

# FERRAMENTAS DE PRÉ E PÓS-PROCESSAMENTO PARA PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM ZONAS COSTEIRAS USANDO UM SIG

SUSANA B. O. SZEWCZYK<sup>1</sup>, PAULO R. F. TEIXEIRA<sup>2</sup> e MARIA A. V. SANTOS<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mestranda do Curso de Engenharia Oceânica – FURG – [su\\_oceano@hotmail.com](mailto:su_oceano@hotmail.com)

<sup>2</sup> Professor do Departamento de Materiais e Construção; Doutor em Engenharia Civil; [teixeira@dmc.furg.br](mailto:teixeira@dmc.furg.br)

<sup>3</sup> Professora do Departamento de Materiais e Construção; Doutora em Engenharia Civil; [angela@dmc.furg.br](mailto:angela@dmc.furg.br)

## RESUMO

A utilização de modelos numéricos na análise de problemas relacionados à Engenharia Costeira envolve a compatibilização de informações geográficas com os dados de entrada e saída desses modelos. No presente trabalho, implementa-se uma plataforma que permite automatizar tarefas de pré e pós-processamento, necessárias à utilização de um modelo numérico de propagação de ondas em zonas costeiras. A mesma permite que os dados, carregados num Sistema de Informação Geográfica (SIG), possam ser acessados por um modelo de propagação de ondas. De maneira análoga, os resultados gerados pelo modelo podem ser georreferenciados no SIG. A implementação da plataforma de compatibilidade foi desenvolvida em linguagem FORTRAN 90, e permite a ligação entre o modelo em diferenças finitas REFDFIF e a ferramenta de georreferenciamento SPRING [INPE/DPI]. A validação da plataforma implementada é feita por meio da simulação da propagação de uma onda em um domínio quadrangular e de fundo de inclinação constante.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema de Informação Geográfica, modelos numéricos, propagação de ondas

## 1 – INTRODUÇÃO

A gestão integrada do litoral, a exploração dos recursos marinhos, as diversas vertentes dos estudos oceanográficos, o planejamento, a execução e o controle de obras marítimas são exemplos de atividades cujo sucesso exige o conhecimento mais completo e atualizado possível do meio em que ocorrem, ou seja, o ambiente marinho. De igual forma, a condução de operações navais e aeronavais requer esse conhecimento. A realidade mostra que o conjunto de informações sobre o ambiente marinho é vasto e rico. No entanto, essa riqueza não pode ser utilizada na sua potencialidade enquanto não existir um sistema que, de forma cientificamente organizada, permita a exploração integrada da informação proveniente dos vários domínios do conhecimento. A utilização racional da informação disponível passa, inevitavelmente, pela construção de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

O SIG pode ser considerado, sob o ponto de vista de sua funcionalidade, como um conjunto de ferramentas para recolha, armazenamento, organização e seleção, transformação e representação de informação de natureza espacial, do mundo real para um determinado conjunto de circunstâncias, conforme Burrough [3].

A plataforma desenvolvida neste trabalho automatiza as tarefas de pré e pós-processamento, necessárias à utilização de um modelo numérico de propagação de ondas, permitindo que os dados carregados num Sistema de Informação Geográfica (SIG) possam ser acessados por esse modelo.

As ondas superficiais de gravidade são a principal e mais constante forma de transporte de energia no mar, exercendo papel preponderante na determinação das feições costeiras e constituindo-se na mais efetiva ameaça às obras costeiras, à segurança da navegação e às operações navais. Pode-se dizer, portanto, que o conhecimento do clima de ondas de uma região e a capacidade de previsão do estado de agitação marítima são de fundamental importância para todas as atividades ligadas ao oceano.

### 1.1 – Geoprocessamento

Um sistema de geoprocessamento é destinado ao processamento de dados referenciados geograficamente (ou georreferenciados), desde a sua coleta até a geração de saída na forma de mapas convencionais, relatórios, arquivos digitais etc., devendo prever recursos para sua estocagem, gerenciamento, manipulação e análise. O geoprocessamento pode ser considerado como uma ciência multidisciplinar que possui contribuições de muitas áreas. Um sistema de geoprocessamento armazena a geometria e os atributos dos dados que estão georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre numa projeção cartográfica. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados.

### 1.2 – Sistema de Informação Geográfica – SIG

De forma geral, as funções de processamento de um SIG operam sobre dados em uma área de trabalho em memória principal. A ligação entre os dados geográficos e as funções de processamento do SIG é feita por mecanismos de seleção e consulta que definem restrições sobre o conjunto de dados.

O requisito de armazenar a geometria dos objetos geográficos e de seus atributos representa uma dualidade básica para SIGs. Para cada objeto geográfico, o SIG necessita armazenar seus atributos e as várias representações gráficas associadas. Em particular, quando essas informações são localizáveis na Terra (na

superfície, acima ou abaixo dela), são ditas geográficas [15]. Os SIGs são utilizados em áreas e aplicações variadas, de análise ambiental a planejamento urbano, de gerenciamento de redes de serviços públicos a monitoramento de veículos e navegação, tais como computação gráfica, processamento digital de imagens e banco de dados, havendo ainda esforço nas áreas de algoritmos, estrutura de dados, engenharia de software e otimização. Além disso, os SIGs utilizam conceitos e técnicas de outras áreas do conhecimento, em particular na área de geociências (cartografia, geografia, topografia).

### 1.3 – Conceitos básicos

Todos os levantamentos desenvolvidos em um país ou região, sejam geodésicos ou topográficos, devem ser coordenados, isto é, devem estar relacionados a um único sistema de referência. Esse sistema que serve de apoio aos trabalhos cartográficos é definido pelas coordenadas geodésicas (latitude e longitude), além da altitude de precisão, determinadas por processos geodésicos. Tais coordenadas (elipsóidicas) são transformadas em coordenadas plano-retangulares por meio da aplicação do sistema de projeção UTM (Universal Transverse Mercator). Baseado na Projeção Cilíndrica Transversa Conforme, esse sistema mantém a forma das figuras representadas, isto é, reduz a um mínimo as deformações angulares. As coordenadas topográficas são, então, vinculadas ao sistema através das coordenadas UTM dos pontos cujas coordenadas – latitude e longitude, bem como a altitude, são determinados por processos geodésicos [15].

O espaçamento entre os meridianos (fuso) é limitado a 60 de amplitude (30 para cada lado do meridiano central), com o objetivo de reduzir as deformações. A palavra *conforme* exprime a preocupação do sistema em manter a forma das figuras representadas, o que significa reduzir a um mínimo possível as deformações angulares. Os meridianos são representados por retas paralelas, e sua convergência nos pólos é negligenciada.

A projeção conforme de Gauss pode ser utilizada tanto para o caso de se considerar a Terra esférica ou elipsóidica. No primeiro caso, os meridianos e paralelos são circunferências; no segundo, se o elipsóide for de revolução, os paralelos continuam sendo circunferências e os meridianos são elipses [15].

O sistema UTM pode ser utilizado para qualquer região da Terra, com exceção das calotas polares. É um sistema de representação plana do elipsóide terrestre disciplinada por um conjunto de especificações (ver detalhes na ref. [19]).

A projeção UTM e a topográfica são representações planas do terreno. Logo, conhecidas as coordenadas topográficas referidas a um sistema com origem arbitrária, é possível transformá-las em coordenadas UTM por meio de uma translação de eixos, de modo que a sua origem coincida com o marco geodésico de coordenadas UTM conhecidas.

Estudos geodésicos apresentam valores diferentes para os elementos do elipsóide, medidos nos vários pontos da Terra. Assim, cada região deve adotar como referência o elipsóide mais indicado. No Brasil, adotou-se o elipsóide de Hayford, cujas dimensões foram consideradas as mais convenientes para a América do Sul. Atualmente, no entanto, utiliza-se com mais frequência o elipsóide da União Astronômica Internacional, homologado em 1967 pela Associação Internacional de Geodésia, que passou a se chamar Elipsóide de Referência.

Para caracterizar um datum, utiliza-se uma superfície de referência e uma superfície de nível. Uma superfície de referência (datum horizontal) consiste em cinco valores: a latitude e longitude de um ponto inicial, o azimute de uma linha que parte desse ponto e duas constantes necessárias para definir o elipsóide de referência. Assim, forma-se a base para o cálculo dos levantamentos de controle horizontal, no qual se considera a curvatura da Terra. A superfície de nível (datum vertical) refere-se às altitudes. Para a definição do datum, escolhe-se um ponto mais ou menos central em relação à área de abrangência do datum. Para o Brasil, nos mapas mais antigos adota-se o Datum de Córrego Alegre – MG, e mais recentemente, o Datum SAD 69 (Datum Sul-Americano de 1969).

## 2 – SISTEMA PARA PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS – SPRING

### 2.1 – Características principais do SPRING

A ferramenta de georreferenciamento SPRING [19] (Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas) é um software de domínio público desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE/DPI. É um SIG, tratado como um Banco de Dados Geográfico, uma vez que foi concebido com todas as ferramentas de um sistema de informação dentro da estrutura de banco de dados relacionais.

Como um sistema de geoprocessamento, o SPRING não é simplesmente um sistema computacional projetado para fazer mapas. Embora possa criar mapas em diferentes escalas, em diferentes projeções e com diferentes cores, ele é principalmente uma ferramenta de análise que auxilia na tomada de decisões.

Escolheu-se o SPRING para o desenvolvimento deste trabalho porque possibilita:

- a geração de grades retangulares,
- a escolha do sistema de projeção (sistema UTM – Universal Transverse Mercator), que converte latitudes e longitudes para coordenadas retangulares  $x$  e  $y$ , em metros.

Ambas são condições para o modelo de propagação de ondas REFDIF desenvolvido por Kirby [10].

O SPRING é baseado num modelo de dados orientado a objetos, do qual são derivadas sua interface de menus e a linguagem espacial LEGAL [19]. Algoritmos inovadores, como os utilizados para indexação espacial, segmentação de imagens e geração de grades triangulares, garantem o desempenho adequado para as mais variadas aplicações.

Outra característica, considerada extremamente importante, é que a base de dados é única, isto é, a estrutura de dados é a mesma quando o usuário trabalha em um microcomputador e em uma estação, não havendo necessidade alguma de conversão de dados.

A motivação básica para o desenvolvimento do SPRING baseia-se em duas premissas: integração de dados e facilidade de uso. No primeiro caso, a complexidade dos problemas ambientais do Brasil requer uma forte capacidade de integração de dados entre imagens de satélite, mapas temáticos e cadastrais e modelos numéricos de terreno. Além disso, muitos dos sistemas disponíveis no mercado nacional apresentam alta complexidade de uso e demandam tempo de aprendizado muito longo. Os objetivos do sistema SPRING são [4]:

- Integrar as tecnologias de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica.
- Utilizar modelo de dados orientado a objetos, que melhor reflete a metodologia de trabalho de estudos ambientais e cadastrais.
- Fornecer ao usuário um ambiente interativo para visualizar, manipular e editar imagens e dados geográficos.

## 2.2 – Modelagem Numérica de Terreno (MNT)

Um modelo numérico de terreno – MNT (em inglês, DTM-Digital Terrain Model) é uma representação matemática da distribuição espacial de determinada característica vinculada a uma superfície real. A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado. Dentre alguns usos do MNT pode-se citar, de acordo com Burrough [3], os seguintes;

- a) Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- b) Análises de corte-aterro para projetos de estradas e barragens;
- c) Elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio a análise de geomorfologia e erodibilidade;
- c) Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- d) Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Para a representação de uma superfície real no computador, é indispensável a elaboração e criação de um modelo digital, que pode estar representado por equações analíticas ou uma rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno. No SPRING, um MNT é criado na forma de uma grade de pontos regulares e irregulares.

A criação de um modelo numérico de terreno corresponde a uma nova maneira de enfocar o problema da elaboração e implantação de projetos. A partir dos modelos (grades), pode-se calcular diretamente volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e aspecto, gerar fatiamentos nos intervalos desejados e perspectivas tridimensionais.

No processo de modelagem numérica de terreno, pode-se distinguir três fases: aquisição dos dados, geração de grades e elaboração de produtos representando as informações obtidas.

As grades retangulares são geralmente utilizadas em aplicações qualitativas, ou seja, para visualização da superfície, enquanto o modelo de grade irregular é utilizado quando se requer maior precisão na análise quantitativa dos dados.

No SPRING, a grade regular pode ser gerada a partir de amostras, ou seja, de pontos e linhas. Nesse caso, podem ser utilizados os seguintes interpeladores: vizinho mais próximo, média simples, média ponderada, média ponderada por quadrante e média ponderada por cota e por quadrante. Para a geração de uma nova grade regular, a partir de outra grade retangular podem ser utilizados os interpeladores linear e bicúbico.

Os dados de MNT estão representados pelas coordenadas  $xyz$ , onde  $z$  caracteriza o parâmetro a ser modelado, sendo  $z=f(x,y)$ . Estes dados são, usualmente, adquiridos segundo uma distribuição irregular no plano  $xy$ , ou seja, não existem relações topológicas definidas entre as posições dos pontos amostrados ou ao longo de linhas com mesmo valor de  $z$  ou mesmo com um espaçamento regular.

A aquisição desses dados é geralmente realizada por levantamentos de campo, digitalização de mapas, medidas fotogramétricas a partir de modelos estereoscópicos e dados altimétricos adquiridos de GPSs, aviões e satélites. Entretanto, as aplicações ou produtos de MNT não são elaborados sobre os dados amostrados, mas sim a partir dos modelos gerados no formato de grade regular ou irregular. Esses formatos simplificam a implementação dos algoritmos de aplicação e os tornam mais rápidos computacionalmente.

### 3 – MODELO DE REFRAÇÃO E DIFRAÇÃO DE ONDAS

A propagação de ondas em regiões com batimetrias regulares envolve muitos processos, tais como a refração, o empolamento (shoaling), a difração, as dissipações de energia.

As técnicas de construção de raios de onda foram muito utilizadas na análise de refração das ondas. Essas técnicas não incluem a difração de ondas, portanto perdem precisão quando esses efeitos são importantes. Atualmente, existem modelos numéricos que simulam o fenômeno da refração, proporcionando resultados da altura e direção das ondas nos pontos de uma grade numérica [6,7].

Para que os efeitos da difração sejam incluídos, é prática geral desconsiderar a refração em áreas onde a difração é dominante, usando uma solução analítica de Sommerfeld [19] para o fundo plano [18]. Em áreas afastadas dos efeitos de difração, considera-se somente a refração. Obviamente que essa técnica é imprecisa, não permitindo a inclusão da difração de forma adequada.

Os modelos combinados de refração e difração incluem ambos os efeitos explicitamente, permitindo a simulação de ondas em regiões onde a batimetria é irregular e a difração é importante. O REFDDIF é um modelo de refração-difração de ondas, desenvolvido na Universidade de Delaware por Kirby e Dalrymple [11], e inclui a correção da celeridade da onda até a ordem de Stokes III.

A equação de Berkhoff [1], conhecida como a equação de declive suave (mild-slope), é escrita em termos de deslocamento do operador gradiente horizontal  $\nabla_h$ , da forma:

$$\nabla_h \cdot (C C_g \nabla_h \eta) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad (1)$$

onde

$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}$  é a celeridade,  $k = \frac{2\pi}{L}$  é o número de onda,  $C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)$  é a celeridade de grupo, sendo  $h(x,y)$  a profundidade local e  $g$  a aceleração da gravidade. O número de onda local  $k(x,y)$  é relacionado à frequência angular da onda  $\sigma$ , e a profundidade  $h$  pela relação de dispersão dada por:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (2)$$

Os modelos de solução da equação de declive suave (mild-slope) são baseadas no princípio da conservação de energia, assumindo a teoria linear da onda, a qual considera que a onda se propaga sobre fundos de inclinação suave e que o movimento é irrotacional, originando a existência de um potencial.

Vários autores aplicaram o modelo de declive suave (mild-slope) em muitos exemplos, inicialmente usando o método de elementos finitos, tais como Jonsson e Skovgaard [9], Bettess e Zienkiewicz [2] e Houston [8].

Radder [17] desenvolveu a aproximação parabólica que não inclui o fenômeno da reflexão, e neste caso a difração é incluída apenas na direção transversal à direção de propagação. Assim, esse modelo tem limitações relativas aos ângulos de propagação de onda e deve ser aplicado considerando a direção principal de propagação da onda orientada segundo a malha de cálculo.

O REFDDIF, que utiliza esse modelo, inclui a interação onda-corrente [9] e a dissipação devido à rebentação da onda [5]. Além disso, inclui diferentes modelos de dissipação por atrito de fundo, considerando os efeitos de camada limite.

Trata-se, pois, de um modelo adequado para a propagação de onda desde o largo até próximo da costa, desde que a difração em torno de obstáculos e a reflexão não sejam importantes. Tem como vantagem o baixo custo computacional em relação aos modelos hiperbólicos e elípticos.

### 4 – O ALGORITMO DE ACOPLAMENTO DOS PROGRAMAS

Neste capítulo, é descrito o processo de implementação da plataforma de ligação entre o SPRING e o REFDDIF, a etapa de digitalização de uma carta náutica até a visualização dos resultados. Este processo está esquematizado na Figura 1. Basicamente, os programas de ligação pertencentes a esta plataforma são o REFDDIF\_SPRING, utilizado para o acoplamento dos dados gerados pelo SPRING, com os necessários para o REFDDIF e o REFDDIF\_SPRING responsável pela adaptação de saída do REFDDIF com os dados de entrada ao SPRING para a visualização dos resultados.

Após a digitalização das cartas náuticas, obtém-se o arquivo *carta.spr*, contendo a batimetria de cada ponto do plano. Este arquivo é adequado ao formato ASCII para a importação de dados para o programa SPRING, onde será gerada a grade retangular. Para tanto, escolhe-se o sistema de projeção, informam-se os

parâmetros de longitudes e latitudes máximas e mínimas, escala, espaçamento, além da interpolação desejada. A grade retangular (arquivo *bat.dat*) é o arquivo de entrada para o programa SPRING\_REFDIF. Nesse programa, o *bat.dat* serve de base para a geração do arquivo adequado ao formato de entrada para o modelo de propagação de ondas REFDIF (*refdat.dat*). Esses passos estão descritos na Figura 1.

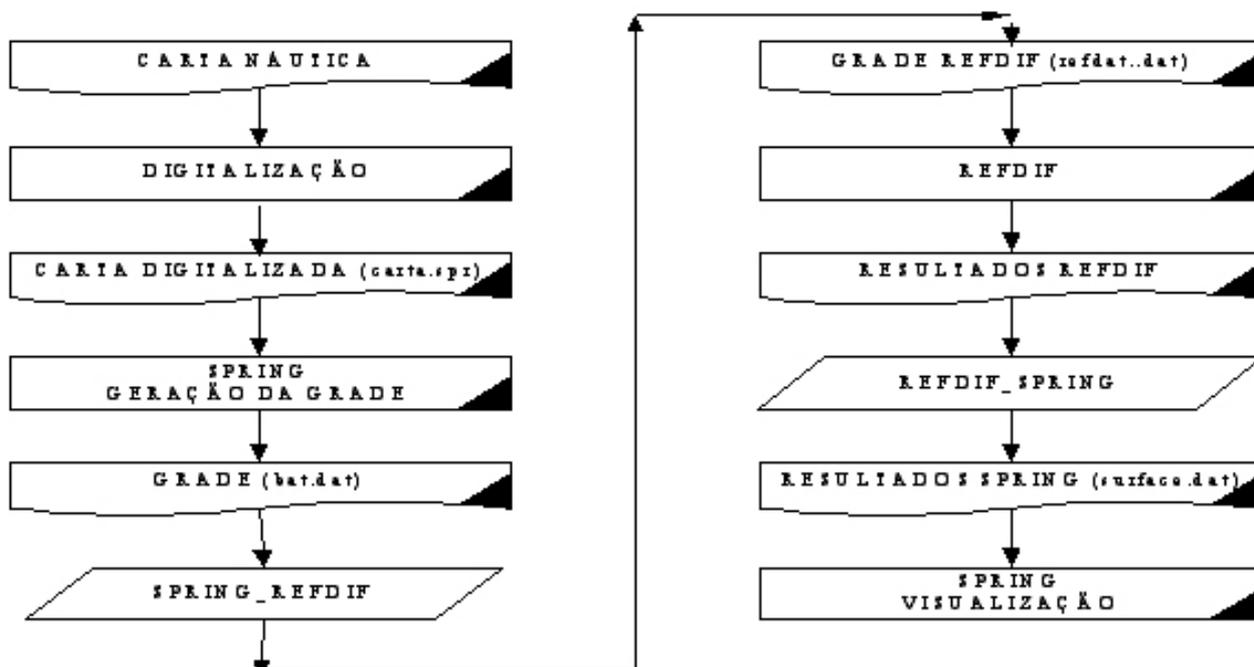


FIGURA 1 – Esquema de compatibilização dos aplicativos

A grade utilizada pelo REFDIF (*refdat.dat*) é gerada pelo programa SPRING\_REFDIF, baseada na grade gerada pelo programa SPRING, denominada de *bat.dat*. Para isso, estabelece-se um ponto de origem ( $x_i, y_i$ ) do sistema de coordenadas da grade do REFDIF, conforme mostra a Figura 2. A orientação desta grade dependerá do ângulo de incidência da onda. Portanto, a grade do REFDIF deve estar rotacionada em relação à grade de base do SPRING.

A batimetria (coordenada  $z$ ) dos pontos da grade do REFDIF é determinada por uma interpolação linear com os pontos da grade do SPRING por meio do programa SPRING\_REFDIF. Esta é realizada, primeiramente, identificando a célula do SPRING à qual está relacionado o ponto da grade do REFDIF cuja batimetria se deseja obter. Após, é feita uma interpolação linear das batimetrias dos pontos pertencentes a essa célula em função da localização do ponto da grade do REFDIF (Figura 3).

A grade utilizada pelo REFDIF (*refdat.dat*) é gerada pelo programa SPRING\_REFDIF, baseada na grade gerada pelo programa SPRING, denominada *bat.dat*. Para isso, estabelece-se um ponto de origem ( $x_i, y_i$ ) do sistema de coordenadas da grade do REFDIF, conforme mostra a Figura 2. A orientação dessa grade dependerá do ângulo de incidência da onda. Portanto, a grade do REFDIF deve estar rotacionada em relação à grade de base do SPRING. A batimetria (coordenada  $z$ ) dos pontos da grade do REFDIF é determinada por uma interpolação linear com os pontos da grade do SPRING através do programa SPRING\_REFDIF. Esta é realizada, primeiramente, identificando a célula do SPRING à qual está relacionado o ponto da grade do REFDIF cuja batimetria se deseja obter. Após, é feita uma interpolação linear das batimetrias dos pontos pertencentes a essa célula em função da localização do ponto da grade do REFDIF (Figura 3).

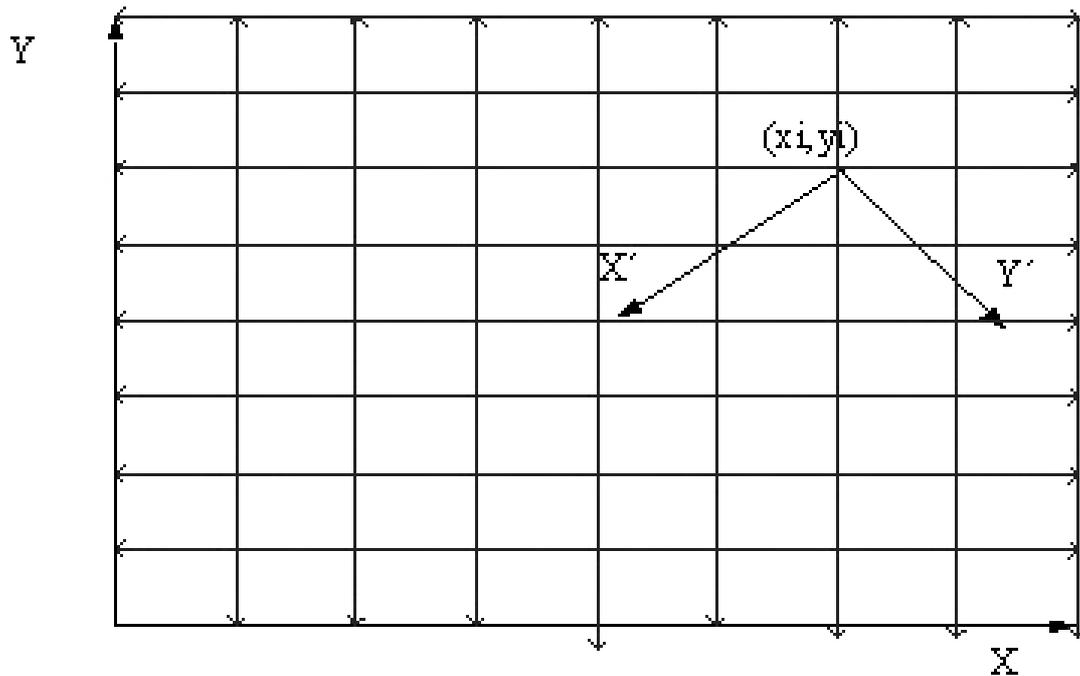


FIGURA 2 – Orientações dos sistemas de eixos

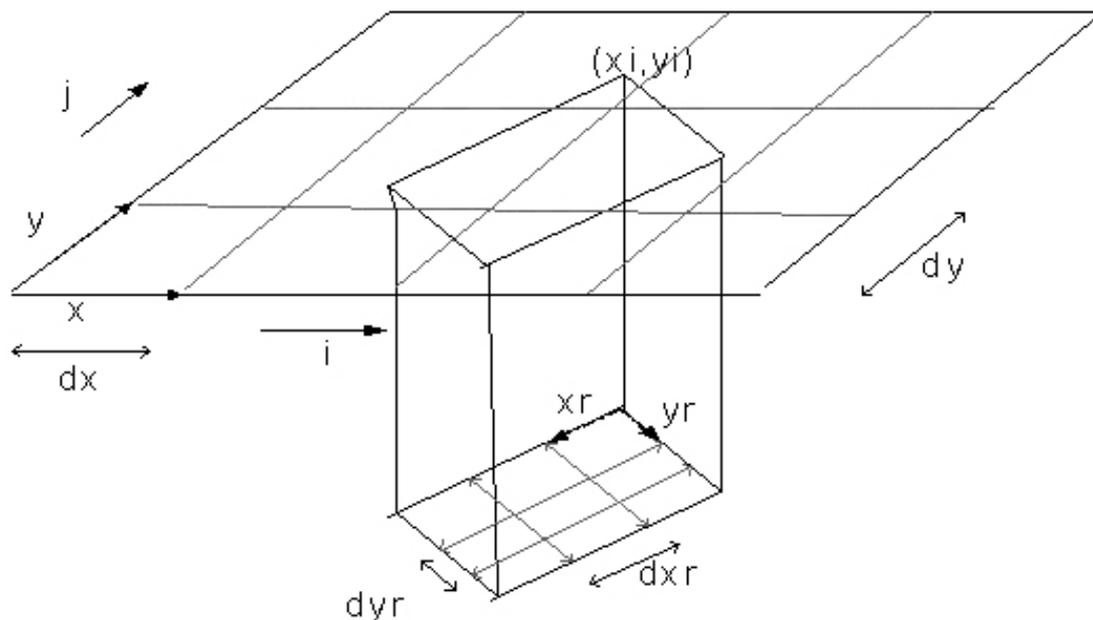


FIGURA 3 – Relação entre as grades do SPRING e REFDIF

O *refdat.dat*, arquivo de saída do programa SPRING\_REFDIF, que contém a batimetria em cada ponto da malha, é o arquivo de entrada para o REFDIF.

Os principais arquivos de saída do modelo REFDIF são:

- *outdat.dat*: valores da altura de onda e direção em cada ponto da malha
- *owave.dat*: valor da amplitude complexa na última linha da malha
- *surface.dat*: valor da superfície livre em cada ponto da malha
- *bottomu*: magnitude da velocidade no fundo para cada ponto da malha
- *angle.dat*: direção da onda em cada ponto da malha
- *height.dat*: altura de onda em cada ponto da malha
- *depth.dat*: profundidades em cada ponto da malha

Após a execução do programa REFDFIF, executa-se o programa REFDFIF\_SPRING. Nesse programa, rotaciona-se novamente a grade no ponto  $(x_i, y_i)$  para retornar ao sistema  $(x, y)$  do programa SPRING. Baseado nos arquivos de direção da onda *angle.dat*, arquivo de profundidade *depth.dat*, arquivo de altura da onda *height.dat*, gera-se o arquivo de entrada do SPRING, denominado *surface.dat*, para a visualização dos resultados.

## 5 – EXEMPLO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA EM UMA RAMPA

Este exemplo consiste na propagação de uma onda monocromática em um domínio quadrado (2000 m x 2000 m) com um fundo de inclinação constante (1:16,67), conforme mostra a Figura 4. A onda possui as seguintes características em águas profundas: período  $T=12$  s; altura  $H_0=1$  m; ângulo de incidência  $\theta_0=30^\circ$ ; comprimento em águas profundas  $L_0=224,64$  m.

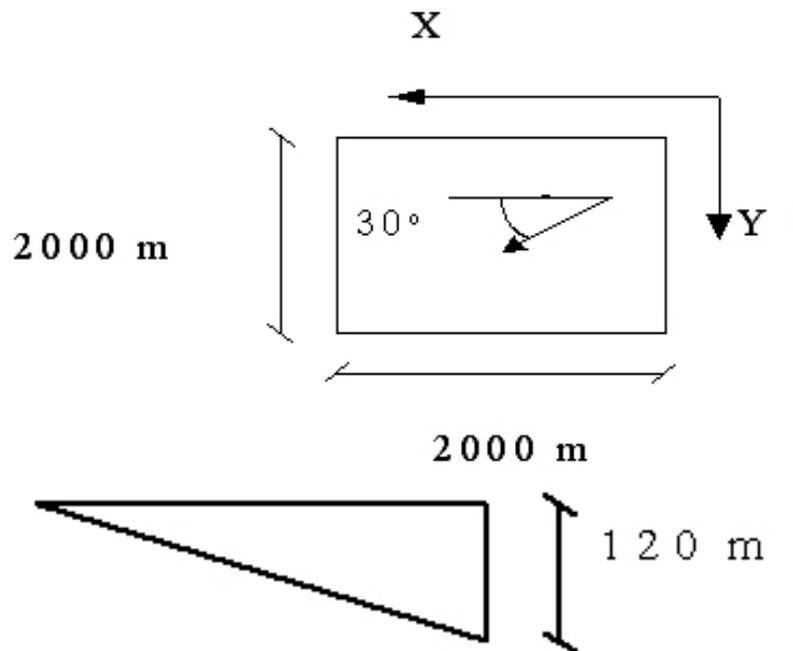


FIGURA 4 – Esquema do exemplo da onda propagando-se em uma rampa

Este problema foi escolhido devido a sua simplicidade e possibilidade de comparação com a solução analítica.

Foi utilizada uma malha de espaçamentos  $dx=20$  m e  $dy=20$  m, localizada entre as longitudes  $-52^\circ30'$  e  $-49^\circ52'$  e latitudes  $-32^\circ39'$  e  $-31^\circ07'$ .

A solução analítica do problema, que envolve o fenômeno da refração de ondas, é governada pela Lei de Snell, a qual relaciona o ângulo da onda refratada com o ângulo da onda incidente, por meio de uma proporcionalidade, dada pela razão entre as velocidades de propagação:

$$\frac{\sin \theta}{C} = \frac{\sin \theta_0}{C_0} \quad (3)$$

onde  $C_0$  é a celeridade de onda em águas profundas,  $(C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}})$ ,  $C=C_0 \tanh(kh)$  é a celeridade da onda em uma profundidade  $h$ ,  $\theta_0$  é o ângulo de incidência da onda em águas profundas ( $\theta_0=30^\circ$ ) e  $\theta$  é o ângulo de incidência a profundidade  $h$ .

Assim, o ângulo  $\theta$  de um raio de onda pode ser determinado em função da profundidade  $h$ , da seguinte forma:

$$\theta = \arcsin(\sin \theta_0 \tanh(kh)) \quad (4)$$

sendo o número de onda determinado pela equação de dispersão.

Por meio do procedimento numérico, foram obtidos os resultados de raios de onda mostrados na Figura 5. O gráfico da Figura 6 faz uma comparação do ângulo de incidência obtido pela análise numérica com o obtido pelo método analítico. Observam-se resultados muito semelhantes, embora a análise numérica proporcione resultados com pequenas perturbações em torno da solução exata.

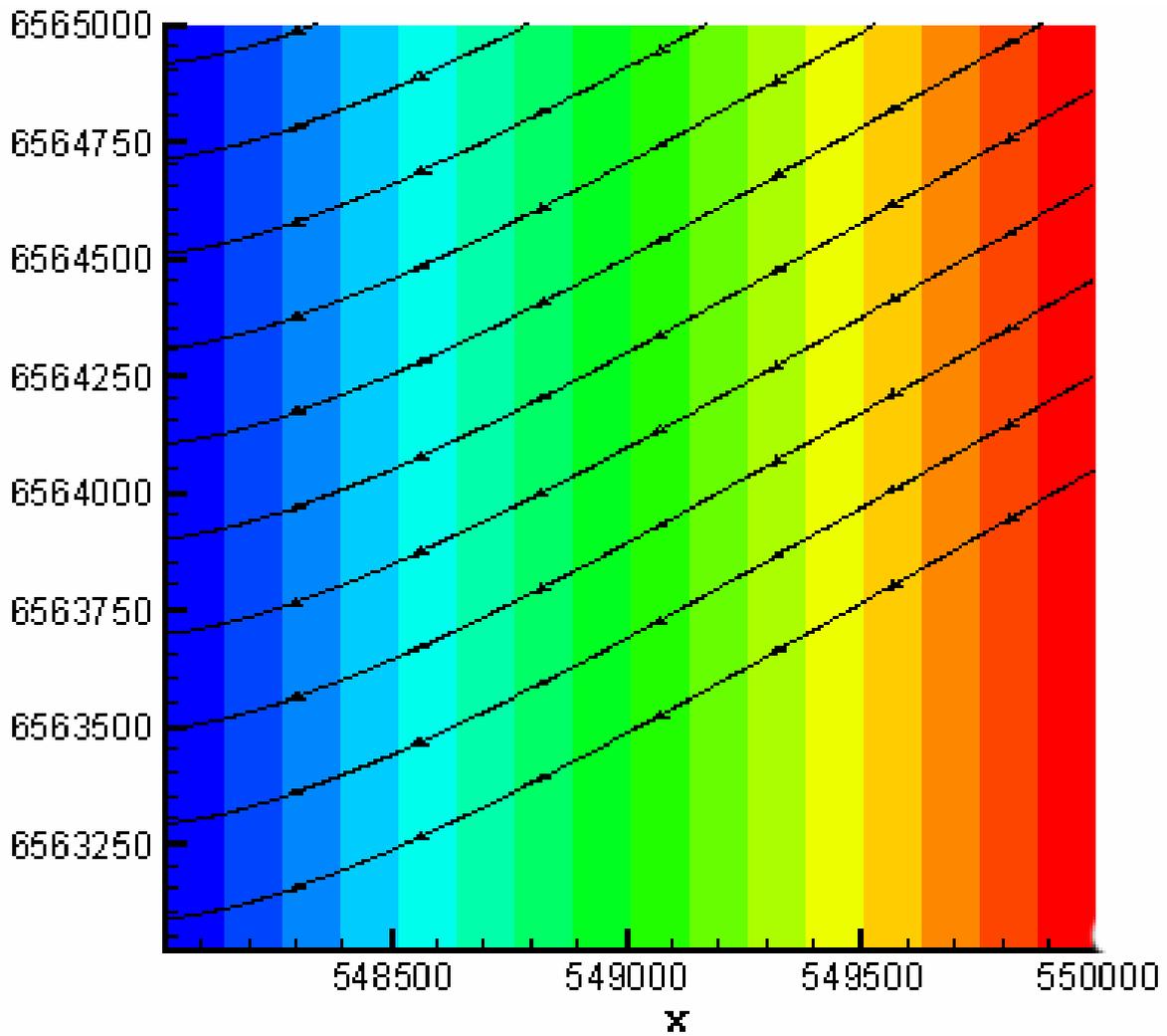


FIGURA 5 – Raios de onda no exemplo rampa

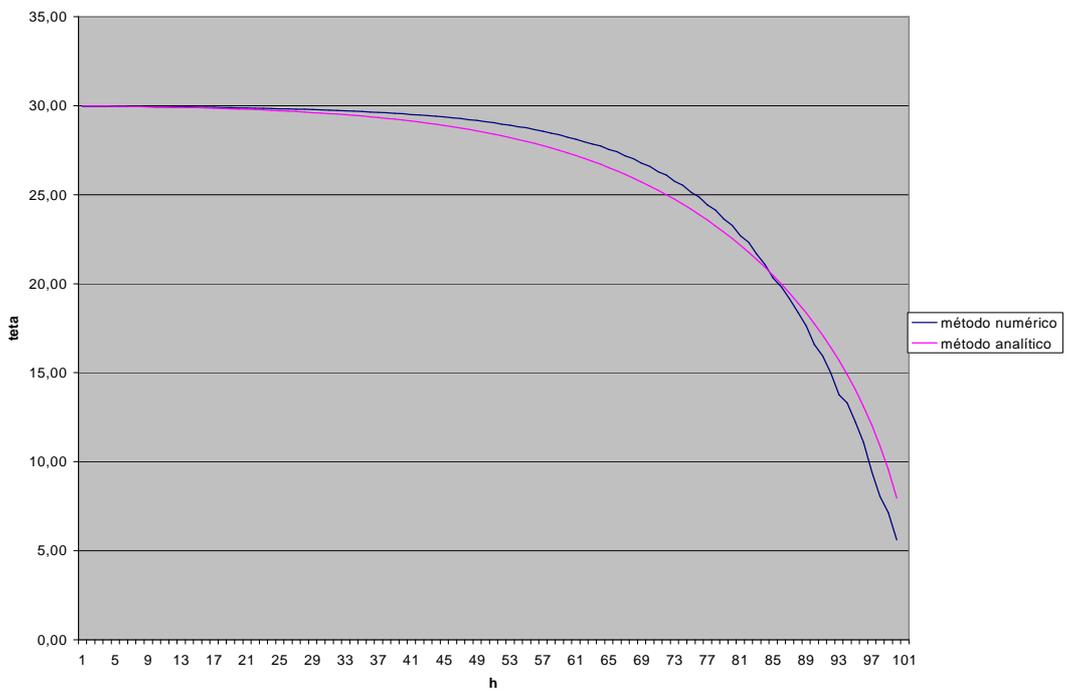


FIGURA 6 – Comparação dos resultados

## 6 – CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho uma plataforma que permite automatizar tarefas de pré e pós-processamento, necessárias à utilização de um modelo numérico de propagação de ondas em zonas costeiras. De maneira análoga, os resultados gerados pelo modelo foram georreferenciados no SIG. A implementação da plataforma permitiu a ligação entre o modelo em diferenças finitas REFDIF desenvolvido por Kirby [10] e a ferramenta de georreferenciamento SPRING [19].

Realizou-se um exemplo de propagação de uma onda monocromática em um domínio quadrado de fundo com inclinação constante para a validação da plataforma de compatibilidade implementada. Neste exemplo, os resultados foram bons, comparados com os da solução analítica baseada na lei de Snell.

A metodologia está sendo aplicada ao litoral do Rio Grande do Sul, para um estudo sob o ponto de vista da Engenharia Costeira, visando a um melhor conhecimento de suas feições e processos. A área de realização das simulações numéricas é a região sul do litoral do Rio Grande do Sul, onde ocorrem os processos mais significativos de modificação das ondas que atingem a costa do Rio Grande do Sul.

## REFERÊNCIAS

1. BERKHOFF, J. C. W. Computation of combined refraction-diffraction. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 13. *Proceedings...* Vancouver, 1972. p. 471-490.
2. BETTESS, P.; ZIENKIEWICZ O. C. Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements. *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, n. 11, p. 1271-1290, 1977.
3. BURROUGH, P. *Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press, 1986.
4. CAMARA, G.; CASANOVA, M.; FREITAS, V. Fields and objects algebras for GIS operations. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 3. Anais... São Paulo: USP, 1995. p. 409-424.
5. DALLY, W. R.; DEAN R. C.; DALRYMPLE, R. A. Wave height variations across beaches of arbitrary profile. *J. Geophys Research*, v. 90, n. C6, p. 11917-11927, 1985.
6. DALRYMPLE, R. A. A model for the refraction of water waves. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 114, n. 4, p. 423-435, 1988.
7. \_\_\_\_\_. REFRACT: A refraction program for water waves. Version 2.0. Report CACR-91-09, Center for Applied Coastal Research, Dept. of Civil Eng., Univ. of Delaware, 1991.
8. HOUSTON, J. R.. Combined refraction-diffraction of short waves using the finite elements method. *Applied Ocean Res.*, n. 3, p. 163-170, 1981.
9. JONSON, I. G.; SKOVGAARD, O. A mild-slope wave equation and its application to tsunami calculations. *Mar Geodesy*, v. 2, p. 41-58, 1979.
10. KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. *Combined Refraction/Diffraction Model, REF/DIF 1, Version 2.5, Documentation and User's Manual* Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware 19716, 1994.
11. \_\_\_\_\_. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography. *J. Fluid Mech.*, n. 136, p. 543-566, 1983.
12. \_\_\_\_\_. The propagation of weakly nonlinear waves in the presence of varying depth and currents. In: CONGRESS I. A. H. R., 20. *Proceedings...* Moscow, 1983.
13. \_\_\_\_\_. Verification of a parabolic equation for propagation of weakly nonlinear waves. *Coast. Eng.*, v. 8, p. 219-232, 1984.
14. \_\_\_\_\_. An approximate model for nonlinear dispersion in monochromatic wave propagation models. *Coast. Eng.*, v. 9, p. 545-561, 1986.
15. LAURINI, R.; THOMPSON D. *Fundamentals of spatial information systems*. San Diego: Academic Press, 1992. p. 680.
16. MONTEIRO, J. P.; MARTINS, R. R.; SANTOS, I. J. Implementação de ferramentas de pré e pós-processamento para um modelo em elementos finitos usando um SIG. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 6. Anais... Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2001.
17. RADDER, A. C. On the parabolic equation method for water-wave propagation. *J. Fluid Mech.*, n. 95, p.159-176, 1979.
18. SOMMERFELD, A. Mathematische theorie der diffraction. *Math. Annalen*, n. 47, p. 317-374, 1896.
19. SPRING - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Processamento de Imagens, INPE/DPI, 2002.