faixa de terreno entre as dunas frontais e as dunas livres, uma região que se caracteriza, morfológicamente, por uma topografia fragmentada, irregular, fracamente ondulada, sem orientação definida e que foi designada por Martins (1967) de "planície arenosa" (Fig. 4). As "nebkas" são dunas vegetadas, monticulares, que se desenvolvem controladas por núcleos de vegetação de densidades e tipos variáveis mesclando, em conseqüência, formas arredondadas com formas mais orientadas que incluem, muitas vezes, bem desenvolvidas dunas de sombra ("shadow dunes"). O terreno consiste, em geral, num mosaico confuso de dunas bem vegetadas intercaladas com dunas com vegetação muito rala pontuadas por bacias de deflação localizadas. Estas dunas ocupam, topograficamente, uma região relativamente baixa onde, muitas vezes, o lençol freático se aproxima da superfície do terreno.

Em conseqüência do maior afastamento da praia, da presença de um substrato mais estabilizado, de ocupar um espaço relativamente abrigado e da maior proximidade do freático, a variedade de plantas que se desenvolvem nesta faixa de terreno é bem maior do que a existente nas dunas

Figura 5 - Configuração esquemática dos principais tipos de dunas livres e feições associadas à deflação encontradas na área de estudo.

frontais e embrionárias. Estas variedades incluem, na área de estudo, além de *Panicum racemosum* e *Senecio crassiflorus* espécies como *Hydrocotyle bonariensis*, *Spartina ciliata*, *Gamachaeta americana*, *Androtrichum trigynum*, entre outras (Pfadenhauer, 1978).

Em função da distribuição irregular da cobertura vegetal ocorrem, dentro da faixa de terreno ocupada pelas dunas do tipo "nebka", regiões com vegetação muito rala e que possibilitam significativo transporte de areia pelo vento. Estas faixas de terreno se comportam como verdadeiros "corredores de alimentação", permitindo o deslocamento atual de areia desde a praia até o campo de dunas livres situado mais a oeste. Normalmente estes "corredores de alimentação" se desenvolvem a partir de interrupções (naturais ou artificiais) na continuidade das dunas frontais.

Dunas Livres

O campo de dunas livres (não vegetadas) ocupa a porção mais ocidental do sistema eólico holocênico da região

estudada e alcança, em certos trechos, uma largura em torno de 5 a 6 km. Em geral seu limite, do lado oeste, corresponde às margens de corpos lacustres/lagunares, para dentro dos quais as dunas avançam.

Os principais tipos de dunas livres encontrados na área de estudo incluem, na terminologia de McKee (1979) (a) Dunas barcanas. (b) Cadeias barcanóides e (c) Dunas transversais. A diferenciação morfológica entre estes três tipos de dunas pode ser atribuída, muitas vezes, a maior ou menor

Figura 6 - Fotografia aérea de um segmento do campo eólico costeiro entre Tramandaí e Cidreira mostrando a presença de cadeias barcanóides, barcanas e lençóis de areia. A distância entre o corpo lagunar (canto superior esquerdo) e a praia (canto inferior direito) é de cerca de 4 km.

disponibilidade de areia. Pode-se verificar aqui, como já foi constatado em vários outros locais (veja-se, por exemplo, McKee, 1979) que uma diminuição na quantidade de areia disponível (representada aqui pelo maior afastamento da fonte - a praia - ou pelo cancelamento na alimentação devido à urbanização) é acompanhada de uma progressiva passagem de dunas transversais a cadeias barcanóides e, por fim, a barcanas isoladas. Em alguns locais esta sucessão é bastante clara, embora em outros os três tipos de dunas coexistam, evidenciando que novos fatores igualmente devem atuar nesta diferenciação morfológica (Fig. 5).

As observações realizadas em fotos aéreas antigas (1947, 1948) bem como em fotos mais modernas, neste caso em regiões ainda pouco afetadas pela urbanização (sul da área de estudo) mostram que, na ausência da influência antrópica (presença de estradas, balneários, construções diversas) o campo de dunas livres inicia bem próximo à praia sendo alimentado diretamente por lençóis arenosos ativos que se prolongam através de bacias de deflação e outras interrupções

Figura 7 - Cadeias barcanóides ao norte de Cidreira. Após um período de chuvas as interdunas desenvolvem pequenos lagos.

existentes na duna frontal. As primeiras dunas livres a se formar desenvolvem, em geral, uma morfologia de duna transversal com a crista orientada aproximadamente na direção N-S, sendo alimentadas, portanto, por um vento proveniente de E ou ENE. À medida que estas dunas migram para o interior a crista vai se tornando mais sinuosa ao mesmo tempo em que vai sofrendo uma gradativa deflexão até se orientar, já como uma típica cadeia barcanóide, na direção NW-SE, perpendicularmente ao vento efetivo, proveniente de NE (Fig. 6). Esta progressiva curvatura na direção média das cristas das dunas barcanóides, bem como a marcante assimetria dos braços das barcanas (o braço de lado leste em geral é mais desenvolvido), é um dos aspectos morfológicos mais expressivos destas dunas costeiras. Este comportamento morfológico responde, provavelmente, a uma correspondente deflexão sofrida pelo vento à medida que se afasta da praia, possivelmente por efeitos de interação com a própria superfície topográfica do campo de dunas.

É possível, assim, reconstituir a trajetória desenvolvida pelas dunas livres durante sua migração a partir da praia. Após adquirem uma orientação perpendicular ao vento efetivo as dunas alcançam sua taxa de migração mais expressiva (cerca de 30 m/ano) se deslocando no sentido SW, transgredindo terrenos mais antigos, holocênicos e até mesmo pleistocênicos.

A análise de fotografias aéreas de diferentes datas de vôo, complementada por observações e medidas diretas no campo, mostra claramente as diversas variações morfológicas a que as dunas livres se encontram submetidas ao longo do tempo, embora mantenham, como regra, a sua característica básica de dunas transversais migratórias no sentido SW. Estas dunas sofrem marcantes modificações de forma, por exemplo, ao longo das diferentes estações do ano. Assim, durante a primavera e verão, e especialmente durante períodos de seca, as interdunas desenvolvem uma grande quantidade de pequenas barcanas e dunas transversais cuja velocidade de migração excede à das dunas maiores. Em consequência, durante estes períodos, as dunas livres carregam, ao longo de sua superfície a barlavento, inúmeras dunas menores transformando-se, morfológicamente, em dunas compostas (segundo McKee, 1979) ou "draas" (no sentido de Wilson, 1972).

Nos meses de inverno e nos períodos de elevada precipitação, as dunas menores praticamente desaparecem e as interdunas, devido à elevação do lençol freático, se transformam em pequenos lagos (Fig. 7).

As variações sazonais no regime de ventos são responsáveis também por importantes modificações temporárias na morfologia das dunas livres. Assim, durante os meses de inverno, com a ocorrência mais freqüente de fortes ventos provenientes de SW, opostos à direção normal de migração das dunas, a face de deslizamento normal é fortemente erodida, a beira é desgastada com formação de profundas incisões e, comumente, desenvolve-se, junto à crista da duna, uma face de deslizamento reversa. Esta configuração morfológica é, no entanto, efêmera, pois logo os ventos provenientes de NE, ativos mesmo nestes meses de inverno, tratam de recompor a morfologia original. O resultado final é que, durante os meses de outono e inverno, a taxa de migração das dunas livres diminui sensivelmente e as dunas apresentam-se mais baixas, desgastadas, "arredondadas" em perfil transversal. Nos meses de primavera e verão, com o franco predomínio dos ventos de NE, a morfologia normal se restabelece por completo, as

dunas alcançam uma altura maior, exibem uma beira bem definida e atingem as taxas de migração mais expressivas.

Lençóis de Areia

Os depósitos eólicos mantiformes (lençóis de areia) correspondem a acumulações arenosas promovidas pelo vento sem que ocorra o desenvolvimento de morfologia de duna. Embora não apresentem feições morfológicas como cristas ou faces de deslizamento, estes lençóis arenosos muitas vezes se prolongam alinhados na direção do vento dominante, evidenciando uma migração segundo esta mesma direção.

Os mantos de areia podem se desenvolver em qualquer parte do campo eólico, mas sua ocorrência mais comum se dá na margem vegetada, próximo à praia, onde comumente constituem a maior parte dos “corredores de alimentação”. Nesta região, muitas vezes os depósitos eólicos mantiformes transicionam para outros tipos de feições eólicas características destas zonas (lençóis arenosos parabólicos, dunas parabólicas e dunas lineares).

Uma outra região de desenvolvimento comum dos depósitos eólicos mantiformes corresponde às margens do campo de dunas livres próximo aos corpos lagunares onde, muitas vezes, se observa uma tendência de dissipação das dunas com a formação de lençóis arenosos parcialmente vegetados. Nestes locais, o aumento no grau de umidade do terreno com uma maior aproximação de lençol freático pode ser a causa da dissipação das dunas e formação dos lençóis de areia.

Feições Associadas à Deflação Eólica

As principais feições associadas aos processos de deflação eólica na área de estudo incluem (a) Bacias de deflação (“blow-outs”), (b) Dunas parabólicas, (c) Dunas lineares e (d) Lençóis arenosos parabólicos (Fig. 5). Elas ocorrem, preferencialmente, na faixa inicial do campo eólico, próximo à praia, nos terrenos de domínio das dunas vegetadas. Nota-se, assim, uma nítida inter-relação entre feições de deflação, a cobertura vegetal e o lençol freático. Muitas vezes as feições passam gradativamente uma às outras, em função de fatores como o volume de areia disponível e a influência da vegetação. A partir do estudo de fotografias aéreas de épocas diferentes é possível se acompanhar claramente a transformação seqüencial dos depósitos eólicos mantiformes em lençóis arenosos parabólicos e, por fim, em dunas parabólicas, à medida que a feição migra, se afasta da praia e, conseqüentemente, sofre uma gradativa diminuição na alimentação de areia.

As bacias de deflação são feições com formas aproximadamente circulares ou elípticas e que se desenvolvem ao longo da duna frontal, bem como no terreno ocupado pelas dunas do tipo “nebka”. Nestas feições, a escavação da areia pelo vento, muitas vezes se aprofunda até atingir o lençol freático. Junto à duna frontal servem como condutos por onde a areia da praia é transferida para o interior do campo eólico. Na maioria das vezes é a partir deles que iniciam os “corredores de alimentação” com seus lençóis de areia. As bacias de deflação podem se desenvolver por processos naturais ou então podem ser induzidas artificialmente como conseqüência da destruição da cobertura vegetal devido, por exemplo, ao

Figura 8 - Perfil transversal ao campo eólico holocênico do Litoral Norte do Rio Grande do Sul mostrando a organização espacial mais comum das feições eólicas.

tráfego, à criação de animais ou a outras causas.

As dunas parabólicas se desenvolvem em alguns poucos locais da área de estudo associando-se, em geral, a terrenos parcialmente vegetados. Elas possuem caracteristicamente seus braços voltados para a direção de proveniência do vento dominante (NE) e migram, portanto, no sentido SW. Estas dunas são produzidas nos locais em que há uma relativa deficiência de areia e onde a vegetação atua no sentido de ancorar os braços, retardando-os em relação à migração do corpo central da duna. Embora sejam relativamente raras no campo eólico holocênico, as dunas parabólicas são, por outro lado, muito comuns nas zonas arenosas de reativação eólica situadas sobre os terrenos pleistocênicos da região onde, inclusive, se constituem no tipo principal de duna.

As dunas lineares correspondem a projeções longitudinais ao vento dominante, alimentadas através de bacias de deflação existentes na duna frontal, ou então são feições associadas à migração de dunas parabólicas quando constituem, na realidade, remanescentes dos braços destas dunas que permaneceram no terreno como cristas longitudinais orientadas paralelamente ao vento dominante.

Por fim, os lençóis arenosos parabólicos são feições que igualmente transgridem os terrenos vegetados, mantendo uma orientação longitudinal ao vento dominante, e que se desenvolvem naqueles locais em que a quantidade de areia, alimentada através de bacias de deflação, for mais expressiva. Apresentam uma configuração morfológica intermediária entre os lençóis de areia e a das dunas parabólicas propriamente ditas podendo, inclusive, marcar um estágio de transição na passagem entre estas duas feições eólicas. Muitas vezes a porção do lençol parabólico que possui uma maior espessura de areia permite o desenvolvimento de algumas dunas livres (dunas transversais) que migram em sua superfície.

ORGANIZAÇÃO ESPACIAL E EVOLUÇÃO DO CAMPO EÓLICO COSTEIRO DO RIO GRANDE DO SUL

Apesar do sistema eólico costeiro do Litoral Norte do Rio Grande do Sul já ter sido em grande parte modificado pela intervenção humana, é ainda possível se verificar, em determinados segmentos do campo eólico, a sua organização natural. Os diversos tipos de dunas e outras feições que o constituem apresentam um padrão de organização espacial que, em grande parte, reflete o processo evolutivo do sistema.

A Figura 8 ilustra a distribuição das feições eólicas encontradas na área de estudo, segundo um perfil que, partindo dos terrenos pleistocênicos mais interiorizados, corta transversalmente os terrenos holocênicos até a praia atual. Embora a distribuição ilustrada não seja válida para todo o

sistema - há, por exemplo, trechos do campo eólico em que as dunas vegetadas são raras e as dunas livres se desenvolvem imediatamente junto à praia - ela representa o quadro mais comum na área estudada.

Dentro do campo de dunas vegetadas, o processo evolutivo natural parece ser bem claro e envolve a transformação das dunas embrionárias em dunas frontais e estas em dunas do tipo "nebka". Esta seqüência de evolução que, tudo indica, dominou durante a maior parte do Holoceno nesta região costeira, parece ter sido interrompida no presente. A situação atual, caracterizada pela efemeridade das dunas embrionárias e pela destruição parcial das dunas frontais inibe o processo evolutivo das dunas vegetadas e a conseqüente progradação da linha de costa. Ela reflete a tendência erosiva que a costa do Rio Grande do Sul apresenta atualmente (Tomazelli & Villwock, 1989, 1992; Tomazelli, 1990).

Em alguns trechos da costa, especialmente na porção sul da região investigada, onde a ação antrópica ainda é pouco significativa e a cobertura vegetal é mais reduzida, as dunas livres são alimentadas diretamente da areia praial. Na maior parte da costa, no entanto, elas se encontram, presentemente, separadas da fonte primária de areia (a praia) pelos terrenos ocupados pelas dunas vegetadas. Nestes locais, a alimentação das dunas livres se reduz a faixas relativamente estreitas - os já comentados "corredores de alimentação". Por outro lado, a progressiva urbanização desta região costeira tem interrompido, muitas vezes, o desenvolvimento natural destes corredores ativos de tal forma que alguns importantes segmentos do campo eólico de dunas livres se encontram, hoje em dia, com sua alimentação praticamente cancelada. O transporte eólico, que continua ativo dentro destes segmentos, se dá, nestes casos, às expensas das areias internas ao próprio campo de dunas livres, sem que haja aporte de areia nova. Obviamente, nestas circunstâncias, estes segmentos do campo eólico costeiro se encontram em gradativo processo de desaparecimento.

Esta situação é excepcionalmente clara na região ao norte de Imbé. Fotografias aéreas antigas (1947) mostram a existência de um exuberante campo de dunas livres, praticamente contínuo até Capão da Canoa, alimentado diretamente da praia e exibindo bem desenvolvidas dunas transversais. A proliferação de balneários nesta região tem progressivamente bloqueado a alimentação das dunas livres de tal forma que, hoje em dia, o campo eólico está muito reduzido, limitando-se, praticamente, à presença de alguns poucos lençóis parabólicos remanescentes.

O amplo campo de dunas livres é, sem dúvida, o elemento mais proeminente do sistema eólico costeiro do Rio Grande do Sul. Seu expressivo desenvolvimento é um fato que desperta a atenção, quando se considera que esta região costeira está submetida a um clima úmido e que existem nela espécies vegetais potencialmente efetivas na fixação das dunas (especialmente *Panicum racemosum*). Sua origem deve ser atribuída a uma disponibilidade muito grande de areia na praia, conjugada a um regime de ventos muito favorável à movimentação desta areia em sentido ao continente.

Tomazelli (1993) demonstrou a grande efetividade dos ventos de NE e E na remoção da areia da praia e alimentação do sistema eólico. Por outro lado, a alta disponibilidade de areia no ambiente praial pode estar associada ao processo de elevação do nível relativo do mar que, fortes evidências indicam, parece estar ocorrendo nesta região costeira

(Tomazelli & Villwock, 1989, 1992). Ao propiciar uma maior erosão das dunas embrionárias e das dunas frontais pelas ondas de tempestade, este mecanismo evitaria o processo de progradação praial e aumentaria o suprimento de areia na praia, possibilitando sua transferência pelos ventos de NE e E, até o campo de dunas livres.

As determinações das taxas médias de migração das dunas livres revelaram valores entre 10-38 m/ano (Tomazelli, 1993). Considerando-se a largura máxima do campo eólico e a provável trajetória das dunas migratórias, desde a praia até suas posições atuais, é possível se fazer um estimativa da idade máxima do campo de dunas livres. Segundo esta estimativa, as dunas mais antigas - aquelas situadas junto à margem oeste do campo eólico de dunas livres - possuiriam uma idade inferior a 1000-1500 anos. Portanto, ainda que impreciso, este simples cálculo permite deduzir que o campo eólico ativo da costa do Rio Grande do Sul é um sistema costeiro bastante jovem. Esta recente aceleração na atividade eólica pode ter sido deflagrada por um também recente processo de elevação do nível relativo do mar, fenômeno este para o qual várias outras evidências têm sido apontadas (Tomazelli & Villwock, 1989, 1992).

Agradecimentos - O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo suporte financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagnold, R.A. 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen, London. 265p.
- Bernardi, H.; Cordazzo, C.V. & Costa, C. S. B. 1987. Efeito de ressacas sobre *Blutaparon portulacoides* (St. Hill) Mears, nas dunas costeiras do sul do Brasil. *Ciências e Cultura*, 39 (5/6): 545-547.
- Carter, R.W.G. 1988. *Coastal Environments*. Academic Press, London, 617p.
- Cordazzo, C.V. & Seeliger, U. 1988. *Guia Ilustrado da Vegetação Costeira do Extremo Sul do Brasil*. Editora da FURG, Rio Grande, 275 p.
- Costa, C.S.B.; Seeliger, U. & Cordazzo, C.V. 1984. Aspectos da ecologia populacional do *Panicum Racemosum* (Spreng) nas dunas costeiras do Rio Grande do Sul. In: Lacerda, L.D.; Araujo D.S.D.; Cerqueira, R. & Turcq, B. (eds.). *Restingas: Origem, Estrutura, Processos*. CEUFF, Niterói. p. 381-394.
- Davies, J.L. 1980. *Geographical Variation in Coastal Development*. Longman, London. 212p.
- Goldsmith, V. 1985. Coastal Dunes. In: Davies Jr.; R.A., (ed.) *Coastal Sedimentary Environments*. Springer-Verlag, New York. p. 303-378.
- Martins, L. R. 1967. Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. *Publicação Especial. Escola de Geologia, UFRGS, Porto Alegre*, nº 13. 102p.
- Mc Kee, E.D. 1966. Structures of Dunes at White Sands National Monument, New Mexico. *Sedimentology*, 7 (1): 3-69.
- . 1979. Introduction to a Study of Global Sand Seas. In: Mc Kee, E.D. (ed.). *A Study of Global Sand Seas*. U.S. Geol. Survey, Washington, D.C. p. 1-19 (Geol. Surv. Prof. Paper, nº 1052).
- Pfadenhauer R. J. 1978. Contribuição ao conhecimento da vegetação e de suas condições de crescimento nas dunas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Biologia*. Rio de Janeiro, 38 (4): 827-836.
- Short, A.D. & Hesp, P.A. 1982. Wave, beach and dune interaction in South-eastern Australia *Marine Geology*. 48: 259-284.
- Soares, J.J. 1984. Levantamento fitossociológico de uma faixa litorânea do Rio Grande do Sul entre Tramandaí e Praia do Barco. In: Lacerda, L.D.; Araujo, D.S.D.; Cerqueira, R. & Turcq, B., (eds.). *Restingas: Origem, Estrutura, Processos*. CEUFF, Niterói. p. 381-394.
- Tomazelli, L. J. 1990. *Contribuição ao estudo dos sistemas deposicionais holocênicos do nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul - com ênfase no sistema eólico*. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. 270p.
- . 1993. O Regime de Ventos e a Taxa de Migração das Dunas Eólicas Costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, 20 (1): 18-26.

- ____ & Villwock, J.A. Processos erosivos atuais na costa do Rio Grande do Sul, Brasil: evidências de uma provável tendência contemporânea de elevação do nível relativo do mar. *Anais, 2º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*, Rio de Janeiro. ABEQUA, (no prelo).
- ____ & ____ 1992. Um Novo Modelo Evolutivo Para o Holoceno Costeiro do Rio Grande do Sul: Resultados Preliminares. *Boletim de Resumos Expandidos, 37º Congresso Brasileiro de Geologia*, São Paulo, SBG, 1:69-70.
- Wilson, I. G. 1972. Aeolian bedforms - their development and origins. *Sedimentology*, 7 (1): 3-69.