

MOBILIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE DUNAS EM CLIMAS ÚMIDOS E SECOS*

Prof. Dr. Haim Tsoar
University of Negev - Israel
tsoar@mail.bgu.ac.il

Prof. Dr. Sebastiaan M. Arens
University of Amsterdam - Holanda
arens@duinonderzoek.nl

RESUMO

Dunas costeiras formam um sistema único e importante, que pode ser móvel ou fixo. A vegetação de dunas é reconhecida como sendo escassa e não aumentar com aumento de precipitação e temperatura, como ocorre com plantas em outros solos. As razões desse fato residem no grande espaço entre os poros nas areias das dunas e na baixa percentagem de umidade em contexto de capacidade de campo, que facilitam a infiltração em direção ao lençol freático, e na ausência de coesão das areias, que faz da erosão eólica o principal fator limitante para a vegetação. Neste estudo, os fatores climáticos no campo de dunas da região quente e seca de Negev (Israel) e na zona costeira úmida temperada da Holanda que foram artificialmente ativadas são comparados. Na Holanda, a vegetação não voltou a recobrir as dunas quatro anos após ter sido removida, enquanto no deserto de Negev, elas foram recobertas em intervalo de tempo semelhante. A principal diferença entre os dois tipos de campos dunares é dada pela intensidade da energia do vento (wind power), expresso pelo potencial de deriva de areia (drift potential) (DP), a qual é responsável pelo fator limitante no crescimento da vegetação em dunas. As interações biológicas e físicas são na seqüência desenvolvidas por histerese, a qual demonstra que a duna pode ser vegetalizada quando a energia do vento é suficientemente baixa. Uma vez vegetalizada, é necessária uma pressão muito maior do vento para destruir a vegetação e reativar as dunas. A vegetação pode cobrir dunas que estão sob ação de elevada energia do vento. Somente se elas forem plantadas artificialmente, como é o caso na maior parte das dunas costeiras na Europa. Essas dunas estão em estado estático uma vez que a vegetação é removida em função de elevado DP. O efeito de mudanças climáticas faz-se sentir primeiramente através de mudanças na potência do vento e não através de mudanças na precipitação e temperatura.

Palavras chave: dunas costeiras, vegetação costeira, relação vento x dunas.

ABSTRACT

Coastal sand dunes form an important and unique system that can be mobile or fixed. Vegetation on sand dunes is known to be meagre and does not increase with increase in rainfall and temperature as it does with plants on other soils. The reasons for such are the big pore spaces of sand and the low percentage of soil moisture at field capacity that allow easy infiltration to the ground table, and the lack of cohesion of the sand that makes wind erosion the main limiting factor for vegetation. In this study the climatic factors of the hot arid Negev fixed sand dunes and the temperate humid Dutch coastal dunes that were activated artificially, are compared. Vegetation did not recover in the Netherlands more than four years after it was removed, while in the Negev Desert they recovered after such a spell. The main difference between the two dune fields lies in the amount of wind power, manifested by the drift potential (DP), which is responsible for the limiting factor of plants on sand. The physical – biological interaction is further developed by a hysteresis, which shows that a dune can become vegetated when the wind power is sufficiently low. Once vegetated, a much higher wind stress is needed to destroy the vegetation and re-activate the dunes. Vegetation can cover sand dunes that are under high wind power only if they were planted artificially as was the case in most of the European coastal dunes. These dunes are in a stable state once the vegetation is removed because of the high DP. The effect of climate change on sand dunes is reflected primarily by the change in wind power and not by a change in rainfall and temperature.

Key words: coastal sand dunes, coastal vegetation, aeolian sand mobility

*Traduzido do texto em inglês por Vanda Claudino Sales.

Introdução

Dunas localizadas em zonas costeiras sob todos os tipos de climas mundiais, das regiões boreais aos trópicos, aonde oferecem proteção contra o ataque das ondas do mar, são importantes habitats ecológicos com diversas espécies endêmicas de fauna e flora, e representam importantes sítios para recreação (Bauer e Sherman, 1999; Nordstrom, 2000). A maioria apresenta-se larga ou esparsamente vegetalizada enquanto outras são livres de vegetação e, portanto, ativas. Todas as dunas costeiras estabilizadas indicam terem tido mobilidade no passado, provavelmente sob regime climático diferente do atual.

As areias são facilmente transportadas pelo vento e isso transforma a mobilidade de areias em imagem de dessecação e desertificação (Helldén, 1988; Khalaf, 1989). Atividades humanas nas proximidades de dunas costeiras, onde a mobilidade de areias é considerada um risco, induz percepções negativas acerca da presença de campos de dunas (Hagedorn et al., 1977). Com resultado, por um longo período de tempo a visão conservadora dos administradores indicava a necessidade de estabilização de dunas e a interrupção de qualquer transporte de areias (Barrère, 1992; Brown, 1948; Tear, 1925). É sabido que muitos campos de dunas costeiras foram no mundo todo estabilizados artificialmente (Avis, 1989; Favennec, 1996; Harle, 1914; Kucinski and Eisenmenger, 1943; Lehotsky, 1941). Esse paradigma mudou recentemente, quando ecólogos e administradores reconheceram o valor das dunas costeiras enquanto paisagens dinâmicas, mostrando-se atentos aos importantes efeitos das alterações nas paisagens e comunidades nas paisagens (Nordstrom e Lotstein, 1989; van Bohemen, 1996; van Zoest, 1992).

A interação entre temperatura e precipitação é importante fator determinante da produção média anual de biomassa primária. Os sítios mais produtivos para pastagens e campos são aqueles onde a média anual de precipitação situa-se acima de 800 mm e a temperatura média anual mostra-se superior a 15°C. Os menos produtivos ocorrem onde a precipitação se apresenta abaixo de uma média anual de 300 mm e a temperatura média anual, inferior a 15°C (Lauenroth, 1979). Por essa razão, é esperado que as dunas em desertos quentes sejam desprovidas de vegetação e mostrem-se ativas, enquanto dunas presentes nas áreas costeiras da Europa Ocidental ou na costa noroeste da América do Norte apresentem-se vegetalizadas e estabilizadas. Portanto, é aceita a noção de que a atividade eólica no transporte de areia ocorra durante fases áridas, quando a diminuição de precipitação e o aumento da evapotranspiração provoca a perda da cobertura vegetal das dunas, que se tornarão ativas, enquanto a estabilização através da vegetação ocorre durante fases úmidas (De Deckker et al., 1991; Keen and Shane, 1990; Muhs et al., 1997; O'Connor and Thomas, 1999; Sarnthein, 1978; Stokes et al., 1997; Thomas et al., 1997).

Em conseqüência, espera-se que os vastos campos de dunas estabilizadas localizados nas Grandes Planícies da América do Norte venham a ser reativados sob futuras condições climáticas, as quais talvez sejam caracterizadas por uma redução de precipitação e aumento da temperatura (Muhs e Maat, 1993; Arbogast, 1996; Stokes e Swinehart, 1997; Wolfe, 1997). No entanto, existem muitas variações em relação a esse veredito. As incursões de areias nas áreas costeiras da Europa Ocidental não estão relacionadas com aridez, mas com erosão costeira causada por uma subida do nível do mar acompanhada por enchentes de tempestades (*storm floods*). Cada período de erosão costeira coincide com intensificação de elevada frequência do vento (Klijin, 1990). Em regiões semi-áridas e áridas, a atividade das dunas acha-se relacionada com suprimento de sedimentos que é relacionado com enchentes em larga escala (Tchakerian and Lancaster, 2002; Williams and Lee, 1995). No entanto, os episódios de formação de dunas necessitam de um aumento de aridez e de ação do vento (O'Connor e Thomas, 1999; Preusser et al., 2002).

Índice de mobilidade de dunas

Considerando os fatores de aridez e ação do vento, uma equação foi desenvolvida (Equação 1, índice *M*) por (Lancaster, 1988) para quantitativamente indexar a mobilidade e estabilidade das areias de

dunas. O índice M é largamente usado por geólogos e geomorfólogos para determinar quando as areias de dunas seriam ativas ou fixas assim como para verificar o efeito esperado de mudanças climáticas em campos de dunas (Bach, 1998; Bullard et al., 1997; Kocurek and Lancaster, 1999; McTainsh et al., 1990; Muhs and Holliday, 1995; Muhs and Maat, 1993; Stetler and Gaylord, 1996; Wolfe, 1997). A equação do índice M é baseada na razão de W (percentagem de tempo durante o ano com areias mobilizadas pela ação eólica, o que representa o fator de mobilidade das areias) para P/PET (quociente da média anual de precipitação em relação ao potencial anual de evapotranspiração, o que representa o fator de umidade do solo disponível para a vegetação).

$$M = \frac{W}{P/PET} \quad \omega$$

O índice M foi calibrado por (Lancaster, 1988), que definiu o valor crítico de M para a África Meridional como acima de 200 para a mobilidade completa de dunas sem cobertura vegetal e a baixo de 50 para dunas inativas vegetalizadas.

P/PET é usado para definir zona áridas pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (United Nations Environmental Programme - UNEP), onde $P/PET < 0.65$ define terras secas (Middleton e Thomas, 1997). Muhs e Holliday (1995) encontraram uma melhor relação entre o grau de atividade de dunas e o valor de P/PET para as areias das dunas das Grandes Planícies, considerando W de menor importância. Existem diversas exceções em relação às conclusões da Equação 1 e àquela de Muhs e Holliday (1995) onde dunas costeiras em áreas úmidas são móveis e livres de vegetação (e.g. Hunter et al., (1983) e Illenberger e Rust (1988) e regiões áridas onde as dunas são completamente estabilizadas por vegetação (Tsoar e Karnieli, 1996).

O objetivo desse artigo é expor as importantes propriedades físicas das dunas e o efeito que elas produzem na vegetação e estabilização das areias. Nossa perspectiva é entender o efeito dos elementos climáticos (precipitação, evaporação, ação eólica) na germinação e colonização da vegetação em ambientes arenosos eólicos e obter uma melhor explicação climática para mobilidade e estabilidade de dunas. Nosso trabalho é baseado em dois campos de dunas situados sob a ação de condições climáticas contrastantes. Um localiza-se na área quente e árida do noroeste do deserto de Negev em Israel e outra em clima úmido temperado na costa da Holanda.

Áreas de pesquisa

As dunas do noroeste de Negev estão localizadas em uma região árida que tem, em média anual, 170mm de precipitação ao norte e 84mm ao sul. O período de chuvas estende-se de outubro a maio e a média anual de desvio-padrão da precipitação para medidas efetuadas no setor meridional do campo de dunas em um período de 14 anos é de 42%. O índice de aridez (P/PET) é 0.08 na parte norte do campo de dunas e diminui para 0.04 no sul, o que, de acordo com a definição da UNEP (Middleton e Thomas, 1997), indica uma transição de zona climática árida para hiper-árida.

As dunas do noroeste de Negev em Israel e no norte do Sinai, no Egito, são unitárias, divididas artificialmente por uma fronteira política que também separa dois diferentes tipos de uso da terra (Figura 1A). A área é coberta por dunas lineares que originalmente eram vegetalizadas (Tsoar, 1989). Pastoreio e outros usos intensivos de plantas e arbustos no Sinai relativamente à quase ausência desses usos em Negev têm resultado em notável diferença espectral entre Negev e Sinai.

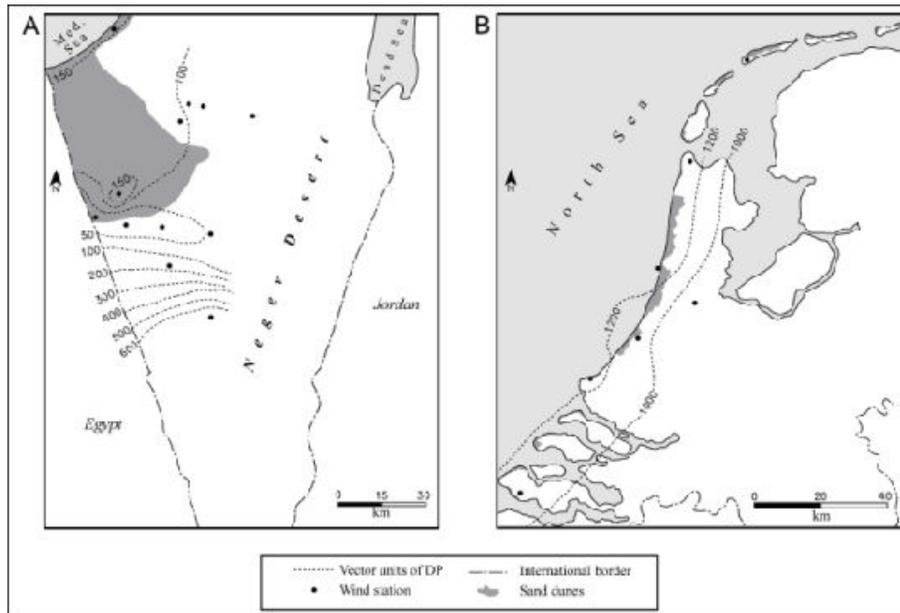


Figura 1. A- Mapa dos campos de dunas do oeste do Deserto de Negev. B- Mapa das dunas costeiras da Holanda. As linhas hachuradas indicam os valores médios anuais do potencial de deriva de areias (drift potential) (DP). Notar o decréscimo dos valores de DP da praia em direção ao interior. O aumento do DP em direção ao sul no Deserto de Negev Desert é resultante do aumento da altitude.

A vegetação perene que recobre as dunas em Negev colonizaram a área após o pastoreio ter sido finalizado em Negev em 1982 (Meir e Tsoar, 1996; Tsoar e Karnieli, 1996; Tsoar e Møller, 1986). A vegetação recobriu majoritariamente a área interdunar e as vertentes voltadas para norte, enquanto as voltadas para sul assim como as cristas têm uma cobertura vegetal esparsa (Figura 2). Plantas perenes recobrem 20%–50% dos setores interdunares e das vertentes e aproximadamente 10% das cristas (Kadmon, 1997). As áreas entre os arbustos nas vertentes e nos setores interdunares estão cobertas por uma crosta microfítica de algas (Danin et al., 1989) que estabiliza as areias. A taxa de transporte de areias reduz-se para em torno de 10% do transporte de areias desnudas uma vez que a área é recoberta por no mínimo 17% de arbustos. A crosta microfítica é formada nesse estágio, trazendo o total de cobertura vegetal (macrofítica e microfítica) para próximo de 100% com ausência de transporte de areias (Figura 2).



Figura 2. Fotografia de dunas lineares no oeste do Deserto de Negev onde a média anual de precipitação é 84mm. A cobertura perene de arbustos ocupa 17–20% da área. A superfície escura entre os arbustos é recoberta por algas microfíticas que formam uma crosta. Somente algumas parcelas das cristas não apresentam tais crostas. O substrato branco desprovido de vegetação é composto por silte e argila fluviais.

As dunas costeiras na Holanda recebem uma média anual de precipitação ao de 750 mm, a qual ocorre ao longo do ano com um desvio-padrão de 15%. A área é definida com úmida de acordo com a relação P/PET, a qual é de 1.26 (acima de 0.65, que representa o limite máximo para a definição de terras secas). Extensas parcelas das dunas na zona costeira holandesa consistem em dunas parabólicas que se desenvolveram durante episódios datados de 800 e 1850 DC. Existem diversos registros antigos de dunas de idade anterior ao século dezesseis e dezessete. (Klijn, 1990). Na atualidade, as dunas apresentam-se estabilizadas e existe uma pequena atividade eólica restrita à feições de escala reduzida, como blowouts (Arens et al., 2003). Diversos experimentos foram realizados depois de 1990 em vários sítios ao longo do setor central da zona costeira holandesa, onde as dunas se tornaram móveis em razão da remoção da vegetação (floresta de pinheiros) e do solo formado desde a fixação. O objetivo desses experimentos foi verificar a mobilidade das dunas sob as condições climáticas úmidas atuais na zona costeira da Holanda, na perspectiva de restaurar os valores ecológicos.

A remoção da cobertura vegetal e do solo poderia implicar em rejuvenescimento do sistema, por criar oportunidades para a vegetação pioneira (Arens et al., 2003). Os resultados obtidos nos experimentos de Kraansvlak, que iniciaram em dezembro de 1998, mostram que as dunas que foram desmatadas não se estabilizaram durante os últimos 4–5 anos (figura 3), a despeito das condições favoráveis existentes na Holanda entre 1998 e 2001, quando a precipitação aumentou cerca de 30% acima da média anual, e a ação eólica esteve abaixo da média. As dunas do deserto de Negev foram estabilizadas quatro anos depois de terem cessado os impactos humanos (Meir e Tsoar, 1996).



Figura 3. Fotografia da duna parabólica da área de Kraansvlak (Holanda) tirada em 6 de fevereiro de 2003, mais de 4 anos depois que o solo e a cobertura vegetal foram removidos.

O campo de dunas setentrional de Negev e da zona costeira da Holanda também diferem em relação ao índice M (Equação 1), o qual é de 265 para o segmento sul dos campos de dunas de Negev, sendo definido de acordo com (Lancaster, 1988) como um clima que naturalmente produz completa e intensa mobilidade de dunas. O índice M para IJmuiden, Holanda, é 42, o qual define clima que produz completa estabilização de dunas.

A vegetação na duna é escassa, sobretudo em função da baixa porcentagem de umidade. Chuvas freqüentes com valores em torno de 10 mm colocam a umidade próxima da capacidade de campo, que é de 3 - 6% para areias (Noy-Meir, 1973), dessa maneira fornecendo às plantas de ciclo anual máxima disponibilidade de umidade. Por essa razão, seria melhor verificar a distribuição mensal da precipitação, em oposição à média de precipitação anual. A média aritmética (\bar{m}) do desvio-padrão da precipitação mensal (P_i) em relação à média mensal \bar{P} :

$$\mu = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} |P_i - \bar{P}| \quad (2)$$

O desvio-padrão da média mensal (Vr)

$$Vr = 100 \frac{\mu}{\bar{P}} \quad (3)$$

O desvio-padrão da média mensal de precipitação para as dunas de Negev é 128% e para IJmuiden e Den Helder na Holanda, de respectivamente 18% e 24%. O elevado desvio-padrão em Negev é devido ao longo período seco existente entre abril e outubro, enquanto que na costa holandesa a precipitação é constante ao longo de todo o ano.

As propriedades discretas das areias enquanto solo e seus efeitos na cobertura vegetal

As areias dunares são conhecidas como solos inertes desprovidos de qualquer característica de flora. Tal fato é devido ao relativo grande espaço entre poros. As areias têm baixa capacidade de retenção de água (diferença entre capacidade de campo e ponto de murcha), assim como elevada taxa de permeabilidade e lixiviação, resultando em lavagem e transporte de elementos nutrientes necessário para o crescimento das plantas (Tsoar, 1990). A ausência de coesão das areias de dunas resulta em fácil erodibilidade das areias. Os solos arenosos têm assim o mais baixo limiar para erosão eólica de todos os solos conhecidos (Pye e Tsoar, 1990).

Apesar dessa situação, as dunas do noroeste do deserto de Neveg (Figura 2) são conhecidas por relativamente apresentarem rica cobertura de flora (Tsoar e Møller, 1986). A rica cobertura de arbustos perenes é o resultado do *efeito de textura inversa* que foi descrito por Noy-Meir (1973) e reforçado por Le Houérou (1984), Sala et al. (1988) e Tsoar (1996). As implicações do *efeito de textura inversa* refletem-se através da elevada produtividade dos solos arenosos em desertos em relação àquela dos solos de textura fina, a despeito das desvantagens acima mencionadas dos solos arenosos. Em áreas úmidas as areias têm a menor produtividade primária líquida.

Os grandes poros dos grãos de areia resultando em baixa porcentagem de água disponível para as plantas são também a razão da elevada produtividade primária das areias dos desertos. A característica de profunda percolação das areias é maior nos desertos, onde a umidade do solo é protegida do efeito da evaporação durante os longos períodos secos e quentes. Na crista e nos segmentos superiores das vertentes de dunas lineares (Figura 2), a água percola para profundidade de 60-90 cm durante anos com taxa de precipitação média e para 180 cm e até mais durante anos com precipitação acima da média e com elevada intensidade. A percolação em um solo situado nas proximidades do campo de dunas em tela, composto por silte e argila (o terreno branco desvegetalizado situado na área interdunar presente na figura 2), foi limitada a 30-40 cm (Yair et al., 1997). A umidade do solo em profundidades abaixo de 60 cm fica protegida da evaporação durante os longos períodos quentes e secos (Sala et al., 1988). Em áreas úmidas caracterizadas por elevada precipitação, a principal característica das perdas de umidade do solo nas areias dunares é associada com a elevada taxa de infiltração para além do nível das raízes, onde a água fica indisponível para as plantas.

O ponto de inflexão entre a vantagem de areias de textura grosseira (baixa evaporação) quando comparada com solos de textura fina versus sua inerente desvantagem (baixa disponibilidade de água para as plantas e baixo conteúdo de nutrientes) situa-se em algum ponto entre climas semi-árido e sub-úmido (Noy-Meir, 1973). Precipitação de 370 mm demarca esse ponto de inflexão na área central de campos (*grassland*) dos Estados Unidos (Sala et al., 1988). Essa vantagem da textura grosseira tem a

Fatores afetando o crescimento da vegetação em dunas

A ausência de cobertura vegetal em dunas pode ser explicada pela combinação de três fatores ou por um dos seguintes fatores:

1. Baixíssima média de precipitação. A precipitação anual na parte meridional de Negev durante os últimos 14 anos, onde dunas foram estabilizadas por vegetação e crosta microfítica, foi de 84 mm. O máximo de precipitação anual durante esse período foi de 166,6 mm e o mínimo de 29,4mm com um desvio-padrão de 42,6. Baseado em observações feitas no Deserto do Sinai, é assumido que o limite de precipitação para essa área (a parte nordeste do Deserto do Saara) seja em torno de 50 mm

2. Ventos muito fortes e freqüentes, que erodem a areia e impedem a germinação da vegetação, ou que soterram a vegetação. A areia é muito sensível à erosão eólica em função da sua ausência de coesão. A erosão eólica é considerada como principal fator limitante para o crescimento de vegetação em (Bowers, 1982; Tsoar, 1990; Tsoar e Illenberger, 1998). Esse fato é comprovado em dunas parabólicas, onde a vegetação está habilitada a germinar e colonizar os setores onde ocorre pouca ou nenhuma deflação. (Tsoar and Blumberg, 2002). *Ammophila arenaria*, que é a mais robusta planta psamófila, pode resistir ao transporte e a intenso soterramento das areias, ainda que não à erosão e exposição das raízes (Arun et al., 1999; Huiskes, 1979; Wiedemann and Pickart, 1996).

3. Intensa interferência humana. As sociedades pastoris nômades no Sinai, assim como na zona costeira holandesa produziram, nos séculos 12 a 17, grande destruição da vegetação das dunas através do pastoreio, pisoteio e desmatamento (Tsoar e Karnieli, 1996; Tsoar e Møller, 1986; Klijn, 1990). A destruição das dunas em sociedades mais desenvolvidas é sobretudo realizada por pisoteio e tráfego de veículos .

Os resultados mostram que arbustos e crostas microfíticas naturalmente recobriram as dunas lineares do deserto de Negev 4 a 5 anos após ter cessado a pressão humana. O recobrimento da vegetação em Kraansvlak é muito lento em relação ao recobrimento observado nas dunas do deserto de Negev, apesar das condições favoráveis de precipitação acima da média e de ação do vento abaixo da média na Holanda entre 1999 e 2002 (Arens et al., 2003). A vegetação reapareceu esparsamente depois de 2-3 anos nas áreas interdunares e nas cristas. Muitas sementes foram disseminadas no outono de 2002, mas foram completamente soterradas durante o inverno de 2002/03. O índice-*M* (Equação 1) largamente utilizado não é efetivo para as dunas de Negev tanto quanto não o é para as dunas da zona costeira da Holanda.

A singularidade das dunas pode explicar porque a precipitação ou a intensidade da chuva (P/PET) não é fator decisivo na estabilização e mobilização das dunas como é normalmente aceito (Muhs e Holliday, 1995). A permeabilidade nas dunas é 2,500 vezes maior que aquela do loess (Davis e DeWiest, 1966). Assim, a maior parte da chuva em áreas úmidas infiltra para o lençol freático e a umidade disponível ficará no nível de ou próxima de baixa capacidade de campo.

As plantas perenes nas dunas de Negev obtêm a umidade que necessitam no nível úmido situado a profundidades de 60 a 180 cm, que varia de ano para ano de acordo com a variação de precipitação. Mesmo em um ano com precipitação tão reduzida quanto 85,5 mm, existia umidade suficiente no início do verão à profundidades de 60 cm (Yair et al., 1997). A crosta microfítica é resistente à tensão da água durante o verão quente e seco quando ela está no estado latente (Danin et al., 1989). Plantas de ciclos anuais dependem de umidade nos 10 cm superiores, o que é necessário para a germinação. Esse contínuo umedecimento superficial das areias ocorre na maioria das vezes durante anos com precipitação acima da

média, com grande parcela da precipitação ocorrendo durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, que são os meses mais frios do ano (Tsoar e Karnieli, 1996).

O índice M (Equação 1) refere-se à média de precipitação, média de evaporação potencial e porcentagem de dias durante o ano com ventos transportando areias (W). De acordo com o mencionado acima, os dois primeiros fatores não são significativos em dunas em razão da textura das areias. O vento é o único fator limite para a existência de vegetação em dunas, onde não existe pressão humana. No entanto, o índice M não se refere nem à magnitude nem ao direcionamento do vento.

A taxa de erosão do vento é relacionada com o cubo do vento (Bagnold, 1941, p. 70).

$$q = 5.2 \times 10^{-4} (U - U_l)^3 \quad (4)$$

onde q is a taxa de erosão de areia, U é a velocidade do vento medida à uma altura de 1 metro e U_l o limiar da velocidade do vento ($= 4 \text{ m s}^{-1}$). Quando o vento aumenta acima do limiar, ocorre um enorme aumento do transporte de areias. Por exemplo, um vento forte com deslocamento de 16 m s^{-1} moverá mais areias em 1 hora do que a quantidade que seria transportada em 72 dias por um vento com deslocamento constante de 5 m s^{-1} .

Um melhor índice de erosão do vento é o potencial de deriva de areias (drift potential) (DP) do vento (Fryberger, 1979), o qual se refere à equação de erosão de areia:

$$DP = \sum q = \frac{U^3 (U - U_l)}{100} t \quad (5)$$

onde U é a velocidade do vento (em nós), medida em uma altura de 10 m, U_l é o limiar da velocidade do vento ($= 12$ nós) e t é igual a W na Equação 1, i.e., o tempo que o vento se deslocou acima do limiar de velocidade (em percentual).

DP é um parâmetro da quantidade máxima potencial de areia que poderia ser erodida pelo vento durante um ano. DP, sendo diretamente proporcional à taxa de transporte de areia e ao tempo de transporte decorrido, é a medida da energia potencial do vento. O índice de variabilidade direcional do vento é a razão entre o potencial de deriva resultante (resultant drift potential) (RDP) e o potencial de deriva de areia (RDP/DP). DP é relacionado com W e na maior parte das vezes W aumenta com DP. Dados de DP (medidos de acordo com a Equação 5) versus W (Equação 1) de 40 estações eólicas no mundo todo mostram que existe uma significativa relação entre esses dois parâmetros, e que as duas variáveis são precisamente relacionadas quando apresentam valores baixos ($W < 25$; $DP < 400$).

A energia do vento nas dunas de Negev e na costa da Holanda diferem enormemente. O potencial de deriva de areias (DP) de Nizzana na parte meridional do segmento NW nos campos de dunas de Negev é 56 unidades de vetor e aumenta para 150 ao norte, próximo da praia, enquanto em Ijmuiden é 1224 (Figura 1). De acordo com Fryberger (1979), os valores de DP de Negev demarcam ambientes com baixa energia eólica enquanto aqueles da zona costeira da Holanda indicam ambientes com elevada energia eólica. Nas duas áreas o DP aumenta com a proximidade da linha de costa, enquanto em Negev o DP também aumenta com um aumento da elevação de 200 metros na área de dunas para 800 metros, ao sul (Figura 1A).

Análises da relação DP versus RDP/DP para dunas vegetalizadas e não vegetalizadas em 40 dunas situadas em diversas partes do mundo podem atestar o efeito da energia do vento na cobertura vegetal de areias dunares (Figura 4).

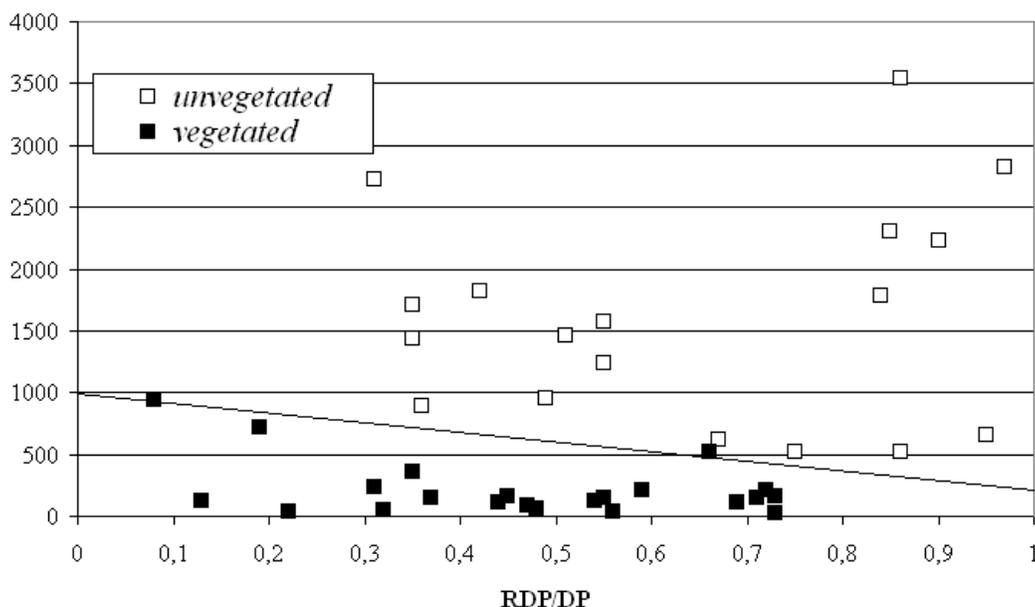


Figura 4. DP versus RDP/DP para 40 dunas vegetalizadas e não vegetalizadas em áreas onde a precipitação média anual é ≥ 80 mm.

A linha que diferencia as dunas vegetalizadas das não vegetalizadas indica que quando RDP/DP é baixo (ventos multidirecionais), a energia do vento é distribuída em mais de uma vertente da duna e a energia exercida em cada vertente é mais baixa do que o mesmo DP com elevado RDP/DP. A equação 6 é a expressão matemática dessa linha:

$$M = \frac{DP}{1000 - \left(750 \frac{RDP}{DP}\right)} \quad (6)$$

Concluimos que dunas presentes em áreas com média anual de precipitação = 80mm são vegetalizadas e móveis sob condições de vento nas quais M (de acordo com a Equação (6)) excede 1 e são cobertas por vegetação quando $M < 1$. Dunas que estão sob $M < 1$ e apresentam-se sem cobertura vegetal estão provavelmente sob pressão humana. Essas dunas serão naturalmente recolonizadas pela vegetação uma vez que a pressão humana cesse. Tal processo ocorreu nas dunas de Negev quando pastoreio, pisoteio, etc., pararam em 1982. Dunas vegetalizadas que estão sob $M > 1$ são dunas que e/ou foram estabilizadas artificialmente como parte de atividades de gerenciamento de campo de dunas e/ou foram cobertas por vegetação no passado quando o clima era diferente do atual e M menor que 1. A maior parte das dunas costeiras da Europa foi estabilizada artificialmente no passado. Essa é uma condição espúria que pode ser corrigida através da remoção da vegetação.

Considerações finais

A relação entre a energia do vento e a cobertura vegetal pode ser recapitulada através de uma curva histerese (Figura 5). Quando o clima muda na forma de diminuição da energia do vento, a vegetação começará a recobrir a duna através do aumento de números à medida que a energia do vento decresce para valores abaixo de 1000 DP. Quando DP está abaixo de 200, esse processo é consumado, na medida em que a cobertura vegetal atinge o máximo que a duna pode suportar. No entanto, quando esse processo é revertido, um aumento do poder do vento em dunas vegetalizadas não produzirá extinção

completa da vegetação quando DP aumenta para valores acima de 1000. Micrófitas, plantas anuais, vegetação rasteira, arbustos e árvores formarão um obstáculo tampão entre o vento e a areia (Wolfe e Nickling, 1993).

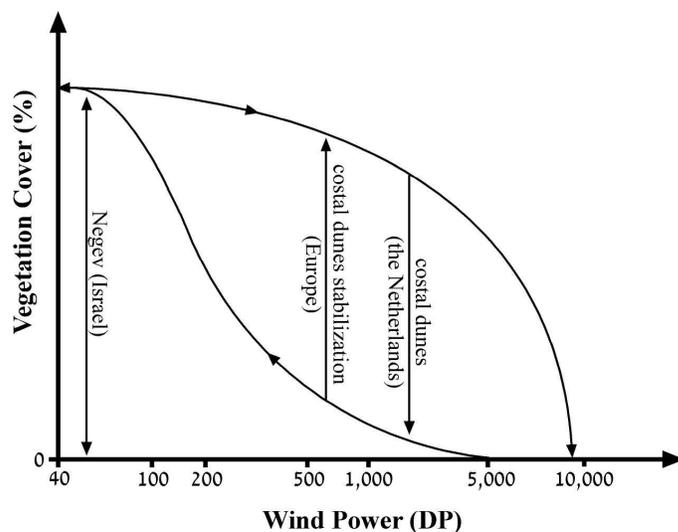


Figura 5. Cursa de histerese relacionada com mudanças na energia do vento e cobertura vegetal. Explicações no texto.

Existe um limiar para a destruição da vegetação pelos ventos de tempestade, mas o valor da energia do vento nesses casos não é tão claro. A escala eólica de Beaufort indica que árvores de grande porte são desenraizadas quando submetidas à uma força Beaufort 10. A média de magnitude do vento para a força de Beaufort é 51 nós (26 m s^{-1}). Um modelo de simulação no qual adicionamos ventos com 51 nós em 5% do tempo (438 horas durante o ano) para os dados de ventos de Ijmuiden aumentou o DP para 6,300. Devemos assumir que se a turbulência aumentasse com taxa igual ou maior, árvores e arbustos não suportariam essa energia do vento e seriam destruídas (Figura 5). A maior energia do vento na Terra está na Antártica (Pye e Tsoar, 1990). Calculamos os valores de $DP = 4018$ e $W = 74.4\%$ para a Estação Byrd (Lat. 80.01S ; Lon. 119.32W), e $DP = 10,246$ e $W = 47.1\%$ para Esperanza (Lat. 63.24S ; Lon. 56.59).

As linhas de histerese são as conexões entre os pontos de estabilidade. Dunas com qualquer quantidade de vegetação estão estáveis no estado delas quando situadas nessas linhas. Qualquer mudança natural na energia do vento ou artificial na cobertura vegetal trará a duna para uma nova posição na linha histerese. A figura 5 mostra as mudanças que ocorreram nas dunas da Europa Ocidental durante os últimos 200 anos quando dunas móveis naturais foram artificialmente estabilizadas e ocuparam uma posição estável na parte superior do lado inverso da curva histerese com máxima cobertura vegetal. A remoção artificial da vegetação nas dunas parabólicas de Zuid-Kennemerland (Kennemerduinen), Holanda (Arens et al., 2003), colocou as dunas da zona costeira holandesa em um baixo ponto estável de mobilidade. Uma duna que não está localizada na linha histerese pode ficar estável somente se a pressão humana perdurar. As dunas de Negev só podem ficar estáveis na parte superior da curva histerese onde crostas

microfíticas se desenvolvem entre os arbustos perenes em razão de muito baixo DP (Figura 5). As dunas de Negev e parte das dunas do Sinai serão desvegetalizadas enquanto prevalecer o impacto de atividades humanas.

Conclusões

1. O fator limitante para a presença de vegetação em dunas é a erosão produzida por elevada energia do vento.
2. A vegetação pode colonizar dunas em regiões áridas com pelo menos 80 mm de precipitação média anual..
3. A precipitação (valor total e anual) não é um fator limitante. Em outras palavras, ecossistemas arenosos em desertos não são controlados pela água (precipitação), mas pela energia do vento.
4. Dunas ativas (transgressivas) talvez se transformem em dunas fixas (ou de retenção) como resultado de mudanças climáticas nas quais a energia do vento seja reduzida a valores que permitam crescer a vegetação.
5. Mudança na energia do vento produzirá uma mudança na cobertura vegetal ao longo de uma linha histerese de estabilidade. Dunas estabilizadas podem permanecer no estado de estabilidade mesmo se a energia do vento aumentar para valores que normalmente impedem as plantas de germinarem areias móveis (DP>1000).
6. Dunas fixas permanecerão estáveis a menos que algum distúrbio as mobilize ou que a energia do vento aumente para valores mais elevados que os atualmente conhecidos na Europa Ocidental ou América do Norte. Simulações demonstram que energia do vento de DP>6,000 pode causar destruição natural da vegetação em dunas costeiras. Tal elevado DP existe na Antártica.
7. Dunas desprovidas de vegetação permanecerão móveis até que elas sejam estabilizadas artificialmente ou que o clima mude para poder de vento com várias centenas de DP ou menos.

Agradecimentos

Agradecemos ao Centro Minerva de Pesquisa em Ecossistemas Áridos (*Minerva Arid Ecosystems Research Centre*) da Universidade Hebraica de Jerusalém por fornecer os dados climáticos relativos às dunas de Negev, bem como ao Instituto Meteorológico Real Holandês (Royal Netherlands Meteorological Institute - KNMI) pelo fornecimento dos dados de vento das áreas costeiras da Holanda. Agradecemos a Vanda Claudino Sales pela tradução do texto para o português e a MERCATOR pela oportunidade da publicação.

Referência Bibliográfica

- ARENS, S. M.; SLINGS, Q.; VRIES, C. N. D. Mobility of a remobilised parabolic dune in Kennemerland, the Netherlands: **Geomorphology**, p. in press, 2003.
- ARUN, A. B.; BEENA, K. R., RAVIRAJA, N. S.; SRIDHAR, K. R. Coastal sand dunes - A neglected ecosystem. **Current Science**, v. 77, p. 19-21, 1999.
- AVIS, A. M. A review of coastal dune stabilization in the Cape Province of South Africa. **Landscape and Urban Planning**, v. 18, p. 55-68, 1989.
- BACH, A. J. Assessing conditions leading to severe wind erosion in the Antelope Valley, California, 1990-1991. **Professional Geographer**, v. 50, p. 87-97, 1998.
- BAGNOLD, R. A. **The physics of blown sand and desert dunes**. London: Methuen, 1941, 265 p.
- BARRÈRE, P. Dynamics and management of the coastal dunes of the Landes, Gascony, France. In: CARTER, R. W. G.; CURTIS, T. G. F.; SHEEHY-SKEFFINGTON, M. J. (eds.). **Coastal dunes**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1992, p. 25-32.
- BAUER, B. O.; SHERMAN, D. J. Coastal dune dynamics: problems and prospects. In: GOUDIE, A. S.; LIVINGSTONE, I.; STOKES, S. (eds.) **Aeolian environments, sediments and landforms**. Chichester: John Wiley & Sons, 1999, p. 71-104.
- BOWERS, J. E. The plant ecology of inland dunes in western North America. **Journal of Arid Environments**, v. 5, p. 199-220, 1982.
- BROWN, R. L. Permanent coastal dune stabilization with grasses and legumes. **Journal of Soil and water Conservation**, v. 3, p. 69-74, 1948.
- BULLARD, J. E.; THOMAS, D. S. G., LIVINGSTONE, I.; WIGGS, G. F. S. Dunefield Activity and Interactions with Climatic Variability in the Southwest Kalahari Desert. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 22, p. 165-174, 1997.
- DANIN, A.; BAR-OR, Y.; DOR, I.; YISRAELI, T. The role of cyanobacteria in stabilization of sand dunes in southern Israel. **Ecologica Mediterranea**, v. 15, p. 55-64, 1989.
- DAVIS, S. N.; DEWIEST, R. J. M. **Hydrogeology**. New York: John Wiley & Sons, 1966.
- DE DECKKER, P.; CORRÈGE, T.; HEAD, J. Late Pleistocene record of cyclic eolian activity from tropical Australia suggesting the younger dryas is not an unusual climatic event. **Geology**, v. 19, p. 602-605, 1991
- FAVENNEC, J. Coastal management by the French National Forestry Service in Aquitaine, France. In: JONES, P. S.; HEALY, M. G.; WILLIAMS, A. T. (eds.). **Studies in European Coastal Management**. Cardigan: Samara Publishing Limited, 1996, p. 191-196.
- FRYBERGER, S. G., Dune forms and wind regime. In: MCKEE, E. D. (ed.) **A study of global sand seas**, 1052. Washington: U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1052, 1979, p. 137-169.
- HAGEDORN, H.; GIEBNER, K.; WEISE, O.; BUSCHE, D.; GRUNERT, G. **Dune stabilization**. Eschborn: German Agency for Technical Cooperation, 1977.
- HARLE, M. E. La fixation des dunes de Gascogne. **Bulletin de la Section de Géographie**, v. 29, p. 181-224, 1914.
- HELLDÉN, U. Desertification monitoring: Is the desert encroaching?: Desertification Control. **Bulletin**, v. 17, p. 8-12, 1988.
- HUISKES, A. H. L. Biological flora of the British Isles. **Journal of Ecology**, v. 67, p. 363-382, 1979.
- HUNTER, R. E.; RICHMOND, B. M.; ALPHA, T. R. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon coast. **Geological Society of America Bulletin**, v. 94, p. 1450-1465, 1983.
- HYLGAARD, T.; LIDDLE, M. J. The effect of human trampling on a sand dune ecosystems dominated by *Empetrum nigrum*. **Journal of Applied Ecology**, v. 18, p. 559-569, 1981.
- ILLENBERGER, W. K.; RUST, I. C. A sand budget for the Alexandria coastal dunefield, South Africa: **Sedimentology**, v. 35, p. 513-521, 1988.
- Kadmon, R. Neighbour Competition Modifies Demographic Responses of Desert Dune Annuals to Gradients in Sand Stability. **Journal of Arid Environments**, v. 36, p. 557-564, 1997.
- KEEN, K. L.; SHANE, L. C. K. A continuous record of Holocene eolian activity and vegetation change at Lake Ann, east-central Minnesota. **Geological Society of America Bulletin**, v. 102, p. 1646-1657, 1990.
- KHALAF, F. I. Desertification and Aeolian Processes in the Kuwait Desert. **Journal of Arid Environments**, v. 16, p. 125-145, 1989.

- KLIJN, J. A. The younger dunes in the Netherlands; chronology and causation. **Catena (Suppl.)**, v. 18, p. 89-100, 1990.
- KOCUREK, G.; LANCASTER, N. Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example. **Sedimentology**, v. 46, p. 505-515, 1999.
- KUCINSKI, K. J.; EISENMENGER, W. S. Sand dune stabilization on Cape Cod. **Economic Geography**, v. 19, p. 206-214, 1943.
- LANCASTER, N. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, Southern Africa. **Journal of Arid Environments**, v. 14, p. 233-244, 1988.
- LAUENROTH, W. K. Grassland primary production: North American grasslands in perspective. In: FRENCH, N. (ed.) **Perspective in Grassland Ecology**, 32. Ecological Studies. New York, Springer-Verlag, 1979, p. 3-24.
- LE HOUÉROU, H. N. Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. **Journal of Arid Environments**, v. 7, p. 213-247, 1984.
- LE HOUÉROU, H. N. The desert and arid zones of Northern Africa. In: EVENARI, B. M.; NOY-MEIR, I.; GOODALL, D. W. (eds.) **Hot deserts and arid shrublands**. Amsterdam: Elsevier, 1986, p. 101-147.
- LEHOTSKY, K. Sand dune fixation in Michigan. **Journal of Forestry**, v. 39, p. 998-1004, 1941.
- LUCKENBACK, R. A.; BURY, R. B. Effects of off-road vehicles on the biota of the Algodones dunes, Imperial County, California. **Journal of Applied Ecology**, v. 20, p. 265-286, 1983.
- MC TAINSH, G. H.; LYNCH, A. W.; BURGESS, R. C. **Wind erosion in eastern Australia**, v. 28, p. 323-339, 1990.
- MEIR, A.; TSOAR, H. International borders and range ecology: The case of Bedouin trans border grazing. **Human Ecology**, v. 24, p. 39-64, 1996.
- MIDDLETON, N.; THOMAS, D. S. G. **World Atlas of Desertification**. London: UNEP/Edward Arnold, 1997.
- MUHS, D. R.; HOLLIDAY, V. T. Evidence of Active Dune Sand on the Great-Plains in the 19th-Century from Accounts of Early Explorers. **Quaternary Research**, v. 43, p. 198-208, 1995.
- MUHS, D. R.; MAAT, P. B. The Potential Response of Eolian Sands to Greenhouse Warming and Precipitation Reduction on the Great-Plains of the USA. **Journal of Arid Environments**, v. 25, p. 351-361, 1993.
- MUHS, D. R.; STAFFORD, T. W.; BEEN, J.; MAHAN, S. A.; BURDETT, J.; SKIPP, G.; ROWLAND, Z. M. Holocene eolian activity in the Minot dune field, North Dakota. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 34, p. 1442-1459, 1997.
- NORDSTROM, K. F. **Beaches and dunes of developed coasts**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 338 p.
- NORDSTROM, K. F.; LOTSTEIN, E. L. Perspective on resource use of dynamic coastal dunes. **Geographical Review**, v. 79, p. 1-12, 1989.
- NOY-MEIR, I. Desert ecosystems: Environment and producers. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, p. 25-51, 1973.
- O'Connor, P. W.; THOMAS, D. S. G. The timing and environmental significance of late quaternary linear dune development in western Zambia. **Quaternary Research**, v. 52, p. 44-55, 1999.
- PREUSSER, F.; RADIES, D.; MATTER, A. A 160,000-year record of dune development and atmospheric circulation in southern Arabia. **Science**, v. 296, p. 2018-2020, 2002.
- PYE, K.; TSOAR, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. London: Unwin Hyman, 1990, 396 p.
- SALA, O. E.; PARTON, W. J.; JOYCE, L. A.; LAURENROTH, W. K. Primary production of the central grassland region of the United States. **Ecology**, v. 69, p. 40-45, 1988.
- SARNTHEIN, M. Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum. **Nature**, v. 272, p. 43-46, 1978.
- STETLER, L. D.; GAYLORD, D. R. Evaluating eolian-climatic influences using a regional climate model from Hanford, Washington (USA). **Geomorphology**, v. 17, p. 99-113, 1996.
- STOKES, S.; SWINEHART, J. B. Middle- and late-Holocene dune reactivation the Nebraska Sand Hills, USA. **Holocene**, v. 7, p. 263-272, 1997.
- STOKES, S.; THOMAS, D. S. G.; WASHINGTON, R. Multiple Episodes of Aridity in Southern Africa Since the Last Interglacial Period. **Nature**, v. 388, p. 154-158, 1997.
- TCHAKERIAN, V. P.; LANCASTER, N. Late Quaternary arid/humid cycles in the Mojave Desert and western Great Basin of North America. **Quaternary Science Reviews**, v. 21, p. 799-810, 2002.
- TEAR, F. J. Sand dune reclamation in Palestine. **Empire Forestry Journal**, v. 4, p. 24-38, 1925.

- Thomas, D. S. G.; Stokes, S.; Shaw, P. A. Holocene aeolian activity in the southwestern Kalahari Desert, southern Africa: significance and relationships to late Pleistocene dune building events. **The Holocene**, v. 7, p. 273-281, 1997.
- TSOAR, H. Linear dunes - forms and formation. **Progress in Physical Geography**, v. 13, p. 507-528, 1989.
- _____. the ecological background, deterioration and reclamation of desert dune sand. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 33, p. 147-170, 1990.
- _____. The effect of soil texture on the biomass in an arid region. , *In*: GRADUS, Y.; LIPSHITZ, G. (eds.). The Mosaic of Israeli Geography. Beer Sheva: Ben-Gurion University of the Negev Press, 1996, p. 385-391.
- TSOAR, H.; BLUMBERG, D. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean coast. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p. 1147-1161, 2002.
- TSOAR, H.; ILLENBERGER, W. Reevaluation of sand dunes' mobility indices. **Journal of Arid Land Studies**, v. 7S, p. 265-268, 1998.
- TSOAR, H.; KARNIELI, A. What determines the spectral reflectance of the Negev-Sinai sand dunes. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 513-525, 1996.
- TSOAR, H.; MOLLER, J. T. The role of vegetation in the formation of linear sand dunes. , *In*: NICKLING, W. G. (ed.) **Aeolian Geomorphology**. Boston: Allen and Unwin, 1986, p. 75-95.
- VAN BOHEMEN, H. D. Environmentally friendly coasts: dune breaches and tidal inlets in the foredunes. Environmental engineering and coastal management. A case study from The Netherlands. **Landscape and Urban Planning**, v. 34, p. 197-213, 1996.
- VAN ZOEST, J. Gambling with nature? A new paradigm of nature and its consequences for nature management strategy. *In*: CARTER, R. W.; CURTIS, T. G. F.; SHEEHY-SKEFFINGTON, M. J. (eds.) **Coastal Dunes**. Rotterdam: Balkema, 1992, p. 503-515.
- WIEDEMANN, A. M.; PICKART, A. The *Ammophila* problem on the Northwest Coast of North America. **Landscape and Urban Planning**, v. 34, p. 287-299, 1996.
- WILLIAMS, S. H.; LEE, J. A. Aeolian Saltation Transport Rate: An Example of the Effect of Sediment Supply. **Journal of Arid Environments**, v. 30, p. 153-160, 1995.
- WOLFE, S. A. Impact of increased aridity on sand dune activity in the Canadian Prairies. **Journal of Arid Environments**, v. 36, p. 421-432, 1997.
- WOLFE, S. A.; NICKLING, W. G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. **Progress in Physical Geography**, v. 17, p. 50-68, 1993.
- YAIR, A.; LAVEE, H.; GREITSER, N. Spatial and temporal variability of water percolation and movement in a system of longitudinal dunes, western Negev, Israel. **Hydrological Processes**, v. 11, p. 43-58, 1997.