



**BALANÇO DE SEDIMENTOS ARENOSOS NO LITORAL MÉDIO DO RIO
GRANDE DO SUL**

Porto Alegre, 2011

LUCAS MARCHI DA MOTTA

**BALANÇO DE SEDIMENTOS ARENOSOS NO LITORAL MÉDIO DO RIO
GRANDE DO SUL**

Trabalho de conclusão do curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina de Projeto Temático em geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em geologia.

Orientador: Prof. Dr. Elírio E. Toldo Jr.

Porto Alegre, 2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho de conclusão de curso “Balanço de sedimentos arenosos no litoral médio do Rio Grande do Sul” elaborado por Lucas Marchi da Motta, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em geologia.

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg

Prof. Dr. Jair Weschenfelder

FICHA TÉCNICA DO PROJETO

I – IDENTIFICAÇÃO

Linha Temática: Geologia Marinha

Aluno Proponente: Lucas Marchi da Motta

II – DADOS GERAIS

Título: Balanço de sedimentos arenosos no litoral médio do Rio Grande do Sul

Área de Estudo: Litoral Médio do Rio Grande do Sul

Instituições envolvidas: UFRGS

III – ORIENTAÇÃO

Orientador: Prof. Dr. Elirio E. Toldo Jr.

Supervisor: Prof. Dr. Luiz Emílio Sá Brito de Almeida

RESUMO

O conceito de balanço de sedimentos, aplicado às zonas costeiras, foi desenvolvido com o objetivo de definir a magnitude e a direção do transporte de sedimentos de uma determinada região de interesse como, por exemplo, os trechos de erosão e acresção ao longo de uma praia. Esta é uma valiosa ferramenta que auxilia na investigação de mudanças da linha de costa observadas em campo e também ajuda a prever possíveis cenários para sua posição. Desta maneira foi realizado o balanço de sedimentos arenosos no litoral médio do Rio Grande do Sul, com a identificação de áreas fontes e sumidouros de sedimentos arenosos. Ao longo da área de estudo, entre a desembocadura da Lagoa dos Patos e a praia de Dunas Altas, foram mapeadas as zonas litorâneas com erosão e deposição, em escala de tempo de curto prazo (anos e décadas), para análise do balanço de sedimentos dentro do sistema praial. Para tanto, a região foi delimitada em 12 células litorâneas, em um conceito adaptado do modelo proposto por Rosati e Kraus (2001). Neste estudo foram classificados os parâmetros controladores do balanço de sedimentos em relação as suas resultantes de transporte, como adição ou remoção, e estimados os volumes de areia contidos no campo de dunas costeiras, que se desenvolve sobre a planície costeira para que seja possível quantificar o estoque de sedimentos. Também foram calculadas as taxas de deriva litorânea, através do método do fluxo de energia (Komar e Inman, 1970), a partir de um conjunto de doze anos de dados de previsões de parâmetros ondulatórios obtidos pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), entre os anos de 1998 e 2009.

Palavras chave: Balanço de sedimentos. Litoral Médio do RS. Deriva litorânea.

ABSTRACT

The concept of sediment budget applied to coastal areas, was developed in order to define the magnitude and direction of sediment transport in an interest region, such as erosion and accretion portions along the shoreline. It is a valuable tool that assists in the investigation of shoreline changes observed in the field and also helps predict possible scenarios for its position. Thus the sediment budget was held on the coast of Rio Grande do Sul, with the identification of sources and sinks areas of sandy sediments. Along the study area, between the mouth of Patos Lagoon and the beach of Dunas Altas, coastal areas were mapped, defining the erosion and deposition areas, based on a short-term time scale (years and decades) to statement analysis of sediment within praial system. To this end, the region was demarcated into 12 coastal cells, adapting the model proposed by Rosati and Kraus (2001). the parameters controlling the relative balance of sediment were classified related to their transport resulting, such as addition or removal, and the volume of sand contained in the coastal dunes field, which develops on the coastal plain, was estimated, to be possible the quantification of the inventory of sediment. The rates of longshore drift Were also calculated, using the energy flux method (Komar and Inman, 1970), from a set of twelve years data for forecasting wave parameters obtained from NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) between 1998 and 2009.

Keywords: Sediment budget. Littoral drift. Middle coast of Rio Grande do Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: padrão de refração de ondas com incidência oblíqua considerando a linhas batimétricas paralelas a praia.....	16
Figura 2: litoral médio do Rio Grande do Sul definido entre a desembocadura da Lagoa dos Patos e a praia de Dunas Altas.....	19
Figura 3: Exemplo de célula litorânea.....	21
Figura 4: a) Duna sem os pontos, em uma área não urbanizada na praia de Cidreira. b) malha de pontos a onde foi realizado o levantamento planialtimétrico.....	27
Figura 5: Divisão do Litoral Médio em células litorâneas e seus respectivos ângulos de alinhamento.....	28
Figura 6: volume relativo de sedimentos do campo de dunas costeiras para cada trecho litorâneo ($m^3 \cdot 10^9$).....	30
Figura 7: agrupamento das 12 células litorâneas em 04 trechos litorâneos.....	30
Figura 8: Distribuição percentual da deriva litorânea ao longo dos 12 anos (1998 a 2009). No eixo das ordenadas são apresentados os volumes transportados em m^3	32
Figura 9: deriva líquida anual entre 1998 e 2009.....	51
Figura 10: Localização das praias de Mostardas, Dunas Altas e Cassino.....	52
Figura 11: Classificação das células litorâneas para os meses de outono entre 1998 e 2009.....	55
Figura 12: deriva litorânea líquida para os meses de outono entre 1998 e 2009.....	56
Figura 13: Classificação das células litorâneas para os meses de inverno entre 1998 e 2009.....	56
Figura 14: deriva litorânea líquida para os meses de inverno entre 1998 e 2009.....	57
Figura 15: Classificação das células litorâneas para os meses de primavera entre 1998 e 2009.....	57
Figura 16: deriva litorânea líquida para os meses de primavera entre 1998 e 2009.....	58
Figura 17: Classificação das células litorâneas para os meses de verão entre 1998 e 2009.....	58
Figura 18: deriva litorânea líquida para os meses de verão entre 1998 e 2009.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: volumes de sedimentos em m ³ transportados pela deriva litorânea para NE (azul) e SW (vermelho).....	33
Tabela 2: Balanço sedimentar para cada estação do ano e o volume total (m ³), entre os anos de 1998 e 2009 Deposição (azul) e erosão (vermelho).....	36
Tabela 3: balanço anual e total de sedimentos para cada célula litorânea e o resíduo encontrado (m ³). Em vermelho as células classificadas como fonte de sedimentos e em azul as classificadas como sumidouro.....	37
Tabela 4: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 1 (m ³).....	38
Tabela 5: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 2 (m ³).....	39
Tabela 6: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 3 (m ³).....	40
Tabela 7: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 4 (m ³).....	41
Tabela 8: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 5 (m ³).....	42
Tabela 9: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 6 (m ³).....	43
Tabela 10: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 7 (m ³).....	44
Tabela 11: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 8 (m ³).....	45
Tabela 12: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 9 (m ³).....	46
Tabela 13: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 10 (m ³).....	47
Tabela 14: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 11 (m ³).....	48
Tabela 15: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 12 (m ³).....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: gráfico de dispersão das alturas significativas ($H_{1/3}$) obtidas pelo ondógrafo e pelo modelo WAVEWACHTIII da NOAA para o mesmo período.....	23
Gráfico 2: gráfico de dispersão dos períodos significativos ($T_{1/3}$) obtidos pelo ondógrafo e pelo modelo WAVEWACHTIII da NOAA para o mesmo período.....	24
Gráfico 3: gráfico de dispersão das direções obtidas pelo ondógrafo e pelo modelo WAVEWACHTIII da NOAA no mesmo período. Nota-se claramente o agrupamento de duas populações entre as direções provenientes de norte-nordeste e sul-sudeste.....	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Justificativa.....	9
1.2 Premissas.....	10
1.3 Hipóteses.....	11
1.4 Objetivos e metas.....	12
1.5 Estado da arte.....	12
1.6 Fundamentação teórica.....	15
1.6.1 Propagação de ondas oceânicas.....	15
1.6.2 Transporte longitudinal de sedimentos.....	16
1.6.3 Sistema multiespectral de imageamento (ASTER)	17
1.7 Área de estudo.....	18
2 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO	20
2.1 Divisão do litoral em células litorâneas.....	20
2.2 Transferência dos parâmetros ondulatórios para o ponto de rebentação.....	21
2.3 Estimativa das taxas de deriva litorânea.....	25
2.4 Estimativa do volume e do tempo de formação do campo de dunas	25
3 RESULTADOS	28
3.1 Divisão do Litoral Médio.....	28
3.2 Volume de areia no Campo de Dunas	29
3.3 Volumes da Deriva Litorânea.....	31
3.4 Balanço sedimentar do Litoral Médio.....	34
4 DISCUSSÕES	50
4.1 Deriva litorânea.....	50
4.2 Balanço sedimentar	50
4.3 Estoque de sedimentos arenosos.....	52
4.4 Modelo de dinâmica costeira de curto prazo para o litoral médio.....	53
4.5 Hipótese para o tempo de formação do campo de dunas do litoral médio.....	59
5 CONCLUSÕES	61
Referências.....	62

1 INTRODUÇÃO

Uma série de trabalhos já foi realizada no litoral do Rio Grande do Sul visando explicar e compreender os diferentes comportamentos e a mobilidade da linha de praia na costa do nosso estado. Porém é muito difícil de obter valores quantitativos de mobilidade da linha de praia ou taxas confiáveis de transporte sedimentar devido, principalmente, as incertezas existentes nos cálculos da deriva litorânea. O balanço de sedimentos é uma importante ferramenta para auxiliar no entendimento da dinâmica costeira do litoral do Rio Grande do Sul, para desta maneira conhecer as fontes, os sumidouros de sedimentos ao longo da costa e a magnitude com que os processos de erosão e deposição atuam, além de identificar como e para onde estes sedimentos são transportados.

1.1 JUSTIFICATIVA

O litoral do Rio Grande do Sul concentra um número expressivo de habitantes durante o ano todo e, no verão, essa população multiplica de tamanho. Estas regiões são muito visadas por imobiliárias e possuem uma tendência de aumento na sua ocupação, porém muitas vezes isto ocorre sem o planejamento ocupacional adequado. A realização do balanço de sedimentos arenosos no Litoral Médio do Rio Grande do Sul é muito importante para estimar o tempo e a intensidade com que atuam os processos responsáveis pela erosão, transporte e deposição de sedimentos e desta maneira compreender a dinâmica costeira da região, bem como mapear as áreas de risco, seja por erosão ou acresção. Esta é também uma valiosa ferramenta que auxilia na investigação de mudanças da linha de costa observadas em campo e também ajuda a prever possíveis cenários para sua futura posição, sendo indispensável para a realização de um bom planejamento ocupacional da região costeira.

O desenvolvimento do estudo no Litoral Médio se justifica pela melhor disponibilidade de dados geológicos, oceanográficos e meteorológicos, em particular dados sobre taxas de mobilidade da linha de praia e de deriva litorânea, nesta região, o

que possibilita a validação de um modelo de balanço de sedimentos arenosos aplicado à zona costeira do Rio Grande do Sul.

1.2 PREMISSAS

Em praias arenosas os processos de deposição e erosão são controlados por um equilíbrio dinâmico que envolve três componentes principais: quantidade e tipo de sedimento disponível, energia física ao longo da costa e mudanças do nível do mar (Davis, 1997). Em escala de curto prazo (anos e décadas), sem influência das variações relativas do nível do mar, o estoque de sedimentos contidos em uma praia pode ser definido como o volume de sedimentos dentro da praia e aquele que se move através da praia, e num dado trecho da praia corresponde ao resultado do balanço entre a adição e a remoção dos sedimentos (Rosati, 2005). O balanço de sedimentos flutua em um determinado intervalo de tempo, principalmente sob influência de tempestades. Enquanto que o estoque de sedimentos pode ser quantificado, a taxa de suprimento para um intervalo de tempo é muito difícil de ser calculada, principalmente pelas incertezas existentes no cálculo da deriva litorânea, e deste modo a quantidade total de sedimentos envolvida no balanço sedimentar. O superávit ocorre pela maior adição e menor remoção de sedimentos. Por outro lado, o déficit ocorre pela maior remoção e menor adição de sedimentos. O primeiro processo tem como resultado o avanço da linha de praia pela deposição de sedimentos, e o segundo, a retração ou erosão da linha de praia.

O litoral do Rio Grande do Sul não recebe contribuição de areias atualmente, pois toda a carga de tração da rede de drenagem interior fica retida nas lagunas e outros ambientes costeiros, como por exemplo, a Lagoa dos Patos e a Lagoa Mirim. Desta maneira o principal componente controlador do balanço sedimentar em escala de tempo de curto prazo, sem considerar as variações relativas do nível do mar, é a ação mecânica das ondas. A incidência oblíqua de ondas na costa é responsável pela geração de correntes paralelas a ela, ou correntes longitudinais, motivo pelo qual o estudo dos parâmetros ondulatórios atuantes no nosso litoral se torna indispensável. Airy propôs em 1845 a teoria de ondas lineares e desde então ela foi aplicada no

estudo de ondas oceânicas e de processos costeiros por apresentar respostas coerentes para as características das ondas em uma série de parâmetros ondulatórios. Esta teoria assume que o fluido é homogêneo e incompressível, as tensões superficiais podem ser desconsideradas, o efeito de coriolis é desprezível, a pressão na superfície do fluido é uniforme e constante, o fluido é ideal (sem viscosidade) e as partículas de água não sofrem rotação. Com a aplicação da teoria de ondas lineares os parâmetros ondulatórios obtidos para águas profundas foram transferidos para as condições no ponto de rebentação das ondas, onde são geradas as correntes longitudinais, para posteriormente serem calculadas as taxas de deriva litorânea.

Para calcular o balanço de sedimentos em um determinado trecho costeiro devemos identificar as possíveis fontes e depósitos, estimando quanto é adicionado e removido a cada ano.

1.3 HIPÓTESES

A distribuição das direções da corrente litorânea ao longo de toda à costa é muito regular, tanto para SW, quanto para NE, num padrão claramente bidirecional (NICOLODI *et al.*, 2003), porém o transporte sedimentar associado as correntes longitudinais de SW são mais expressivos que os de NE por serem resultantes, na maioria dos casos, com a passagem de frentes frias. Também se pode afirmar que a bidirecionalidade tem uma componente sazonal governada pelas variações dos parâmetros climáticos. Nos meses de Outubro a Março é marcante o predomínio de correntes para SW, e entre Maio e Agosto esse domínio é para NE. A deriva litorânea resultante no litoral médio do Rio Grande do Sul é para NE devido à maior intensidade das correntes longitudinais vindas de SW.

Com a utilização de imagens de satélite ASTER, com modelo de elevação do terreno, e LandSat é possível quantificar o estoque de sedimentos arenosos presente nos reservatórios que se desenvolvem no campo de dunas costeiras.

O litoral médio pode ser dividido em grandes segmentos de retas com alinhamento semelhante. Nas praias de Mostardas e Dunas Altas estes alinhamentos sofrem inflexão da ordem de 10° a 12° o que gera um acúmulo de sedimentos devido à

perda da capacidade de transporte nestes trechos ocasionado pelas mudanças no ângulo da praia. Parte do sedimento transportado de segmentos mais ao sul é depositada nestas áreas de inflexão e parte é redirecionada para a antepraia para formar os bancos submersos de areia presentes nestes locais.

Como o litoral do Rio Grande do Sul, atualmente, não recebe contribuição de areias das áreas fontes continentais, as áreas fontes da própria zona costeira produzem a quantidade de sedimentos necessária para a construção dos depósitos de sedimentos encontrados nos sumidouros?

Os ambientes classificados como fontes ou sumidouros de sedimentos apresentam geindicadores de taxas de erosão ou deposição, respectivamente?

Os mecanismos de transporte por deriva litorânea e do transporte eólico são efetivos para o balanço de sedimentos entre as áreas fontes e sumidouros de sedimentos?

1.4 OBJETIVOS E METAS

O objetivo deste trabalho é realizar o balanço de sedimentos arenosos do litoral médio do Rio Grande do Sul para se identificar os trechos de erosão e deposição de sedimentos arenosos além de estimar o tempo e a intensidade com que atuam os processos costeiros responsáveis pela erosão, transporte e deposição destes sedimentos. Foi também estimado o volume de areia contido no campo de dunas costeiras, além das taxas de deriva litorânea.

1.5 ESTADO DA ARTE

De acordo com CERC (1984), por volta de 1950, foi criado o conceito de balanço de sedimentos com o objetivo de conhecer a magnitude e a direção do transporte de sedimentos para uma determinada região de interesse dentro de um determinado intervalo de tempo. O balanço de sedimentos, aplicado a zonas costeiras, é uma valiosa ferramenta na investigação de mudanças observadas na costa, assim como na previsão de futuros cenários, possibilitando desta maneira, alternativas no seu manejo.

O CERC (1984) foi um extenso trabalho realizado pelo *U.S Army Corps of Engineers*, referência internacional na aplicação de técnicas e métodos sobre os estudos de problemas costeiros. Dele foram extraídos trabalhos considerados basilares na área de processos costeiros.

Diversos estudos têm sido realizados aplicando o conceito de balanço de sedimentos, principalmente nos Estados Unidos. Em um dos primeiros trabalhos realizados aplicando este conceito, Savage (1962) reuniu dados a partir de estudos de campo e de laboratório para desenvolver a equação matemática que mais tarde foi adotada pelo *U.S Army Corps of Engineers* para a criação do *Coastal Design Manual*, em 1966, que ficou sendo conhecida como “CERC formula” ou método do fluxo de energia. Esta fórmula para o transporte litorâneo de sedimentos mais tarde foi modificada, baseada nas relações de transporte e em dados de campo publicados por Komar e Inman’s (1970). Esta é a metodologia utilizada pelo *Shore Protection Manual* (1984).

Caldwell (1966) desenvolveu um balanço regional de sedimentos para a costa norte de New Jersey. Através deste estudo foi possível identificar divergência nas direções das correntes de deriva litorânea na cidade de Mantoloking, localizada a norte de Dover Township.

Bowen e Inman (1966) introduziram o conceito de células litorâneas no balanço de sedimentos, aplicado na costa sul da Califórnia, pelas evidentes fontes (fluxo do rio e erosão das falésias) e sumidouros de sedimentos (*canyons* submarinos), além da geologia costeira (costões rochosos) que limita bem fisicamente cada célula. Uma célula litorânea pode também ser definida como uma região limitada por diferentes condições de transporte ou ainda por obras de engenharia.

Outro trabalho pioneiro de pesquisa seguindo esta linha foi o de Jarrett (1977, 1991), que desenvolveu um balanço regional de sedimentos arenosos para a costa da Carolina do Norte, incluindo três ilhas costeiras e dois *inlets*.

Jarrett (1977, 1991) utilizou as mudanças do perfil praias medidas em campo, para corrigir os valores das taxas potenciais de deriva litorânea calculadas a partir do método do fluxo de energia.

Kana e Stevens (1992) desenvolveram e introduziram o modelo de balanço conceitual de sedimentos. Eles recomendam que esta metodologia seja utilizada nas etapas de planejamento, para detalhar e estimar as fontes e os sumidouros de sedimentos de uma determinada região. O balanço conceitual de sedimentos é um modelo qualitativo que dá uma perspectiva regional da interação de *inlets*, praias e processos costeiros, considerando os efeitos na batimetria e incorporando os indicadores geomorfológicos de deriva litorânea.

Bodge (1993) desenvolveu trabalhos focados em *inlets* e em praias adjacentes e enfatizou a importância de se considerar tanto as taxas brutas como as líquidas de deriva litorânea, especialmente em *inlets* e praias que agem como sumidouros de sedimentos.

Lima (2001) utilizou os dados de ondas provenientes de embarcações para, através do método do fluxo de energia, calcular as estimativas das taxas de deriva litorânea para o litoral do Rio Grande do Sul.

Rosati (2005) revisou os principais conceitos para a realização do balanço de sedimentos em zonas costeiras. Neste trabalho se ressalta os principais desafios no seu desenvolvimento, como estabelecer os limites de cada célula, definir a magnitude dos processos responsáveis pela adição e remoção de sedimentos para dentro ou para fora de cada célula, representar as incertezas associadas aos valores assumidos para o balanço sedimentar e testar a sensibilidade do balanço sedimentar ao longo do tempo.

Lopes (2008), baseada em um conjunto de mosaicos de fotos aéreas, atualizou as taxas de mobilidade da linha de praia estabelecidas por Toldo (1999), para mapear as zonas de acreção e erosão do Litoral Médio e Norte do Rio Grande do Sul.

Toldo (2006) propôs um modelo de sedimentação costeira no Litoral Médio do Rio Grande do Sul aplicado a progradação do campo de dunas costeiras e da antepraia na região de Mostardas e Dunas Altas controlados pela deriva litorânea devido às inflexões da linha de costa nestas áreas.

1.6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa do trabalho serão descritas sucintamente as principais teorias utilizadas para a realização do presente estudo.

1.6.1 Propagação de ondas oceânicas

A propagação de ondas oceânicas é objetivo de estudo de diversos pesquisadores desde muito tempo devido a sua relativa fácil observação e, principalmente, ao seu conseqüente efeito na costa. A formação de ondas no oceano ocorre devido à transferência de energia dos ventos, através da superfície da água, e está diretamente relacionada com a intensidade do vento, ao seu tempo de duração e ao tamanho da pista onde ele atua.

Diversas teorias foram formuladas tentando explicar o fenômeno de propagação destas ondas e a mais simples e que melhor se aplica no estudo da dinâmica costeira é a teoria de ondas lineares desenvolvida por Airy (1845). À medida que a onda se distancia da zona de geração e se aproxima da costa suas características sofrem mudanças, ocasionadas principalmente pelas diferenças na batimetria. Entre os principais fenômenos de interesse para este trabalho está a refração das ondas, ocasionada pela diminuição da profundidade e conseqüente atrito com o fundo, reduzindo sua velocidade de propagação e seu comprimento, o que ocasiona mudança na sua direção e aumento na altura, fazendo com que ela tenda a quebrar paralela à linha de praia (figura 1). Outra importante característica é a quebra da onda, fundamental para a geração das correntes litorâneas. Isto se deve pela aproximação das ondas com a costa e conseqüente aumento da sua esbeltez, associada com o aumento do componente horizontal de suas velocidades orbitais. A partir do ponto de rebentação a maior parte da energia propagada pela onda é dissipada e é nesta zona que se desenvolvem as principais correntes litorâneas responsáveis pelo transporte sedimentar no litoral médio do estado.

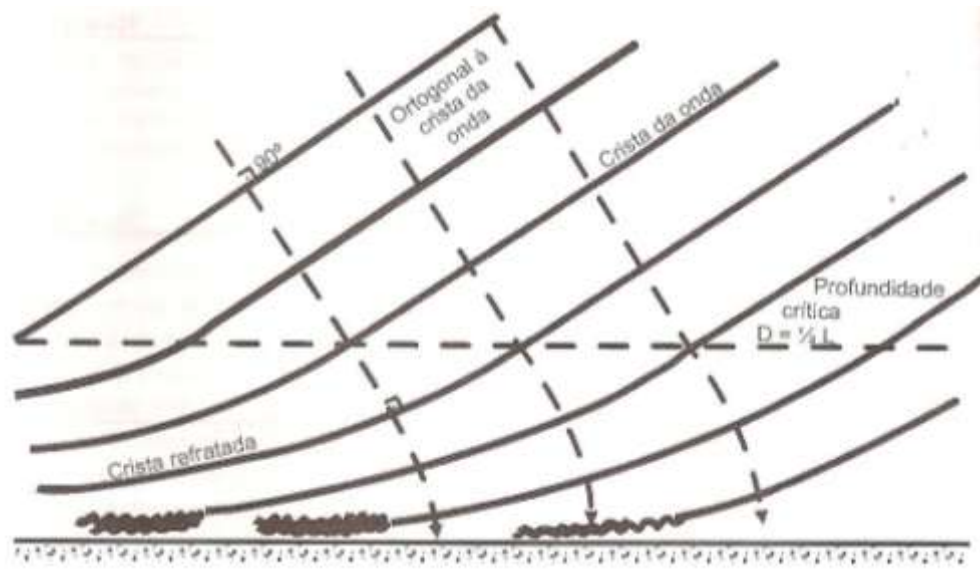


Figura 1: padrão de refração de ondas com incidência oblíqua considerando as linhas batimétricas paralelas à praia, onde D = profundidade (m), L = comprimento da onda (m). Fonte: Introdução à geologia marinha, Baptista Neto, 2004.

1.6.2 Transporte longitudinal de sedimentos

Destacam-se como agente de transporte no litoral médio do Rio Grande do Sul as correntes paralelas à praia, ou correntes longitudinais, ou ainda, correntes de deriva litorânea devido à grande extensão da costa e a ausência de desembocaduras, promontórios rochosos, cânions submarinos ou obras de engenharia. Estas correntes se formam pela incidência oblíqua das ondas e são geradas na zona de rebentação, fotografia 1. Existem diversas equações para estimar o volume de sedimentos transportado através destas correntes e neste trabalho foi utilizado o método do fluxo de energia. O volume de sedimentos transportado a partir destas correntes está diretamente relacionado com o ângulo de incidência das ondas, atingindo valores máximos de transporte próximo ao ângulo de 45° e também com a energia, ou potência, das ondas. As estimativas sobre os volumes transportados a partir destas correntes podem subestimar ou superestimar os valores reais, sendo necessário, na maioria dos casos, compará-los com dados medidos em campo. A obtenção das estimativas de deriva litorânea devem ser realizadas a partir de uma série histórica

consistente de parâmetros ondulatórios a fim de realizar uma relação empírica consistente entre o peso submerso dos sedimentos e a capacidade de transporte das ondas incidentes na costa. Entre as principais variáveis para a obtenção das taxas de transporte longitudinal se destacam o ângulo de incidência das ondas, a altura significativa e o período significativo.



Fotografia 1: Desenvolvimento da corrente e deriva litorânea dentro da zona de surfe ao longo da praia de Capão da Canoa. Fonte: Sidnei Zomer.

1.6.3 Sistema multiespectral de imageamento (ASTER)

O ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) é um sensor multiespectral de imageamento a bordo do satélite TERRA, lançado no ano de 1999 como parte do programa *Earth Observing system* (EOS) da NASA. Ele é equipado com três subsistemas com diferentes resoluções espectrais e espaciais, tanto com bandas no visível e infravermelho próximo (VNIR), como no infravermelho de ondas curtas (SWIR) e infravermelho termal (TIR). Os dados com elevação do terreno são obtidos a partir de sensores multiangulares em que câmeras permitem que sejam obtidas simultaneamente imagens com visada para frente e para trás.

Em junho de 2009 foram disponibilizadas gratuitamente todas as imagens ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) para *Download* com dados de altimetria do mundo todo (Hugenholtz, C. H e Barchyn, T. E., 2010). Contudo é necessário observar se há anomalias antes de trabalhar com estas imagens e também é aconselhável calibrar os dados obtidos através delas com dados medidos em campo.

1.7 ÁREA DE ESTUDO

O estado do Rio Grande do Sul tem uma extensa costa, classificada como um sistema deposicional do tipo laguna barreira, com orientação uniforme NE-SW e leve sinuosidade ao longo dos seus 615km. Toda esta extensão é constituída por depósitos quaternários inconsolidados que não recebem contribuições modernas de areias, pois toda carga de tração transportada pela rede de drenagem interior é retida nas lagunas e outros ambientes costeiros como, por exemplo, a Lagoa dos Patos e a Lagoa Mirim (Martins *et al.* 1973; Tomazelli e Villwock 1992; Toldo *et al.* 2006).

A plataforma continental tem a largura de 150 a 200km, atingindo profundidades máximas da ordem de 100 a 140m, possuindo declividades que variam entre 0,5 a 1,5m/km (Martins e Corrêa, 1996). Os sedimentos do sistema praias são areias finas bem selecionadas ($Mz = 0,2mm$) (Martins, 1967; Martins e Corrêa, 1996; Siegle, 1996; Nicolodi *et al.* 2002; Gruber, 2002), exceto ao longo de 60km no Litoral Sul onde ocorrem sedimentos bimodais devido à presença de cascalho biodetrítico (Calliari e Klein, 1993).

A incidência de ondas é caracterizada por um comportamento sazonal, pois durante o outono e inverno ocorrem fortes ondulações geradas no Oceano Atlântico Sul, associadas com a passagem de frentes frias provenientes de S e SE, e durante o verão e a primavera ocorrem vagas geradas pelos fortes ventos locais de NE. Exceto pela passagem destas frentes frias, a agitação marítima é caracterizada por ondas de média a elevada energia, com altura significativa de 1,5m e período entre 7 e 9 segundos. A maré astronômica é semi-diurna, com amplitude média de 0,25m, sendo que a maré meteorológica pode alcançar 1,20m (Almeida *et al.* 1997). Com base em

dois conjuntos de dados de onda coletados nos anos de 1963 e 1996 no Litoral Norte do estado, a profundidade de fechamento foi estimada em 7,5m (Almeida *et al.* 1999). Desta maneira o transporte e a deposição de sedimentos são controlados principalmente pela ação das ondas e pelas correntes litorâneas associadas a elas. As correntes longitudinais, responsáveis pela deriva litorânea, possuem um padrão bidirecional para NE e SW, porém a intensidade e o volume de sedimentos transportados para NE é mais significativa, pois muitas vezes está associada com a passagem de frentes frias provenientes de S e SE.

Os sedimentos da área de estudo possuem granulometria homogênea e são caracterizados por areias finas com concentrações de carbonatos muito baixas, variando entre 0,2 e 0,5%, porém a concentração de minerais pesados varia bastante devido às diferentes características hidrodinâmicas da região, atingindo valores de no máximo 40% (Nicolodi, *et al.* 2002).

O estudo se concentra no Litoral Médio, entre a desembocadura da Lagoa dos Patos (km 220) e Dunas Altas (km 495), numa extensão aproximada de 275km, como ilustra a figura 2.

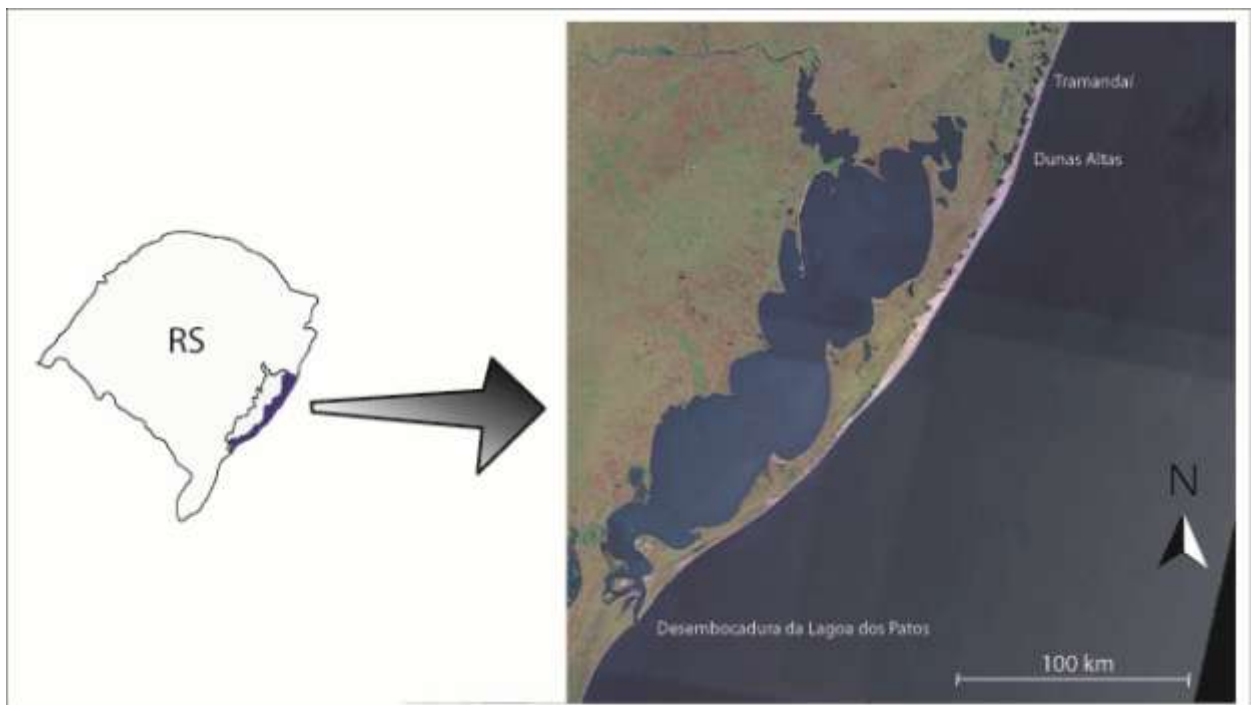


Figura 2: litoral médio do Rio Grande do Sul definido entre a desembocadura da Lagoa dos Patos e a praia de Dunas Altas.

2 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

As metodologias adotadas para a realização deste trabalho foram divididas em quatro subitens.

2.1 Divisão do litoral em células litorâneas

A área de estudo compreende o Litoral Médio do estado, limitada ao sul e ao norte pela desembocadura da Lagoa dos Patos e a praia de Dunas Altas, numa extensão aproximada de 275 km. Através da análise das variações do alinhamento da praia por imagens LandSat o litoral médio foi dividido em 12 células litorâneas, numa adaptação ao modelo de ROSATI e KRAUS (2001), figura 3. A partir das variações dos ângulos da linha de praia em relação ao norte a área de estudo foi dividida em segmentos de reta com mesma orientação. O ângulo de cada segmento foi obtido através de trigonometria a partir das coordenadas UTM X e Y dos dois pontos que o compõe, sendo o ponto mais ao sul o limite de barlamar e o ponto mais ao norte o limite de sotamar de cada célula. Além disso, utilizando as taxas de deriva litorânea elas foram classificadas como fonte ou sumidouro de sedimentos. As células que possuem maior componente erosional foram classificadas como fonte de sedimentos arenosos e as células que possuem maior componente deposicional foram classificadas como sumidouro de sedimentos.

Os limites costeiros e oceânicos foram estabelecidos pelo pé da duna frontal e pela profundidade de fechamento, respectivamente. Os parâmetros controladores do balanço de sedimentos foram estabelecidos pelo mecanismo e agente de transporte de sedimentos, cada qual com um atributo de adição ou remoção de sedimentos, para dentro ou para fora de cada célula.

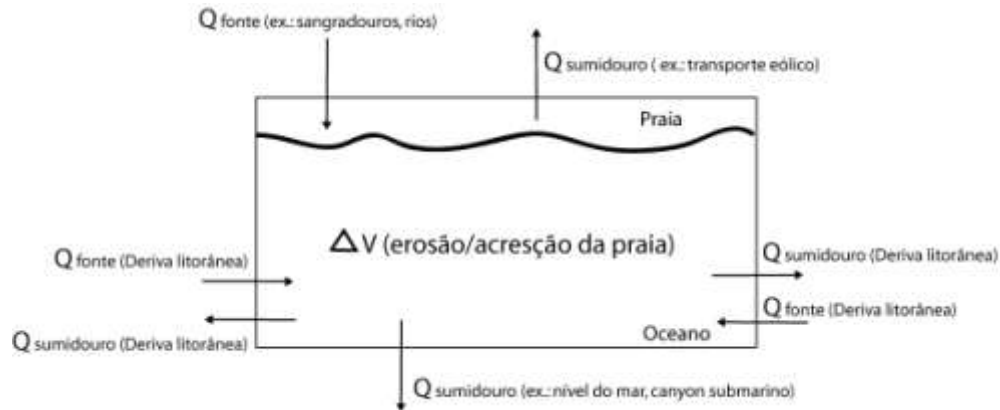


Figura 3: Exemplo de célula litorânea. Fonte: CERC, 1984

2.2 Transferência dos parâmetros ondulatórios para o ponto de rebentação

Os parâmetros ondulatórios necessários para o cálculo das taxas de deriva litorânea foram obtidos pelo modelo global de previsões de ondas da NOAA/NCEP WAVEWATCH III (Tolman, 1997, 1999) no ponto mais próximo a praia de Tramandaí, com dados entre os anos de 1998 e 2009, disponíveis para *download* através do endereço eletrônico <http://polar.ncep.noaa.gov/waves>. Este modelo gera dados de altura e período significativos, além da direção das ondas, utilizando como dados de entrada os registros de vento da NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*). Os dados são gerados em intervalos de três horas, as 00:00h, 03:00h, 06:00h, 09:00h, 12:00h, 15:00h, 18:00h e 21:00h durante todos os dias entre os anos de 1998 e 2009 e são a base para as estimativas do volume transportado pela deriva litorânea.

Como são necessários os parâmetros de onda no ponto de quebra das ondas os dados obtidos pelo modelo WAVEWATCH III para águas profundas devem ser transferidos para as condições no ponto de rebentação das ondas. Para tanto foi aplicada a teoria de ondas lineares utilizando a metodologia sugerida por Herbich (2000) que segue a seguinte sistemática:

A) estimar a altura da onda em águas profundas, sem influência da refração

$$H'_0 = H_0 K_r$$

$$\text{usando } K_r \cong \sqrt{\cos \alpha_0}$$

onde: α_0 é o ângulo de incidência da onda em águas profundas; K_r é o coeficiente de refração e H_0 é a altura da onda em águas profundas.

B) estimar a altura da onda no ponto de rebentação

$$H_r = 0,76 * tg\beta^{1/7} \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{-1/4} (\cos \alpha_0)^{3/8} H'_0$$

onde: $tg\beta$ é a declividade da praia e L_0 é o comprimento da onda em águas profundas

C) estimar a profundidade no ponto de rebentação

$$d_r = \frac{H_r}{b - a \frac{H_r}{gT^2}}$$

$$\text{Onde: } a = 43,75(1 - e^{-19tg\beta}) \quad \text{e} \quad b = \frac{1,56}{1 + e^{-19tg\beta}}$$

D) estimar o comprimento de onda na rebentação

$$L_r = \sqrt{2\pi d_r L_0} \left(1 - \frac{\pi d_r}{3L_0} \right)$$

E) estimar o ângulo de incidência da onda na linha de rebentação

$$\frac{\text{sen}\alpha_r}{L_r} = \frac{\text{sen}\alpha_0}{L_0}$$

onde: α_r é o ângulo de incidência da onda na rebentação

F) estimar o coeficiente de refração para α_r

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_r}}$$

Após a obtenção do coeficiente de refração se retorna ao primeiro passo e se realiza uma interação para melhor aproximação dos resultados.

O somatório de dados de previsão de ondas que foram disponibilizados pela NOAA, e gerados pelo modelo matemático WAVEWACHTIII, entre os anos de 1998 e 2009 contabilizaram mais de 35 mil registros referentes aos parâmetros ondulatórios em águas profundas, nas proximidades da praia de Tramandaí. A comparação destes dados com aqueles registrados pelo ondógrafo waverider, fundeado em águas rasas nesta praia entre os anos de 2006 e 2007, demonstram razoável correlação linear, tanto para os valores de altura como dos períodos significativos, como demonstram os gráficos 1 e 2. No entanto ao se analisar a dispersão dos valores de direção percebe-se claramente que podemos separar os dados em dois grupos distintos, de acordo com o quadrante de proveniência, os provenientes dos quadrantes S-SE, daqueles de N-NE, sempre em relação ao alinhamento da praia de Tramandaí, como mostra o gráfico 3.

Com valores razoáveis de correlação entre os dados do modelo WAVEWACHTIII, e aqueles medidos pelo ondógrafo waverider em Tramandaí, estipulamos que os parâmetros ondulatórios obtidos através do modelo matemático são representativos e válidos para serem aplicados na análise hidrodinâmica nesta região do litoral.

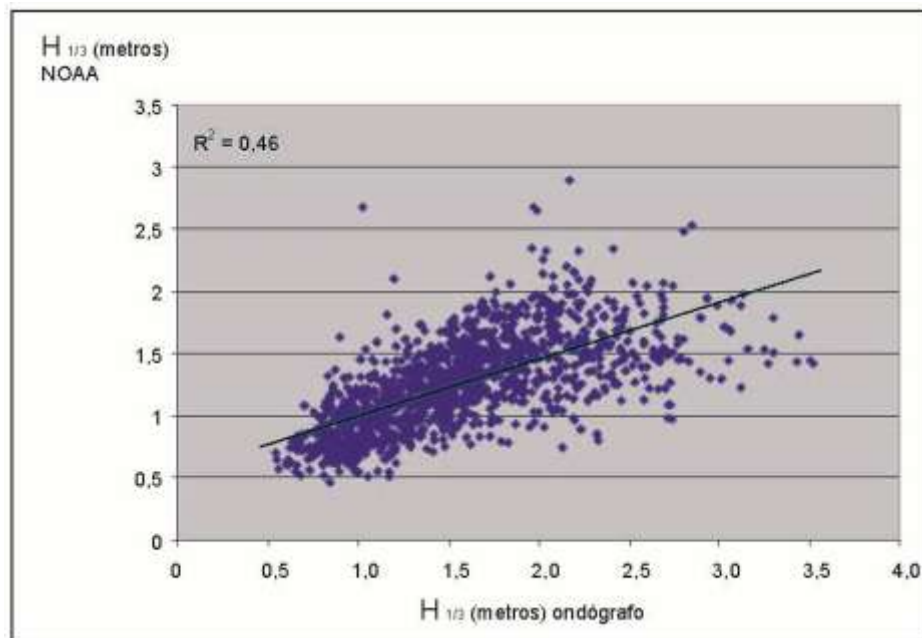


Gráfico 1. Gráfico de dispersão das alturas significativas ($H_{1/3}$) obtidas pelo ondógrafo e pelo modelo WAVEWACHTIII da NOAA para o mesmo período.

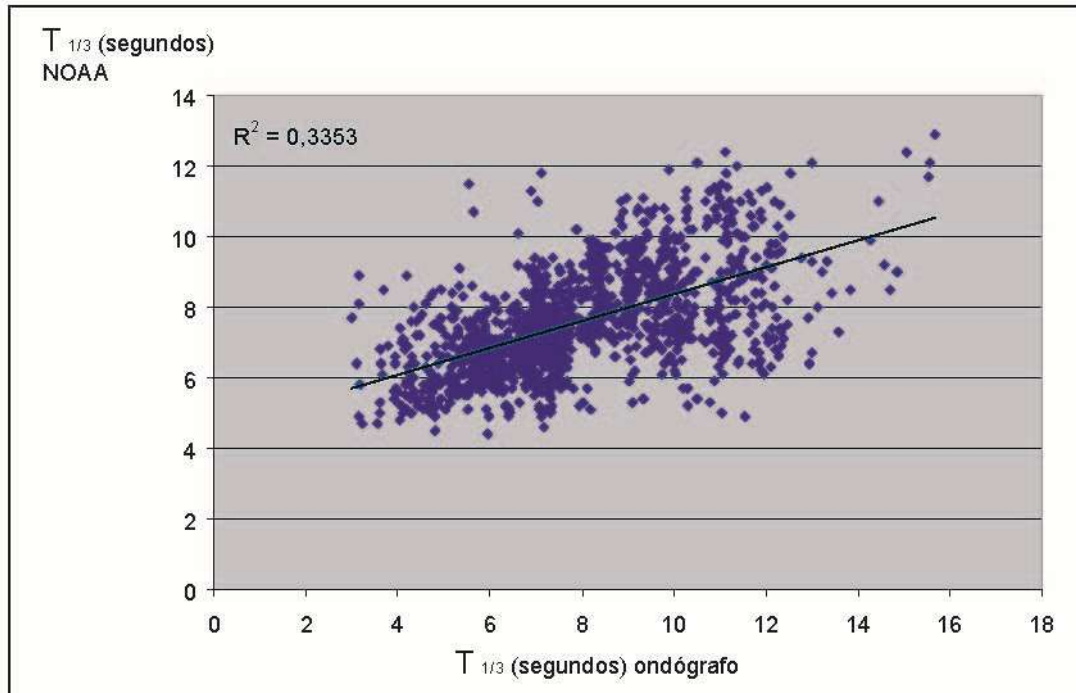


Gráfico 2: gráfico de dispersão dos períodos significativos ($T_{1/3}$) obtidos pelo ondógrafo e pelo modelo WAVEWACHTIII da NOAA para o mesmo período.

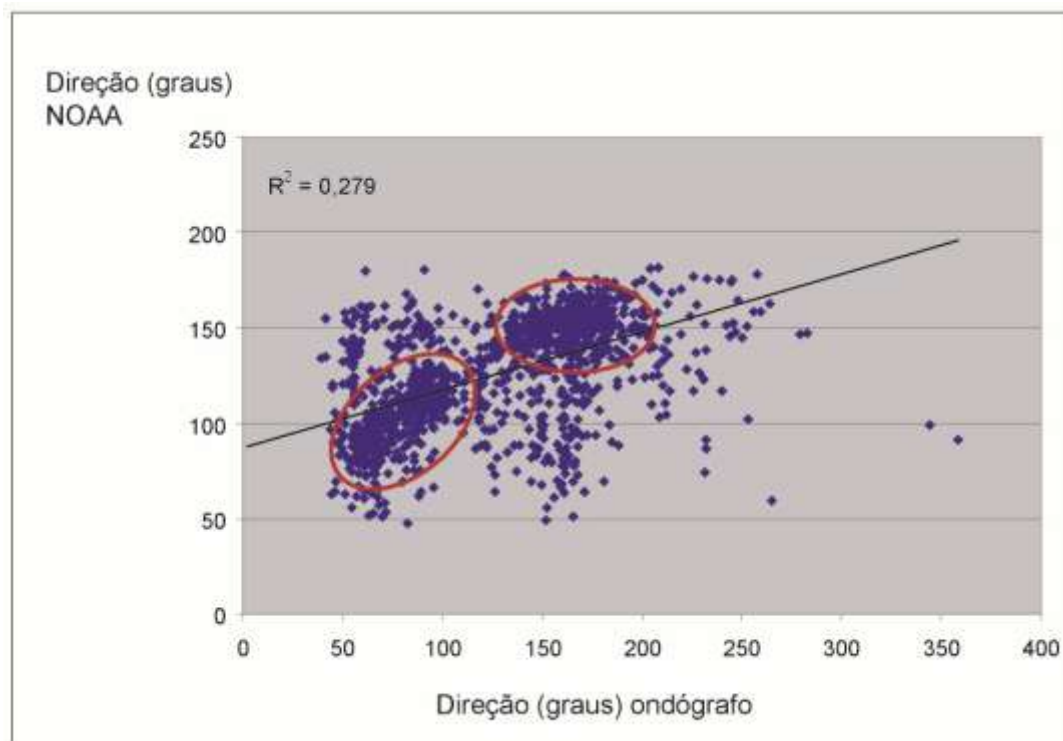


Gráfico 3: gráfico de dispersão das direções obtidas pelo ondógrafo e pelo modelo WAVEWACHTIII da NOAA no mesmo período. Nota-se claramente o agrupamento de duas populações entre as direções provenientes de norte-nordeste e sul-sudeste.

2.3 Estimativa das taxas de deriva litorânea

Utilizando o método do fluxo de energia (Sayao,1982; Komar e Inman, 1970), o mesmo utilizado pelo *Shore Protection Manual (1977,1984)*, foi quantificado o volume de sedimentos transportados no litoral médio. Esta metodologia é amplamente utilizada nos Estados Unidos desde a década de 30, aplicada pelo corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos, apresentando resultados muito coerentes com observações feitas em campo. O *Shore Protection Manual (1984)* foi um extenso trabalho realizado pelo *U.S Army Corps of Engineers*, referência internacional na aplicação de técnicas e métodos sobre os estudos de problemas costeiros.

A equação matemática utilizada e que descreve o volume de sedimentos transportados pelas correntes longitudinais é:

$$Q = 0,025 H_r^2 \sqrt{g d_r} \sin(2\alpha_r)$$

onde: “Q” é o volume, em metros cúbicos, de sedimentos transportados por segundo; “ H_r ” é a altura da onda no ponto de rebentação; “ α_r ” é o ângulo de incidência da onda no ponto de rebentação; “g” é a aceleração da gravidade e “ d_r ” é a profundidade no ponto de rebentação.

2.4 Estimativa do volume e do tempo de formação do campo de dunas

Para estimar a quantidade de sedimentos presente no campo de dunas costeiras foi utilizado o *software* de sensoriamento remoto *Global Mapper 11* e imagens Aster, com resolução espacial de 30m e altimétrica de 1m, sobrepostas por imagens Landsat, que auxiliaram na identificação dos limites de cada campo. As incertezas envolvidas nestas estimativas foram obtidas com a realização de um levantamento planialtimétrico que foi utilizado para calcular o volume de areia contido em uma determinada área. Este volume foi então comparado com o encontrado na mesma área através do *software Global Mapper 11*. O levantamento planialtimétrico foi realizado utilizando um

sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS). Foram utilizados dois GPS modelo GR3 da Topcon de dupla frequência que funcionaram no modo cinemático, coletando coordenadas e altitude a cada cinco segundos. A correção dos pontos foi realizada na etapa pós campo, durante o processamento dos dados, a partir da estação base RBMC de Porto Alegre e o programa pós processamento utilizado foi o Topcon Tools com precisão centimétrica tanto para a altitude como para as coordenadas planas. A obtenção da altitude ortométrica foi a partir do programa Mapgeo 2010 do IBGE.

Os erros e imprecisões referentes às estimativas do volume de sedimentos nestes reservatórios foram estipulados a partir de um levantamento planialtimétrico em uma área não urbanizada na praia de Cidreira. Neste levantamento foi delimitada com detalhe uma duna com aproximadamente trinta 1.000 m^2 . No campo, foram obtidos 1.717 pontos com coordenadas planares e altitude, como mostra a figura 4.

No pós-processamento foram observados erros verticais e horizontais máximos de 15,43 cm e 15 cm, respectivamente. O volume de areia contido na duna foi calculado através dos dados de campo, corrigidos e posteriormente integrados com o *Software Surfer 9*. O resultado encontrado através deste procedimento foi de 393.498,6 m^3 , enquanto que o volume estimado a partir do Global Mapper 11, na mesma área, foi de 332.676,2 m^3 . Portanto, uma diferença para menos de 15,46%, que corresponde ao erro das medidas estimadas através do Global Mapper.

A partir das estimativas das taxas de deriva litorânea foi calculado o tempo necessário para a acumulação dos volumes de areia encontrados em cada célula, considerando que estas taxas não sofreram alteração nos últimos anos.

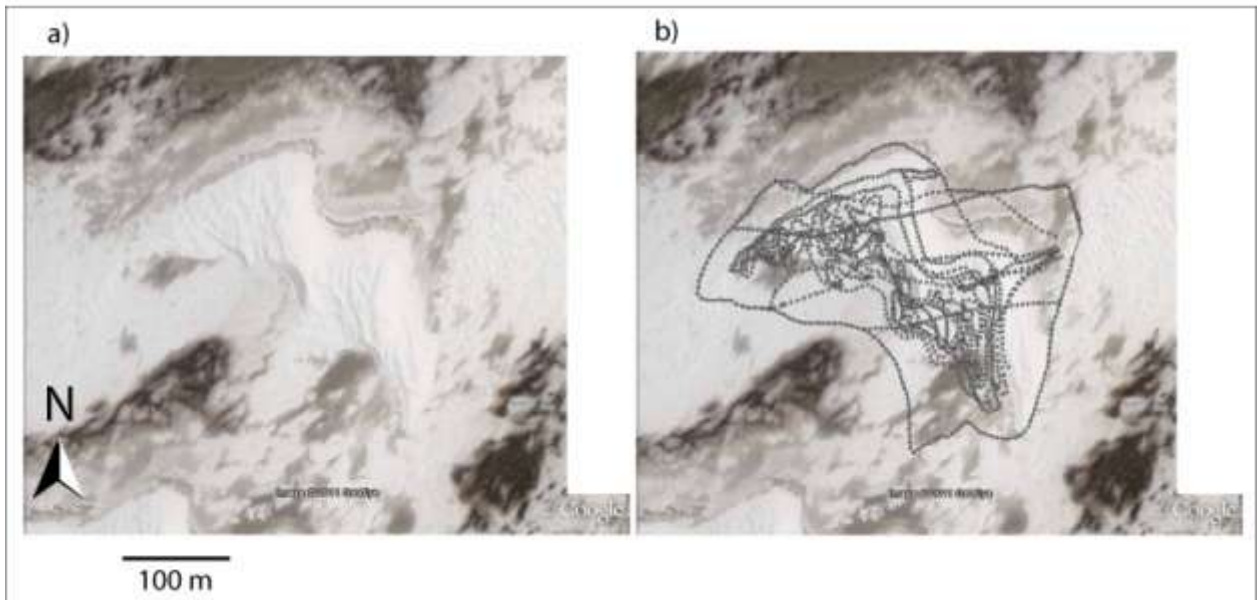


Figura 4: a) Duna sem os pontos, em uma área não urbanizada na praia de Cidreira. b) malha de pontos a onde foi realizado o levantamento planialtimétrico. Fonte: Google Earth.

3 RESULTADOS

Os resultados obtidos foram subdivididos em itens, como adotado no capítulo de metodologia, para melhor entendimento.

3.1 Divisão do Litoral Médio

Com base no critério de mudança da orientação no alinhamento das praias do litoral médio, medidas em imagens LandSat, foi possível dividir toda a extensão em 12 células litorâneas. Os alinhamentos variaram bastante, podendo ser observados ângulos da ordem de 18° na porção mais ao norte do litoral, até 57° na região mais ao sul, como ilustra a figura 5.

Os ângulos foram medidos através de trigonometria a partir das coordenadas UTM X e Y entre os pontos que compõem cada célula.

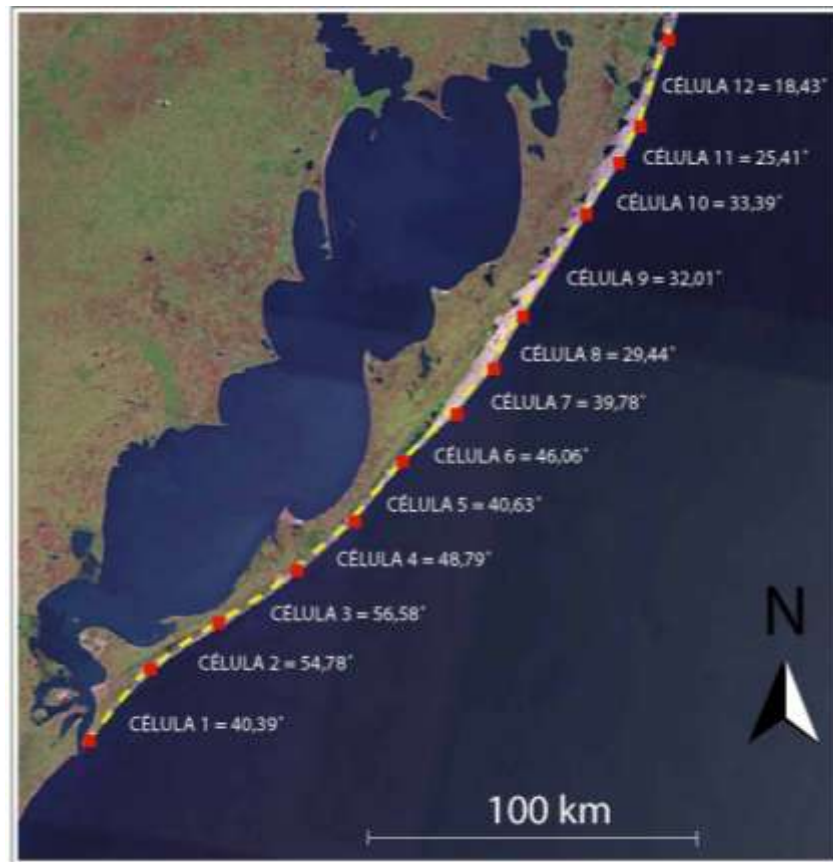


Figura 5: Divisão do Litoral Médio em células litorâneas e seus respectivos ângulos de alinhamento.

3.2 Volume de areia no Campo de Dunas

Com o auxílio das imagens ASTER, LandSat e do *software* Global Mapper 11 foi delimitado e, também, quantificado o volume de areia do campo de dunas costeiras do litoral médio. Este imenso depósito de sedimentos é um importante reservatório de areia e se apresenta sem descontinuidades entre as células costeiras. Porém foi possível observar que nas zonas de inflexão mais expressiva do alinhamento praiial, entre as células 6 a 8, e entre as células 10 a 12 (Fig. 5), ocorre um sensível alargamento do campo, e portanto um maior volume de areia nestes trechos. Por causa destas características não foram estendidos os limites das células litorâneas sobre o campo de dunas.

No campo de dunas costeiras as células 1, 2, 3, 4, 5, células 6, 7, 8, célula 9 e finalmente as células 10, 11 e 12, foram unidas em quatro novos arranjos, denominados trechos litorâneos (figura 6). Ou seja, a divisão do campo de dunas foi definida com base na sua largura, por exemplo, no primeiro e o terceiro agrupamentos de células se observa um estreitamento do campo de dunas, enquanto que nos demais ocorre um alargamento, como se verifica nas células 6, 7, 8 e 10, 11, 12, onde também a linha de costa sofre significativa inflexão na sua orientação.

O trecho 2 foi o que apresentou o maior volume de areia com 2.007.894.829,05 m³, seguido pelo trecho 4 com 827.567.770,28 m³, trecho 3 com 743.418.571,76 m³ e finalmente o trecho 1 com 620.687.414,40 m³. O volume total de areia no litoral médio, representado pela soma dos 4 trechos litorâneos é de 4.199.568.589,49 m³.

Os valores relativos ao volume total de sedimentos são ilustrados na figura 6. Já a divisão dos quatro trechos do campo de dunas costeiras é ilustrada pela figura 7.

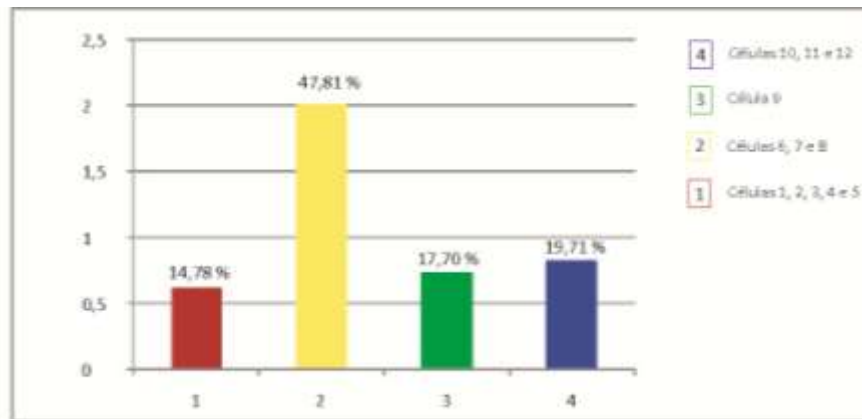


Figura 6: volume relativo de sedimentos do campo de dunas costeiras para cada trecho litorâneo ($m^3 \times 10^9$).

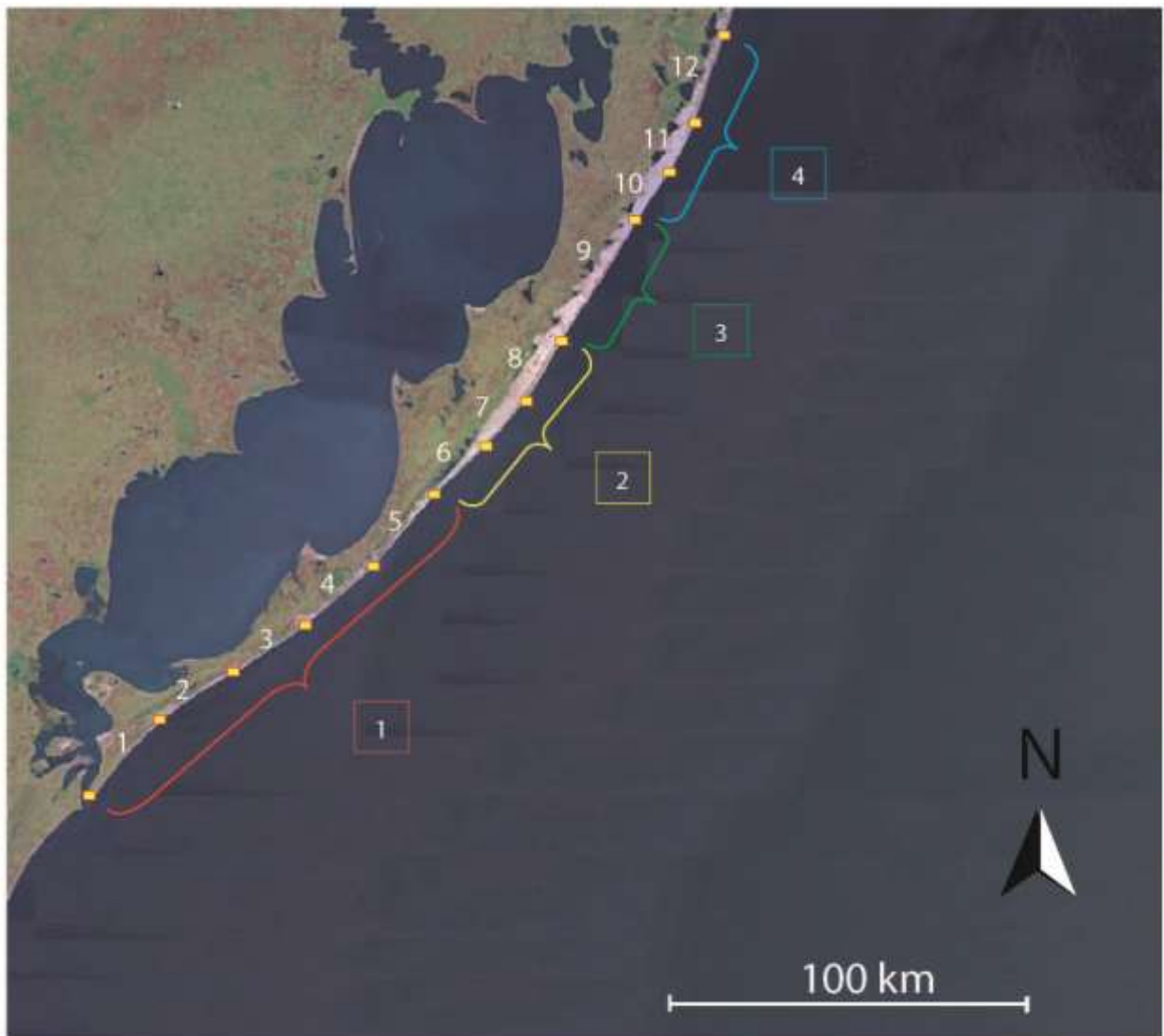


Figura 7: agrupamento das 12 células litorâneas em 04 trechos litorâneos.

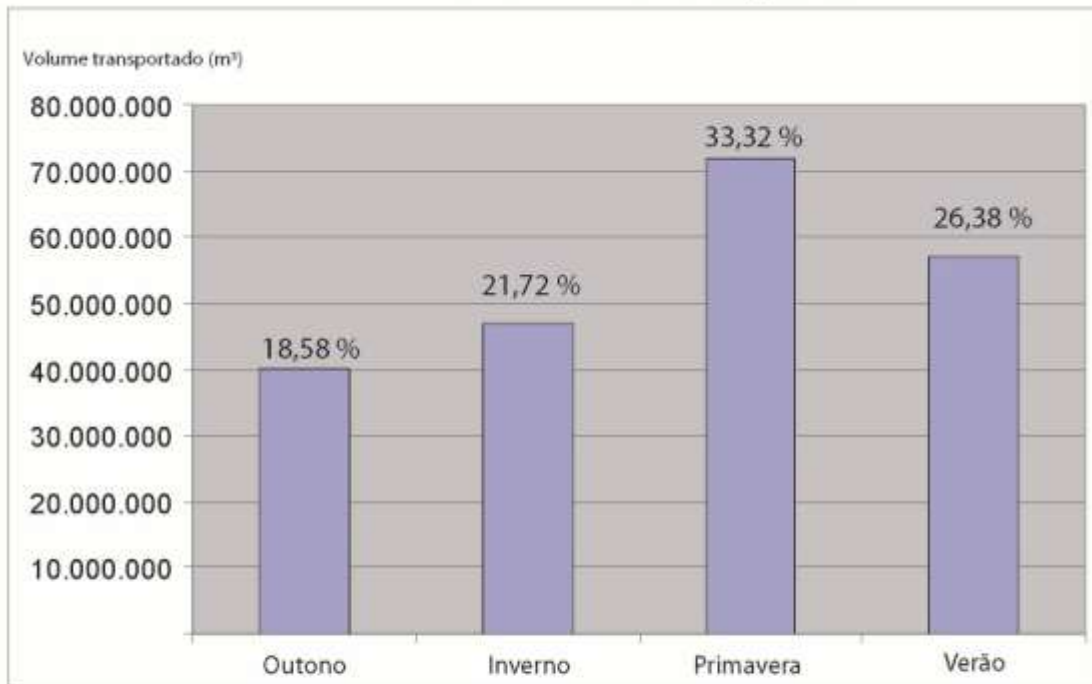
3.3 Volumes da Deriva Litorânea

A análise da deriva litorânea foi conduzida com base no banco de dados de onda gerados pela NOAA, conforme detalhamento apresentado no capítulo 2. Os parâmetros ondulatórios foram transferidos de águas profundas, para águas rasas, no local de fundeio do ondógrafo a 17 m de profundidade, na praia de Tramandaí (figura 2) e também para o ponto de quebra da onda de cada uma das 12 células litorâneas, o que possibilitou o cálculo da deriva litorânea total em cada célula, para SW e NE, bem como a deriva líquida, entre 1998 e 2009.

Os volumes transportados para NE variaram de 1,1 milhões até 2,9 milhões de m^3 , e os volumes transportados para SW entre 0,5 milhões e 2,4 milhões de m^3 . Os resultados do cálculo da deriva total anual, para NE e SW, são apresentados na tabela 1. Em todas as células litorâneas é marcante o predomínio da deriva líquida para NE, dentro do intervalo de tempo do estudo. No entanto, foi observado que nos anos de 1998, 2000, 2001, 2004 e 2008 houve inversão na direção da deriva litorânea líquida nas células que possuem ângulos de alinhamento mais elevados, entre 40° e 56° , localizadas na porção mais ao sul do litoral médio, correspondente as células 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Nos locais em que o alinhamento da linha de praia apresenta valores inferiores a 40° não foi observada inversão na deriva litorânea líquida, exceto nas células 1 a 11 do ano 2001 (tabela 1 e figura 9).

Podem ser observadas variações sazonais na direção da deriva líquida devido à diferença também sazonal no clima de ondas (figuras 12, 14, 16 e 18). Os meses de outono e inverno representam mais de 65% do volume transportado para NE, já os meses de primavera e verão representam quase 60% do volume transportado para SW, entre 1998 e 2009, como ilustra a figura 8.

Volumes de deriva litorânea para SW



Volumes de deriva litorânea para NE

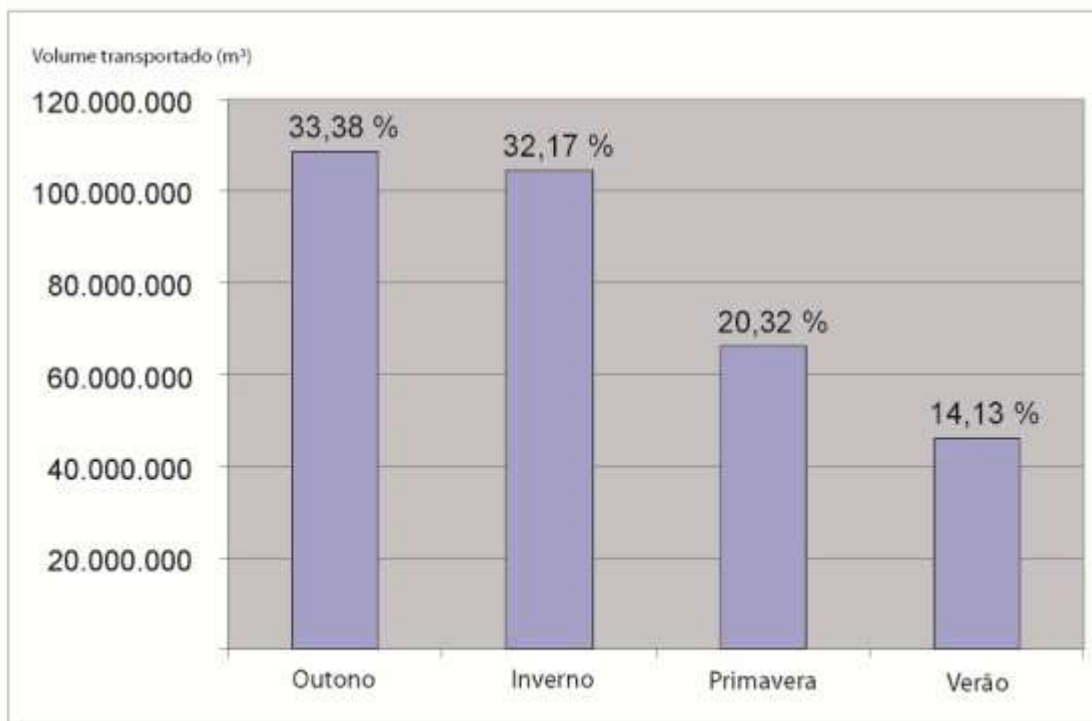


Figura 8: Distribuição percentual da deriva litorânea ao longo dos 12 anos (1998 a 2009). No eixo das ordenadas são apresentados os volumes transportados em m³.

	célula 1	célula 2	célula 3	célula 4	célula 5	célula 6	célula 7	célula 8	célula 9	célula 10	célula 11	célula 12
2009	1.535.225,19	1.589.152,32	1.601.135,59	1.579.889,75	1.539.914,87	1.565.022,18	1.530.785,20	1.403.183,04	1.447.755,90	1.468.070,24	1.314.275,47	1.119.295,69
	2.451.664,11	1.809.388,95	1.690.768,89	2.144.001,55	2.445.737,47	2.262.941,48	2.465.942,41	2.527.513,64	2.545.686,54	2.546.661,55	2.458.466,19	2.255.671,83
2008	2.256.870,48	2.410.373,56	2.412.301,05	2.367.583,47	2.262.223,26	2.346.486,90	2.242.779,08	1.934.587,96	2.016.662,91	2.057.937,79	1.792.527,02	1.488.589,53
	2.213.006,02	1.701.131,86	1.616.261,32	1.941.947,90	2.207.693,19	2.046.956,86	2.225.966,24	2.368.247,11	2.338.181,14	2.320.660,57	2.400.605,45	2.411.396,65
2007	981.058,65	1.023.226,71	1.035.030,67	996.568,19	981.026,49	987.799,04	981.081,34	965.535,62	984.949,96	984.550,50	989.578,06	1.004.224,27
	2.573.824,88	2.109.339,10	2.005.690,29	2.387.233,02	2.571.660,17	2.473.340,18	2.578.340,49	2.478.188,90	2.532.077,58	2.553.949,43	2.368.577,86	2.135.958,82
2006	1.284.568,76	1.302.445,42	1.317.706,18	1.276.345,09	1.284.278,67	1.279.225,38	1.285.335,91	1.276.927,19	1.288.511,20	1.288.006,02	1.242.948,65	1.132.626,47
	2.789.742,58	1.925.090,91	1.785.033,46	2.346.372,95	2.761.240,26	2.512.774,02	2.790.418,94	2.921.552,61	2.929.035,44	2.921.098,18	2.855.135,89	2.613.015,93
2005	1.325.231,28	1.474.850,80	1.463.833,39	1.435.024,85	1.329.348,12	1.407.335,77	1.314.339,01	1.106.934,46	1.160.083,27	1.189.154,95	1.045.864,48	973.719,29
	2.330.138,92	1.815.444,98	1.709.053,13	2.111.492,38	2.327.270,68	2.209.517,17	2.336.376,48	2.294.059,18	2.326.412,90	2.339.243,23	2.244.209,50	2.148.253,76
2004	1.873.508,18	2.066.680,81	2.074.521,94	2.011.594,75	1.877.143,28	1.970.013,14	1.864.043,00	1.630.071,78	1.700.244,62	1.733.920,35	1.508.662,10	1.292.904,90
	1.954.028,54	1.454.072,47	1.367.475,82	1.704.321,13	1.947.363,60	1.794.833,54	1.970.471,11	2.129.108,41	2.109.468,10	2.092.934,86	2.139.815,93	2.132.433,85
2003	596.165,73	729.216,48	765.216,57	639.084,15	586.740,31	611.654,40	597.290,14	629.962,40	620.229,86	614.705,09	646.328,63	665.898,38
	2.477.396,23	1.919.856,03	1.816.699,61	2.214.870,55	2.472.260,35	2.318.435,37	2.489.425,86	2.491.045,46	2.524.508,85	2.533.154,12	2.400.796,52	2.153.237,97
2002	1.006.803,21	878.688,15	874.542,64	920.244,26	1.004.530,02	946.788,89	1.012.477,51	1.052.983,25	1.059.109,17	1.054.858,72	1.063.308,07	991.683,25
	2.177.206,58	1.589.819,12	1.495.923,99	1.905.440,12	2.172.626,08	2.016.164,38	2.187.989,81	2.178.399,77	2.212.836,24	2.223.178,83	2.089.225,56	1.852.251,03
2001	1.846.880,08	1.724.799,55	1.689.707,92	1.815.689,58	1.847.621,73	1.839.011,41	1.844.445,35	1.704.429,35	1.753.537,24	1.776.487,58	1.609.070,76	1.373.540,07
	1.480.435,40	1.159.951,59	1.098.714,44	1.328.459,06	1.458.150,64	1.384.257,69	1.465.781,94	1.490.582,69	1.491.234,11	1.490.537,92	1.494.473,12	1.447.941,56
2000	1.181.150,36	1.530.210,18	1.570.769,76	1.389.545,14	1.186.255,47	1.322.660,18	1.189.133,96	1.057.885,98	1.072.451,49	1.082.747,51	1.046.197,51	1.007.638,81
	1.823.519,25	1.389.647,81	1.326.615,44	1.615.609,34	1.818.376,91	1.686.345,87	1.837.079,45	2.054.643,64	2.005.834,04	1.977.183,47	2.119.583,28	2.156.932,27
1999	1.625.201,94	1.319.363,24	1.286.513,41	1.446.913,47	1.620.448,22	1.507.388,11	1.637.101,30	1.762.902,89	1.750.327,72	1.737.638,39	1.754.192,38	1.668.404,39
	2.260.372,34	1.728.533,07	1.623.243,19	2.025.171,82	2.256.592,89	2.126.020,91	2.269.193,92	2.243.450,80	2.281.469,28	2.293.424,15	2.149.521,97	1.930.843,62
1998	1.636.456,90	1.505.063,76	1.469.319,35	1.548.916,57	1.634.106,25	1.576.504,63	1.642.412,72	1.663.609,69	1.670.908,16	1.672.308,68	1.640.951,70	1.539.904,27
	1.849.538,90	1.305.475,56	1.224.428,83	1.563.451,47	1.843.097,84	1.668.534,83	1.865.506,46	1.988.027,97	1.979.884,56	1.970.651,52	1.962.529,60	1.908.720,14

Tabela 1: volumes de sedimentos em m³ transportados pela deriva litorânea para NE (azul) e SW (vermelho).

3.4 Balanço sedimentar do Litoral Médio

O balanço de sedimentos foi calculado para cada célula litorânea, a partir dos dados de deriva para SW e NE ao longo de toda área de estudo. Para a realização do balanço sedimentar da célula 12, extremo norte da área de estudo (figura 5), foram calculadas as taxas de deriva litorânea para SW do segmento de praia que se encontra mais ao norte de Dunas Altas, ou seja, fora da área de interesse direto, no litoral norte. Já para a célula 1, extremo sul da área (figura 5), o aporte de sedimentos transportados pela deriva litorânea para NE, através da praia do Cassino, localizada mais ao sul, foram considerados nulos, assim como a saída de sedimentos da célula 1 para SW, devido a presença dos molhes de Rio Grande. Esta estrutura costeira de aproximadamente 4 km de extensão é um obstáculo para a deriva e impede a transferência de sedimentos entre o litoral sul e médio do estado.

As células 2, 3, 6, 9 e 12 apresentaram balanço sedimentar positivo, locais onde prevaleceu a componente deposicional, no período de estudo, entre 1998 e 2009, e foram classificadas como sumidouros de sedimentos arenosos (tabelas 2 e 3). Já as células 1, 4, 5, 7, 8, 10 e 11 apresentaram balanço negativo, maior componente erosional, e foram classificadas como áreas fontes de sedimentos (tabelas 2 e 3). Os volumes totais erodidos e depositados em cada célula são apresentados na tabela 3. Cabe ressaltar que foi encontrado um resíduo negativo de valor considerável no cálculo do balanço sedimentar, ou seja, os volumes erodidos superaram os volumes depositados, sendo a soma entre eles de -10 milhões de m³. Ocorre que tanto as células classificadas como fonte e como sumidouros de sedimentos não possuem as mesmas grandezas quanto aos volumes depositados e erodidos. As células 2 e 12 apresentaram os maiores volumes depositados no litoral médio durante o período, com valores de 6,4 e 2,3 milhões de m³, respectivamente, e a célula 9 o menor valor, em torno de 24 mil m³. Já as células 1 e 4 são as que possuem os volumes erodidos mais elevados, respectivamente de 8,7 e 4,7 milhões de m³, ao contrário das células 8 e 11 que apresentaram os menores valores, sendo eles 377 e 805 mil m³ (tabela 3).

Foi observado que as taxas de deriva litorânea, e também o balanço sedimentar para cada célula, apresentaram comportamentos diferentes em cada estação do ano,

tendo locais que em certas épocas apresentaram comportamento erosional e em outras deposicional, como mostra a tabela 2.

Se analisarmos cada ano separadamente é possível observar que as células também apresentam comportamentos distintos, alternado tendências deposicionais e erosionais sazonalmente, entre 1998 e 2009. Nas tabelas 4 a 15 são apresentados detalhes deste comportamento individualmente para cada célula, a cada ano. Portanto, é possível observar mudanças sazonais na mesma célula, bem como, mudanças na mesma estação do ano, ao longo dos doze anos de cálculo da deriva litorânea (tabelas 4 a 15).

	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4	Célula 5	Célula 6	Célula 7	Célula 8	Célula 9	Célula 10	Célula 11	Célula 12
OUTONO	-4.553.489,56	2.393.421,10	-115.169,22	-2.179.882,69	-687.329,34	165977,7812	-1.461.329,17	-17.687,09	55.455,78	-500.087,15	-188.926,12	765.945,04
INVERNO	-5.070.680,80	2.076.991,12	343.880,86	-1.482.626,77	-939.015,49	559.762,68	-486.519,21	26.108,18	-132.543,05	-21.925,49	379.635,13	870.359,55
PRIMAVERA	-477.939,47	1.148.772,74	540.181,22	-333.997,56	-931.983,18	763.228,26	42.776,96	-395.526,28	-33.028,39	159.469,46	-250.056,21	428.716,41
VERÃO	1.325.606,05	840.164,84	215.740,98	-790.318,15	-254.938,02	44.123,85	-870.410,31	9.443,95	134.902,40	-619.025,67	-746.341,55	259.449,18
TOTAL	-8.776.502,78	6.459.349,80	964.643,85	-4.796.225,17	-2.793.286,04	1.533.092,57	-2.875.481,73	-377.661,19	24.786,73	-1.001.548,85	-805.688,74	2.322.470,18

Tabela 2: Balanço sedimentar para cada estação do ano e o volume total (m³), entre os anos de 1998 e 2009. Deposição (azul) e erosão (vermelho).

Células	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2009	-852.511,79	644.258,42	97.374,22	-496.207,55	-273.628,60	148.559,02	-330.603,10	-16.998,37	2.139,44	-154.787,78	-106.764,41	306.850,61
2008	197.367,53	513.801,66	40.152,95	-431.046,79	-181.481,65	57.028,51	-487.190,50	-60.215,92	70.340,85	-246.910,20	-373.852,37	144.590,51
2007	-1.550.598,18	476.289,75	65.186,33	-397.084,42	-177.654,60	91.602,28	-100.546,03	99.565,94	-54.288,14	-16.844,28	200.017,77	224.655,30
2006	-1.467.297,16	859.912,43	98.696,36	-553.405,61	-419.920,90	254.576,77	-286.053,63	-121.549,67	-5.988,00	-37.120,11	-44.359,90	307.103,62
2005	-855.288,12	523.676,53	57.583,32	-508.115,99	-137.790,65	24.756,75	-334.263,86	95.466,12	-3.282,04	-156.120,61	22.888,54	136.506,47
2004	112.652,28	507.797,19	23.669,46	-471.296,78	-150.192,61	46.579,92	-409.608,79	-88.464,46	53.296,04	-208.505,01	-262.838,26	120.261,00
2003	-1.748.179,76	593.540,29	-22.976,00	-441.514,78	-241.275,71	139.250,72	-138.308,23	-11.352,14	-38.987,16	22.975,47	151.929,16	239.581,71
2002	-1.298.218,44	572.941,95	149.596,76	-325.230,37	-324.927,39	222.150,62	-122.239,69	6.635,95	-38.666,92	-11.891,24	72.326,45	275.689,22
2001	264.364,15	265.392,18	187.218,81	-197.812,46	-138.301,90	79.326,89	-221.540,25	24.307,14	22.298,92	-166.720,63	-229.465,90	169.234,55
2000	-293.309,07	464.431,03	-108.192,25	-492.283,57	-66.362,87	-31.495,18	-251.981,57	-202.998,67	59.105,62	-7.899,43	-180.958,51	-12.671,38
1999	-941.009,11	498.989,44	265.689,94	-228.393,88	-344.481,18	260.285,17	-17.371,41	13.167,94	-50.707,81	4.599,11	58.114,19	276.200,41
1998	-344.475,13	538.318,92	130.643,95	-253.832,96	-337.247,98	240.471,10	-175.774,67	-115.225,03	9.545,92	-22.323,94	-112.725,50	134.468,17
TOTAL	-8.776.502,78	6.459.349,80	984.643,85	-4.796.225,17	-2.793.266,04	1.533.092,57	-2.875.481,73	-377.661,19	24.786,73	-1.001.548,85	-805.688,74	2.322.470,18

Resíduo -10.102.031,37

Tabela 3: balanço anual e total de sedimentos para cada célula litorânea e o resíduo encontrado (m³). Em vermelho as células classificadas como fonte de sedimentos e em azul as classificadas como sumidouro.

Célula 1

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-371.410,55	-721.938,49	-146.780,49	-3.470,46	-465.283,46	-630.583,84	85.480,42	-190.545,78	-529.519,71	-780.881,50	-173.982,59	-622.553,11
inverno	-63.934,44	-427.723,47	-385.996,88	-220.576,67	-683.495,64	-610.770,59	-336.984,55	-500.059,61	-806.206,56	-627.732,36	-146.211,77	-238.987,86
primavera	100.236,28	188.369,04	-317.590,47	263.628,61	-29.348,06	-317.125,40	166.714,12	-262.579,55	-36.562,20	-197.239,41	227.717,30	-284.158,71
verão	-9.366,42	20.283,82	559.058,75	224.782,88	-118.081,27	-188.698,93	217.442,29	97.886,83	-85.008,28	55.255,10	289.854,59	273.187,90

Tabela 4: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 1 (m³).

Célula 2

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	306.888,29	232.436,79	162.192,59	174.302,24	191.273,36	280.133,40	198.312,27	124.338,59	248.966,67	159.751,04	145.998,59	168.827,26
inverno	59.266,57	166.540,71	88.573,07	62.911,68	254.198,10	202.539,18	88.908,30	264.379,83	303.651,23	222.804,53	146.129,99	216.887,94
primavera	88.356,08	27.567,78	129.568,54	9.429,48	10.218,74	55.715,62	142.013,24	115.064,44	174.441,24	1.951,17	194.237,63	199.818,79
verão	83.807,98	72.044,17	84.106,82	18.748,78	117.251,75	55.152,09	78.563,39	19.893,68	132.653,28	91.783,02	27.463,45	58.774,44

Tabela 5: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 2 (m³).

Célula 3

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-37.325,90	46.559,50	-30.033,19	-60.517,56	27.487,49	-49.085,45	21.888,89	-21.818,10	-25.067,35	19.673,79	-75.316,45	68.395,10
inverno	69.659,51	77.408,23	-11.629,63	88.098,64	64.694,59	-37.185,76	37.128,86	-1.592,84	58.392,25	43.729,81	-20.009,22	-24.803,58
primavera	31.069,13	102.192,28	17.390,05	141.377,30	54.834,96	30.452,42	-83.525,98	73.078,80	84.762,97	4.701,69	89.136,96	-5.289,37
verão	67.241,21	39.529,93	-83.919,48	18.280,42	2.579,71	32.852,78	48.177,69	7.915,46	-19.391,51	-2.918,97	46.341,66	59.072,08

Tabela 6: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 3 (m³).

Célula 4

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-235.826,96	-160.356,39	-127.917,34	-200.168,20	-140.128,49	-221.457,42	-232.776,05	-145.114,91	-219.823,15	-146.095,57	-216.283,50	-133.934,70
inverno	22.445,98	-54.574,62	-125.288,10	-30.572,41	-119.305,16	-155.654,33	-80.781,24	-246.044,53	-214.341,34	-153.596,35	-142.513,90	-182.399,76
primavera	-23.200,58	48.082,70	-82.249,17	81.378,76	2.056,35	-33.539,36	-131.241,83	-38.066,57	-46.838,89	2.684,88	5.661,05	-115.724,93
verão	-17.251,38	-59.545,58	-168.827,96	-48.450,60	-57.853,07	-30.463,67	-28.497,66	-78.889,98	-72.402,23	-100.077,38	-77.910,44	-54.146,20

Tabela 7: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 4 (m³).

Célula 5

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-108.432,23	-111.279,39	-55.526,43	-11.819,35	-82.668,56	-90.438,43	-23.954,49	-10.653,32	-71.765,26	-51.177,24	27.196,93	-76.611,57
inverno	-79.076,39	-126.440,91	7.706,18	-51.104,61	-160.449,83	-80.079,16	-33.127,86	-72.017,64	-141.263,39	-106.376,33	-31.869,04	-64.914,31
primavera	-73.508,13	-76.009,55	-63.382,37	-88.663,99	-20.755,11	-35.016,76	-32.022,06	-69.507,69	-141.085,30	-6.783,44	-198.284,64	-107.062,16
verão	-76.229,23	-30.751,33	44.839,74	13.186,23	-61.053,66	-35.739,95	-61.068,19	34.388,00	-65.806,95	-13.307,60	21.475,11	-24.850,56

Tabela 8: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 5 (m³).

Célula 6

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	44.117,17	68.769,82	25.164,49	-29.220,90	47.001,94	34.416,39	-26.304,47	-17.987,74	20.130,23	21.073,04	-68.099,51	45.917,31
inverno	72.931,29	99.888,41	-26.641,33	40.161,68	116.577,48	50.126,74	16.195,42	16.854,45	86.336,62	66.945,24	-1.319,05	21.705,73
primavera	62.531,13	76.507,44	40.093,94	90.407,44	19.486,60	28.115,85	14.233,69	70.257,33	110.673,66	12.384,57	163.117,00	75.419,42
verão	60.891,50	14.119,51	-70.112,27	-22.021,34	39.064,60	26.591,74	42.455,27	-44.367,29	37.436,05	-8.600,58	-36.689,92	5.516,57

Tabela 9: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 6 (m³).

Célula 7

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-193.499,38	-32.089,78	-72.808,10	-174.993,71	-74.793,85	-195.210,61	-238.974,93	-119.165,21	-130.337,67	-44.574,09	-203.367,72	-41.865,12
inverno	43.586,51	24.230,34	1.517,22	7.951,68	-14.026,11	-48.585,37	-23.080,98	-150.838,03	-57.878,94	-42.657,07	-83.889,24	-142.879,21
primavera	2.085,36	55.729,63	-17.611,57	34.737,88	12.619,19	40.831,43	-65.275,96	4.634,33	-22.946,09	79.042,49	-57.451,99	-23.715,82
verão	-27.948,15	-65.241,59	-163.279,11	-89.326,11	-46.038,92	4.586,33	-82.266,92	-68.894,94	-74.888,94	-92.357,35	-142.501,64	-122.202,96

Tabela 10: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 7 (m³).

Célula 8

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-58.232,63	10.360,25	-73.153,34	-69.411,17	10.669,99	-32.806,12	14.639,81	18.854,47	-16.083,06	82.506,14	22.245,35	72.723,28
inverno	4.180,62	-7.777,72	9.613,48	55.582,42	-10.774,49	-29.982,51	73.215,43	6.766,34	-11.517,18	8.297,03	-44.379,33	-27.124,92
primavera	-64.524,11	-14.674,57	-8.382,32	12.435,76	43.700,23	33.869,78	-166.386,13	20.018,96	-52.407,55	4.568,24	-105.326,52	-98.018,06
verão	3.751,09	25.259,99	-131.096,50	25.680,13	-36.959,78	17.566,71	-9.923,56	49.827,34	-41.541,88	4.204,53	67.244,58	35.421,32

Tabela 11: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 8 (m³).

Célula 9

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	20.354,12	-22.297,98	16.065,66	38.010,89	-8.421,88	4.113,60	28.446,90	8.490,60	3.002,59	-28.409,20	24.727,76	-27.627,29
inverno	-14.704,77	-21.106,46	-11.302,03	-19.483,40	-22.724,24	-9.533,89	-22.766,57	186,68	-19.243,68	-17.536,29	14.477,68	11.192,92
primavera	6.647,12	-8.343,29	-8.087,80	-7.988,53	-12.982,39	-22.675,96	34.859,62	-17.675,42	-540,40	-18.124,51	16.276,19	5.616,98
verão	-2.750,55	1.039,92	62.439,79	11.759,97	5.441,59	-10.890,91	12.756,10	5.716,10	10.793,49	10.780,86	14.859,21	12.956,83

Tabela 12: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 9 (m³).

Célula 10

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-50.736,38	3.363,56	8.265,66	-45.422,26	-27.137,64	-22.412,43	-136.108,70	-53.231,10	-43.781,57	-28.120,72	-89.009,68	-35.755,69
inverno	24.834,58	37.022,29	12.231,66	-20.062,07	34.027,54	16.461,62	-29.562,38	-55.245,01	11.353,06	5.962,89	-11.994,20	-46.965,47
primavera	27.986,56	18.229,07	6.491,45	-20.231,14	-16.570,86	27.813,78	19.390,83	1.708,13	10.570,39	50.659,42	-10.001,55	43.423,37
verão	-24.408,71	-54.015,80	-34.888,20	-81.015,15	-2.210,28	1.112,49	-62.224,76	-49.352,83	-15.281,99	-45.345,67	-135.934,76	-115.469,80

Tabela 13: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 10 (m³).

Célula 11

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	-48.374,25	60.435,56	-45.689,94	-102.322,25	14.737,53	3.610,50	-123.086,27	-12.586,68	-23.172,83	100.566,43	-76.626,26	63.591,32
inverno	20.165,48	50.884,73	53.403,50	17.758,95	67.727,42	44.895,29	66.752,55	11.742,68	66.702,17	54.096,05	-50.706,31	-22.787,37
primavera	-43.201,58	-23.819,54	16.775,66	-76.011,41	17.533,35	79.352,13	-106.755,43	29.056,11	-41.210,08	63.747,14	-138.926,24	-26.516,34
verão	-41.235,16	-29.386,57	-205.438,73	-68.881,19	-27.671,84	24.071,24	-99.749,11	-5.323,57	-45.679,18	-16.391,86	-107.593,56	-121.052,03

Tabela 14: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 11 (m³).

Célula 12

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
outono	33.385,37	131.889,94	3.610,17	-36.652,45	97.460,40	70.558,56	44.163,47	16.728,45	108.251,77	125.334,68	15.903,08	155.331,59
inverno	37.786,71	81.586,20	41.771,79	101.570,74	105.189,50	76.239,74	89.634,43	63.495,43	122.328,89	103.763,02	15.690,86	31.312,25
primavera	-3.391,44	20.351,06	58.922,24	84.806,48	49.873,95	46.625,97	-64.571,35	80.977,14	52.293,37	18.546,77	50.025,67	32.256,56
verão	66.687,54	42.383,21	-116.975,59	19.509,78	23.185,37	46.157,44	51.034,45	-24.694,56	24.229,60	-22.989,17	62.970,90	87.950,22

Tabela 15: balanço sedimentar sazonal entre os anos de 1998 e 2009 para a célula 12 (m³).

4 DISCUSSÕES

Após analisar os dados apresentados anteriormente é possível avaliar a complexidade da dinâmica dos sedimentos na zona de surfe e a necessidade de prolongar a pesquisa para melhorar a compreensão do balanço de sedimentos ao longo do litoral médio do estado.

4.1 Deriva litorânea

Um importante processo observado neste trabalho foi à inversão, nos anos de 1998, 2000, 2001, 2004 e 2008, da deriva litorânea líquida nas células mais ao sul da área de estudo. A interpretação desta inversão na deriva litorânea decorre pelo elevado ângulo das orientações da linha de praia nesta região, entre 40° e 56°, o que gera mais casos de transporte para SW do que para NE, se comparados com células que possuem ângulos menores de alinhamento da praia.

Long (1987) apresentou um modelo de evolução histórica do estuário da Lagoa dos Patos, com base em cartas de navegação do fim do século XVIII além de evidências geológicas e geomorfológicas, tais como faixas de cordões litorâneos e paleocanais, onde ele interpreta que a evolução dos depósitos costeiros estaria associada a um transporte longitudinal com direção para SW, ou seja, os dados de inversão da deriva litorânea, na parte sul do litoral médio, encontradas neste trabalho (figura 9 e tabela 1), são concordantes com a direção de crescimento dos pontais e dos processos de sedimentação costeira interpretadas por este autor.

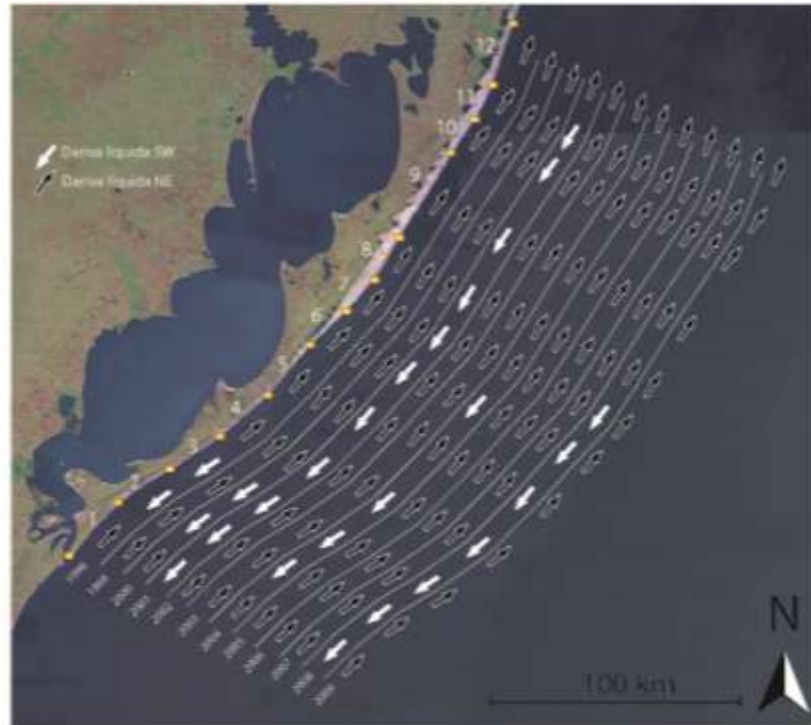


Figura 9: deriva líquida anual entre 1998 e 2009.

4.2 Balanço sedimentar

Ao comparar o comportamento das células durante todo o período de estudo, e em cada ano separadamente, se observou que nem sempre elas apresentam o mesmo comportamento, sendo em alguns casos constatado que células classificadas como sumidouro ou fonte de sedimentos possuem, em alguns anos, tendência contrária ao intervalo total (tabela 3). Além disso, foi possível observar que o balanço sedimentar realizado para cada estação do ano, dentro do intervalo de tempo do estudo, variou bastante, principalmente nas células 7, 8, 9, 10 e 11 (tabela 2 e figuras 11, 13, 15 e 17), localizadas entre as duas inflexões mais expressivas do litoral médio, entre as praias de Mostardas e Dunas Altas (figura 10). Isso demonstra que a dinâmica costeira nesta área é mais complexa que nas demais células, as quais não apresentaram grandes variações de magnitude e direção de transporte de sedimentos entre os anos de 1998 e 2009.

As variações registradas no balanço sedimentar e na classificação das células 7, 8, 9, 10 e 11, ocorre nos setores do litoral onde foi descrito o mecanismo de engarrafamento da deriva litorânea, com o conseqüente alargamento do sistema praial (Toldo *et al.* 2006).

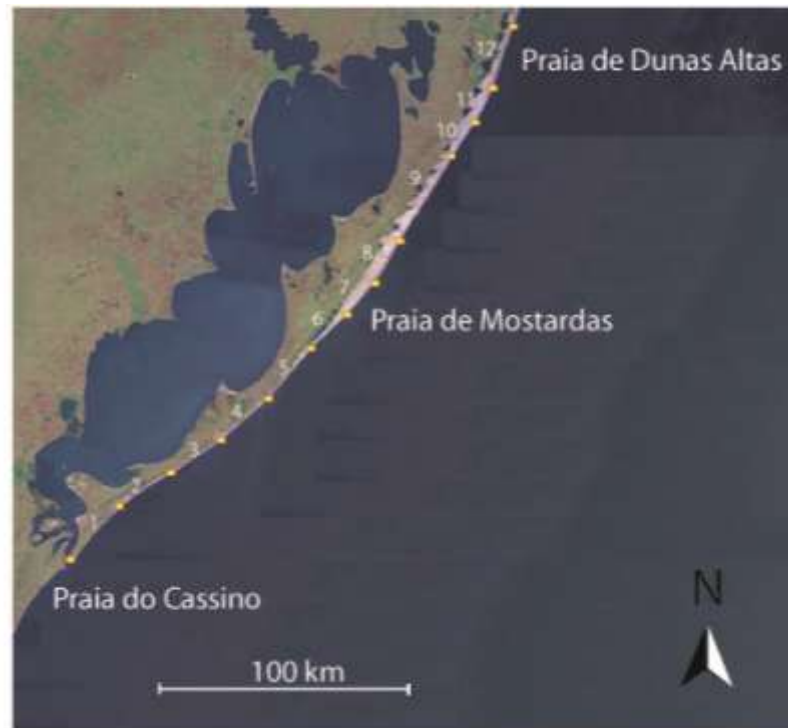


Figura 10: Localização das praias de Mostardas, Dunas Altas e Cassino.

Parte significativa do resíduo encontrado no balanço sedimentar do litoral médio está associado à impossibilidade de transferência de sedimentos entre a praia do Cassino e a célula 1 (figura 10), devido à presença dos molhes de Rio Grande e conseqüente interrupção da deriva litorânea. Outra importante contribuição para o resíduo do balanço sedimentar está associada ao transporte de sedimentos da célula 12 em direção ao Litoral Norte. Os erros nas estimativas das taxas de deriva litorânea também constituem outra fonte considerável de erros para o balanço sedimentar da região. No entanto, após a realização do balanço sedimentar pode-se dizer que apenas o volume de sedimentos remobilizados na costa pela deriva litorânea é suficiente para explicar os diferentes comportamentos da linha de praia do litoral médio do estado.

As células 2, 4, 5, e 7 (tabela 3) foram às únicas a apresentarem no geral o mesmo comportamento durante todos os anos do período estudado. As demais células variaram entre fonte e sumidouro de sedimentos arenosos dependendo do ano analisado (tabela 3). Já para o balanço sedimentar realizado para cada estação, entre os anos de 1998 e 2009, as células 2, 4, 5, 6 e 12 não apresentaram mudanças na sua classificação, ao contrário das células 1, 3, 7, 8, 9, 10 e 11 (tabela 2). Isto demonstra que o balanço sedimentar da região respeita, assim como as taxas de deriva litorânea, a sazonalidade dos parâmetros ondulatórios do litoral médio, fazendo com que, além das células 1 e 3, as células 7, 8, 9, 10 e 11, localizadas entre as praias de Mostardas e Dunas Altas (figura 10), alterem sua classificação entre fonte e sumidouro de sedimentos arenosos de acordo com as estações do ano (tabela 2).

Os indicadores geomorfológicos do Farol da Conceição, localizado entre as células 4 e 5, o alargamento do campo de dunas costeiras entre as células 6 a 8 e 10 a 12, assim como os geoindicadores observados por Long (1987), são condizentes com o balanço sedimentar e as respectivas classificações das células litorâneas em fonte ou sumidouro de sedimentos obtidas neste trabalho (figuras 11, 13, 15 e 17).

4.3 Estoque de sedimentos arenosos

O campo de dunas costeiras que se desenvolve no litoral médio do estado constitui um importante estoque de sedimentos arenosos sendo que quase metade do seu volume se distribui entre as células 6, 7 e 8. Calliari *et al.* (2005) associa a altura das dunas frontais do litoral norte e médio com a orientação da linha de praia em relação a incidência do vento NE e, este autor observou que as praias entre o farol de Mostardas e Dunas Altas apresentam alturas maiores devido ao seu alto ângulo com o vento predominante de NE. Isto explica, em parte, porque um expressivo volume de areias do campo de dunas costeiras se encontra entre estas praias, compreendidas pelas células 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Tomazelli (1990), também associou a incidência do vento NE no litoral do Rio Grande do Sul com a alimentação do campo de dunas costeiras que se desenvolve na costa do estado.

4.4 Modelo de dinâmica costeira de curto prazo para o litoral médio

As correntes de deriva litorânea constituem o principal agente de transporte no litoral médio, responsáveis pela remobilização dos sedimentos ao longo da área de estudo, para dentro e para fora de cada célula. O vento predominante de NE na costa do estado é o principal, se não o único, mecanismo de transporte responsável pela adição de sedimentos ao campo de dunas costeiras através da remoção de areia das células litorâneas em direção ao continente, principalmente nas células que possuem ângulos oblíquos com o vento NE.

A célula 1, localizada no extremo sul da área, é a maior fonte de sedimentos para as demais células, exceto nos meses de verão, em que ela funciona como sumidouro, devido ao predomínio da deriva litorânea para SW. A célula 2 é o maior sumidouro de sedimentos arenosos da área, possuindo comportamento deposicional ao longo de todo o período estudado, porém não se observa o desenvolvimento de um expressivo campo de dunas devido, provavelmente, a sua orientação paralela com o vento predominante na costa. A célula 3 também se comportou como sumidouro de sedimentos com exceção dos meses de outono, quando foi observado uma resultante erosional. As células 4 e 5 se comportaram como fonte de sedimentos para as demais células em todo o período estudado sendo uma das áreas com os maiores volumes erodidos. Nesta região está localizado o Farol da Conceição, ponto conhecido por suas altas taxas de erosão e conseqüente destruição de estruturas antrópicas. A célula 6 assim como a 12 apresentaram predomínio deposicional em todo o período, servindo como sumidouro para os sedimentos erodidos das células localizadas mais ao sul.

Já as células compreendidas entre as praias de Mostardas e Dunas Altas, representadas neste trabalho pelas células 6 a 12, tiveram grande variabilidade na sua classificação variando de fonte a sumidouro de sedimentos de acordo com as estações do ano, apesar de ser a região com a maior extensão e volume de areia no campo de dunas costeiras. Devido ao ângulo oblíquo destas praias com o vento NE, nos meses em que houve deposição nestas áreas elas serviram como fonte de sedimentos para o extenso campo de dunas costeiras que se desenvolve nesta região. Foram classificadas como sumidouro de sedimentos a célula 7, nos meses de primavera, a

célula 8 nos meses de inverno e verão, a célula 9 nos meses de outono e verão, a célula 10 nos meses de primavera e a célula 11 nos meses de inverno (tabela 2). Estas células contribuem com sedimentos para o campo de dunas costeiras em diferentes épocas, demonstrando a forte sazonalidade da dinâmica costeira da região. As figuras 11 a 18 apresentam as classificações de cada célula litorânea para as diferentes estações do ano no período total do estudo, entre 1998 e 2009, além das respectivas direções de deriva litorânea líquida.

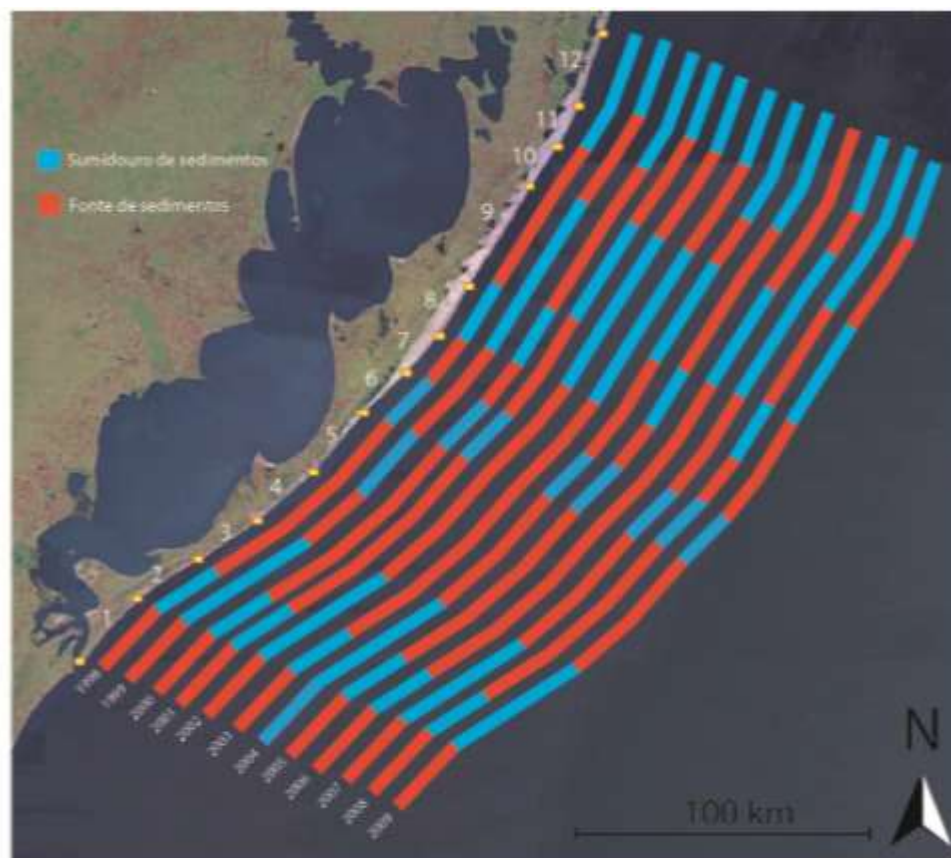


Figura 11: Classificação das células litorâneas para os meses de outono entre 1998 e 2009.

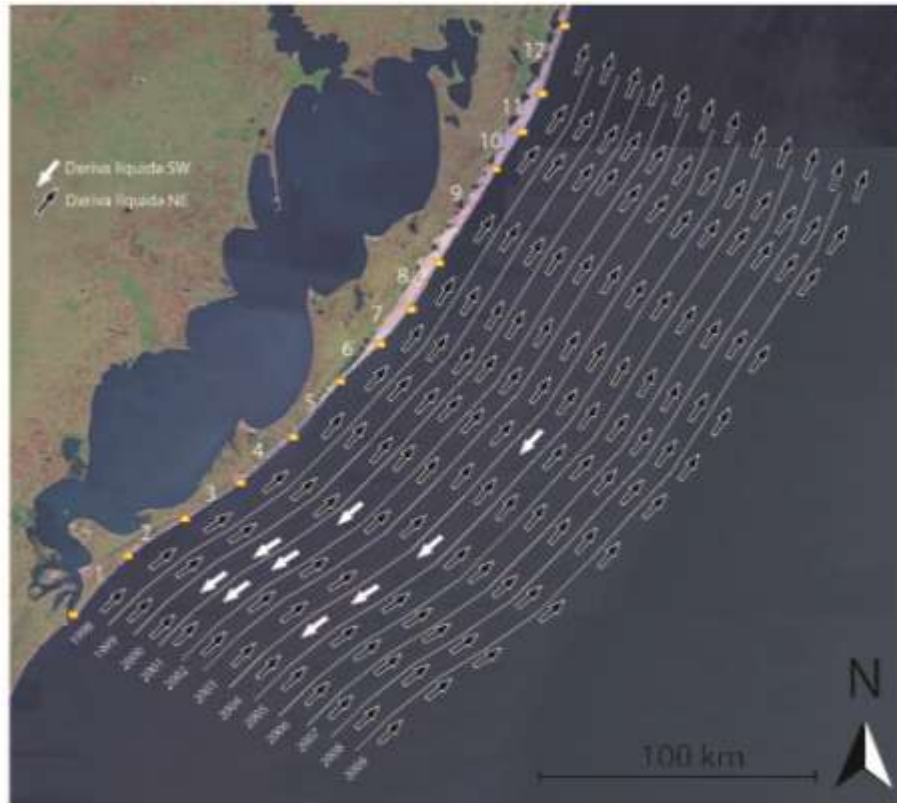


Figura 12: deriva litorânea líquida para os meses de outono entre 1998 e 2009.

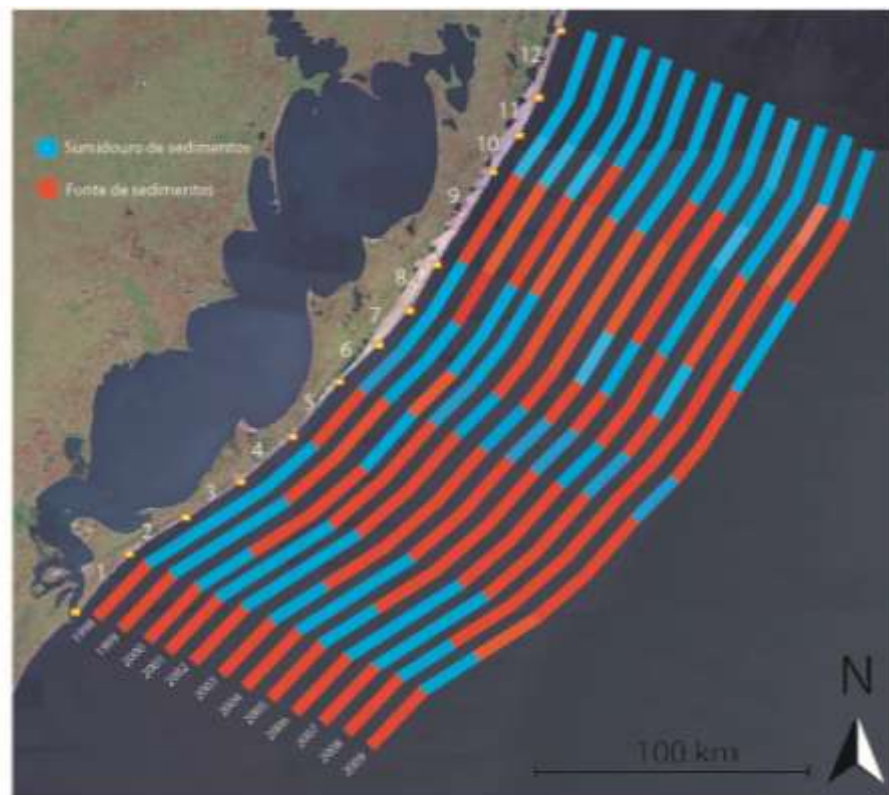


Figura 13: Classificação das células litorâneas para os meses de inverno entre 1998 e 2009.

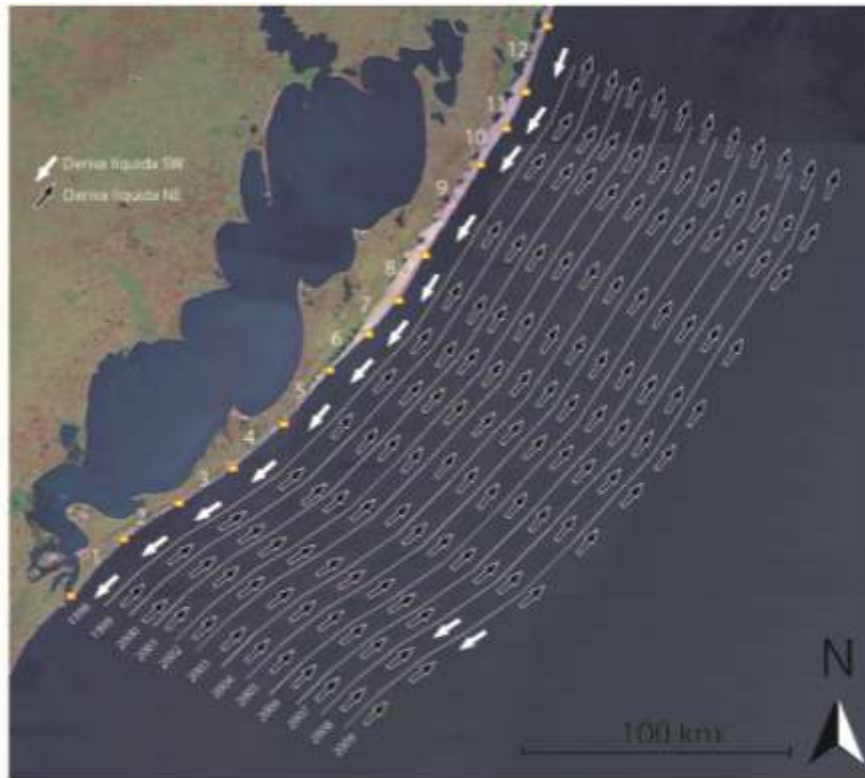


Figura 14: deriva litorânea líquida para os meses de inverno entre 1998 e 2009.

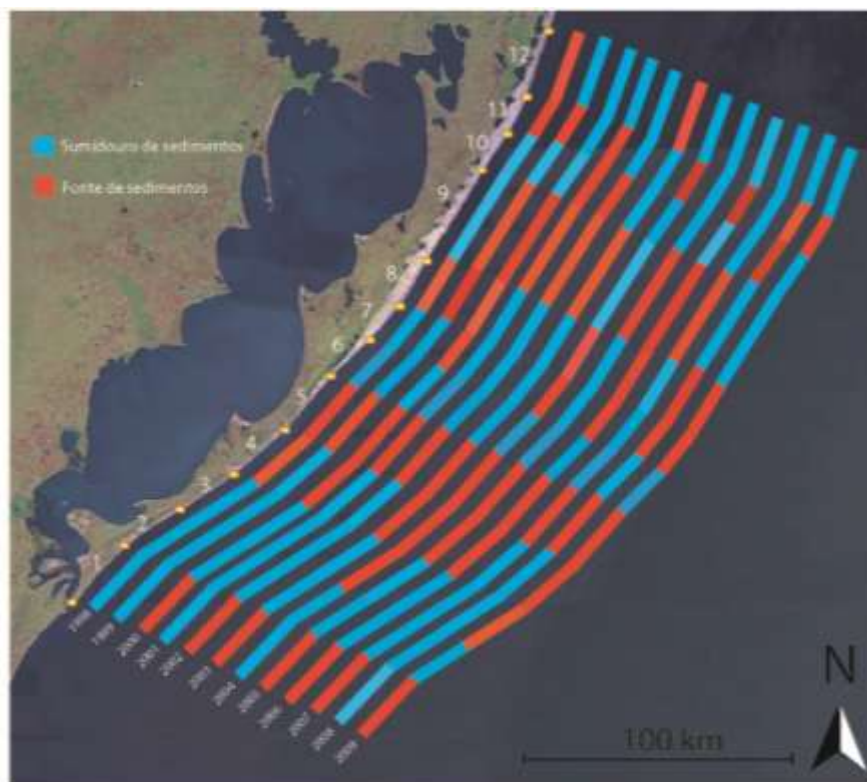


Figura 15: Classificação das células litorâneas para os meses de primavera entre 1998 e 2009.

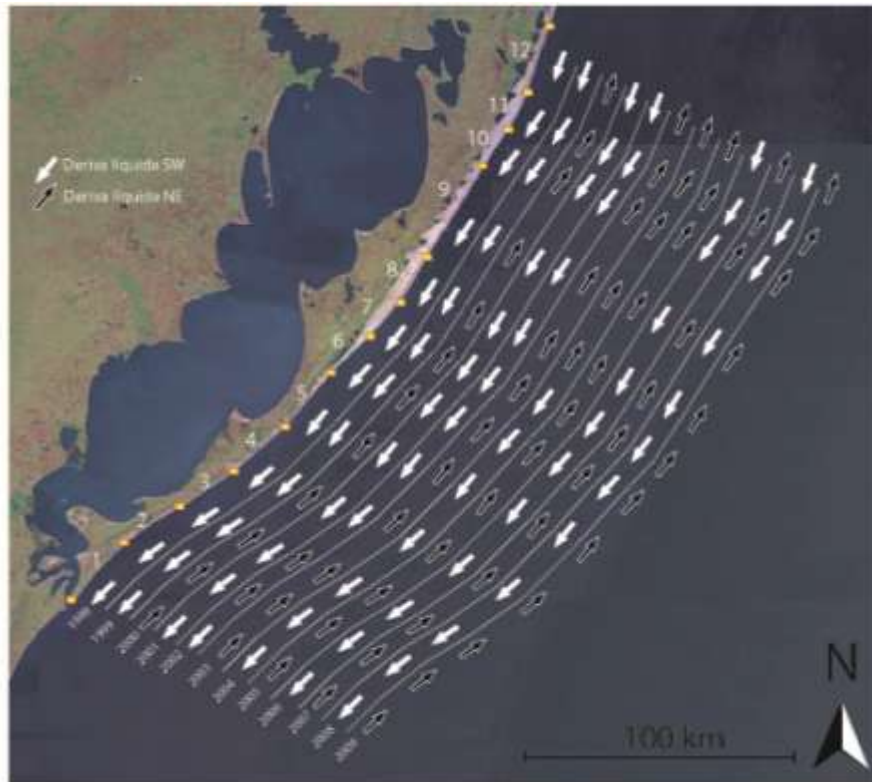


Figura 16: deriva litorânea líquida para os meses de primavera entre 1998 e 2009.

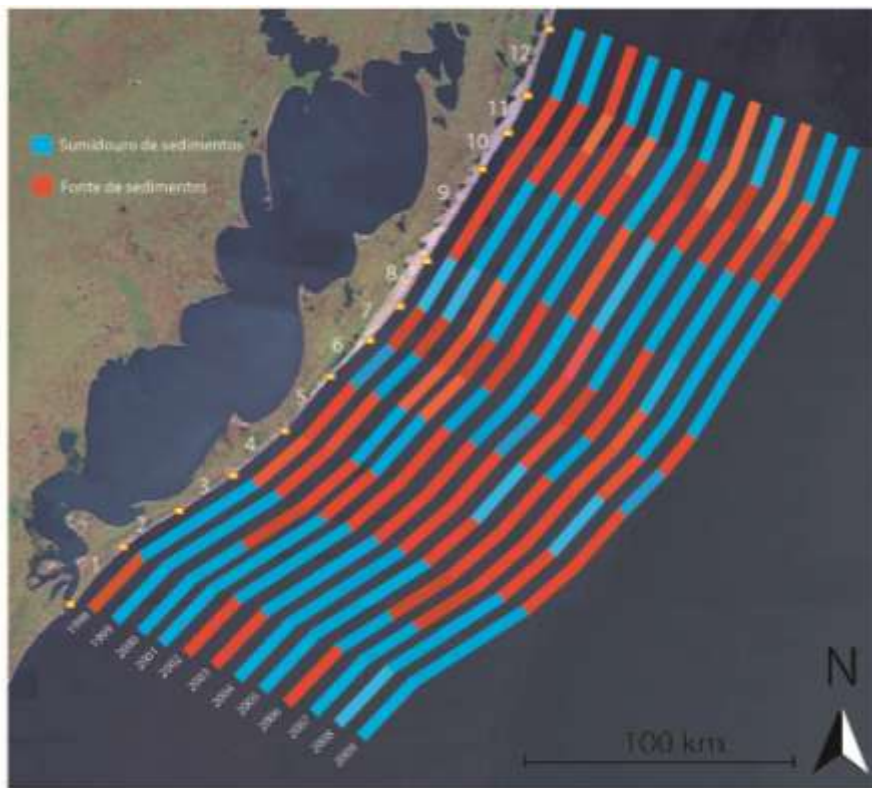


Figura 17: Classificação das células litorâneas para os meses de verão entre 1998 e 2009.

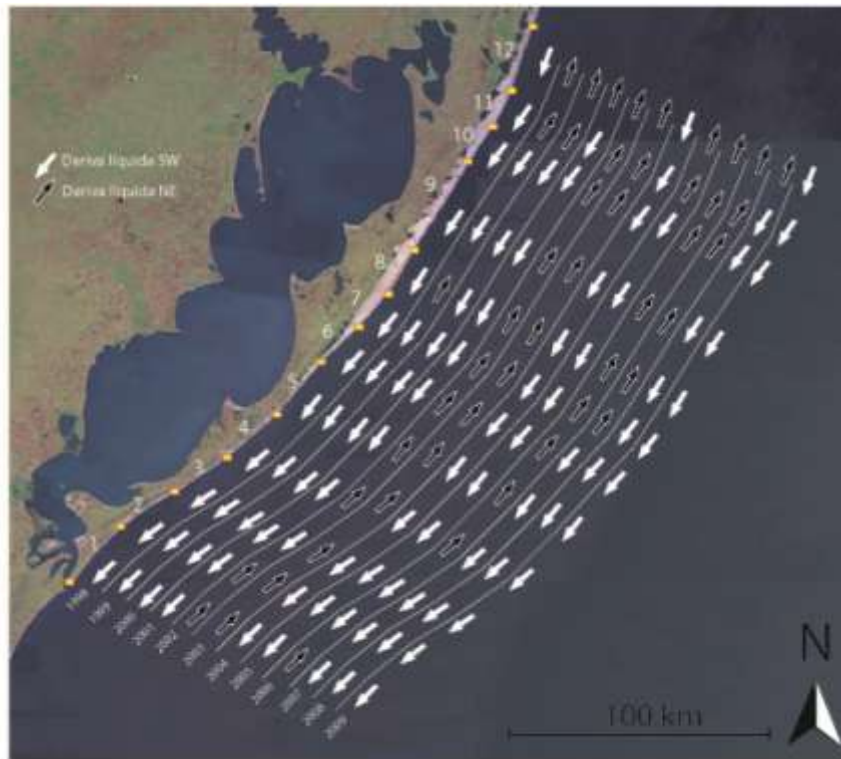


Figura 18: deriva litorânea líquida para os meses de verão entre 1998 e 2009.

4.5 Hipótese para o tempo de formação do campo de dunas do litoral médio

Toldo *et al.* (2006) e Lopes *et al.* (2008) observaram, através de estudos de mobilidade da linha de praia e estimativas de deriva litorânea, que o litoral médio do estado possui altas taxas de erosão, principalmente nas praias localizadas ao sul de Mostardas. Estes autores interpretam que os sedimentos removidos destes locais são depositados nas zonas de inflexão mais expressiva da linha de costa, entre as praias de Mostardas e Dunas Altas (figura 10), pelo engarrafamento da deriva litorânea nestas áreas e servem como fonte de sedimentos para o campo de dunas pela ação do vento NE. Neste trabalho foi encontrado um resíduo negativo de 10.102.031,37 m³, evidenciando, assim como nos trabalhos anteriores desenvolvidos por estes autores, que o litoral médio possui elevadas taxas de erosão.

Desta maneira, se considerarmos o volume de areia existente no campo de dunas costeiras nos trechos 2, 3 e 4 (figura 6), entre as praia de Mostardas e Dunas Altas, sem as variações relativas do nível do mar, e que o valor do resíduo encontrado

para o balanço sedimentar foi integralmente disponibilizado para o campo de dunas costeiras existente nestes locais podemos estimar o tempo necessário para a formação deste extenso estoque de sedimentos arenosos.

O volume de areia do campo de dunas costeiras entre as duas zonas de inflexão mais expressiva da linha de praia, entre as praias de Mostardas e Dunas Altas (figura 10), representadas pelos trechos 2, 3 e 4 (figura 7), tem um total de 3.578.881.171,09 m³. A partir da divisão do volume de sedimentos do campo de dunas costeiras, entre as células 6 e 12, pelo valor do resíduo encontrado para o balanço sedimentar é possível estimar que o tempo necessário para a formação deste imenso estoque é de aproximadamente 4.250 anos.

5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos neste trabalho podemos concluir que:

- O volume total do campo de dunas costeiras é de aproximadamente 4.199.568.589,49 m³, sendo que deste valor, 3.578.881.171,09 m³ estão localizados entre as duas zonas de inflexão mais expressiva da linha de costa, entre as praias de Mostardas e Dunas Altas (Fig.9), representadas pelas células 6 a 12 (Fig.5).
- As estimativas dos volumes transportados pela deriva litorânea foram realizadas através de uma base consistente de dados de parâmetros ondulatórios, com mais de 35 mil registros, entre os anos de 1998 e 2009, disponibilizados pelo modelo WAVEWACHT III (TOLMAN, 1997, 1999) da NOAA.
- Foi possível interpretar que a deriva litorânea é bidirecional com alternância da direção na maioria das células, principalmente nas células com ângulo mais elevado. Também, nas células mais ao sul foi interpretada uma direção de deriva líquida para SW em oposição ao padrão regional do estado.
- As classificações das células 6 a 12, localizadas entre as duas zonas de inflexão mais expressiva da linha de costa, onde se observa alargamento e volumes mais elevados no campo de dunas costeiras, alternam bastante entre os meses de outono, inverno, primavera e verão. Estes locais servem como fonte de sedimentos, nas diferentes épocas do ano, para o campo de dunas, através da remobilização dos sedimentos em direção ao continente pela ação do vento NE.
- Com base no resíduo do balanço sedimentar e no volume de areia contido no campo de dunas costeiras do litoral médio é possível estimar que o tempo de formação deste estoque, entre as praias de Mostardas e Dunas Altas, é de aproximadamente 4.250 anos.

REFERÊNCIAS

- ABSALONSEN, L., TOLDO Jr., E. E. A Influência da Inflexão Costeira na Variabilidade da Linha de Praia em Mostardas – RS. **Pesquisas em Geociências (UFRGS)**, v.34(1), p.3 - 18, 2007.
- ALMEIDA, L.E.S.B.; Rosauero, N.L.; Toldo Jr., E.E. & Gruber, N.L.S. 1999. Avaliação da profundidade de fechamento para o litoral norte do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 13. Belo Horizonte, MG. **Anais...** ABRH, 1CDROM.
- BATISTA NETO, J.A. et all. 2004. **Introdução à Geologia Marinha**. Editora Interciência. 279p.
- BODGE, K. R. 1993. "Gross Transport Effects and Sand Management Strategy at Inlets," *Journal of Coastal Research*, Special Issue 18, Fall 1993, pp 111-124.
- BOWEN, A. J., and Inman, D. L. 1966. "Budget of Littoral Sand in the Vicinity of Point Arguello, California," Technical Memorandum No. 19, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 56 pp.
- CALDWELL, J. M. 1966. "Coastal Processes and Beach Erosion," *Journal of the Society of Civil Engineers*, Vol 53, No. 2, pp 142-157.
- CALLIARI, L.J. & Klein, A.H.F. 1993. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das Praias Oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. **Pesquisas**, 20 (1):48-56.
- CALLIARI, L.R.; Pereira, P. S.; De Oliveira, A. O. e Figueiredo, S. A. 2005. Variabilidade das dunas frontais no litoral norte e médio do Rio Grande do Sul, Brasil. **Gravel**, 3, p 48-56.

DAVIS, Jr., R.A. 1997. Regional Coastal Morphodynamics Along the United States Gulf of Mexico. **Journal of Coastal Research**,13(3):595-604.

GRUBER, N.L.S. 2002. **A antepraia na região de Tramandaí**, RS. 221 p. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JARRETT, J. T. 1991. "Coastal Sediment Budget Analysis Techniques." *Proceedings, Coastal Sediments '91*. ASCE, Reston, VA, pp 2223-2233.

JARRETT, J. T. 1977. "Sediment Budget Analysis: Wrightsville Beach to Kore Beach, NC." *Proceedings of Coastal Sediments '77*. ASCE, New York, 1977.

KANA, T. W., and Stevens, F. D. 1992. "Coastal Geomorphology and Sand Budgets Applied to Beach Nourishment." *Proceedings of Coastal Engineering Practice '92*. ASCE, New York, pp 29-44.

KING, Cuchlaine A. M. 1972. **Beaches and Coasts**. London: Edward Arnold. 570 p.

KOMAR, P. D., Inman, D. L. 1970. "Longshore sand transport on beaches" *Journal of geophysical research*, Vol 75, Nº 30, PP 5914-5927.

LÉLIS, R. J. F. 2003. Variabilidade da linha de costa oceânica adjacente às principais desembocaduras do Rio Grande do Sul. **Monografia de conclusão do curso de Oceanologia**. FURG, Rio Grande, RS. 117p

LIMA, S.F., Almeida, L.E.S.B. e Toldo Jr., E.E. 2001. Estimate of longshore sediments transport from waves data to the Rio Grande do Sul coast. *Pesquisas*, 28(2):99-107.

LONG, Thierry; PAIM, Paulo Sérgio Gomes. 1987. Modelo de evolução histórica e holocênica do estuário da Lagoa dos Patos, RS. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 1. Porto Alegre, **Anais...**Porto Alegre: ABEQUA. p. 227-248.

LOPES, C.G., Zanatta, A., Toldo Jr., E.E. e Nunes, J.C. 2008. Mobilidade de curto prazo da linha de praia do Litoral Norte e Médio do RS. *44º Congresso Brasileiro de Geologia*, Curitiba, PR. PAP1693.

MARTINS, L.R. 1967. Aspectos texturais e deposicionais dos sedimentos praias e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. **Publicação Especial IG, UFRGS, 13.** 100 p.

MARTINS, L.R.; Urien, C.M. & Martins, I.R. 1973. Sedimentos modernos e relíquias da plataforma continental sul americana oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27. 1973. Aracajú, Anais... SBG., v.1: 212-213.

MARTINS, L.R. & Corrêa, I.C. 1996. Morphology and Sedimentology of Southwest Atlantic Coastal Zone and Continental Shelf from Cabo Frio (Brazil) to Peninsula Valdes (Argentina). Porto Alegre, RS., Brasil. IOC—UNESCO / MCT / CPRM Publication, 20 maps and glossary, 74p.

NICOLODI, J.L., Toldo Jr. E.E. e Almeida, L.E.S.B. 2003. Correntes Costeiras Induzidas por Eventos de Tempestades no Litoral Médio do Rio Grande do Sul. *IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*, Anais, ABEQUA, CD, 3p.

NICOLODI, J.L.; Siegle, E.; Rechden Fo., R. & Corrêa, I.C.S. 2002. Análise sedimentológica do pós-praia no Rio Grande do Sul. In: Martins, L.R., Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R (eds). **Erosão Costeira: Causas, análise de risco e sua relação com**

a gênese de depósitos minerais. Porto Alegre. RS, Brasil. Editora CECO-IGUFRGS, 3p.

GUPTA, Ravi P. **Remote Sensing Geology.** Berlin: Springer. 655 p.

ROSATI, J.D e Kraus, N.C. 2001. Sediment budget analysis system (SBAS). ERDC/CHL CHETN-XIV-3, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

ROSATI, J.D. 2005. Concepts in Sediment Budgets. *Journal of Coastal Research*. 21(2):307-322.

SAVAGE, R. P. 1962. "Laboratory determination of littoral transport rates," *Journal of the waterway port, coastal, and ocean division, American society of civil engineers*, N° WW2, pp69-92.

SAYAO, O. 1982. "Beach profiles and littoral sand transport", PhD. Diss., department of civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

SHORT, A.D. 1999. **Hand Book of Beach and Shoreface Morphodynamics.** Wiley. 379p.

SIEGLE, E. 1996. **Distribuição sedimentar ao longo do Litoral Sul Rio Grandense (Trecho Farol da Conceição – Arroio Chuí) e fatores condicionantes.** 91p. Trabalho de Graduação. Oceanografia. Fundação Universidade Rio Grande.

TOLDO JR., E.E., Almeida, L.E.S.B., Barros, C., e Martins, L.R. 1999. Retreat of the Rio Grande do Sul coastal zone, Brazil. Em: Martins, L.R. and Santana, C.I. (eds.). *Non Living Resources of the Southern Brazilian Coastal Zone and Continental Margin*. Porto Alegre, RS., Brazil: Editora CECO-IG-UFRGS, pp. 62-68.

TOLDO JR., E.E. e Almeida, L.E.S.B. 2003. A linha d' água como indicadora da posição da linha de praia. *IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. Recife, PE. Anais, ABEQUA, CD, 3p.

TOLDO JR., E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S. e Esteves, L.S. 2006. Coastal Dunes and Shoreface Width as a Function of Longshore Transport. *Journal of Coastal Research, Proceedings of the 8th International Coastal Symposium*. SI39:390-394.

TOLDO JR. E.E., Almeida, L.E.S.B., Martins, L.R.S., Gruber, N.L.S., Barros, C.E., Nicolodi, J.L., Farina, L., Nunes, J.C. 2007. Hidrodinâmica e Sedimentologia das Praias Oceânicas do Rio Grande do Sul Em: *50 anos de Geologia do Instituto de Geociências* ed.Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, v.1, p. 299-315.

TOMAZELLI, L. J. 1990. Contribuição ao estudo dos sistemas desposicionais Holocênicos do nordeste da província costeira do Rio Grande do Sul, com ênfase no sistema eólico. Universidade Federal do Rio grande do Sul, Curso de Pós-graduação em Geociências. Tese de doutorado, 270 p

TOMAZELLI, L.J., Dillenburg, S.R. e Villwock, J.A. 2000. Late quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, Southern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3):474-476.

TOMAZELLI, L.J. & Villwock, J.A. 1992. Considerações sobre o ambiente praias e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas**, 19:3-12

U.S. Army Coastal Engineering Research Center / CERC, 1984. **Shore Protection Manual**. 4ed., Vol (1). Waterways Experiment Station, Corps of Engineers. USA. 208 p.