
INTERAÇÃO ENTRE DERIVA LITORÂNEA E POTENCIAL DE FORMAÇÃO DE DUNAS NA MORFOGÊNESE COSTEIRA DO NW DO CEARÁ

Dr. Alexandre Medeiros de Carvalho
Universidade Federal do Ceará
medeiros@ufc.br

Prof. Dr. José Maria Landim Dominguez
Universidade Federal da Bahia

Luís Parente Maia
Laboratório de Ciências do Mar/UFC
parente@ufc.br

RESUMO

No trecho litorâneo entre Cumbuco e Matões, costa NW do Estado do Ceará, tem se desenvolvido um ambiente deposicional, cujas características denotam um estado de estabilidade dinâmica. Seu desenvolvimento deu-se sob o controle lito-estrutural de um arcabouço geológico que remonta ao Pré-Cambriano, o qual tem sido submetido a um processo morfogenético, dominado pela ação do vento e das ondas. Os cálculos da intensidade e sentido da deriva litorânea demonstraram sua maior efetividade no sentido de SE-NW, com intensidade variando em diferentes trechos da linha de costa. Da mesma forma, o potencial de formação de dunas, que tem seu comportamento regido pela relação entre o ângulo α , medido entre o sentido do vetor do transporte eólico e a orientação do segmento de linha de costa, também varia segundo as diferentes orientações da linha de costa. A análise desses processos, através de aspectos de campo, respostas obtidas em estudos de sensoriamento remoto e cálculos empíricos, demonstrou a existência de estreita relação entre estas atividades e a geometria da linha de costa. Tal abordagem propiciou a elaboração de um modelo conceitual que trata do comportamento da geometria costeira em forma de espiral, considerando principalmente o potencial de formação de dunas e a deriva litorânea de sedimentos.

Palavras chave: deriva litorânea; potencial de formação de dunas; cálculos empíricos.

ABSTRACT

The littoral sector between Cumbuco and Matões, NW coast of Ceará state, has evolved as a coastal depositional environment whose characteristics indicate a dynamic stability. This environment has experienced a strong litho-structural control exerted by the Precambrian basement in which winds and waves exert a fundamental role. Modelling of the intensity and sense of the longshore transport has shown that the dominant longshore drift is SE-SW, and that drift intensity change with the distinct parts of coastal line. Likely, the potential dune development, which have their behavior controlled by the existent relationship between a angle measured by the sense of coastal line segment and the aeolian transport vector, change with that distinct positions of coastal line segments. The correlation between the action of this process, based on field results and informations from the remote sensing work and empiric calculations, demonstrated an interrelation between this factors and coastal geometry. This approach resulted on development of a conceptual model, which treat about behavior of spiral coastal geometry, mostly considering the potential dune fomation and sediment coastal drift.

Key words: coastal drift; potential dune fomation; empiric calculations.

Introdução

O estado morfodinâmico da costa resulta da interação entre os diversos processos e agentes da dinâmica costeira sob a influência das condições climáticas e do condicionamento físico exercido pelas características lito-estruturais do substrato geológico. Notadamente, os padrões de comportamento dos ventos, das ondas, das condições meteorológicas e das variações no nível relativo do mar constituem os principais fatores responsáveis pelo modelamento atual da paisagem costeira.

As variações no estado morfodinâmico deste ambiente são refletidas no contexto do balanço de sedimentos, resultando em processos de recuo e/ou progradação da linha de costa.

A morfologia da região pode ser enquadrada, com algumas modificações, no modelo de “headland-bay beach” de Yasso (1965), que define este modelado como sendo uma faixa de praia posicionada a sotamar de um promontório, submetida a uma direção predominante de ataque de onda. Apresenta como característica principal o desenvolvimento de uma forma plana côncava voltada para o mar, resultante dos processos de erosão causados pela refração, difração e reflexão de ondas dentro da zona de sombra a sotamar do promontório.

Hsu et al. (1993) reformularam a definição acima acrescentando que, no modelado em espiral, a geometria curvilínea, imediatamente a sotamar do promontório, diminui gradualmente em curvatura à medida que se aproxima do promontório seguinte. Este intervalo, limitado por dois promontórios, define então os limites do modelado em espiral.

Desta forma, a manutenção do equilíbrio da dinâmica costeira em áreas de modelado deste tipo, o qual caracteriza o litoral cearense, implica, entre outros, em limites estreitos entre os processos de erosão e sedimentação.

Áreas com este tipo de geometria na costa cearense, apesar de apresentarem uma configuração persistente ao longo do tempo geológico, exibem variações em escala de detalhe, as quais resultam principalmente da relação entre a intensidade e o ângulo de incidência das ondas. Este aspecto, segundo Johnson (1956), corresponde a um auto-ajuste das praias para absorver a energia de ataque das ondas. Tais variações, dependendo da intensidade dos processos, são refletidas, seja na oscilação do perfil de praia ou na configuração de amplas faixas litorâneas.

Neste trabalho, no contexto do comportamento da geometria litorânea, foi abordada principalmente a interação desenvolvida entre o potencial de formação de dunas, formulado por Carvalho et al. (2000) e Carvalho (2003), e a intensidade da deriva litorânea.

Portanto, pontuam-se como principais objetivos deste trabalho o cálculo da intensidade e sentido da deriva litorânea e do potencial de formação de dunas, bem como a avaliação quantitativa e qualitativa da interação entre estes processos e sua importância para a elaboração e manutenção da geometria costeira.

Localização da área de estudo

O estado do Ceará está localizado no nordeste do Brasil (Figura 1), possuindo uma costa com aproximadamente 572 km de comprimento.

A área selecionada para o desenvolvimento deste trabalho, inclui uma faixa costeira de aproximadamente 170Km de extensão posicionada no litoral noroeste do Estado do Ceará, a oeste/noroeste de Fortaleza-Ce, Brasil (Figura 1) aproximadamente entre as coordenadas 02° 53' 41" S - 039° 43' 11" W e 03° 47' 58" S - 038° 38' 23" W.

Clima regional

As condições do clima e o comportamento dos ventos e das ondas na região mantêm uma estreita relação com o processo de deslocamento ou migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e com as condições meteorológicas no Hemisfério Norte.

A ZCIT atua no controle de um forte ciclo estacional, com periodicidade anual, associada às mudanças das estações climáticas. Esta zona se desloca mais para o norte durante o inverno austral (entre agosto a outubro) e mais para sul, durante o verão austral (março a abril) (Figura 2).

Sua faixa de movimentação é marcada pela convergência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste. Durante os meses de dezembro a abril a ZCIT desloca-se no sentido meridional, quando, via de regra, é caracterizada a estação de chuvas na região. Neste período, verifica-se a presença dos alísios de NE, que também atingem a costa com mais frequência. De julho a novembro a ZCIT desloca-se gradativamente para o norte, afastando-se do equador. Neste período, as chuvas começam a diminuir até

caracterizar-se o período de estiagem. Ao mesmo tempo os alísios de sudeste/este tornam-se mais efetivos, aumentando sua predominância em relação aos de nordeste.

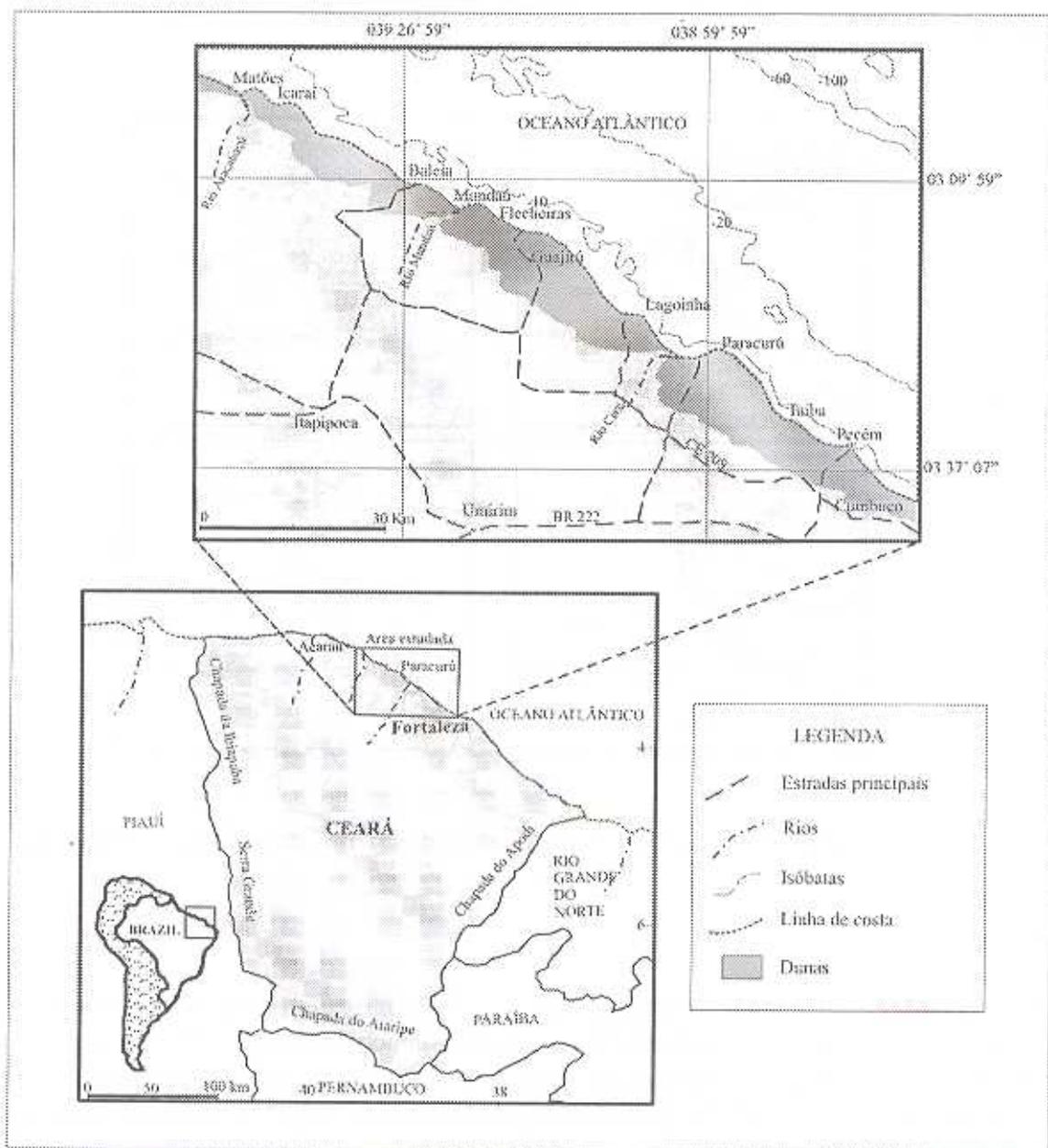


Figura 1 – Mapa da área estudada.

Este comportamento ou padrão climático estacional é bastante influenciado pelo fenômeno “El Niño” que, ao favorecer uma posição da ZCIT mais ao norte e por um maior período de tempo, prolonga, desta forma, a vigência da estação seca.

O clima na área de estudo pode ser definido como semi-árido, entretanto, ao longo da faixa litorânea verifica-se uma tendência de predomínio de condições úmidas a semi-úmidas, definindo uma climatologia onde domina a atuação da massa tropical atlântica, produzindo características de clima quente e chuvoso.

Das ondas incidentes na região, as do tipo "sea" (período de 1 a 9s) representam cerca de 72% das ocorrências, enquanto as consideradas do tipo "swell" (período de 10 a 20s) compreendem 28%. Do total das ondas, 60,6% apresentaram direção entre 46 a 120°Az, das quais, a mais freqüente durante o ano de 1996 foi de 90°Az.

O regime de marés na região pode ser caracterizado como de meso-marés com periodicidade semi-diúrna.

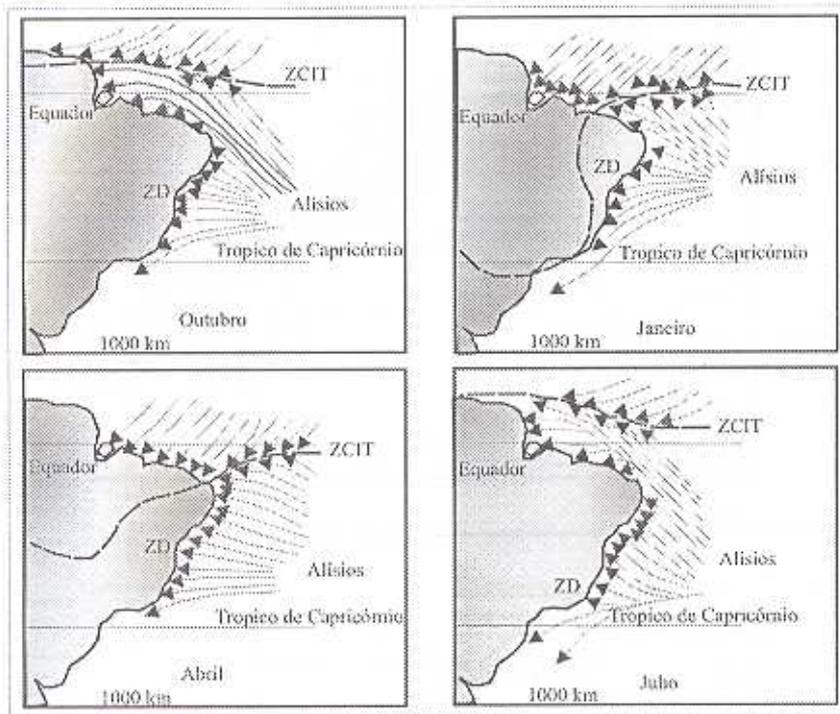


Figura 2 - Síntese da movimentação da ZCIT e da ZD e padrões de vento associados. Modificado de Martin et al (1998).

Geologia

A geologia da área estudada compreende um empilhamento estratigráfico representado, na base, por unidades Pré-Cambrianas, e encimadas por seqüências cenozóicas constituídas por ocorrências de vulcanismo terciário, ampla cobertura de depósitos terciário-quadernários da Formação Barreiras, depósitos colúvio-eluviais e unidades quadernárias, representadas por depósitos eólicos, praias, fluviais, flúvio-lacustres e lacustres, com destaque para os dois primeiros.

Os depósitos da Formação Barreiras (Tb) ocorrem distribuídos continuamente ao longo de toda a faixa costeira estudada, constituindo uma das unidades mais representativas da região. Sua extensão ou limite externo prolonga-se além da linha de costa sobre a plataforma continental. Afloram na faixa costeira na forma de falésias ativas e inativas e em zonas interdunares. De uma forma geral, estes depósitos são em grande parte recobertos por sedimentos eólicos e seu limite interno é de difícil delimitação em virtude do contato que desenvolvem com as coberturas colúvio-eluvionares de idade terci-quadernárias. Na base, seu contato é feito sob discordância litológica com o substrato do embasamento Pré-Cambriano.

Entre os depósitos quadernários, os praias, em geral, desenvolvem superfícies planas (variando em média de 50 a 100m de largura), eventualmente formando cúspides e barras arenosas paralelas a sub-paralelas à linha de costa.

Segundo o tamanho médio dos grãos, estes depósitos são constituídas predominantemente por areias

finas e médias em proporções equivalentes. As areias grossas são raras, ocorrendo em pequenos trechos onde sua concentração corresponde a faixas em erosão, ou aprisionamentos de areias por obstáculos naturais formados por “beach rocks” posicionados na faixa de praia paralelamente a linha de costa.

Os depósitos eólicos são formados por areias finas a médias, bem a moderadamente selecionadas, distribuídas nas cores variando de avermelhadas a brancas.

São distribuídos em formas de dunas agrupadas em gerações que chegam a alcançar cerca de 20 km no sentido da praia para o interior do continente.

Geometria da linha de costa

Para uma melhor compreensão dos processos, a geometria costeira do tipo “espiral” foi dividida em duas partes principais: (1) segmento de maior curvatura, correspondendo à porção imediatamente a sotamar do promontório, e (2) segmento de menor curvatura, que abrange desde o final da primeira parte ao início do promontório seguinte (Figura 3).

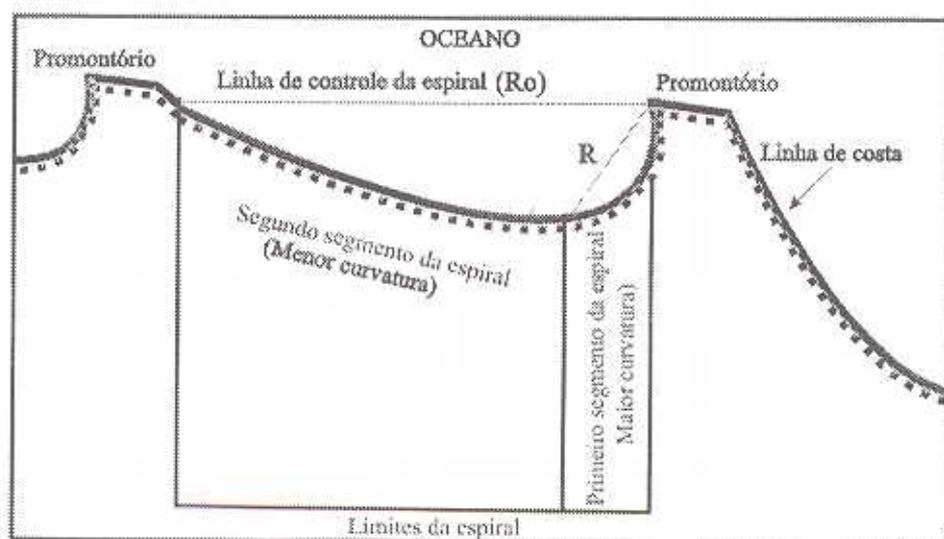


Figura 3 – Modelo conceitual da fisiografia costeira em espiral na área estudada. R = raio da espiral. (modificado de Yasso, 1965).

Materiais e métodos de estudo

Para este trabalho foram utilizadas fotografias aéreas verticais obtidas pelo Serviço Aerofotogramétrico Cruzeiro do Sul S/A (anos 1958 e 1985), com vistas ao mapeamento das principais unidades deposicionais e morfológicas presentes.

Também se utilizou imagens de satélite multi-espectrais (LandSat-5 TM e LandSat-7 ETM) de 1992, 1998 e 2000. Para seu tratamento digital foi usado o “software” “ER Mapper 6.0”, com o qual foram realizadas as retificações das imagens e elaboradas seqüências de tratamento através de combinações de bandas multi-espectrais, objetivando a delimitação das unidades litológicas, feições geológicas e geomorfológicas específicas, e traçado da linha de costa.

As imagens e as fotografias aéreas tratadas foram importadas para o ambiente SIG e, neste sistema, as informações referentes ao tema estudado foram incorporadas a um banco de dados.

Para se obter a coordenada de pontos estudados no terreno, utilizou-se um receptor GPS (Global Positioning System).

Foram efetuadas medidas intensivas de direção e velocidade dos ventos com o uso de uma estação-anemométrica durante dois períodos sazonais (de chuva e de estiagem), entre janeiro a junho e

agosto a novembro de 2000 e 2001. Estas foram utilizadas como base à calibração dos dados compilados de estações meteorológicas fixas.

O estudo do transporte eólico foi baseado em ensaios utilizando-se armadilha para sedimentos do tipo que acumula todo o material transportado através de uma seção vertical. Esta armadilha foi desenvolvida por Maia (1998), com base no modelo de Leatherman (1978). É constituída por um tubo de PVC com 1m de comprimento e 4cm de diâmetro. Neste tubo são feitas duas aberturas verticais em lados opostos. A abertura frontal possui 70cm de comprimento por 1cm de largura e a posterior 70cm de comprimento por 2,5cm de largura. A abertura posterior é recoberta por uma tela com malha de 62 micras. A parte inferior do tubo, com 30cm de comprimento, é fechada com um tampão de PVC. Esta parte, que é encravada no chão ao nível da primeira abertura, funciona como coletor de sedimentos (Figura 4).

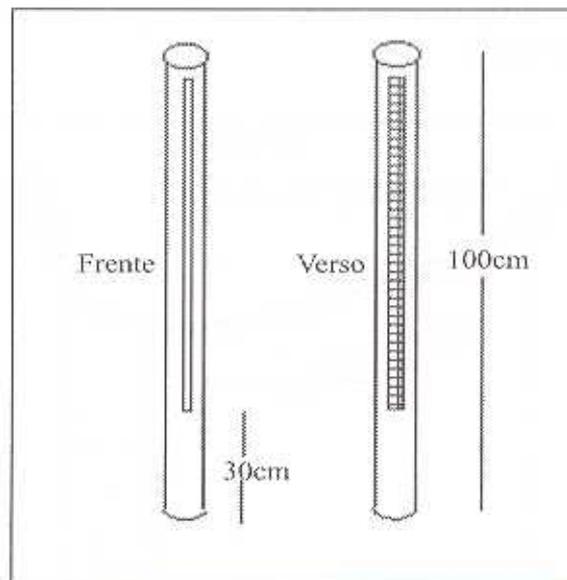


Figura 4 - Modelo de armadilha para sedimentos em transporte eólico. (Modificado de Maia, 1998).

O tempo de ensaio ou medições variou em torno de 12 a 24 horas diárias e as velocidades de vento são medidas simultaneamente à captura de sedimentos durante o período de permanência das armadilhas, em intervalos de uma hora e eventuais sub-intervalos de 15 minutos.

A coleta de sedimentos a partir de armadilhas foi executada durante o mesmo período do ano utilizado para medições de vento.

As análises texturais consistiram de caracterização da granulometria das amostras de sedimento e o procedimento usado correspondeu ao peneiramento com o uso de um sistema de vibração mecânica do tipo "rot up", utilizando-se um conjunto de 12 peneiras com intervalos de abertura de $\frac{1}{2} \phi$.

Para o estudo da distribuição de energia das ondas ao longo da linha de costa, foi utilizado um método gráfico baseado na aplicação de técnicas clássicas de confecção de diagramas de refração de ondas, sistematizado pelo CERC (1984), que objetivou principalmente uma caracterização geral do processo hidrodinâmico.

Procedimentos e resultados dos cálculos do potencial de formação de dunas (Pt) e da intensidade da deriva litorânea (Id)

A área de estudo foi dividida em 31 trechos de orientação uniforme, e para cada um foram procedidas medições, respectivamente, dos ângulos de incidência do vento e da posição da linha de costa

em relação ao norte. Posteriormente foram efetuados os cálculos do potencial de formação de dunas, bem como a determinação do sentido e cálculo da intensidade da deriva litorânea.

O cálculo do potencial de formação de dunas baseia-se num fator de correção que trata da relação entre a direção do vento efetivo com o posicionamento da linha de costa, definido pela equação: ($P_f = q_e \cdot \text{sen } \alpha$). Onde P_f é o potencial de transporte eólico corrigido ou potencial de formação de dunas, q_e é o potencial de transporte eólico associado aos ventos efetivos, e $\text{sen } \alpha$ define o fator de correção, onde α é o ângulo formado entre o vetor resultante das direções de ventos efetivos e a orientação do trecho de linha de costa.

Para a aplicação desta metodologia foi necessário realizar: (1) o mapeamento da faixa costeira, detalhando a orientação da linha de costa; (2) o estabelecimento do regime de vento e identificação das direções de vento efetivo e/ou determinação da direção resultante do transporte eólico a partir de medições em fotos aéreas e imagens de satélite do eixo maior de dunas; (3) a medida do ângulo (α) formado por um trecho de linha de costa e a direção efetiva do vento; (4) medidas diretas de transporte de sedimento com a aplicação de armadilhas para sedimentos, associadas às medidas de clima de vento; (5) caracterização das médias climáticas da região e sua influência sobre o transporte eólico, e (6) determinação do potencial de transporte eólico de sedimento para as principais direções de vento.

Neste trabalho, o potencial de formação de dunas foi aplicado utilizando-se as direções de transporte medidas nas formas de leito. Na área estudada esta direção apresenta uma variação entre 90° e 94° Az.

Em virtude da indisponibilidade de uma série de dados contínuos de velocidade e direção de vento ao longo de toda a extensão da área estudada, durante um ano de medições, o cálculo do potencial de formação de dunas para este trecho da costa cearense teve de ser embasado em dados medidos em campo ao longo de uma série de meses, bem como nos dados medidos numa estação anemométrica situada na localidade de Pecém (Figura 1).

Para a construção dos diagramas de refração e cálculo da intensidade da deriva, foram utilizadas as estatísticas de onda publicadas por Hogben & Lumb (1967), e as principais direções de ondas selecionadas com suas respectivas alturas e períodos estão sintetizadas na tabela 1.

Tabela 1 - Características das ondas selecionadas para os cálculos da intensidade da deriva.

Direção	Período (s)	Altura de onda (m)
N25°	5,0	1,0
	6,5	1,5
N60°	5,0	1,0
	6,5	1,5
N90°	5,0	1,0
	6,5	1,5

A intensidade da deriva litorânea, segundo Komar (1976 e 1998), está relacionada com o ângulo de incidência das ondas, segundo a expressão: $Y = \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha$, onde α é o ângulo que a frente-de-onda faz com a linha de costa.

Em função de seus padrões de convergência e divergência, as ondas apresentam diferentes alturas

ao longo da costa. Segundo este conceito, a intensidade do potencial da deriva por unidade de área da antepraia foi calculada utilizando a expressão: $X = Y \cdot H^2$ (número adimensional), onde H é a altura da onda estimada ao longo da costa (BITTENCOURT et al. 1999).

As alturas das ondas ao longo da linha de costa (H) foram definidas com base no coeficiente de refração (K), obtido diretamente dos diagramas de refração: $K = (b_0/b)^{1/2}$ e $H = H_0 K$, onde (b_0) é a distância entre dois raios de ondas adjacentes ou ortogonais às frentes-de-onda, em condições de águas profundas e (b) a mesma distância medida em águas rasas. (H_0) é a altura de onda em águas profundas (Bascom, 1954) (Figura 5).

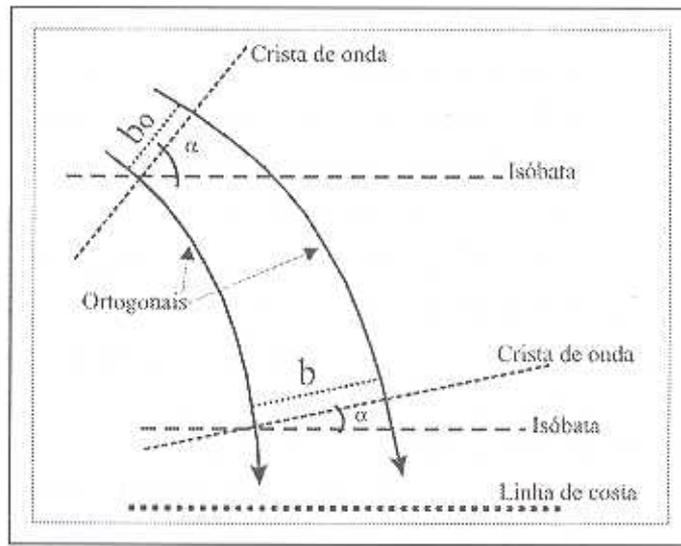


Figura 5 – Divergência de raios de onda como resultado do processo de refração: b_0 e b representam as distâncias entre os dois raios-de-onda adjacentes, respectivamente, em águas profundas e ao longo da costa. Modificado de Komar (1998).

A intensidade da deriva ponderada foi calculada multiplicando-se a sua intensidade pelo percentual de incidência anual das ondas (Tabela 2). A deriva efetiva foi calculada subtraindo-se a deriva secundária da deriva dominante.

Com base nos diagramas de refração, calculou-se o sentido e a intensidade da deriva litorânea potencial efetiva, considerando-se todas as direções de ondas (Tabela 2).

Identificou-se, desta forma, o sentido de SE para NW, como a direção predominante ou efetiva da deriva litorânea.

Integração entre potencial de formação de dunas (Pt) e intensidade da deriva (Id)

De acordo com Goldsmith & Golik (1979) a direção e a taxa de transporte da deriva litorânea constituem dois significativos fatores que determinam os padrões de erosão e deposição de sedimentos ao longo de uma costa.

Na área estudada, os processos de refração/difração de ondas desenvolvem uma tendência de transporte longitudinal de sedimentos no sentido de SE-NW. Entretanto, verifica-se a redução na intensidade da deriva ou mesmo sua inversão de sentido, normalmente, a partir de um ponto onde a direção das cristas de ondas incidentes é predominantemente paralela à linha de costa. Na área estudada isto geralmente ocorre na faixa correspondente ao segundo segmento da espiral.

Este aspecto define uma tendência deposicional ao longo desses segmentos, que, por outro lado, normalmente experimentam um processo de intensificação do potencial de formação de dunas.

Estas características estão apresentadas na figura 7, onde está ilustrada uma comparação entre a distribuição da intensidade da deriva ao longo da linha de costa e o potencial de formação de dunas (Pt).

Tabela 2 – Resultado dos cálculos do potencial de formação de dunas (Pt) e da intensidade da deriva efetiva (Id).

Trecho de linha de costa	Pt (m ³ m/ano)	Id (valor adimensional)	Sentido da deriva
1	131	-1543	SE
2	13	5274	NW
3	114	5714	NW
4	41	1754	NW
5	166	3864	NW
6	131	-247	SE
7	80	3098	NW
8	-74	3646	NW
9	50	5049	NW
10	141	2476	NW
11	-3	2051	NW
12	124	7406	NW
13	156	5495	NW
14	138	3511	NW
15	111	2062	NW
16	58	3798	NW
17	55	3920	NW
18	116	3920	NW
19	18	4477	NW
20	100	4090	NW
21	58	7089	NW
22	39	5735	NW
23	136	1075	NW
24	89	4559	NW
25	38	5161	NW
26	147	-78	SE
27	83	7549	NW
28	10	6526	NW
29	135	4602	NW
30	28	9843	NW
31	-38	8149	NW

A diminuição da intensidade da deriva, representada pela caracterização da incidência de ondas com cristas paralelas a sub-paralelas a linha de costa, propicia a deposição de sedimentos, favorecendo, conseqüentemente, a engorda das praias.

De outro lado, o maior volume de sedimentos disponíveis nesses segmentos, associado ao posicionamento da linha de costa e às direções favoráveis de vento, produz um transporte eólico mais intenso de materiais em direção ao interior do continente, conforme demonstrado pelo potencial de

formação de dunas (Pt). Este fato favorece, conseqüentemente, o desenvolvimento de amplos campos de dunas em frente aos mesmos.

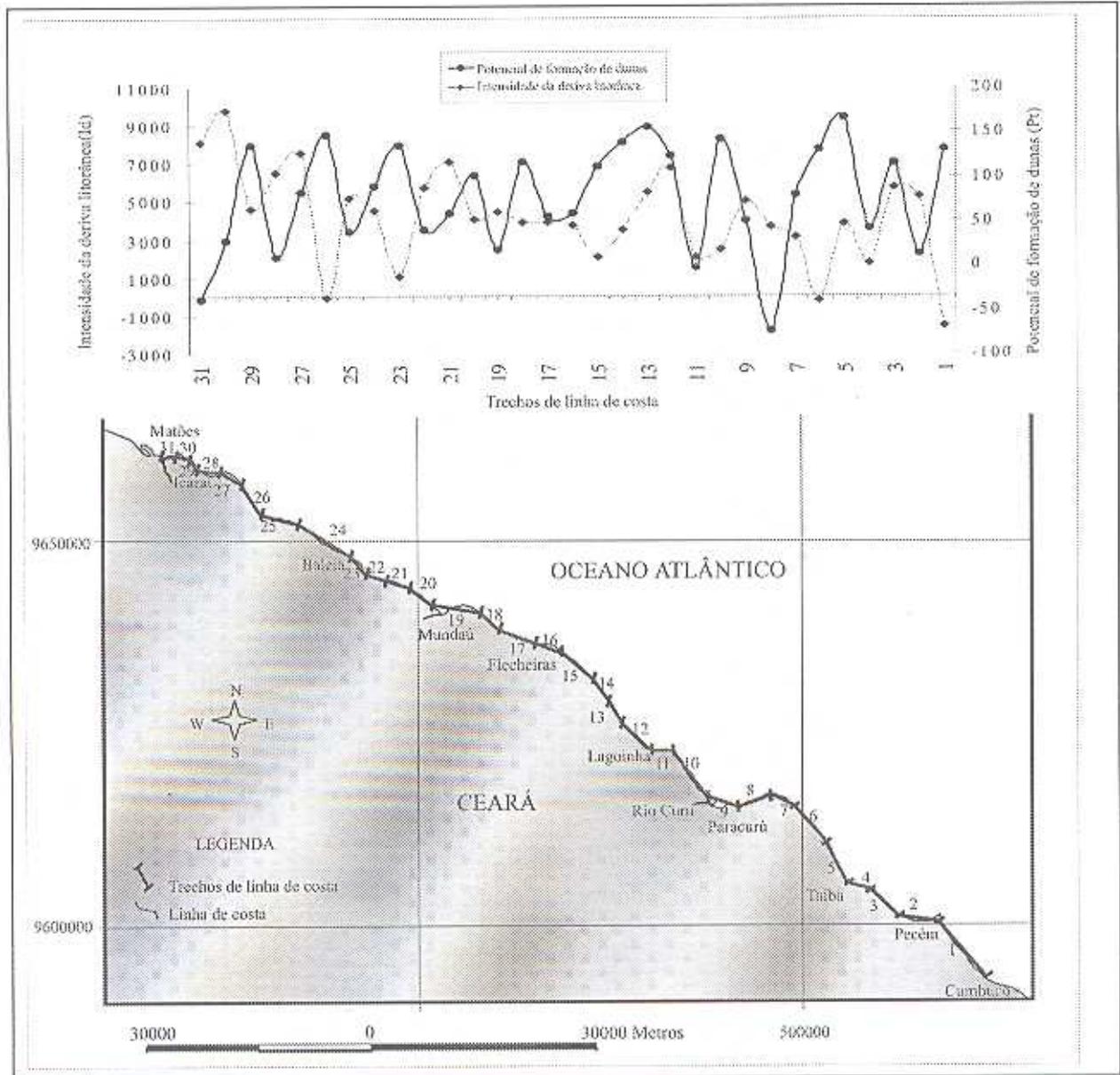


Figura 7 – Comparação entre o potencial de formação de dunas (Pt) e a intensidade da deriva litorânea.

A relação entre estes dois processos, quando em equilíbrio, desenvolve condições que favorecem a manutenção da estabilidade da linha de costa, uma vez que a retirada de materiais pelo vento pode ser compensada pela deposição e/ou diminuição da taxa de retirada de materiais pela deriva. Como conseqüência, a posição e modelado da linha de costa ou indentação do embaimento pode ser mantida relativamente constante.

Durante a evolução do modelado costeiro do tipo 'espiral', o processo de difração experimenta um estágio de intensificação à medida que o promontório torna-se mais proeminente, desenvolvendo-se uma

zona de sombra concomitantemente ao aumento do embaiamento.

Sob esta consideração, observa-se que o processo de erosão no estágio atual de evolução deve ser creditado principalmente à difração de ondas, e ocorrem principalmente ao longo do primeiro segmento da espiral e na parte inicial do segundo segmento da espiral. Este último sob a influência, principalmente, do processo de refração de onda.

No primeiro caso a faixa costeira coincide com o segmento onde é efetiva a realimentação das praias pelos depósitos eólicos.

A importância desta constatação corresponde ao fato da realimentação das praias pelo processo de transporte eólico, num sistema do tipo "headland bypass dune", poder ser de significativa eficácia para a manutenção da estabilidade em faixas sob estas condições, uma vez que o transporte resultante da difração, no estado atual deste modelado na região, ocorre basicamente nos trechos de linha de costa situados no primeiro segmento das espirais.

Em algumas localidades, identificou-se uma importante diminuição no aporte de sedimentos para o sistema citado, seja devido a processos naturais, antrópicos ou pela conjunção das duas causas.

Exemplo deste processo são as dunas que migravam e eram realimentadas por um sistema de "bypass" eólico, e que depositavam sedimentos a sotamar do promontório da Lagoinha (Figura 8). Esta realimentação foi quase completamente interrompida pela introdução de anteparos formados por plantações de coqueiros. Como consequência disso o campo de dunas tem se dissipado devido à redução no fluxo de sedimentos, diminuindo continuamente em termos de área e altura (Figura 8). Coincidentemente, verificou-se o desenvolvimento de erosão no trecho a sotamar desta duna durante o mesmo período.

Nesta faixa, verifica-se o desenvolvimento de micro-embaiamentos que podem estar relacionados a esta deficiência no fornecimento de sedimentos pelas dunas.

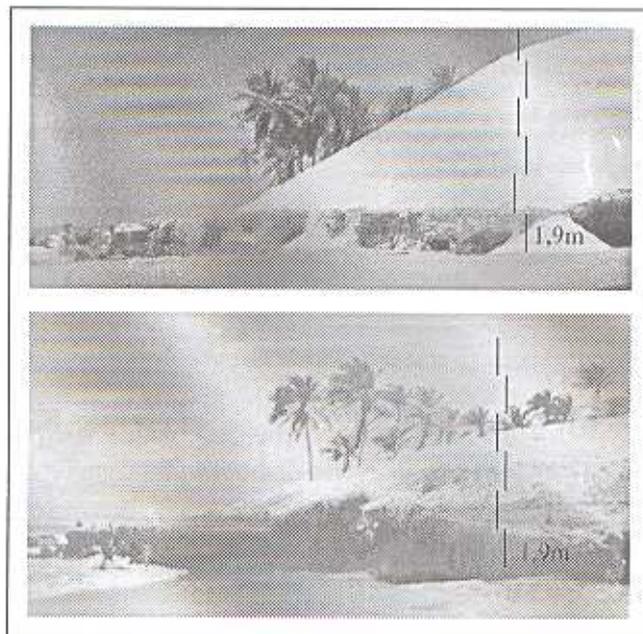


Figura 8 – Redução no volume de sedimentos no sistema do tipo "headland bypass dune". Lagoinha-CE. A quase ausência de realimentação também é denunciada pela coloração dos sedimentos, provenientes de retrabalhamento de dunas antigas. A duna na foto superior data de 1996 e a inferior de 2002.

Na localidade do Pecém, de acordo com a avaliação de campo, os processos erosivos tem sido observados com frequência na porção inicial do segundo segmento da espiral, e dissipam-se próximo a embocadura do rio Gereraú, só retomando o processo erosivo nas proximidades do promontório

seguinte (Figura 9).

Neste segmento, observam-se processos severos de erosão, materializados no tombamento de equipamentos urbanos públicos e privados. Estes processos ocorrem principalmente nos trechos onde se espera ocorrer o domínio de processos de difração das ondas. Ver faixa de difração delimitada pelo raio de difração de N90 e N60, respectivamente R90 e R60 (Figura 9).

A realimentação da faixa de praia próxima à porção de sotamar da Ponta do Pecém é certamente responsável pela minoração dos processos erosivos nesta faixa. Portanto, devido ao atual processo de fixação das dunas e conseqüente interrupção da alimentação da praia pelo sistema tipo “headland dune bypass”, aspecto este atribuído à implantação do Porto do Pecém, a barlar da Ponta do Pecém, é possível que haja um agravamento da ação erosiva marinha neste trecho.

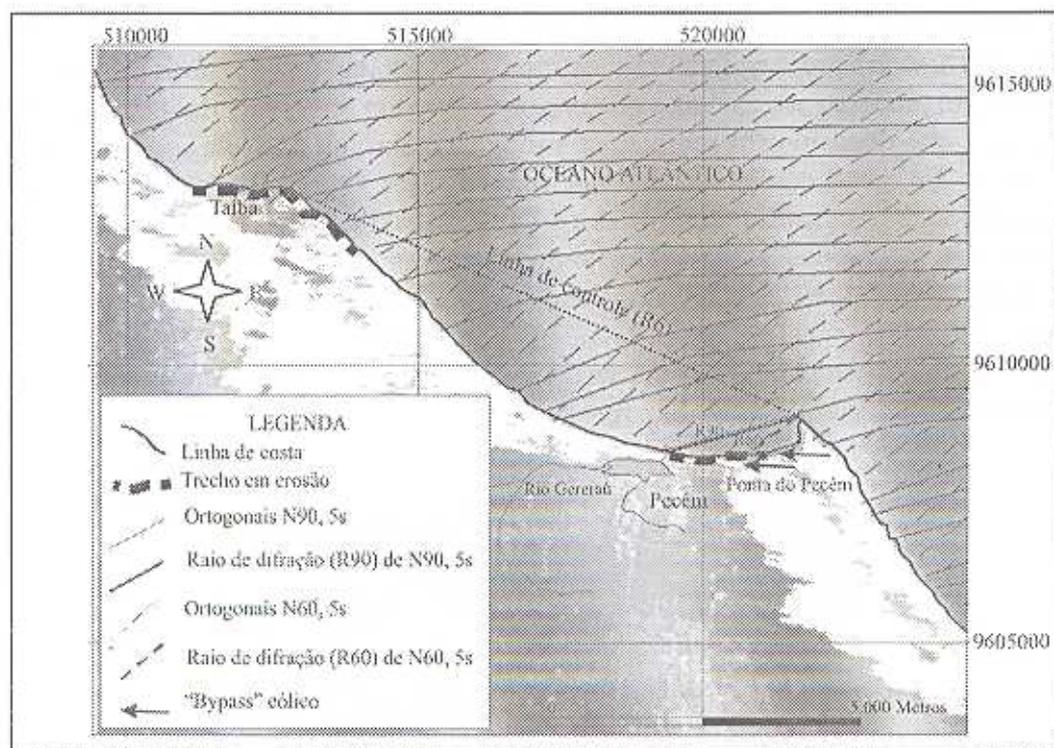


Figura 9 – Processos costeiros no trecho em espiral entre Pecém e Taíba.

No Paracurú (Figura 10), a linha costa forma uma geometria em espiral que se estende da ponta do promontório do Paracurú ao limite do promontório da Lagoinha, desenvolvendo um dos maiores trechos deste tipo de modelado ao longo da área estudada. A geometria do tipo espiral esperada para esta faixa costeira é subdividida em duas espirais (Fig. 10). Além deste aspecto, a continuidade desta faixa costeira é interrompida pela embocadura do Rio Curú que participa na dinâmica da mesma.

A sobreposição do modelo teórico na configuração do litoral de Paracurú demonstra uma tendência à erosão, que é confirmada em campo, localizada no centro da ‘espiral’. No entanto, este processo foi subdividido pelos pequenos espirais. Coincidentemente, o trecho onde se desenvolve a subdivisão do ‘espiral’, corresponde a uma faixa de realimentação da praia por um sistema do tipo “headland bypass dune”.

Para explicar a subdivisão da espiral do Paracurú em duas, consideraram-se as seguintes hipóteses: (1) o modelamento ou indentação da costa foi interrompido pela imposição de litologias que, mais resistentes à abrasão marinha, se converteram em pequenos promontórios (ou promontórios embrionários) ou (2) o condicionamento foi promovido pela constante realimentação da praia pelo

transporte eólico, que teria promovido um equilíbrio no balanço de sedimentos, impedindo assim a aceleração do processo erosivo no trecho especificado.

A ausência de litologias que justificariam a primeira hipótese conduziu à aceitação da segunda como a mais adequada.

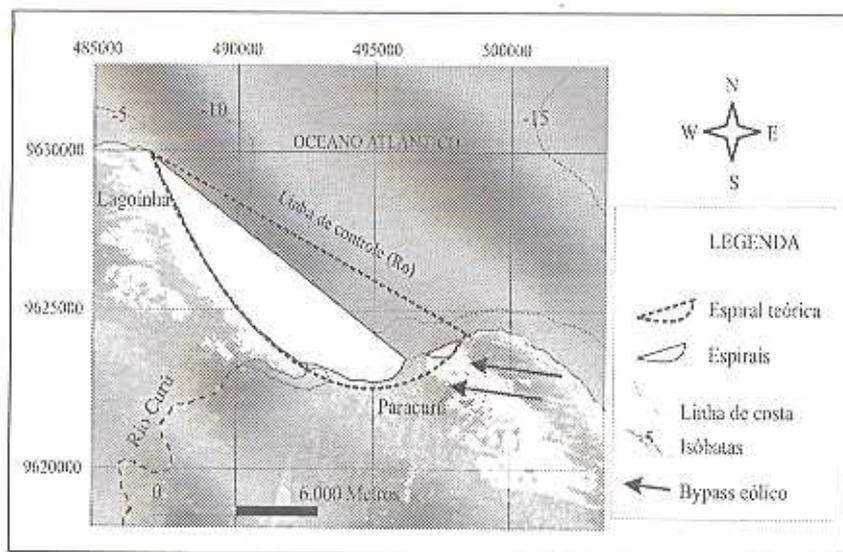


Figura 10 – Fisiografia da linha de costa do Paracurú, evidenciando a divisão do modelado espiral esperado (teórico) em dois espirais contíguos.

Noutras localidades, a exemplo de Icará, também foram verificados processos erosivos próximos a máxima curvatura do embaixamento. Semelhantemente, o fornecimento de sedimentos pelo vento para alimentar ou realizar o “bypass” nesta localidade também encontra-se praticamente estancado.

Comportamento da linha de costa, relativo à sua interação com os principais processos.

A fisiografia litorânea da região apresenta-se regida por um processo de ‘equilíbrio dinâmico’, no conceito de Silvester (1970) e Hsu et al. (1993), promovido pelas condições fisiográficas, associadas basicamente à participação do vento e das ondas, inserindo à dinâmica deste sistema a possibilidade de uma contínua evolução.

O tipo de equilíbrio associado a sua evolução define um padrão que passa a condicionar as faixas onde ocorre uma maior deposição de sedimentos nas praias, bem como naquelas onde os processos erosivos são dominantes, desenvolvendo uma geometria litorânea que pode ser interpretada como estável do ponto de vista da sua adaptação às condições de incidência das ondas e da ação dos demais processos costeiros, e que interage dinamicamente com os mesmos.

Sob este entendimento, segundo Hsu et al. (1989), o embaixamento ou espiral terá retrocedido a um limite de indentação quando atingir o estágio de equilíbrio estático. Idéia semelhante é defendida por Komar (1998), sugerindo que a configuração de equilíbrio é alcançada quando a linha de costa adquire um posicionamento paralelo à incidência das cristas de ondas, favorecendo, portanto, a anulação de transporte em deriva.

Para um melhor entendimento dos processos costeiros verificados neste tipo de modelado litorâneo foi necessário dividi-lo em segmentos, segundo o predomínio de determinados processos. Na área estudada verifica-se que no segmento de maior curvatura do embaixamento, aqui denominado de primeiro segmento da espiral, segundo o entendimento de autores como Hsu et al. (1993), Komar (1998), entre

outros, predomina a difração de ondas. Também observa-se que neste segmento ocorre intensa realimentação da praia pelo transporte eólico, enquanto que no segmento seguinte (segundo segmento da espiral) que é caracterizado pela suavização da curvatura do modelado, predominam os processos de refração de onda e de transporte eólico em direção ao interior do continente (Figura 11).

Desta forma, a ocorrência de uma situação de equilíbrio para este trecho, deve contemplar um estado dinâmico que compense o intenso e contínuo processo de deflação eólica, caracteristicamente dominante ao longo do segundo segmento da espiral (Figura 11).

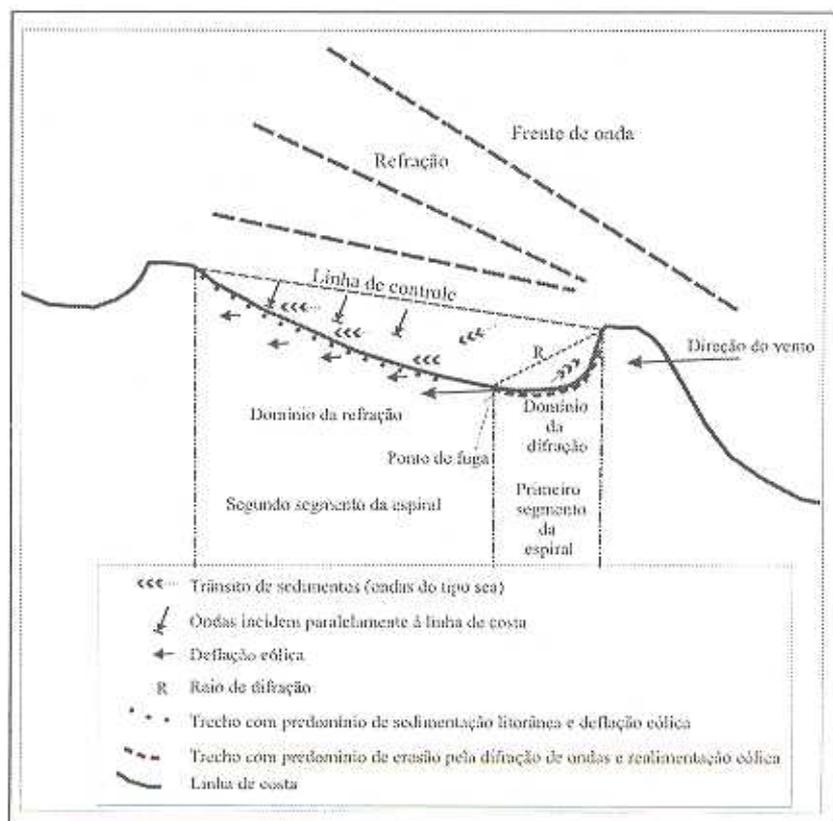


Figura 11 – Segmentação do modelado em espiral e processos associados.

Neste contexto, à medida que a fisiografia vai atingindo um equilíbrio estático em relação a ação dos agentes e processos marinhos, este equilíbrio pode tornar-se comprometido pela possibilidade de ocorrer o recuo da linha de costa ao longo das faixas identificadas como de efetivo potencial de transporte eólico, ou seja, a partir do ponto ou faixa de fuga (Fig 11), no sentido de costa abaixo.

Nestas condições, o processo de deflação eólica poderá provocar modificações no modelado em espiral em virtude do déficit de sedimentos. Conseqüentemente, a ação das ondas causaria a intensificação ou desenvolvimento de trechos de erosão associados a outros com predomínio de sedimentação. Estas condições podem promover o desencadeamento de um processo de adequação da fisiografia à nova condição dinâmica, no sentido de adquirir um novo estágio de estabilidade.

Nesta perspectiva, segundo a dinâmica da região, identificam-se duas possibilidades de comportamento desta fisiografia ou modelado: (1) a adaptação da forma em espiral como um todo, conseqüentemente, provocando erosão generalizada em todo o embaixamento, ou, (2) a concentração de erosão em trechos determinados, provocando desta forma a subdivisão da feição em espiral. As duas possibilidades aqui apresentadas certamente resultariam na busca pela acomodação da geometria da linha de costa, o que provocaria o desenvolvimento de faixas de erosão e outras de deposição ao longo da extensão do modelado.

Ao longo do litoral estudado verifica-se o desenvolvimento de embaiamentos em diferentes escalas que podem estar relacionadas a este tipo de processo, a exemplo do litoral de Paracurú.

Estas características indicam que um estado de equilíbrio estático, sob as condições dinâmicas atuais seria muito pouco provável de ocorrer. Além disso, a variedade de condições hidrodinâmicas também corrobora com a permanência de um estado de constante variação do modelado. Este aspecto encontra respaldo em Arcilla & Jiménez (1994), que são de opinião que uma situação de equilíbrio estático só seria possível sob condições de onda monocromática com altura constante atuando de forma indefinida sobre o perfil.

Na área estudada, o estado de equilíbrio dinâmico é condicionado pelas características fisiográficas ou do modelado costeiro, desenvolvido sob o padrão energético regional e mantido pelo volume de sedimentos envolvido em todo o sistema litorâneo.

Considerações finais

Verificou-se haver uma inter-relação entre a ação do vento e das ondas com a geometria da linha de costa atual.

Este processo atua de forma a manter a estabilidade dinâmica e a morfogênese costeira, sendo demonstrado pelo comportamento da intensidade da deriva e o potencial de formação de dunas.

A ação do vento como agente produtor de erosão e conseqüente instabilidade dinâmica, em muitos casos, tem sido amenizada pelos processos litorâneos, a exemplo da ação das ondas que, em sincronia com a geometria em espiral, tem produzido deposição de sedimentos onde a atividade deflacionária do vento é mais intensa. O mesmo tipo de estabilidade tem sido produzido pelo vento, em relação à ação erosiva das ondas, nos trechos imediatamente a sotamar dos promontórios. Neste caso a realimentação das praias, desenvolvida pelo processo eólico nos segmentos onde a difração de onda parece ser mais efetiva na produção de erosão, também corrobora com a importante interação entre estes processos para a manutenção da estabilidade costeira.

Desta forma, considera-se que o estudo da morfogênese costeira na região só poderá evoluir significativamente se observada a interação entre tais processos e a própria geometria litorânea.

Bibliografia

- BASCOM, W.J., The control of stream outlets by wave refraction. *Jour. Geol.*, 62:600-605, 1954.
- BITTENCOURT, A.C.S.P., DOMINGUEZ, J.M.L., MARTIN, L., REIMÃO, I.S. Padrões de dispersão de sedimentos ao longo da costa do estado da Bahia, Brasil, 1999, 33p. no prelo.
- CARVALHO, A.M. & DOMINGUEZ, J.M.L. Relação entre direção do vento/configuração da linha de costa para o desenvolvimento dos campos de dunas no Ceará. In: XVIII Simpósio de Geologia do Nordeste – A Geologia e o Homem. *Resumos*. Boletim nº 16. Sociedade Brasileira de Geologia-Núcleo Nordeste. Recife, 2000, p. 21.
- CARVALHO, A.M. **Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões-Costa NW do Estado do Ceará.** Ênfase nos processos eólicos. Tese de Doutorado, Salvador, 2003. 188p.
- CERC (Coastal Engineering Research Center). **Shore Protection Manual**. U.S.Army Corps of Engineers. Washington, D.C VI, 1984, 597p, V.II, 603 p.
- DAVIES, J.L. **Geographical variation in coastal development**, Longman Group Ltd., New York, 1972, 204p.
- GOLDSMITH, V. & GOLIK, A. Sediment transport model of the southeastern mediterranean coast. *Marine Geology*. Raifa (Israel). 37(1/2):147-175, 1979.
- HOGBEN, N. & LUMB, F.E. **Ocean waves statistics**. London: National Physical Lab., Ministry of Technology, 1967, 263p.

- HSÚ, J.R.C; UDA, T. & SILVESTER, R. Beach downcoast of harbours in bays. **Coastal Engineering**, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, **19**:163-181, 1993.
- HSU, J.R.C., SILVESTER, R. & XIA, Y.M. Generalities on static equilibrium bays. **Coastal Eng.**, **12**: 353-369, 1989.
- JOHNSON, J.W. Dynamics of nearshore sediment movement. **Bulletin of the American Society of Petroleum Geologists**. **40**(20):2211-2232, 1956.
- KOMAR, P.D. **Beach processes and sedimentation**. 2nd ed. New Jersey. 1998, 544p.
- LEATHERMAN, S.P. A new eolian trap design. **Sedimentology**, **25**: 303-306, 1978.
- MAIA, L.P. **Processos costeiros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): Implicações para una gestión adecuada de la zona litoral**. Universitat de Barcelona. Facultat de Geologia. Dep. D'Estratigrafia i Paleontologia. Tesis Doctoral. Barcelona, 1998, 269p.
- MARTIN, L., DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENOCURT, A.C.S.P. Climatic control of coastal erosion during a sea-level fall episode. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 1998.
- SÁNCHEZ-ARCILLA, A. & JIMÉNEZ, J.A. Ingenieria de playas(I): Conceptos de morfologia costera. **Ingeniería del agua**. **1**: (2). 97-114, 1994.
- SILVESTER, R. Growth of crenulate shaped bays to equilibrium, **J. Water and Harb. Div., Am. Soc. Civ. Eng.**, **76**:275-287, 1970..
- YASSO, W.E. Plan geometry of headland-bay beaches. **J. Geology**, **73**(5): 702-719, 1995.

Trabalho enviado em janeiro de 2004.

Trabalho aceito em agosto de 2004.