
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**MODELOS DE INTERPOLADORES APLICADOS A
CONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES BATIMÉTRICAS**

THYAGO DE ALMEIDA SILVEIRA

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Portugal

Dissertação de Mestrado

Recife, 2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

THYAGO DE ALMEIDA SILVEIRA

**MODELOS DE INTERPOLADORES APLICADOS A CONSTRUÇÃO DE
SUPERFÍCIES BATIMÉTRICAS**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Cartografia e Sistemas de Geoinformação defendida e aprovada no dia 26 de fevereiro de 2010.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Portugal

Recife
Ano 2010

S587m Silveira, Thyago de Almeida.

Modelos de interpoladores aplicados à construção de superfícies batimétrica / Thyago de Almeida Silveira. - Recife: O Autor, 2010.

xv, 81 folhas, il., fig., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2010.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Portugal.

Inclui bibliografia.

1. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 2. Levantamento Batimétrico. 3. Modelos de Interpoladores. 4. Geoestatística. I. Título.

526.1 CDD (22. ed.)

**UFPE
BCTG/2010-097**

**MODELOS DE INTERPOLADORES
APLICADOS A CONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES
BATIMÉTRICAS**

POR

THYAGO DE ALMEIDA SILVEIRA

Dissertação defendida e aprovada em 26/02/2010.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. JOSÉ LUIZ PORTUGAL
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dra. LUCILENE ANTUNES CORREIA MARQUES DE SÁ
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. TEREZA CRISTINA MEDEIROS DE ARAÚJO
Departamento de Oceanografia - Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação a meus pais *Maria Carmem* e *Manoel*, e ao meu irmão *Diego*, que estão sempre ao meu lado, financiando e tornando nossos sonhos em realidade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos órgãos responsáveis que contribuíram para a realização desse trabalho de pesquisa: ao **Governo Brasileiro** e ao **Ministério da Educação do Brasil (MEC)**, representados pela **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES**, por todo apoio concedido durante a fase do mestrado.

A **Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**; Ao **Departamento de Engenharia Cartográfica**, e ao **Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação (PPCGTG)**, na pessoa da **Prof. Dr^a. Tech. Ándrea de Seixas** e do **Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco**.

Aos **Professores do PPCGTG**, e em especial a Prof. Dr^a. Andrea Flávia Tenório Carneiro, Prof. Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias, Prof. Dr. Carlos Alberto Borba Schuler e ao Prof. Dr. Daniel Carneiro da Silva.

Agradecimento especial ao **Prof. Dr. José Luiz Portugal**, por prestar sua orientação, paciência e dedicação. E por sempre ter incentivado a busca do conhecimento, e o crescimento pessoal e profissional.

Agradecimento mais que especial a **Prof. Dr^a. Lucilene Marqués Sá**, pelo encorajamento durante todas as fases do mestrado, e principalmente pela disponibilidade, prontidão. E também, por ter me proporcionado oportunidades únicas.

Aos órgãos do Governo do Canadá responsáveis pelo fomento do Graduate Students' Exchange Program 2007-2008 (GSEP):

- ***The Government of Canada Awards (GCA)***;
- ***Canadian Bureau for International Education (CBIE)***;
- ***Canadian Commonwealth Scholarship Program (CCSP)***;
- ***Foreign Affairs and International Trade Canada (DFAIT)***;

Ao **Department Geodesy e Geomatics Engineering** da **Universidade de New Brunswick (UNB)**, pela receptividade, especialmente a **Prof. Dr. Sue Nichols**, Supervisora de Intercâmbio no Canadá, pela imensa prestatividade, e pelo acolhimento durante todo tempo do intercâmbio; Ao **Prof. Dr. Marcelo Santos**, por toda estrutura disponibilizada na UNB, para o desenvolvimento da minha pesquisa; E ao **Prof. Dr. John Clarke** do Ocean Mapping Group, por ter auxiliado no desenvolvimento de idéias e no conhecimento de novas tecnologias para aplicação desta pesquisa.

A **Verônica McGinn**, Conference Coordinator of Centre for Property Studies da UNB, pela ajuda durante todo período do intercâmbio.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), o qual sou professor, na pessoa do magnífico **Reitor João Batista de Oliveira Silva**. Aos diretores do IFPB – Campus Picuí, **Prof. Msc. Verônica Arnaud** (Diretora da Sede), **Prof^a. Esp. Maria das Graças Negreiros de Medeiros** (Diretora Educacional) e **Aguinaldo Tejo Filho** (Diretor Administrativo). E aos colegas professores de sala da aula do IFPB – Campus Picuí.

A **NAVTEQ do Brasil**, na pessoal do **Msc. Osni de Luna Filho**, por sua compreensão e paciência. E aos colegas da do escritório em Recife, que dividiram comigo essa jornada.

A minha amiga **p.h.D Silvane Paixão**, por todo tempo dedicado durante minha estadia no Canadá.

Aos colegas da **PPCGTG**, pelo companheirismo e aprendizado mútuo.

A minha noiva, **Nathália Barbosa**, obrigado pela ciência descoberta na PAciência e espera.

Aos meus familiares, pela presença e incentivo desde sempre. Demais colegas e amigos que compartilharam comigo esse tempo precioso, em especial aos amigos do **Projeto Anjos de Jesus**.

RESUMO

SILVEIRA, Thyago de Almeida. **MODELOS DE INTERPOLADORES APLICADOS A CONSTRUÇÃO DE SUPERFÍCIES BATIMÉTRICAS**. Recife, 2010, 73 p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

Nas últimas décadas as Tecnologias da Geoinformação, e mais precisamente os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem sido incorporados no gerenciamento de zonas costeiras e oceânicas. As amostras pontuais, resultantes dos levantamentos batimétricos, representam a profundidade do relevo submerso. A partir delas, por processos de interpolação, a morfologia daquele relevo pode ser obtida. Face às inúmeras possibilidades de modelos de interpoladores, torna-se difícil escolher qual interpolador irá gerar a superfície que mais se aproxime da superfície real. Uma solução passível para esse problema é a baseada em geoestatística. Nesse sentido, esta pesquisa teve por objetivo estabelecer qual interpolador reproduz mais fidedignamente a morfologia da plataforma continental interna, adjacente da Região Metropolitana de Recife, que passa por uma série de estudos para contenção da erosão marinha, sobre custódia do Projeto de Monitoramento Ambiental Integrado - MAI. Para tanto, a metodologia empregada foi dividida em quatro etapas: i) aquisição e análise exploratória dos dados; ii) implementação dos interpoladores Inverso da Distância Ponderada, Polinomial Local, Funções de Base Radial, Polinomial Global e Krigagem; iii) análise estatística dos resultados; e vi) criação da superfície tridimensional. Os resultados obtidos indicaram que não existem diferenças significativas entre o Polinomial Local, Funções de Base Radial e Krigagem. Portanto, qualquer um desses três métodos pode ser recomendado. Entretanto, por ser o único interpolador capaz de espacializar a distribuição dos erros sobre uma superfície, opta-se por selecionar a Krigagem como o interpolador mais indicado para a representação tridimensional da área em estudo. Dessa forma, os resultados comprovam que a metodologia proposta conseguiu alcançar seu objetivo, explicitando que ao interpolar dados advindos de levantamentos batimétricos, é necessário analisar o comportamento do

conjunto de amostras de entrada, com base em análises estatísticas espaciais, de forma a assegurar a veracidade de sua representação em uma superfície tridimensional.

Palavras-Chave: Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Levantamentos Batimétricos, Modelos de Interpoladores, Análises Geoestatísticas.

ABSTRACT

SILVEIRA, Thyago de Almeida. **INTERPOLATIONS MODELS APPLIED TO CONSTRUCTION OF BATIMETRIC SURFACES**. Recife, 2010, 73 p. Dissertation (Master's Degree) – Technology and Geosciences Center, Federal University of Pernambuco.

In the last decades the Geoinformation Technologies, and more precisely the Geographic Information System (GIS) have been incorporate in the administration of coastal and oceanic areas. The punctual data, resultants of the bathymetric surveys, represent the depth of submerged relief. Starting from them, for interpolation processes, the relief's morphology can be obtained. Face of innumerable possibilities of interpolations models, is judged pertinent to determine which of them reproduces with more fidelity the morphology. A possible solution for this problem is an analysis based in geoestatistic. Accordingly, this research had to objective established which interpolator reproduces more faithfully the morphology of internal continental platform, adjacent the Recife's Metropolitan Region, which has been passed by a series of studies to contain the marine erosion, above custody on the Projeto of Monitoramento Ambiental Integrado – MAI. For this, the methodology used was divided in four stages: i) acquisition and exploratory analysis of data; ii) the implementation of interpolators Inverse Distance Weighted, Polynomial Local, Radial Basis Functions, Polynomial Global and Kriging; iii) statistical analysis of results; and vi) the creation of three dimensional surface. The results indicated that there are no significant differences between the Polynomial Local, Radial Basis Functions and Kriging. Therefore, any of those three methods may be recommended. However, be the only interpolators capable of make the distribution of errors on a surface, decide on to select the Kriging as more indicated interpolator for the representation of the three dimensional area in study. Thus, the results show that the proposed methodology has its objective achieved, explaining that to interpolate bathymetric data, it is necessary to analyze the behaviour of the entry data set, based on spatial statistical analyzes, on form to ensure the veracity of its representation in a three dimensional surface.

Key words: Geographic Information System (GIS), Bathymetric Surveys, Interpolations Models, Geoestatistic Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Morfodinâmica praial.....	6
Figura 2	Nível de Redução.....	10
Figura 3	Elementos da batimetria.....	12
Figura 4	Processo de Criação de superfícies usando Interpoladores.....	19
Figura 5	Processo de Interpolação.....	24
Figura 6	Variação espacial da variável regionalizada.....	31
Figura 7	Variograma.....	33
Figura 8	Predição do ponto W usando a Krigagem Ordinária.....	40
Figura 9	Matriz de localização espacial dos pontos conhecidos.....	40
Figura 10	Matriz de distância entre os pontos conhecidos.....	42
Figura 11	Vetor de distância entre os pontos conhecidos e o ponto predito.....	42
Figura 12	Matriz de semivariância dos pontos conhecidos (A).....	42
Figura 13	Vetor da semivariância entre os pontos conhecidos e o ponto predito (b).....	43
Figura 14	Matriz inversa da semivariância dos pontos medidos.....	43
Figura 15	Vetor de pesos e suas respectivas distâncias.....	44
Figura 16	Área de estudo do Projeto MAI.....	49
Figura 17	Procedimentos metodológicos.....	51
Figura 18	Área Piloto.....	54
Figura 19	Histograma com a curva normal das amostras medidas.....	56
Figura 20	Histograma com a curva normal das amostras medidas transformadas por logaritmo.....	57
Figura 21	Histograma com a curva normal das amostras medidas transformadas por radiciação.....	58

Figura 22	Histograma com a curva normais das amostras medidas transformadas por reciprocidade.....	58
Figura 23	Elipse de busca usada na interpolação por IDP.....	59
Figura 24	Histograma com a curva normal dos erros do IDP.....	61
Figura 25	Histograma com a curva normal dos erros do Polinômio Local.....	62
Figura 26	Histograma com a curva normal dos erros da FBR.....	64
Figura 27	Histograma com a curva normal dos erros do Polinômio Global.....	65
Figura 28	Gráfico de Tendência das amostras batimétricas em estudo.....	66
Figura 29	Histograma com a curva normal dos erros da Krigagem.....	68
Figura 30	Superfície batimétrica obtida pela Krigagem (a), e sua Superfície de Erros (b).....	71
Figura 31	Representação Batimétrica Tridimensional gerada.....	72
Figura 32	Consulta espacial a superfície interpolada pela Krigagem, e o seu erro associado.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Variogramas da Krigagem.....	35
Tabela 2	Parâmetros do Teste de Kolmogorov-Smirnov.....	55
Tabela 3	Teste de K-S para as profundidades normalizadas.....	57
Tabela 4	Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada do IDP.....	60
Tabela 5	Teste da normalidade para os erros interpolados do método IDP.....	60
Tabela 6	Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada do Polinomial Local.....	61
Tabela 7	Teste da normalidade para os erros interpolados pelo Polinômio Local.....	62
Tabela 8	Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada da FBR.....	63
Tabela 9	Teste da normalidade para os erros interpolados pelo FBR.....	63
Tabela 10	Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada Polinomial Global.....	64
Tabela 11	Teste da normalidade para os erros interpolados pelo Polinômio Global.....	65
Tabela 12	Parâmetros da Parâmetros Validação Cruzada da <i>Krigagem</i>	67
Tabela 13	Teste da normalidade para os erros interpolados pela Krigagem.....	67
Tabela 14	Estatística descritiva para dos Erros das Interpolações.....	68
Tabela 15	Estatística descritiva para o teste <i>t</i> de amostras emparelhadas.....	70
Tabela 16	Coordenadas dos Pontos 01, 02 e 03.....	73

LISTAS DE SIGLAS

CODERM	Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana
CONDEP	Instituto de Planejamento de Pernambuco
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DHN	Diretoria de Hidrográfica e Navegação
ECO	Ecobatímetro posicionado sob a embarcação
FBR	Função de Base Radial
FIDEM	Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GIS	Geographic Information System
IDP	Inverso da Distância Ponderada
IHO	International Hydrographic Organization
K-S	Kolmogorov-Smirnov
LH	Levantamentos Hidrográficos
MA	Maré
MAI	Monitoramento Ambiental Integrado
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPF	Ministério Público Federal
NR	Nível de Referência
OHI	Organização Hidrográfica Internacional
P	Profundidade
RMR	Região Metropolitana de Recife
RTCM	<i>Radio Technical Committee for Marine Service</i>
SIG	Sistemas de Informações Geográficas

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que possui uma grande extensão territorial, apresentando uma linha de costa que se estende por mais de sete mil quilômetros ao longo do Oceano Atlântico. Uma extensão litorânea tão vasta é utilizada para finalidades diversas, como lazer, pesca, transportes, entre outros. Para tanto, é necessário ter dados confiáveis que possam revelar o comportamento da zona costeira, a fim de proporcionar aos usuários destes recursos, segurança durante suas utilizações.

A produção e a atualização da cartografia náutica são atribuições da Marinha do Brasil, realizadas pela Diretoria de Hidrográfica e Navegação (DHN), seguindo os padrões internacionais de qualidade recomendados pela IHO (*International Hydrographic Organization*).

Devido à dinâmica natural dos ecossistemas marinhos, aliado aos processos provocados por intervenções antrópicas, a morfologia do fundo oceânico pode sofrer alterações significativas ao longo dos anos. Tais mudanças podem ser detectadas por meio dos Levantamentos Batimétricos, que associam a posição da embarcação na superfície da água, com a profundidade atingida naquele exato momento.

Os Levantamentos Batimétricos são realizados com a utilização de equipamentos digitais capazes de imagear o fundo do mar, como ecobatímetros de mono-feixe ou multi-feixe (sensores acústicos), radares e laser (plataformas

aerotransportadas), e com a utilização de imagens de satélites (plataformas espaciais) por varredura em cores ou em infravermelho (AYRES e NETO, 2004).

De acordo com AYRES e NETO (2004), a obtenção da profundidade usando o ecobatímetro de mono-feixe é a mais utilizada quando é levada em consideração a relação custo-benefício para levantamentos nas áreas da plataforma continental interna adjacente (profundidade máxima de 130 metros). O produto resultante é uma malha de pontos tridimensionais que, por si só, não é capaz de gerar diretamente a superfície do fundo do mar imageado. Para construir a superfície que representa tal morfologia, é necessário empregar técnicas de interpolação.

Os interpoladores são funções matemáticas usadas na construção de superfícies contínuas a partir de um conjunto de pontos coletados (BURROUGH; MCDONNELL, 1998). Eles são utilizados para densificação de uma amostra que não cobre todo o domínio de interesse.

Atualmente são conhecidos diversos modelos de interpoladores, cada um com suas particularidades e características, e diante de tantas opções para interpolar dados pontuais, tais como dados batimétricos, torna-se difícil escolher qual interpolador irá gerar a superfície que mais se aproxime da superfície real. Nesse contexto, é pertinente que sejam testados diversos modelos de interpoladores para que se estabeleça qual o mais adequado aos dados batimétricos.

1.1. Objetivos da Pesquisa

1.1.1. Objetivo Geral

Estabelecer com base em indicadores estatísticos, qual modelo de interpolador reproduz mais fidedignamente a morfologia da plataforma continental interna, adjacente a aos municípios de Paulista, Olinda e Recife, a partir de um levantamento batimétrico.

1.1.2. Objetivos Específicos

1. Aplicar os modelos determinísticos de efeito global, de efeito local e os modelos estatísticos de efeitos locais e globais, em uma mesma amostra batimétrica;
2. Avaliar a precisão de cada um dos modelos; e
3. Criar a representação da morfologia da plataforma continental interna, adjacente aos municípios de Paulista, Olinda e Recife.

2. GERENCIAMENTO COSTEIRO

O planejamento de ações que envolvam o ambiente o costeiro é um desafio encontrado em todo mundo. De acordo com DIAS et. al (2007) a intensificação do crescimento populacional junto ao litoral, a ampliação e a diversificação das áreas industriais, o crescimento do turismo litorâneo, e a modificação climática em curso, converteram a faixa do litoral em uma zona de grande complexidade cuja gestão harmônica é muito difícil.

Nesse sentido, o desenvolvimento de ações de Gerenciamento Costeiro integra a tentativa de compatibilização de todos os fatores aludidos, de modo a que sua exploração e utilização destas áreas seja feita de forma harmoniosa e sustentável, visando preservar suas potencialidades para as gerações futuras (DIAS et. al, 2007).

Segundo ABSHER *et al.* (2002, p. 1) zona costeira corresponde à faixa de transição entre o domínio continental e o domínio marinho. No Brasil, a zona costeira apresenta 7.367km de extensão, e é considerada Patrimônio Nacional pela Constituição Federal (BRASIL, 1988) em seu artigo 225, §4º. A utilização deve ser feita na forma da lei, dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quando ao uso dos recursos naturais.

O extenso litoral brasileiro é composto por diversos ecossistemas, tais como manguezais, restingas, campos de dunas, estuários, recifes de coral, marismas, praias, falésias, costões rochosos, entre outros (SERAFINI, 2010).

Assim, o estudo da Geomorfologia é fundamental para o planejamento e manejo integrado da Zona Costeira, pois sua abordagem permite uma configuração dos aspectos de delimitação e comportamento das bacias de drenagem, capacidade de uso do solo, manutenção dos recursos hídricos superficiais e subsuperficiais, e processos geomorfológicos atuantes (NICOLODI e TOLDO JR, 2003)

Neste contexto, o estudo da morfodinâmica da praia (praial) e da plataforma continental, conforme esquema visualizado na Figura 1, insere-se como importantes ferramentas para a compreensão dos processos morfodinâmicos e hidrodinâmicos de ambientes costeiros.

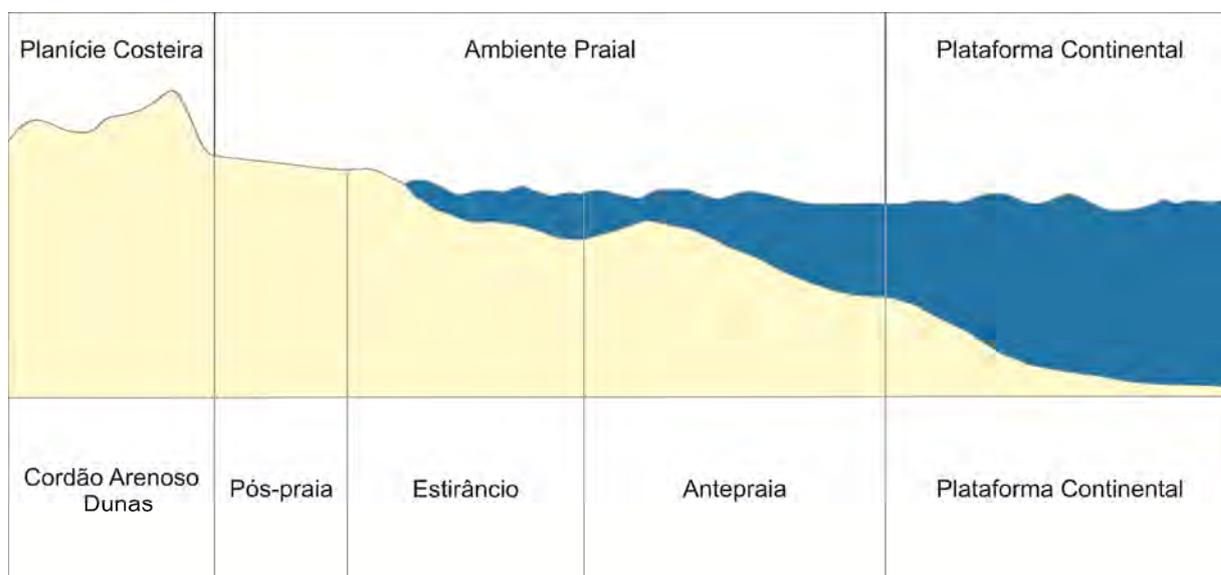


Figura 1 – Morfodinâmica praial.

Fonte: Adaptado de HOEFEL, 1998.

A praia, segundo HOEFEL (1998), pode ser considerada como uma acumulação de sedimentos inconsolidados os quais se estendem entre a zona mais próxima da quebra das ondas (antepraia) até o limite das feições como o cordão arenoso ou das dunas (pós-praia).

Já a plataforma continental representa a extensão submersa dos continente se estendendo desde a antepraia até uma região de aumento do gradiente topográfico, referenciado como quebra da plataforma continental (NETO e SILVA, 2004). Ainda de acordo com os autores, a plataforma continental é caracterizada por apresentar relevo com declives gradientes e suaves com variações pequenas da ordem de 20 m ao longo de profundidades médias de cerca de 130 m.

Conhecer o comportamento morfodinâmico e hidrodinâmico desses ambientes é necessário quando leva-se em consideração a segurança dos banhistas, o manejo de dunas, os critérios para exploração de areia, reconstituição de praias, delimitação submersa de áreas protegidas, entre outras ações que estão intimamente ligados as características geomorfológica deste meio (NICOLODI e TOLDO JR, 2003).

Deste modo, o estudo morfodinâmico das praias e da plataforma continental torna-se fundamental para o desenvolvimento e criação de projetos que possam beneficiar de forma concisa esses ambientes.

2.1. Levantamentos Hidrográficos

As informações contendo dados que se relacionam aos ambientes marinhos e costeiros, diferem dos dados relacionados aos ambientes terrestres em vários aspectos (KRUEGER et al. 2003). Distribuição das amostras, diferentes precisões e resoluções, e também densificação em diferentes partes do oceano, são exemplos de comportamentos divergentes entre esses ambientes.

Tais divergências ocorrem devido à própria dinâmica do fundo oceânico, que por se tratar de um ecossistema ativo, está sujeito a diversas mudanças, tanto naturais, como a variação das marés, quanto antrópicas, como uma construção portuária (KRUG e NOEMBERG, 2005). Essas mudanças podem ser detectadas por meio dos Levantamentos Hidrográficos (LH).

Levantamentos Hidrográficos correspondem ao conjunto de trabalhos executados na obtenção de dados batimétricos, geológicos, maregráficos, fluviométricos, topo-geodésicos, de ondas, de correntes e outros, em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais naturais ou artificiais, navegáveis ou não (DHN, 2009), desde que estejam em conformidade com o Decreto nº 96.000, de dois de maio de 1988, que dispõe sobre a realização de pesquisa e investigação científica na plataforma continental e em águas sob jurisdição brasileira.

O órgão que estabelece as normas para a realização dos levantamentos hidrográficos é a Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Tais normas devem ser seguidas pelos estados-membros, no Brasil é o órgão que representa a OHI.

Segundo a DHN, 2009, os Levantamentos Hidrográficos são classificados em duas categorias em função do propósito de sua execução:

Categoria A - LH executados com o propósito de produzir elementos que sirvam para atualização de cartas e publicações náuticas.

A DHN sugere que todos os LH que envolvam levantamentos batimétricos, ou levantamentos geodésicos e topográficos realizados em apoio aos levantamentos batimétricos, ou realizados com a finalidade de georreferenciar obras sobre águas, instalações portuárias, píeres, pontos notáveis e sinais de auxílios à navegação fixos (balizas, faróis e faroletes), cabos submarinos e toda e qualquer feição topográfica

natural ou artificial relevante sob os aspectos hidrográficos e da segurança da navegação, sejam classificados como nessa categoria (DHN, 2009).

Categoria B - LH executados sem o propósito de produzir elementos que sirvam para atualização de cartas e publicações náuticas.

Devem ser inseridos nesta categoria todos os demais LH cujos trabalhos realizados não se enquadrem nas características dos LH da **Categoria A**. Convém que os LH de batimetria, executados em apoio ao planejamento de dragagens (levantamentos pré-dragagem) sejam assim classificados, posto que a validade dos dados resultantes, normalmente, será efêmera (DHN, 2009).

2.2. Levantamentos Batimétricos

Os levantamentos batimétricos são a principal tarefa de um Levantamento Hidrográfico (LH). Segundo KRUEGER (2005) Os levantamentos batimétricos têm por objetivo realizar as medições de profundidades associadas a uma posição da embarcação na superfície da água. Elas são necessárias em áreas marítimas, fluviais, em lagoas e em canais naturais ou artificiais, navegáveis ou não, visando à representação destas áreas em uma carta.

Os levantamentos batimétricos são realizados de forma indireta, com equipamentos digitais capazes de imagear o fundo do mar. Os sensores acústicos, como o ecobatímetro de mono-feixe ou multi-feixe, e as plataformas aerotransportadas

(radares e laser) ou espaciais (satélites), são exemplos dos instrumentos usados nos levantamentos indiretos (AYRES e NETO, 2004).

Os levantamentos batimétricos são utilizados na representação das linhas isobáticas, que servem para definir o traçado do relevo submerso oceânico. Para a obtenção das profundidades faz-se necessário a definição do plano de referência de navegação. Tal plano é denominado de Nível de Redução – NR (Figura 2), e sua principal função é eliminar as variações das marés, a nível mundial, e garantir que o navegante não encontre nenhuma profundidade menor do que as representadas na carta náutica (DHN, 2009).

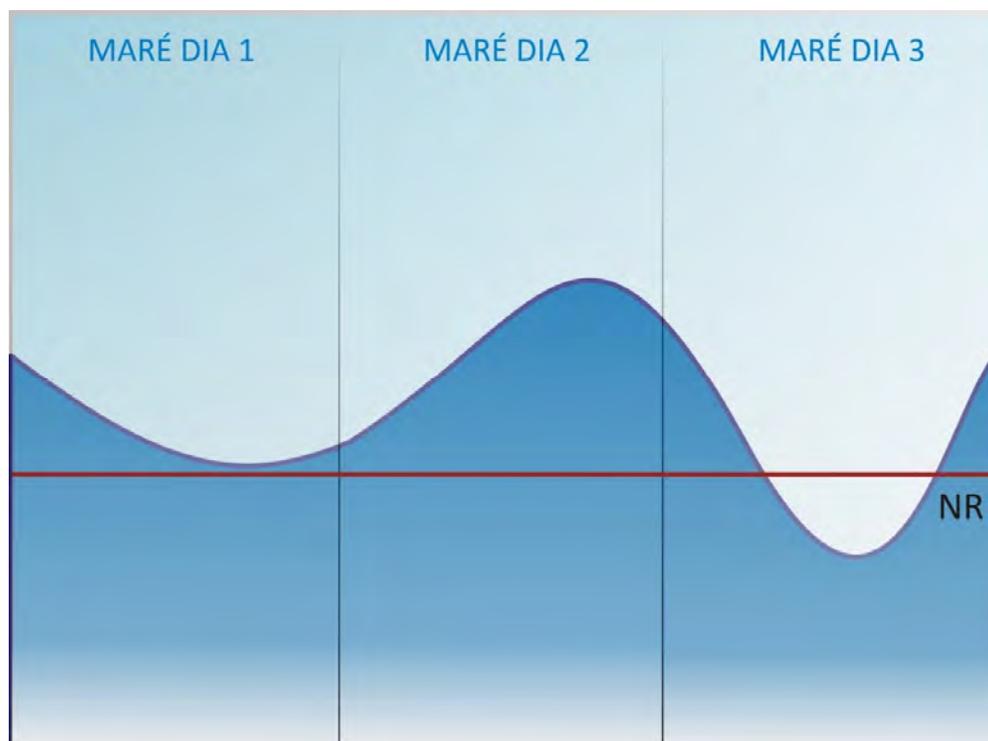


Figura 2 – Nível de Redução.

Para levantamentos batimétricos locais, é necessário levar em consideração o valor da maré no instante da tomada das amostras. Dessa forma, o valor de uma amostra batimétrica será igual à soma do Nível de Redução (NR), acrescido da variação da maré (MA).

De acordo com AYRES e NETO (2004), a obtenção da profundidade usando o ecobatímetro de mono-feixe é a mais utilizada quando é levada em consideração a relação custo-benefício para levantamentos nas áreas da plataforma continental interna adjacente (profundidade máxima de 130 metros). Os equipamentos de alta resolução (210kHz) têm aplicações limitadas em áreas da plataforma, para áreas com profundidades acima de 130 metros é recomendável a utilização de equipamentos com frequências menores, uma vez que além da profundidade, incidem também a estratificação do nível de salinidade e a temperatura da água, fatores que podem provocar erros consideráveis nas medidas batimétricas.

O ecobatímetro consiste em uma fonte emissora de sinais acústicos e um relógio interno que mede o intervalo entre a emissão do sinal, e o instante em que seu eco retorna ao sensor. A profundidade pode ser encontrada pela **Equação (1)**.

$$P = \frac{V_{H_2O} \cdot \Delta t}{2} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

P → é a profundidade calculada;

v_{H_2O} → é a velocidade do som na água (~ 1500m/s);

Δt → é o tempo medido entre a emissão e a recepção do sinal.

O ecobatímetro é posicionado sob a embarcação, e a batimetria é referenciada a partir da posição do sensor na calha do barco. Na Figura 3 pode-se ver como estão disposto os elementos de um levantamento batimétrico: Nível de Referência (NR), Profundidade (P) ou batimetria, Tempo de emissão e recepção do sinal do ecobatímetro (Δt), Ecobatímetro posicionado sob a embarcação (ECO), e Maré (MA).

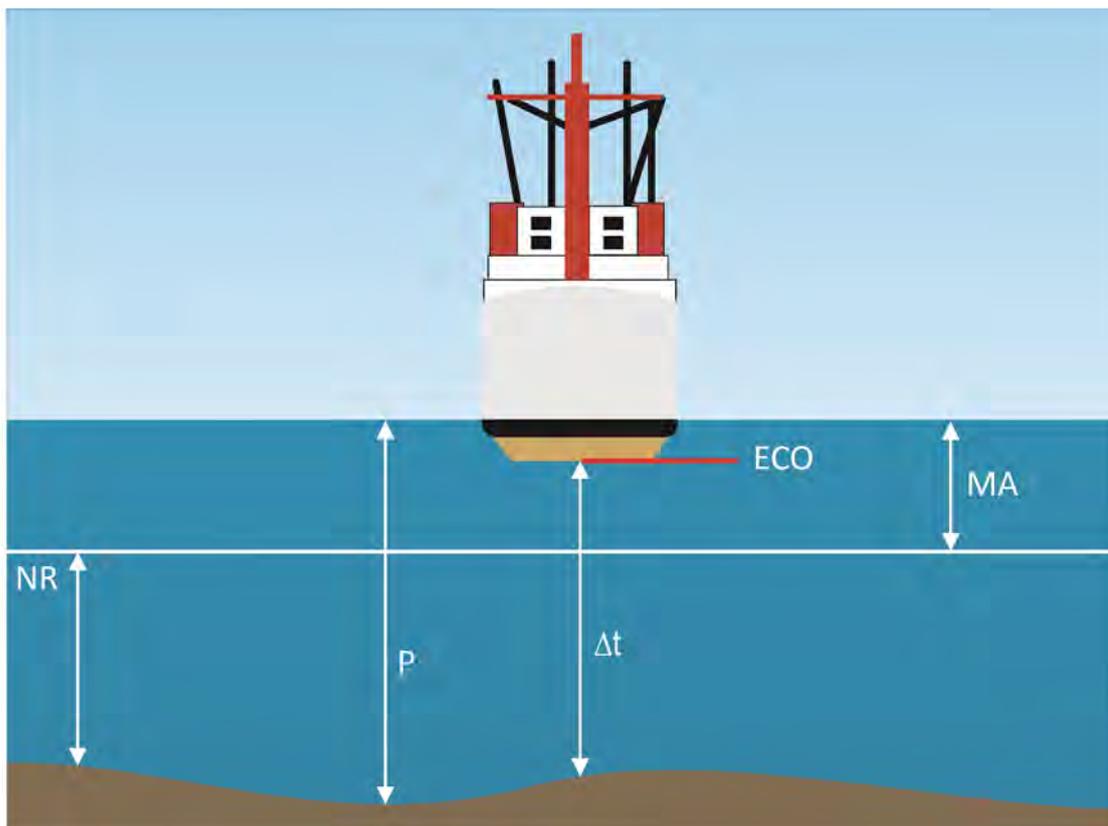


Figura 3 – Elementos da batimetria.

A posição da embarcação é dada através da utilização do *Global Position System* (GPS), que contempla a aquisição de pontos com posteriores correções, ou do *Differential Global Position System* (DGPS), cuja aquisição de pontos acontece com correção simultânea. De acordo com RIBEIRO e KRUEGER (2008), o método DGPS consiste em utilizar simultaneamente dois receptores, um instalado em uma estação fixa de coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência, e um outro em uma estação em permanente movimento, intitulada de estação móvel.

A partir da estação de referência são calculadas as correções diferenciais utilizadas pela estação móvel no processo de cálculo de sua posição (RIBEIRO e KRUEGER, 2008). As correções são enviadas em tempo real por meio de um sistema de comunicação dentro de um formato apropriado, definido pela RTCM (*Radio Technical Committee for Marine Service*) (KRUEGER, 1996).

O resultado do uso conjunto do GPS ou do DGPS e do ecobatímetro, após sua transformação para o sistema de referência adotado, é um conjunto de dados tridimensionais de coordenadas de pontos, que por si só, não é capaz de gerar diretamente a superfície do fundo do mar imageado. Para construir a superfície que representa tal morfologia, é necessário empregar técnicas de interpolação espacial.

3. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG

Segundo ARONOFF (1989) um SIG é uma estrutura computacional baseado na manipulação de dados geográficos que possuem uma localização conhecida, ou seja, que estejam georeferenciados.

A definição de SIG pode ser dividida em três categorias, refletindo cada uma à sua maneira os usos e visões possíveis desta tecnologia (BURROUGH e McDONELL, 1998):

- Baseada em ferramentas: SIG é um poderoso conjunto de técnicas e procedimentos capazes de coletar armazenar, recuperar, transformar e exibir dados espaciais do mundo real (BURROUGH, 1986);
- Baseada em bancos de dados: SIG é um banco de dados indexados espacialmente, sobre o qual opera um conjunto de procedimentos para responder a consultas sobre entidades espaciais (SMITH et al., 1987);
- Baseada em estruturas organizacionais: SIG é um sistema de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente em um ambiente de respostas a problemas (COWEN, 1988).

Os SIG possuem diferentes tipos de classificação dependendo da suas aplicações (SILVEIRA et. al., 2007). Todavia, a escolha do tipo de aplicação depende de variáveis como o tipo de dado manuseado, utilização e finalidade. Segundo BURROUGH (1986) um SIG deve possibilitar respostas a perguntas do tipo:

- a) Onde está o objeto A?
- b) Onde está A em relação ao local B?
- c) Quantas ocorrências do tipo A existem em uma distância D de B?
- d) Qual é o valor de uma função Z na posição X?
- e) Quais as dimensões de B (área, perímetro)?
- f) Qual é o resultado da interseção de vários tipos de dados espaciais?
- g) Qual é o caminho de menor custo, resistência, ou distância entre os pontos X e Y sobre uma rede contínua de pontos que definem um relevo?
- h) O que são os pontos X1 e X2?
- i) Quais objetos estão próximos aos objetos tendo certa combinação de atributos?
- j) Como reclassificar objetos que possuam certa combinação de atributos?
- k) Como projetar um banco de dados digital, modelando uma ação no mundo real, para simular o efeito do processo P através do tempo T, para um dado cenário S.
- l) De que forma converter um conjunto de pontos topográficos, de modo que simulem sua superfície real?
- m) Qual é o caminho que possui a menor distância entre os pontos A e B sobre uma rede contínua de pontos que definem um relevo?

Por serem portadores de múltiplas funções os SIG agregam uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização. Além disso, esses sistemas possibilitam a integração em uma única base de dados de informações geográficas originadas de diversas fontes, destinando-se a utilizações diversas, tais como as de cadastro técnico e multifinalitário, aplicações do meio ambiente e recursos naturais, saúde pública, petróleo e gás, agricultura de precisão, planejamento urbano e de transportes, segurança pública, gerenciamento costeiro, marinho e de pesca.

3.1. SIG com Ênfase no Gerenciamento Costeiro e Oceânico

A representação das características e dos relacionamentos dos atributos costeiros e oceânicos (marinhos) é uma tarefa desafiante para os SIG tradicionais, devido à dinâmica natural dos oceanos e dos sistemas costeiros, e a natureza tridimensional dos volumes aquáticos, que necessitam de uma visão mais ampla para sua representação, justificados pela complexidade que envolve suas características geográficas (WRIGHT et al., 2007).

Assim, o desenvolvimento de aplicações de SIG com ênfase no Gerenciamento Costeiro e Oceânico é resultante da adaptação de uma tecnologia originada e desenvolvida inicialmente para aplicações baseadas no âmbito terrestre.

O SIG com ênfase no Gerenciamento Costeiro e Oceânico permite criar mapas e cenas de visualização tridimensional, de forma a obter uma produção mais realista da morfologia do fundo do mar, possibilitando a extração de informações necessárias ao

mapeamento temático e cartográfico, bem como desenvolvimento de atividades aplicadas ao gerenciamento dos recursos naturais, estudos do habitat pesqueiro, monitoramento do meio ambiente, engenharia submarina, exploração geológica, e segurança para a navegação (FONSECA et al., 2002).

3.2. Análise Espacial

Segundo LONGLEY et. al (2005), as análises espaciais são apontadas como uma dentre as várias ferramentas utilizadas em SIG, que abrangem transformações, manipulações e métodos, que podem ser aplicados para adicionar valores a dados, dar suporte a tomada de decisões, e revelar anomalias que não são perceptíveis diante de uma simples conferência, ou checagem de valores.

As análises espaciais normalmente compreendem consultas a atributos, medidas de distâncias e operações envolvendo camadas de informações. BAILEY e GATRELL (1995) classificam as análises espaciais em três tipos:

- Análises de padrões pontuais – são fenômenos expressos através de casos ocorridos identificados como pontos localizados no espaço, como focos de incêndio, ocorrência de doenças e crimes;
- Análises de superfícies – são superfícies criadas a partir de um conjunto de amostras de pontos espacialmente distribuídas, que representam o comportamento de, por exemplo, dados geológicos, altimétricos e batimétricos;
- Análises de áreas – são análises envolvendo informações agregadas em áreas delimitadas por polígonos fechados, onde se supõe que mudanças importantes só ocorram dentro de seus limites. Geralmente tratam de

dados associados a levantamentos populacionais e estatísticas sobre saúde, relacionando-os aos seus respectivos municípios.

As análises espaciais envolvendo superfícies têm como objetivo representar o fenômeno estudado de forma realista através de superfícies. A conversão de dados que se encontram na forma de pontos em uma representação na forma de grade regular, é feita com o uso de interpoladores, conforme pode ser visualizado na Figura 4.

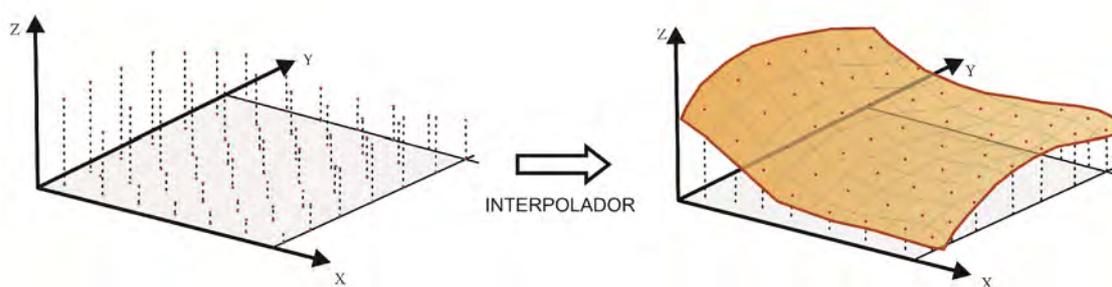


Figura 4 – Processo de Criação de superfícies usando Interpoladores.

Fonte: Adaptado de CAMARA, et al. (2004).

As análises espaciais ocorrem após a aquisição dos dados amostrais, e são compostas das seguintes etapas: Análise da Normalidade dos Dados; Implementação dos Interpoladores; Análises Estatística dos Resultados; e Criação da Superfície Tridimensional.

3.2.1. Análise da Normalidade dos Dados

Segundo FIELD (2009), a análise acerca da normalidade dos dados é realizada a através da aplicação do teste de Kolmogorov-Smirnov (Teste de K-S), que compara escores de uma amostra, a escores de uma distribuição normal modelo de mesma média e variância dos valores encontrados na amostra.

De acordo com ARAÚJO (2007) a estatística apropriada do teste é baseada na maior diferença absoluta entre a função de distribuição normal acumulada $[\hat{F}_{(z_i)}]$, que corresponde a proporção dos valores esperados menores ou iguais a x ; e a frequência relativa observada acumulada e ajustada $[\hat{F}_{(0,5)}]$, correspondendo a proporção dos valores observados menores ou iguais a x ; em que D_{cal} é módulo do desvio máximo observado, conforme a **Equação (2)**:

$$D_{cal} = |\hat{F}_{(z_i)} - \hat{F}_{(0,5)}| \quad \text{Eq. (2)}$$

sendo:

$$\hat{F}_{(0,5)} = \frac{(i - 0,5)}{n}$$

onde:

$\hat{F}_{(z_i)}$ → refere-se a função de distribuição normal acumulada;

$\hat{F}_{(0,5)}$ → refere-se a freqüência relativa observada acumulada e ajustada;

i → refere-se ao número da amostra;

n → refere-se ao tamanho da amostra;

Em seguida compara-se o D_{cal} , com o D_{tab} , que é o desvio máximo tabelado, para um determinado intervalo de confiança. Quando o valor D_{cal} for maior que o valor crítico tabelado D_t ($D_{cal} > D_{tab}$), conclui-se que a característica em estudo da população não segue a distribuição normal; caso contrário ($D_{cal} < D_{tab}$), conclui-se que a amostra é normalmente distribuída.

O teste de Kolmogorov-Smirnov também pode ser interpretado pelo uso do p -value, que corresponde à significância do teste (FIELD, 2009). De forma que se o teste é não significativo (p -value > 0,05) a amostra é normalmente distribuída, caso contrário, a amostra não é normalmente distribuída.

Segundo FIELD (2009) quando o tamanho da amostra é grande, é comum o teste de Kolmogorov-Smirnov apresentar resultado significativo (p -value < 0,05), o que nem sempre é válido. Para sanar essa dúvida sugere-se, a realização de análises gráficas da distribuição dos dados, para então, comprovar ou não a normalidade da distribuição.

Caso se confirme a não normalidade da amostra, pode-se tentar normalizá-la empregando-se transformações do tipo (FIELD, 2009):

- **Logarítmica** ($\log (X_i)$): ao extrair o logaritmo de um conjunto de números reduz-se a assimetria positiva da distribuição;
- **Por radiciação** ($\sqrt{X_i}$): ao tomar a raiz quadrada de um conjunto de valores, reduz-se os valores grandes aproximando-os do centro da distribuição;
- **Recíproca** ($1/X_i$): ao dividir por 1 está-se diminuindo o impacto dos grandes valores, de forma que eles ficaram próximos de zero.

A transformação logarítmica não pode ser aplicada a valores negativos ou zero, já a transformação por radiciação não pode ser aplicada para valores negativos. Para corrigir esses problemas, uma constante pode ser adicionada aos dados para torná-los maiores que zero.

A análise sobre a normalidade dos dados é importante no momento da decisão acerca da utilização dos testes estatísticos. Caso os dados sigam uma distribuição normal, é possível a aplicação de testes paramétricos, caso contrário, se os dados não forem normais, e não conseguirem ser normalizados, pode ser aplicado testes não-paramétricos, ou ainda utilizar o erro, que segundo FIELD (2009), tende a apresentar um comportamento normal.

3.2.2. Implementação dos Interpoladores

Esse procedimento ocorre através da aplicação dos interpoladores. Os Interpoladores são os procedimentos usados na predição de valores de atributos em locais não conhecidos (incertos), a partir de medidas realizadas em pontos com locais conhecidos, para uma mesma área ou região (BURROUGH; MCDONNELL, 1998). Eles estimam os valores de pontos da superfície a partir de um conjunto de amostras vizinhas.

De acordo com BURROUGH e MCDONNELL (1998), a utilização de interpoladores é necessária quando:

- uma superfície discretizada exige um grau de resolução diferente da original (Ex.: transformação de grade com resolução de 100 dpi para 50 dpi), ou
- uma superfície contínua é representada por um modelo de dados diferente do requerido (Ex.: transformação de malha triangular irregular para grade regular), ou
- os dados disponíveis não cobrem o domínio de interesse completamente (Ex.: os infinitos pontos de uma superfície não estão disponíveis).

A Figura 5 mostra os pontos utilizados em uma interpolação, e a superfície resultante sobrepostas. Pode-se identificar que a superfície infere a construção dos valores inexistentes entre os dois perfis, exemplificando, assim, como ocorre o processo de interpolação.

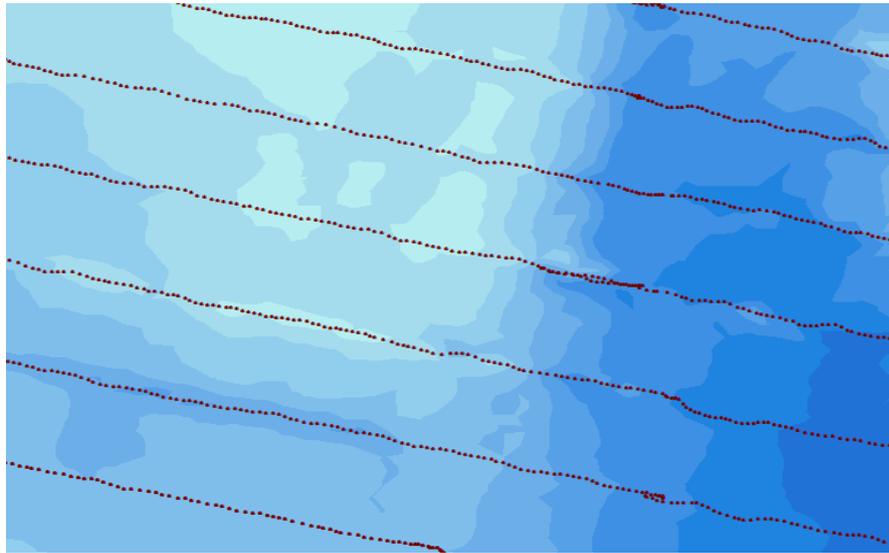


Figura 5 – Processo de Interpolação.

BURROUGH (1987) especifica que os interpoladores se dividem em três tipos, sendo:

- Modelos de Interpoladores Locais: cada ponto da superfície é estimado apenas a partir da interpolação das amostras mais próximas. A suposição implícita é que predominam os efeitos puramente locais.
- Modelos de Interpoladores Globais: a suposição implícita nesta classe de interpoladores é que, para a caracterização do fenômeno em estudo, predomina a variação em larga escala e, que a variabilidade local não é relevante.

- Modelos de Interpoladores Geoestatísticos (Krigagem): são usados quando a variação de atributo é tão irregular, e a densidade de amostras é tal, que métodos simples de interpolação podem dar previsões incertas. Esses métodos podem estabelecer estimativas probabilísticas da qualidade da interpolação.

3.2.2.1. Modelos de Interpoladores Locais

a) Inverso da Distância Ponderada (IDP)

O interpolador Inverso da Distância Ponderada é um interpolador local, e tem a característica de exato, ou seja, um ponto amostral quando predito não sofre alteração. O modelo permite a manipulação dos parâmetros de dimensões do raio de busca, o número de vizinhos a serem processados no cálculo e a potência a ser empregada na ponderação da distância (ESTRADA e SAFRIET, 2006).

Segundo BAJJALI (2002), sua formulação matemática pode ser expressa pela **Equação (3)**:

$$\hat{Z}_o = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \frac{1}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}, \quad \text{Eq. (3)}$$

onde:

$\hat{Z}_o \rightarrow$ é o valor predito no ponto O ;

$Z_i \rightarrow$ são os valores dos pontos amostrais vizinhos ao ponto desconhecido Z_o ;

$d_i \rightarrow$ é a distância que separa cada ponto amostral i ao ponto desconhecido O ;

$n \rightarrow$ é o número de vizinhos;

$p \rightarrow$ é a pontencia adotada.

b) Polinomial Local

O interpolador Polinomial Local possui formulação matemática de acordo com a **Equação (4)**.

$$f \{(x, y)\} = \sum_{r+s \leq p} (b_{rs} \cdot x^r \cdot y^s), \quad \text{Eq. (4)}$$

onde:

$f \{(x, y)\} \rightarrow$ é o valor de elevação (Z), nas coordenadas (X, Y);

$b \rightarrow$ são os coeficientes do polinômio de grau p ;

$p \rightarrow$ é ordem da superfície de tendência.

Neste modelo, são adaptadas “n” superfícies na região de trabalho, sendo estas definidas pelas dimensões do raio de busca (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Dessa forma, esse raio de busca identifica os pontos amostrais que serão empregados no cálculo dos valores preditos (AGRA, 2007).

O modelo permite a manipulação do grau do polinômio, das dimensões do raio de busca, do número de vizinhos a serem processados no cálculo, e dos pesos a serem atribuídos a cada ponderação alcançada na definição do grau do polinômio (ESTRADA e SAFRIET, 2006).

JAKOB e YOUNG (2006) explicitam ainda que o interpolador polinomial local pode ajustar muitos polinômios, cada um especificando sua vizinhança, diferentemente do interpolador polinomial global, que ajusta um polinômio à superfície toda.

c) Funções de Base Radial (FBR)

As Funções de Base Radial correspondem a um grupo de interpoladores chamados *Splines* que produzem superfícies suaves (CHIN-SHUNG YANG *et.al.* 2004). O princípio das *Splines* é minimizar a curvatura total da superfície, semelhante a ajustar uma membrana de borracha aos valores observados, garantindo-se que a mesma contenha os pontos amostrais, configurando-se como um interpolador exato (JAKOB e YOUNG, 2006).

Por causa dessa característica, as Funções de Base Radial não são recomendadas para as superfícies com grandes variações de gradientes, produzindo

bons resultados para superfícies de pouca variação, como de elevação de terreno. (JAKOB e YOUNG, 2006).

De acordo com (JAKOB e YOUNG, 2006) esse grupo de interpoladores pode ser dividido em cinco funções básicas distintas:

- *Thin Plate Spline;*
- *Spline with Tension;*
- *Completely Regularized Spline;*
- *Multiquadric Function;*
- *Inverse Multiquadric Function.*

As funções de base radial são usadas para se calcular superfícies suavizadas de um grande número de pontos, e são inapropriadas quando existem muitas mudanças nos valores em pouca distância (JAKOB e YOUNG, 2006).

3.2.2.2. Modelos de Interpoladores Globais

a) Polinomial Global

Segundo MICHAEL e TRIVELONI (2006), o interpolador polinomial global é uma técnica que consiste no ajustamento de equações que representam à variação espacial de valores através de superfícies matemáticas (polinômios). Dessa forma, este

interpolador tem como resultado uma superfície gradual, que muda de acordo com a definição do grau polinomial usado na interpolação dos dados.

O interpolador polinomial global adapta uma superfície de ordem “n”, previamente definida, à todos os pontos amostrais (BAJJALI, 2002).

O modelo matemático desse interpolador é semelhante ao do Interpolador Local, e é definido pela **Equação (5)** (BURROUGH e MCDONNELL, 1998):

$$f \{(x, y)\} = \sum_{r+s \leq p} (b_{rs} \cdot x^r \cdot y^s), \quad \text{Eq. (5)}$$

onde:

$f \{(x, y)\}$ → é o valor de elevação (Z), nas coordenadas (X, Y);

b → são os coeficientes do polinômio de grau p ;

p → é ordem da superfície de tendência.

Exemplificando:

- Uma superfície de grau zero é da forma $f(x, y) = b_0$, e corresponde a um plano horizontal;
- Uma superfície de grau um é da forma $f(x, y) = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y$, e corresponde a um plano inclinado;

- Uma superfície de grau três é da forma $f(x,y) = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + b_3 \cdot x^3$, e corresponde a uma cúbica.

3.2.1.1. Modelo de Interpoladores Geoestatísticos

a) Krigagem

A Krigagem é um estimador exato que considera tanto efeitos Locais como Globais em sua predição, ou seja, é função dos dados e de covariância espacial (CHAPLOT; *et. al.*, 2006). Segundo BAILEY e GATRELL (1995), este interpolador tem por objetivo identificar a correlação espacial existente entre os valores de um conjunto de amostras com seus valores interpolados, definindo os pesos atribuídos às diversas amostras pela vizinhança a ser considerada, e pelo erro associado ao valor estimado.

De acordo com BURROUGH e MCDONNELL (1998), a Krigagem pode ser expressa pela **Equação (6)**:

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) + \varepsilon'', \quad \text{Eq. (6)}$$

onde:

$Z(s) \rightarrow$ é o valor da função aleatória numa posição s ;

$\mu(s)$ → é uma função determinística que descreve a componente estrutural Z numa posição s ;

$\varepsilon'(s)$ → é um termo estocástico correlacionado com variação local;

ε'' → é um ruído aleatório não correlacionado, normalmente distribuído.

Tal formulação tem interpretação geométrica mostrada na Figura 6, que reproduz o comportamento das amostras correlatas, de acordo com a variação espacial existente entre o conjunto de valores de entrada e o conjunto dos dados interpolados (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

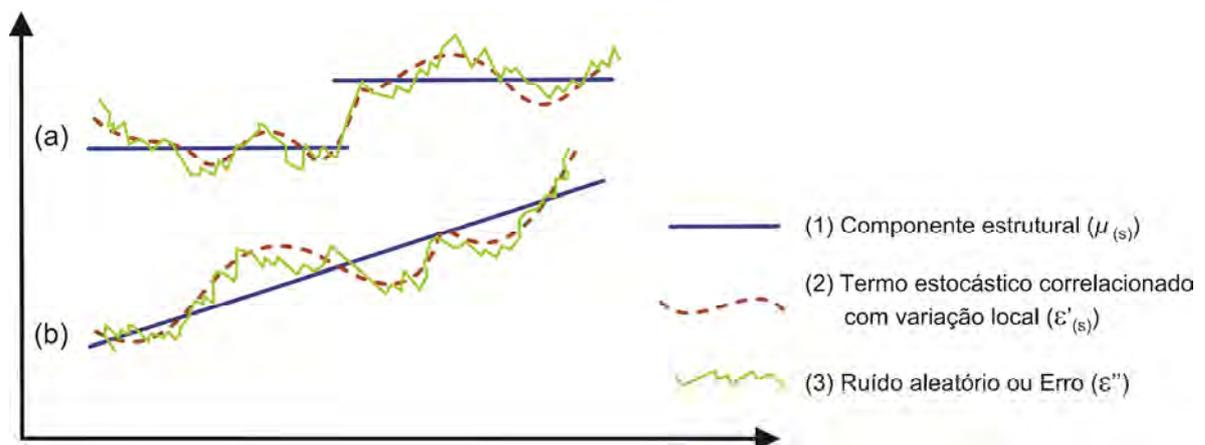


Figura 6 – Variação espacial da variável regionalizada.
 FONTE: Adaptado de BURROUGH e MCDONNELL (1998).

Na Figura 6(a) visualiza-se o comportamento amostras que possuem valores da $\mu(s)$ constante, por sua vez, na Figura 6(b), as amostras representadas revelam o $\mu(s)$ com um comportamento tendencioso.

Quando a função determinística [$\mu(s)$] é constante na região em estudo, os efeitos globais da amostra se tornam quase que inexistentes. Desse modo, a **Equação 6** fica reduzida a determinação do termo estocástico $\varepsilon'(s)$, que é obtido em função de um Variograma (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

MELLO *et. al.*, (2005) definem o Variograma como sendo uma técnica de suporte a Krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço, e é definido pela **Equação (7)**.

$$2\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=0}^{N(h)} [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad \text{Eq. (7)}$$

onde:

$N(h)$ → é o número de amostras separadas por uma distância h ;

$Z_{(x_i)}$ e $Z_{(x_i+h)}$ → são os valores amostrais nas posições x_i e $x_i + h$, separados pela distância h ;

$\hat{\gamma}(h)$ → é a semivariância de todos os pares de amostras $Z_{(x_i)}$ e $Z_{(x_i+h)}$;

A representação gráfica do variograma, segundo SCHAFFRATH *et. al.*, (2007), é mostrada na Figura 7, onde são identificados os seguintes parâmetros:

- **Alcance ou Range (A)**: materializa a distância onde as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;

- **Patamar ou Sill (C_1):** valor da semivariância correspondente ao Alcance (A). O Patamar (C_1) indica o ponto que deixa de existir a dependência espacial, dado que a variação da diferença entre pares de amostras torna-se aproximadamente constante;
- **Efeito Pepita ou Nugget (C_0):** representa a interseção da curva com o eixo y. Sua construção aponta uma descontinuidade, que pode ocorrer por se considerar distâncias menores que a menor distância entre as amostras, por erros de medição ou pelo acaso.

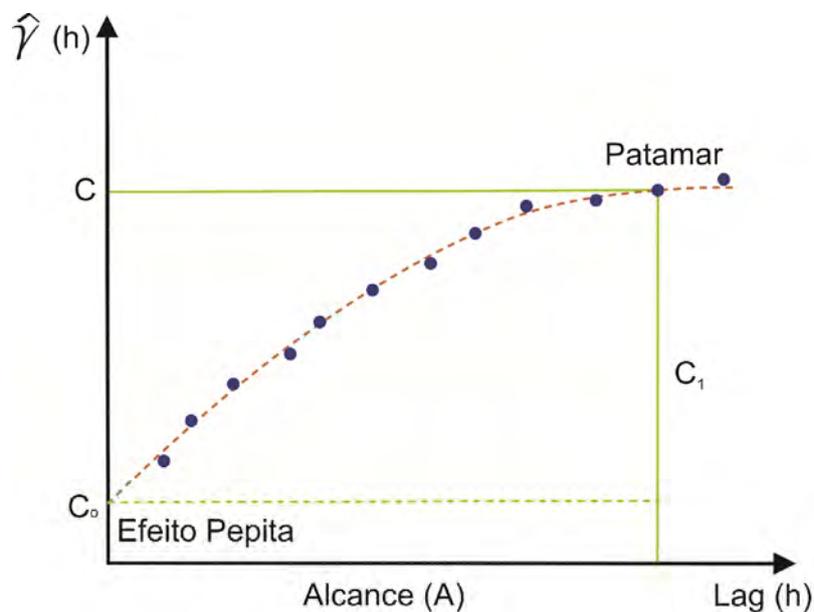


Figura 7 – Variograma.

FONTE: Adaptado de BURROUGH e MCDONNELL (1998).

Existem diversos modelos de Variograma, cada um com formatações específicas. Na Tabela 1, estão descritos o tipo de Variograma, o seu modelo matemático e o gráfico resultante, dos modelos mais conhecidos.

Tabela 1 – Variogramas da Krigagem.

VARIOGRAMA	MODELO	GRÁFICO
Exponencial	$\hat{\gamma}(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right], 0 < h < d;$	
Gaussiano	$\hat{\gamma}(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right], 0 < h < d;$	
Linear	$\hat{\gamma}(h) = c_0 + bh, 0 < h < d;$	
Esférico	$\hat{\gamma}(h) = c_0 + c_1 \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), 0 < h \leq a;$ $\hat{\gamma}(h) = c_0 + c_1, h > a;$ $\hat{\gamma}(0) = 0;$	

FONTE: Adaptado de BURROUGH e MCDONNELL (1998).

onde:

$\hat{\gamma}(h)$ → é a semivariância de todos os pares de amostras Z_i e Z_j ;

c_0 → é o Efeito Pepita (C_0) para todos os pares de amostras Z_i e Z_j ;

c_1 → é o valor da semivariância correspondente ao Alcance (Parcial Sill);

$c_0 + c_1$ → é o Patamar;

a → é o Alcance (A);

h → é o eixo das distâncias.

i. Krigagem Ordinária

Quando a função determinística que descreve a componente estrutural Z numa posição s [$\mu(s)$], é constante na região em estudo, a Krigagem passa a ser do tipo Ordinária.

De acordo com BARROS FILHO (2007), a Krigagem Ordinária é considerada como o melhor estimador linear não-tendencioso, pois, como estimador linear, assume que o valor desconhecido pode ser estimado por uma combinação linear dos pesos dos valores observados nas amostras vizinhas; já como estimador não-tendencioso, assume que a média global dos erros, ou seja, a média das diferenças entre os valores estimados e os valores observados seja nula.

Assim, o processo a ser estimado tem uma média desconhecida, mas constante, cujo valor é igual à média dos valores observados nas amostras. Portanto, os pesos são escolhidos de maneira que o valor médio estimado é restringido pelo valor da média das amostras, sendo para isso necessário que a soma dos pesos seja igual a 1 (BARROS FILHO, 2007).

Dessa forma, o peso reflete a distância entre as amostras e o ponto a estimar, de forma que quanto mais próximas estiverem as amostras do ponto a estimar, maior será o seu peso no estimador (SOARES, 2000).

A Krigagem Ordinária possui a capacidade de avaliar o grau de incerteza dos parâmetros ajustados aos modelos teóricos de semivariogramas. Tal incerteza é o erro da estimativa, que pode ser obtido mediante o procedimento chamado validação do modelo que envolve a re-estimação dos valores conhecidos por meio dos parâmetros ajustados ao modelo do semivariograma (CAMARGO, 1997).

BARROS FILHO (2007) afirma que a Krigagem Ordinária minimiza a variância dos erros, espacializa os erros, permitindo a geração de uma superfície de erros.

A superfície gerada pela Krigagem Ordinária corresponde a uma grade, cujos pontos são calculados em função da variação local da amostra, conforme definido na **Equação (8)** (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad \text{Eq. (8)}$$

onde:

$\hat{Z}(x_0) \rightarrow$ é o valor calculado dos pontos da grade;

$Z(x_i) \rightarrow$ é o valor amostral;

$\lambda_i \rightarrow$ é o peso determinado pelo variograma, com $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Os pesos (λ_i) são escolhidos quando a estimação de $[\hat{Z}(x_0)]$ é não tendenciosa, e quando a estimação da variância (σ_e^2) é menor do que qualquer outra combinação linear dos valores observados.

O erro associado ao ponto estimado, conhecido como Variância da Krigagem (σ_e^2), pode ser interpretado como padrão de confiança para os valores interpolados. O erro pode ser calculado de acordo com a **Equação (9)** seguinte forma:

$$\sigma_e^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \phi \quad \text{Eq. (9)}$$

e obtido quando $\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \phi = \gamma(x_j, x_0)$ para todo j . Nesse caso:

$\gamma(x_i, x_j)$ → é a semivariância de \hat{z} entre os pontos amostrais x_i e x_j ;

$\gamma(x_j, x_0)$ → é a semivariância de \hat{z} entre os pontos amostrais x_i e os desconhecidos x_0 ;

O cálculo de um ponto com sua coordenada z desconhecida, e o seu erro de estimativa segundo a Krigagem Ordinária é exemplificada em determinada região amostral, que tem seu espaço geográfico delimitado por um plano cartesiano (x,y) apresentando valores de zero $(0,0)$ a dez $(10,10)$. Essa região apresenta um variograma melhor adaptado como do tipo esférico, com os parâmetros $C_0 = 2.5$ (Efeito Pepita), $C_1 = 7.5$ (Patamar), e $A = 10.0$ (Alcance). Conforme a Figura 8, o ponto W , com localização $(5,5)$, possui sua coordenada $z(x_{i=0})$ desconhecida, e está separado de outros cinco pontos medidos, e espacializados ao seu redor por distâncias (h) .

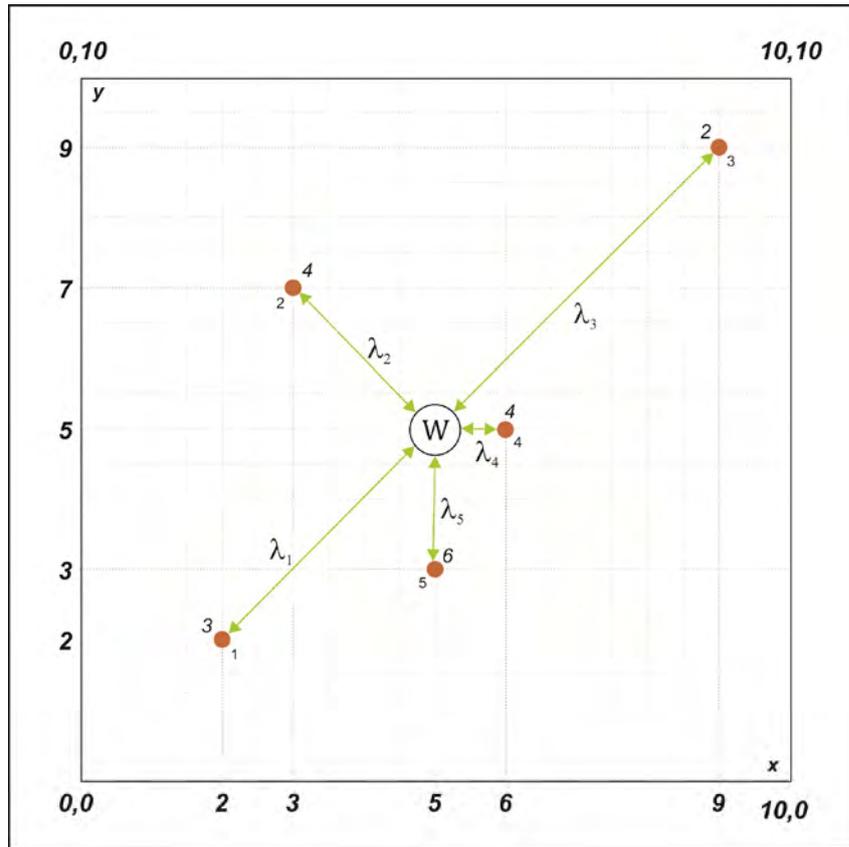


Figura 8 – Predição do ponto W usando a Krigagem Ordinária.

Os cinco pontos ao redor do ponto W, estão numerados de 1 a 5, possuem suas coordenadas de localização no espaço (x,y), e o valor da coordenada z, conforme pode-se visualizar na matriz de localização espacial (x,y,z), expressa na Figura 9.

I	X	Y	Z
1	2	2	3
2	3	7	4
3	9	9	2
4	6	5	4
5	5	3	6

Figura 9 – Matriz de localização espacial dos pontos conhecidos.

Para calcular o erro associado ao ponto W, é necessário calcular o valor da sua coordenada z, e posteriormente calcular o erro a ele associado. Fazendo uso da Krigagem Ordinária, podemos encontrar esses valores através da determinação dos pesos, conforme expresso na **Equação (10)**.

$$A^{-1} \cdot b = \begin{bmatrix} \lambda \\ \phi \end{bmatrix}, \quad \text{Eq. (10)}$$

onde:

A → é a matriz da semivariância entre os pares dos pontos conhecidos;

b → é o vetor da semivariância entre cada ponto conhecido e o ponto a ser predito;

λ → é o vetor dos pesos;

ϕ → linha e coluna extra que garantem que a soma dos pesos seja 1.

Para criar as duas matrizes de semivariância (A e b), é necessário primeiro criar duas matrizes com as informações de distâncias. Uma contendo as distâncias entre todos os pontos conhecidos (Figura 10); e a outra matriz, ou vetor de distância, contendo as distâncias entre os pontos conhecidos e o ponto a ser predito (Figura 11).

l	1	2	3	4	5
1	0.0	5.099	9.899	5.000	3.162
2	5.099	0.0	6.325	3.606	4.472
3	9.899	6.325	0.0	5.0	7.211
4	5.0	3.606	5.0	0.0	2.236
5	3.162	4.472	7.211	2.236	0.0

Figura 10 – Matriz de distância entre os pontos conhecidos.

i	0
1	4.243
2	2.828
3	5.657
4	1.0
5	2.0

Figura 11 – Vetor de distância entre os pontos conhecidos e o ponto predito.

As duas matrizes de distância são ajustadas ao variograma do tipo esférico com o objetivo de adquirir as semivariâncias correspondentes as matrizes A e b (Figuras 12 e 13):

A = i	1	2	3	4	5	6
1	2.500	7.739	9.999	7.656	5.939	1.000
2	7.739	2.500	8.667	6.381	7.196	1.000
3	9.999	8.667	2.500	7.656	9.206	1.000
4	7.656	6.381	7.656	2.500	4.936	1.000
5	5.939	7.196	9.206	4.936	2.500	1.000
6	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Figura 12 - Matriz de semivariância dos pontos conhecidos (A).

$b = i$	1
1	7.151
2	5.597
3	8.815
4	3.621
5	4.720
6	1.000

Figura 13 – Vetor da semivariância entre os pontos conhecidos e o ponto predito (b).

Nas duas matrizes de semivariância encontradas foi adicionada uma nova coluna e uma nova célula ($i = 6$), para assegurar que o somatório dos pesos seja igual a um (1).

O próximo passo é calcular a matriz inversa de semivariância dos pontos conhecidos (Figura 14):

$A^{-1} = i$	1	2	3	4	5	6
1	-0.172	0.500	0.022	-0.026	0.126	0.273
2	0.500	-0.167	0.032	0.007	0.007	0.207
3	0.022	0.032	-0.111	0.066	-0.010	0.357
4	-0.026	0.077	0.066	-0.307	0.190	0.030
5	0.126	0.007	-0.010	0.190	-0.313	0.134
6	0.273	0.207	0.357	0.003	0.134	-6.873

Figura 14 - Matriz inversa da semivariância dos pontos medidos.

Nesse momento efetua-se a operação $A^{-1} \cdot b = \begin{bmatrix} \lambda \\ \phi \end{bmatrix}$, obtendo-se o vetor dos pesos (λ), conforme apresentado na Figura 15:

λ	Pesos		Distâncias
1	0.0175	} $\Sigma = 1$	4.423
2	0.2281		2.828
3	-0.0891		5.657
4	0.6437		1.000
5	0.1998		2.000
6	0.1182	ϕ	

Figura 15 – Vetor de pesos, e suas respectivas distâncias.

De posse de todos do vetor dos pesos, o ponto desconhecido é calculado de acordo com a **Equação (6)**, como mostrado:

$$Z(X_{i=0}) = 0.0175*3 + 0.2281*4 - 0.0891*2 + 0.6437*4 + 0.1998*6$$

$$Z(X_{i=0}) = \mathbf{4.560}$$

O erro associado à estimativa do ponto desconhecido $Z(X_{i=0}) = 4.560$, é determinado pela **Equação (9)**, como mostrado:

$$\sigma_e^2 = [0.0175*7.151 + 0.2281*5.597 - 0.0891*8.815 + 0.6437*3.621 + 0.1998*4.720] + \phi$$

$$\sigma_e^2 = 3.890 + 0.1182$$

$$\sigma_e^2 = \mathbf{4.008}$$

3.2.3. Análise Estatística dos Resultados

As análises estatísticas dos resultados dos pontos interpolados correspondem ao conjunto de procedimentos que servem para descrever a amostra, bem como são indicadores para a tomada de decisão na avaliação comparativa entre variáveis estudadas.

- **Média e Desvio Padrão**

É o cálculo da média e do desvio padrão da amostra, como expresso nas **Equações (11) (a) e (b)**.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{N} \quad \text{Eq. (11) (a)}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{N}} \quad \text{Eq. (11) (b)}$$

Onde:

Z_i → refere-se ao dado amostral i ;

Z → refere-se a média amostral;

S → refere-se ao desvio padrão;

N → refere-se ao tamanho da amostra.

▪ **Tendência Média**

Identifica o desvio médio de uma amostra, que equivale a média dos erros, sendo expressa pela **Equação (12)**:

$$E_{\text{médio}} = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{Z}_i - Z_i}{N} \quad \text{Eq. (12)}$$

Onde:

\hat{Z}_i → refere-se ao valor amostral predito;

Z_i → refere-se ao valor amostral medido;

N → refere-se ao tamanho das amostras;

▪ **Intervalo de confiança**

Corresponde aos limites entre os quais acredita-se que o valor da media verdadeira estará, dentre um determinado nível de probabilidade. Pode-se construir um intervalo de confiança de acordo com a **Equação (13)**.

$$IC_{\alpha} = \bar{Z} \mp S_{\bar{Z}} \quad \text{Eq. (13)}$$

Para:

$$S_{\bar{Z}} = \frac{S}{\sqrt{N-1}}$$

Onde:

$S_{\bar{z}}$ → refere-se ao erro padrão da amostras;

S → refere-se ao desvio padrão;

N → refere-se ao tamanho da amostra;

▪ **Teste t dependente (teste t de amostras emparelhadas)**

Compara a diferença média entre duas amostras, com a diferença que espera-se encontrar entre as médias das amostras (zero), levando em conta o erro padrão das amostras. O teste t de amostras emparelhadas pode ser descrito de acordo com a **Equação (14)**.

$$t = \frac{\bar{D} - \mu_D}{S_{\bar{z}}} \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

\bar{D} → refere-se a diferença média entre duas amostras;

μ_D → refere-se a diferença esperada entre as médias das amostras;

$S_{\bar{z}}$ → refere-se ao erro padrão entre as amostras;

3.2.4. Criação da Superfície Tridimensional

A superfície tridimensional é criada em função do interpolador que obtiver os melhores indicadores estatísticos.

4. ÁREA DE PILOTO

A erosão costeira é um problema que atinge 70% das praias arenosas do mundo (BIRD, 1981). No Brasil, vários trechos da costa têm sido atingidos pelo processo erosivo, fenômeno naturalmente estabelecido pelas forçantes que atuam junto à costa, tais como ondas e marés. No entanto, este processo natural tem se agravado devido às intervenções antrópicas decorrentes do desenvolvimento urbano.

Em Pernambuco a zona costeira tem suportado um grande crescimento, sendo a área que apresenta maior densidade demográfica, com 44% da população do Estado (MAI, 2004). É também nessa área que se dá a concentração de atividades econômicas, industriais, de recreação e turismo, e conseqüentemente dos problemas delas decorrentes (MAI, 2004).

Com o avanço da erosão costeira, vários projetos de contenção foram executados nas praias que abrangem os municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes (Figura 16). Entretanto, a maioria desses projetos não respeitou os limites requeridos pela dinâmica natural da linha de costa, fato que intensificou ainda mais o processo erosivo na área (MAI, 2004).

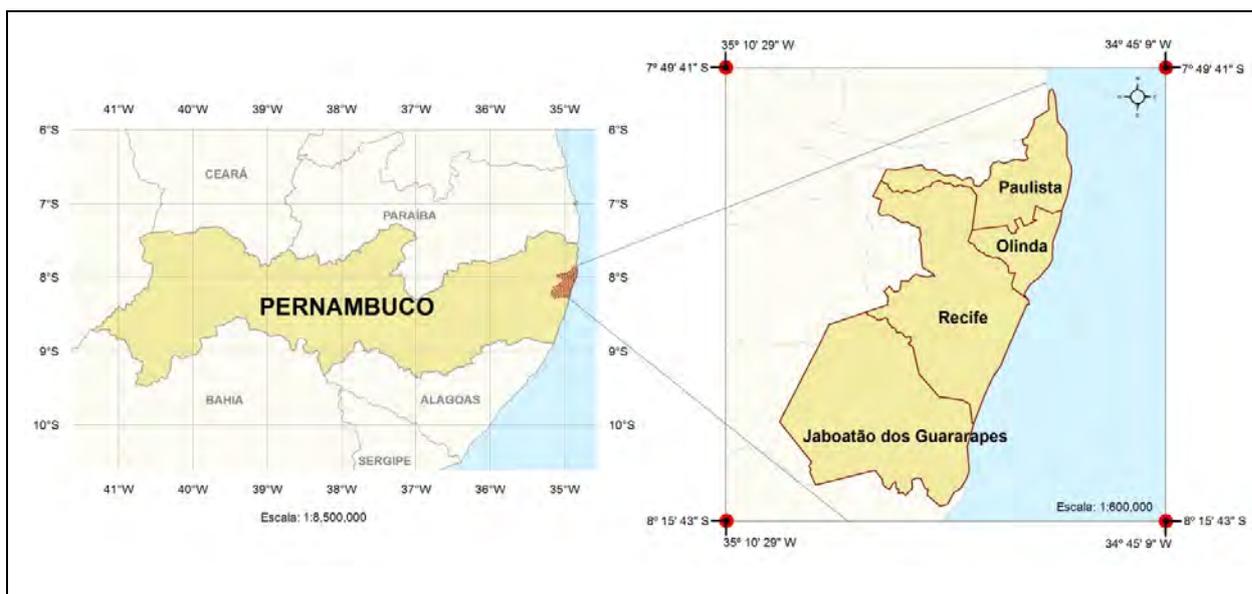


Figura 16 – Área de estudo do Projeto MAI.

Vários pontos da costa pernambucana encontram-se em desequilíbrio, apresentando erosão marinha progressiva que varia de moderada a severa, para a qual ainda não se dispõe de um diagnóstico preciso, dado a inexistência de meios adequados à compreensão das causas locais e regionais (MAI, 2004).

Em resposta ao problema, as Prefeituras dos Municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e Paulista, através do Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (CONDERM) e em parceria com a CPRH, entenderam ser imprescindível uma avaliação integrada dos problemas comuns aos quatro municípios. Dessa forma, foi articulado o Projeto de Monitoramento Ambiental Integrado (MAI), contando com o apoio técnico científico da Universidade Federal de Pernambuco e de consultores externos. O MAI contou com financiamento do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), através da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP)

e com contrapartida das prefeituras envolvidas, além do acompanhamento sistemático do MPF - Ministério Público Federal (MAI, 2009).

O MAI é um projeto que visa avaliar e monitorar a vulnerabilidade da linha de costa dos quatro municípios e tem como principal objetivo o entendimento do processo erosivo (MAI, 2009). E tem como objetivo principal o levantamento de informações sobre a geologia, a geofísica, a morfologia costeira, os processos físico-oceanográficos e a ocupação do solo, ao longo da zona costeira dos municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes, além de formação de recursos humanos que possibilitem a continuidade do processo.

Dentro dessa ótica, a obtenção das informações sobre a batimetria torna-se pertinente, uma vez que a caracterização morfológica deste meio pode ser feita em uma superfície através dos processos de interpolação, entretanto, tal representação deve ser construída da forma a modelar a superfície de forma mais real possível. E esse procedimento pode ser realizado através da avaliação das características dos interpoladores com a aplicação de testes estatísticos.

5. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia empregada nessa pesquisa é dividida em quatro passos, conforme a Figura 17.

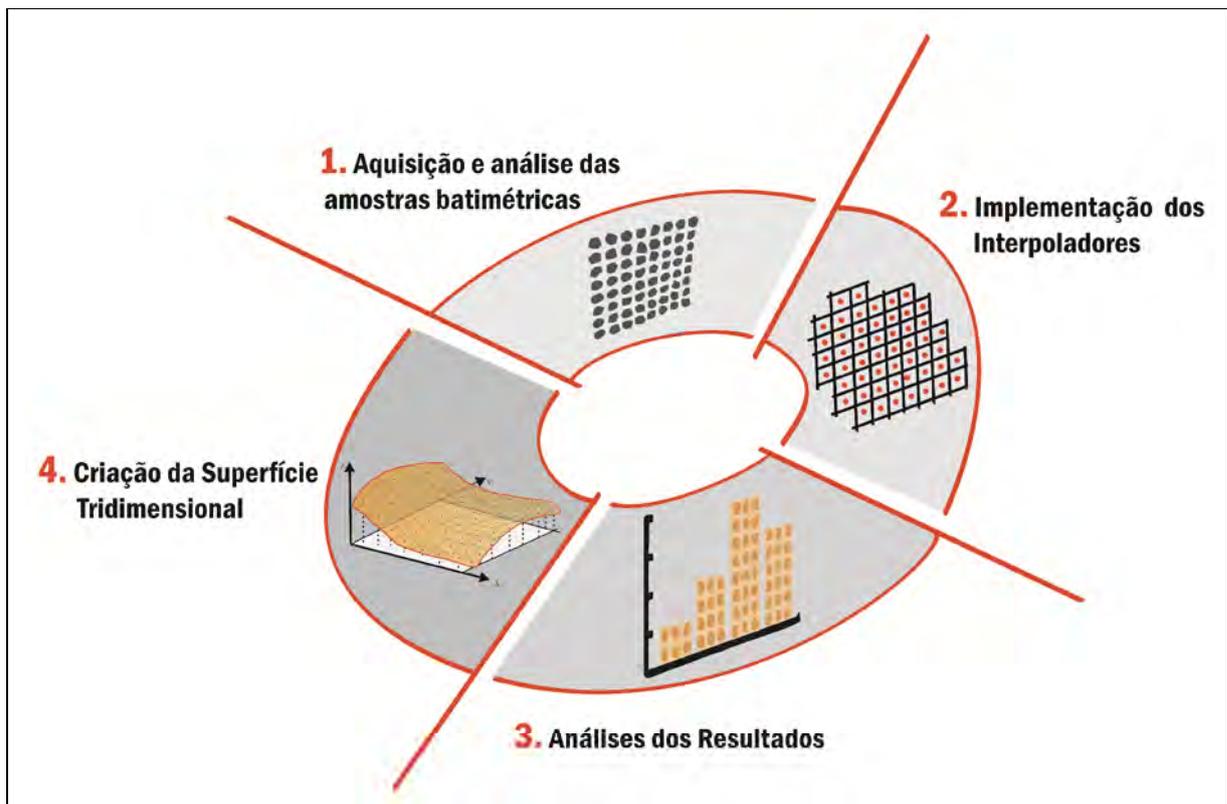


Figura 17 – Procedimentos metodológicos.

5.1. Aquisição das Amostras Batimétricas

O conjunto de amostras batimétricas, que delimitam a área piloto, foi adquirido junto à coordenação do Projeto MAI. A amostra é composta de 65.041 pontos,

dispostos em 137 perfis verticais separados a uma distância de 200 metros, e dois perfis horizontais espaçados a 2.000 metros um do outro. Todos os pontos foram coletados e referenciados ao Datum vertical SAD 69, e projetados no Sistema de Coordenadas UTM.

5.1.1. Análises Exploratórias dos Dados Batimétricos

Para identificar a natureza do conjunto de amostras, foi realizada a análise exploratória dos dados a partir do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (teste K-S) e da análise gráfica.

5.2. Implementação dos Interpoladores

Os interpoladores empregados foram: Inverso da Distância Ponderada, Polinômio Local, Funções de Base Radial (*Completely Regularized Spline*), Polinômio Global e Krigagem.

Durante a fase de interpolação, foi efetuada a validação cruzada, que consiste em omitir a posição de cada ponto amostral " P_i " e recalculá-lo para a mesma posição, considerando os demais pontos. Este procedimento é repetido para os " n " pontos, possibilitando identificar o erro entre os valores preditos e medidos (BAILEY e GATRELL, 1995).

Os parâmetros de cada interpolador foram ajustados individualmente de forma que, cada um deles apresentasse o menor erro.

5.3. Análises dos Resultados

As análises dos resultados foram baseadas na estatística descritiva dos dados, levando em consideração os indicadores Média e Desvio Padrão, Tendência Média, Intervalo de Confiança, e o Teste t de amostras emparelhadas.

5.4. Criação da Superfície Tridimensional

A criação da Superfície foi efetuada pelo interpolador que apresentou os melhores resultados estatísticos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Aquisição das Amostras Batimétricas

As amostras batimétricas coletadas na área piloto seguem o trecho compreendido entre os municípios de Paulista, Olinda, e parte de Recife, conforme mostrado na Figura 18.

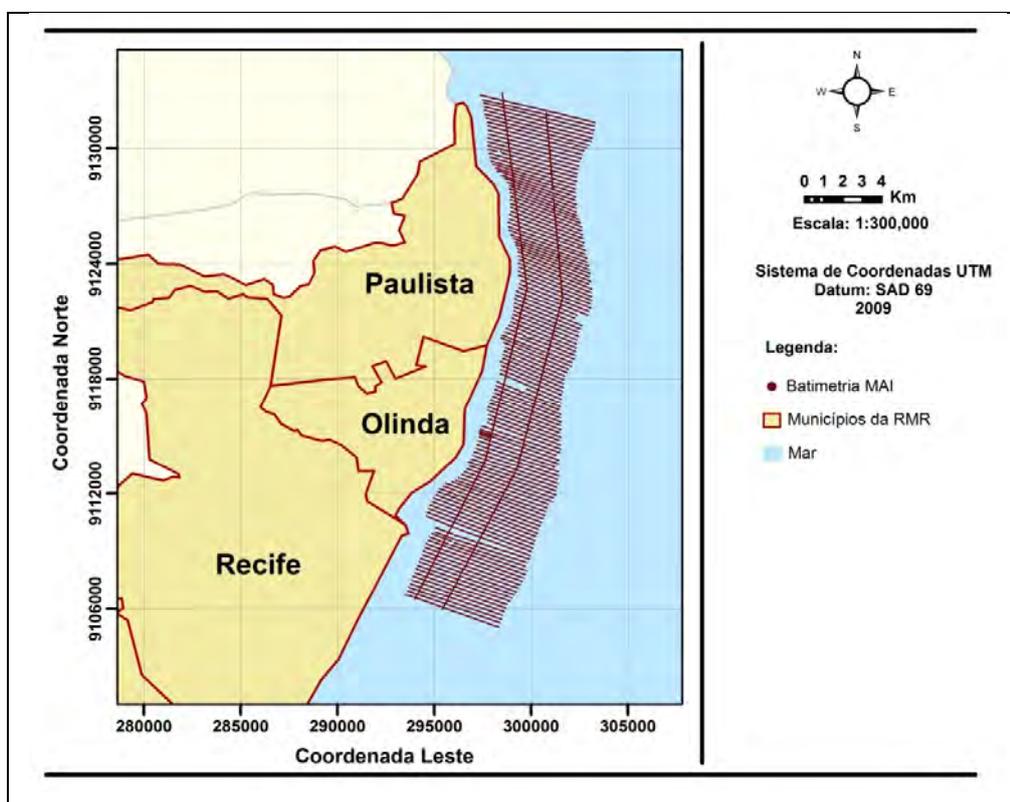


Figura 18 – Área Piloto.

A princípio, o espaçamento das amostras no sentido oeste-leste revelou-se preocupante, haja visto que entre espaçamentos de 200 metros de um perfil para outro, poderia se encontrar irregularidades morfológicas cujos processos de inferência da

superfície usando os métodos de interpolação seriam ineficientes. Após breve consulta a Coordenação do MAI, identificou-se que esse espaçamento não prejudicaria o desenvolvimento da pesquisa.

6.1.1. Análise Exploratória dos Dados Batimétricos

Efetuada-se o teste de K-S, cujos resultados constam na Tabela 2, verifica-se que a amostra batimétrica tem distribuição diferente da normal ($p\text{-value} < 0,05$), em um nível de significância de 95%.

Tabela 2 - Parâmetros do Teste de Kolmogorov-Smirnov

<i>Teste da Normalidade - Kolmogorov-Smirnov</i>			
<i>Variável</i>	<i>D_{cal}</i>	<i>GL</i>	<i>p-value</i>
Batimetria Medida	.056	65299	.000

A Figura 19 mostra o histograma da amostra, comprovando-se não normalidade da distribuição.

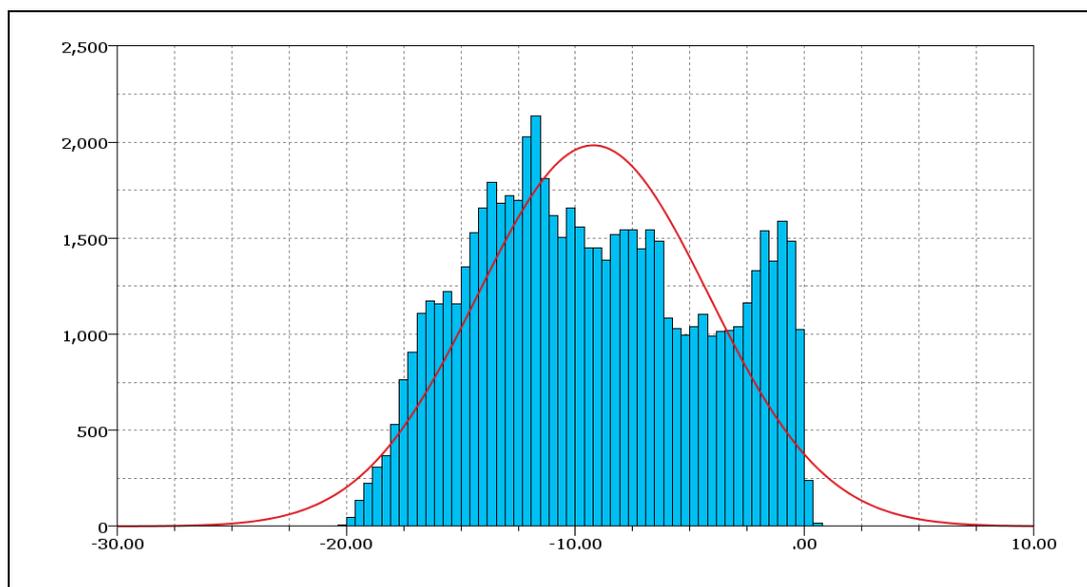


Figura 19 – Histograma com a curva normal das amostras medidas.

Para tentar normalizar a amostra, foi adicionada uma constante de valor 50 metros aos valores das batimetrias medidas. Essa constante resultou na conversão de todos os valores negativos em valores positivos, permitindo a aplicação das transformações logarítmica, por radiciação, e por transformação recíproca.

Após as transformações o Teste de K-S foi repetido, e nenhuma delas teve sucesso para normalização, conforme identifica-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Teste de K-S para as profundidades normalizadas.

<i>Teste da Normalidade de K-S para as Profundidades</i>			
<i>Variáveis</i>	<i>D_{cal}</i>	<i>GL</i>	<i>p-value</i>
Nova Prof (Prof+50)	.056	65041	.000
LN (Nova Prof)	.052	65041	.000
Raiz (Nova Prof)	.053	65041	.000
1 / (Nova Prof)	.056	65041	.000

Os histogramas das amostras transformadas são mostrados nas Figuras 20, 21 e 22, novamente comprovando os resultados obtidos pelo teste de K-S.

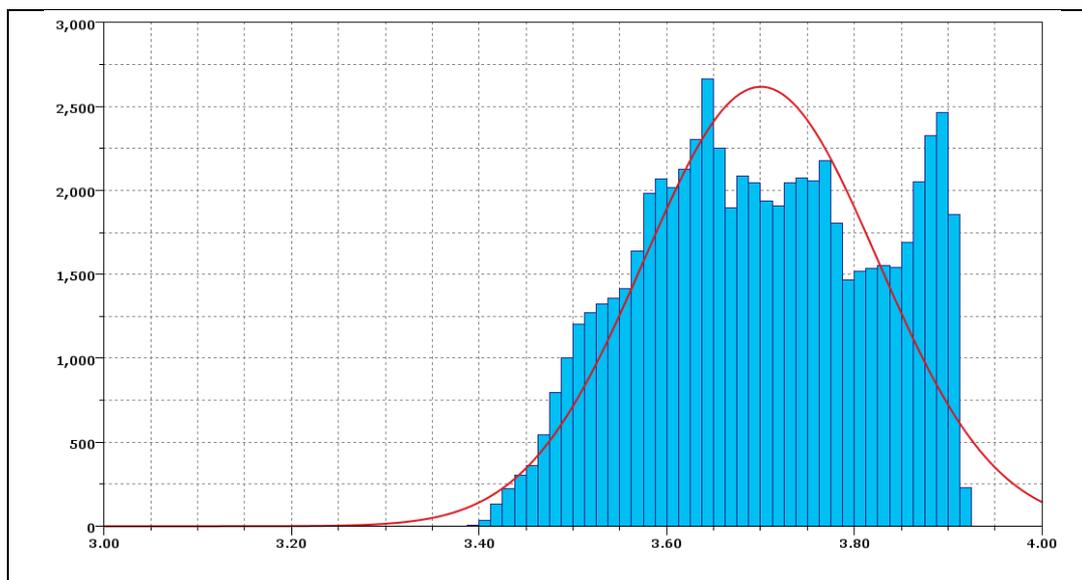


Figura 20 – Histograma com a curva normal da amostra medida transformada por logaritmo neperiano.

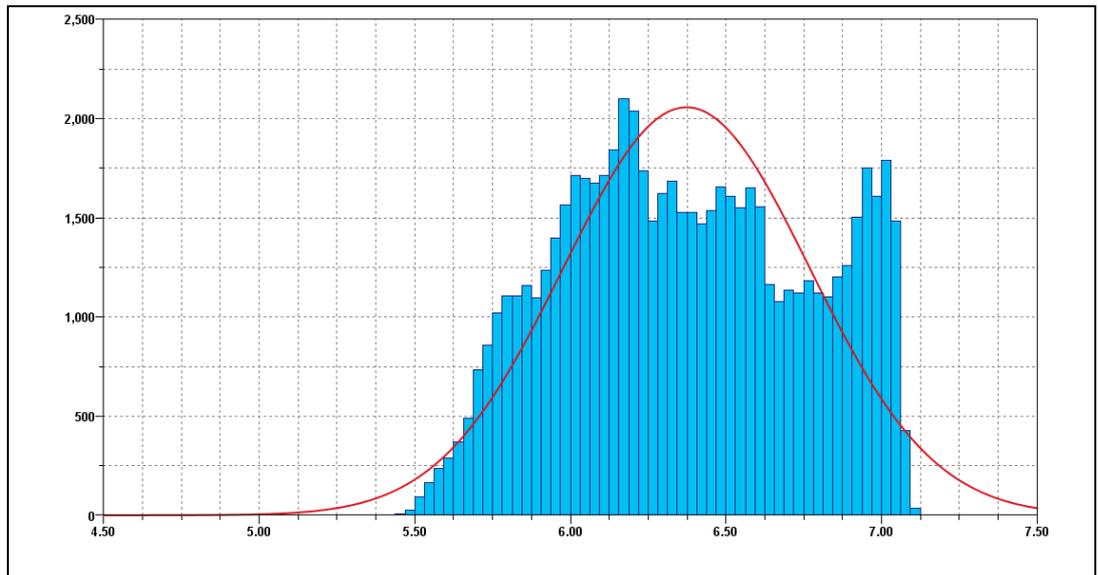


Figura 21 – Histograma com a curva normal da amostra medida transformada por radiciação.

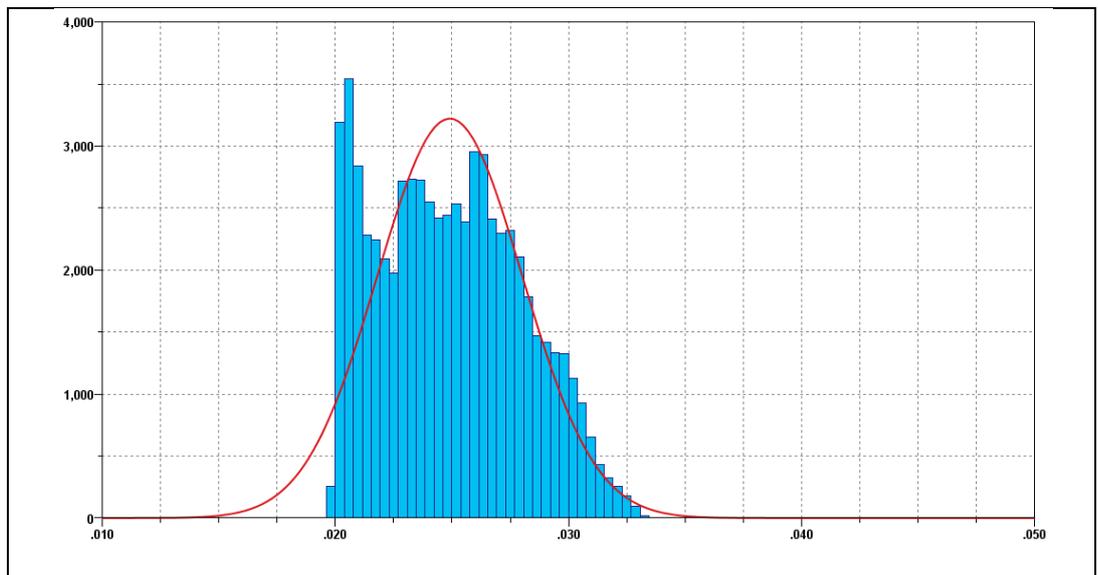


Figura 22 – Histograma com a curva normais das amostras medidas transformadas por reciprocidade.

A não normalidade na distribuição das amostras batimétricas impossibilita o emprego de testes paramétricos diretamente sobre ela. Como condições de contorno

serão testados os erros obtidos entre cada ponto batimétrico (ponto medido) e seu dual (ponto calculado por validação cruzada).

6.2. Implementação das Interpolações

6.2.1. Inverso da Distância Ponderada (IDP)

Para a interpolação pelo método Inverso da Distância Ponderada (IDP), os pontos devem estar contidos dentro de uma elipse com semi-eixo maior de 26.190 metros, e semi-eixo menor de 8.990 metros. O seu semi-eixo menor deve ter uma direção de 20°, que é paralela a direção dos perfis, conforme mostrado na Figura 23.

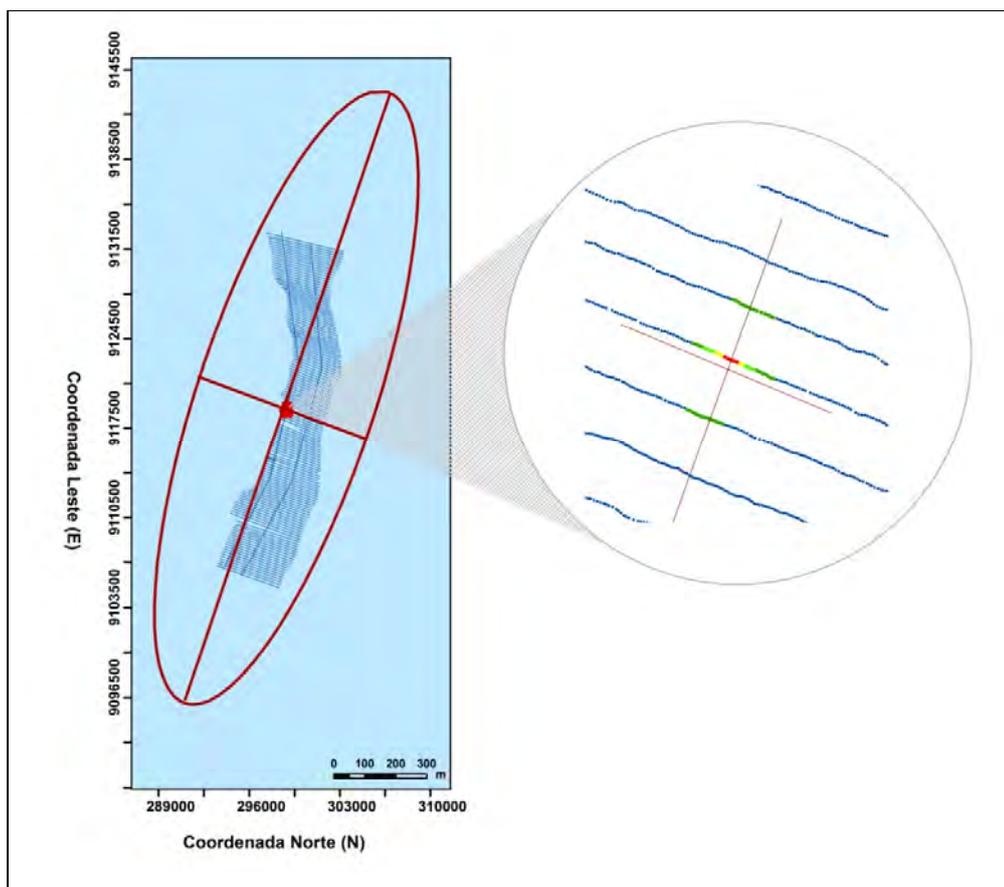


Figura 23 – Elipse de busca usada na interpolação por IDP.

A quantidade de pontos selecionados deve ser de no máximo 15, e no mínimo 10 por quadrante da elipse. Esses parâmetros tem por propriedade a captura de pontos em no mínimo 3 perfis consecutivos.

A estatística dos erros obtidos pela validação cruzada do IDP é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada do IDP.

<i>Interpolador</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Erro Padrão</i>	<i>Intervalo para média com 95% de Confiança</i>	
				<i>Limite -</i>	<i>Limite +</i>
IDP	.0056804	.6979112	.0027365	.0003167	.0110441

O teste de K-S para os erros é mostrado na Tabela 5, identificando-se a não normalidade da distribuição ($p\text{-value} < 0,05$).

Tabela 5 – Teste da normalidade para os erros interpolados do método IDP.

<i>Teste da Normalidade de K-S para o IDP</i>			
<i>Variáveis</i>	<i>D_{cal}</i>	<i>GL</i>	<i>p-value</i>
IDP	.130	65041	.000

Como a amostra em estudo é muito grande (n= 65.041), analisa-se graficamente sua distribuição conforme a Figura 24, concluindo-se sobre a normalidade da mesma.

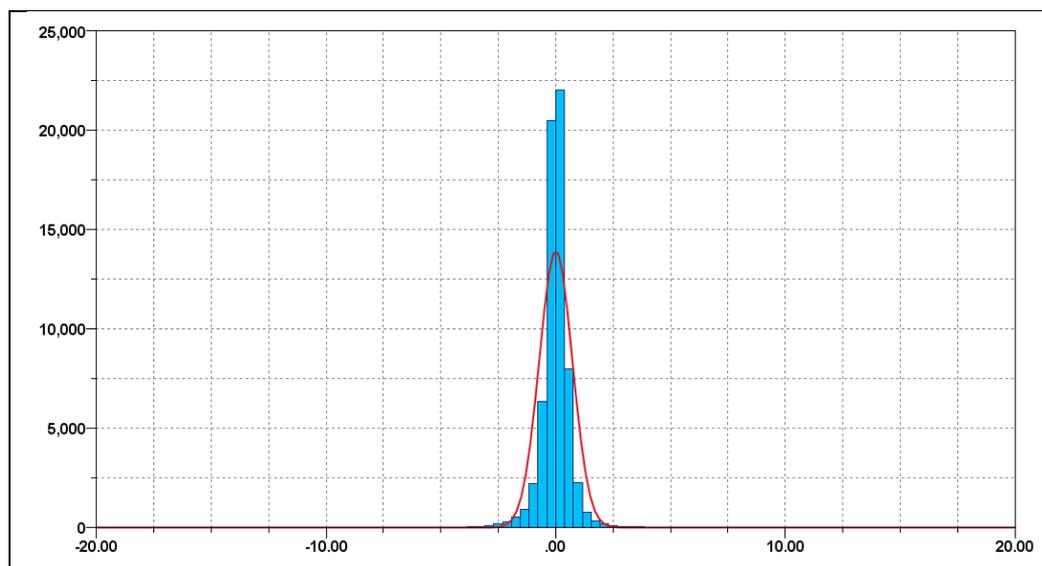


Figura 24 – Histograma com a curva normal dos erros do IDP.

6.2.2. Polinomial Local

Para o método Polinômio Local, seguiu os mesmos parâmetros definidos para o IDP. A estatística dos erros obtidos pela validação cruzada do Polinomial Local é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada do Polinomial Local.

<i>Interpolador</i>	<i>Média dos erros</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Erro Padrão dos Erros</i>	<i>Intervalo para média com 95% de Confiança</i>	
				<i>Limite -</i>	<i>Limite +</i>
Polinomial Local	.0028979	.7002147	.0027456	-.0024834	.0082793

O teste de K-S para os erros é mostrado na Tabela 7, identificando-se a não normalidade da distribuição ($p\text{-value} < 0,05$).

Tabela 7 – Teste da normalidade para os erros interpolados pelo Polinômio Local.

<i>Teste da Normalidade de K-S para o Polinomial Local</i>			
<i>Variáveis</i>	<i>D_{cal}</i>	<i>GL</i>	<i>p-value</i>
Polinômio Local	.136	65041	.000

A Figura 25 mostra a análise gráfica da distribuição da amostra mediante o histograma, concluí-se sobre a normalidade da mesma.

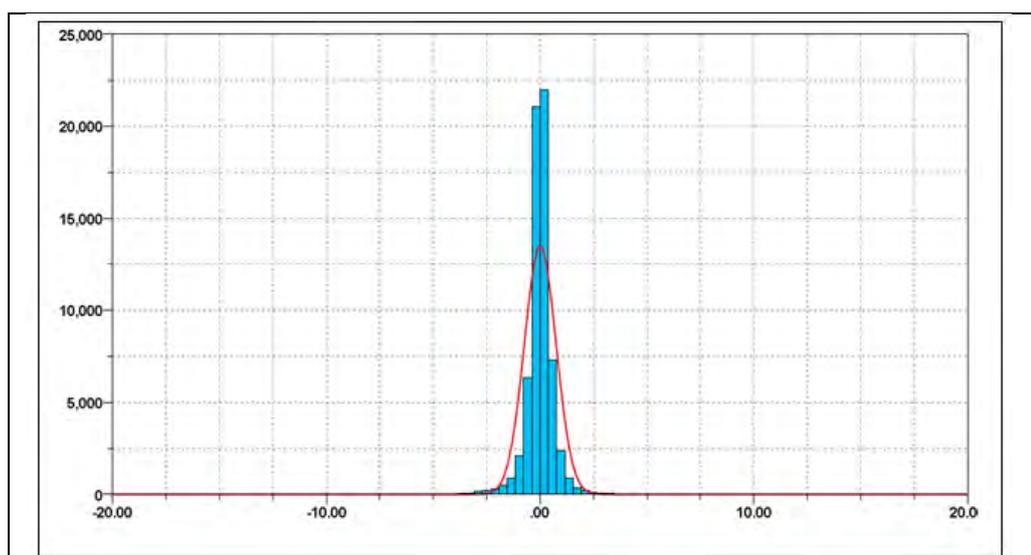


Figura 25 – Histograma com a curva normal dos erros do Polinômio Local.

6.2.3. Funções de Base Radial

A interpolação usando a Função de Base Radial foi realizada usando o método *Completely Regularized Spline*, e os parâmetros adotados para essa interpolação foram

semelhantes aos do IDP. A estatística dos erros obtidos pela validação cruzada para a FRB é mostrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada da FBR.

<i>Interpolador</i>	<i>Média dos erros</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Erro Padrão dos Erros</i>	<i>Intervalo para média com 95% de Confiança</i>	
				<i>Limite -</i>	<i>Limite +</i>
FBR	.0024291	.6922131	.0027142	-.0028907	.0077490

O teste de K-S para os erros é mostrado na Tabela 9, identificando-se a não normalidade da distribuição (*p-value* < 0,05).

Tabela 9 – Teste da normalidade para os erros interpolados pelo FBR.

<i>Teste da Normalidade de K-S para FBR</i>			
<i>Variáveis</i>	<i>D_{cal}</i>	<i>GL</i>	<i>p-value</i>
FBR	.130	65041	.000

A análise gráfica da sua distribuição do FBR, conforme a Figura 26, mostra que a mesma possui comportamento normal.

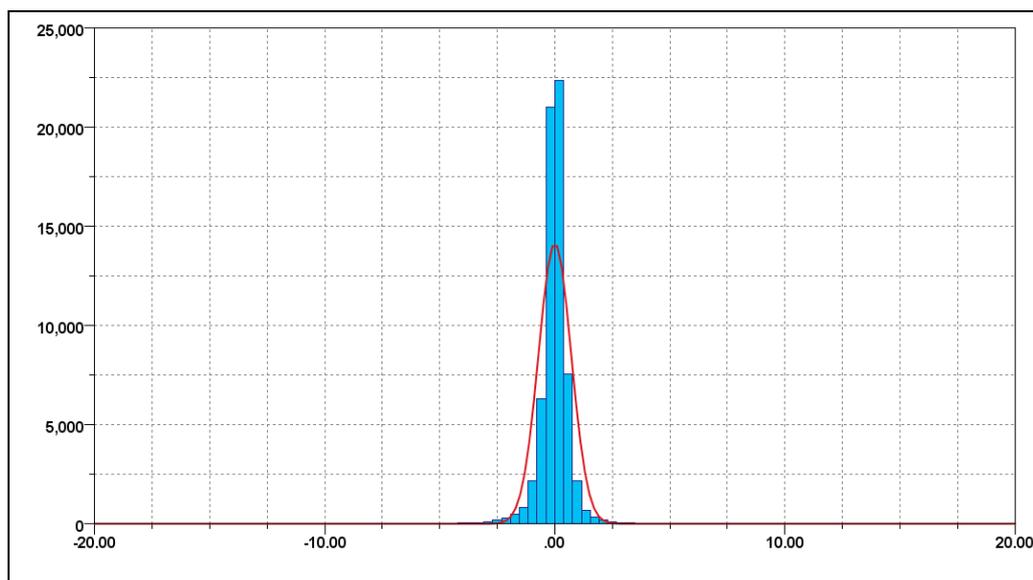


Figura 26 – Histograma com a curva normal dos erros da FBR.

6.2.4. Polinomial Global

Nesse método foi escolhido um polinômio de grau 1. Os resultados das estatísticas para os erros é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Estatísticas dos erros obtidos da validação cruzada Polinomial Global.

<i>Interpolador</i>	<i>Média dos erros</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Erro Padrão dos Erros</i>	<i>Intervalo para média com 95% de Confiança</i>	
				<i>Limite -</i>	<i>Limite +</i>
Polinomial Global	.0000399	3.576930	.0140254	-.0274499	.0275298

O teste de K-S para os erros é mostrado na Tabela 11, identificando-se a não normalidade da distribuição ($p\text{-value} < 0,05$).

Tabela 11 – Teste da normalidade para os erros interpolados pelo Polinomial Global.

<i>Teste da Normalidade de K-S para o Polinomial Global</i>			
<i>Variáveis</i>	<i>D_{cal}</i>	<i>GL</i>	<i>p-value</i>
Polinômio Global	.040	65041	.000

Na Figura 27 observa-se a análise gráfica da distribuição dos erros interpolados pelo Polinomial Global, concluindo-se que a mesma tem um comportamento normal.

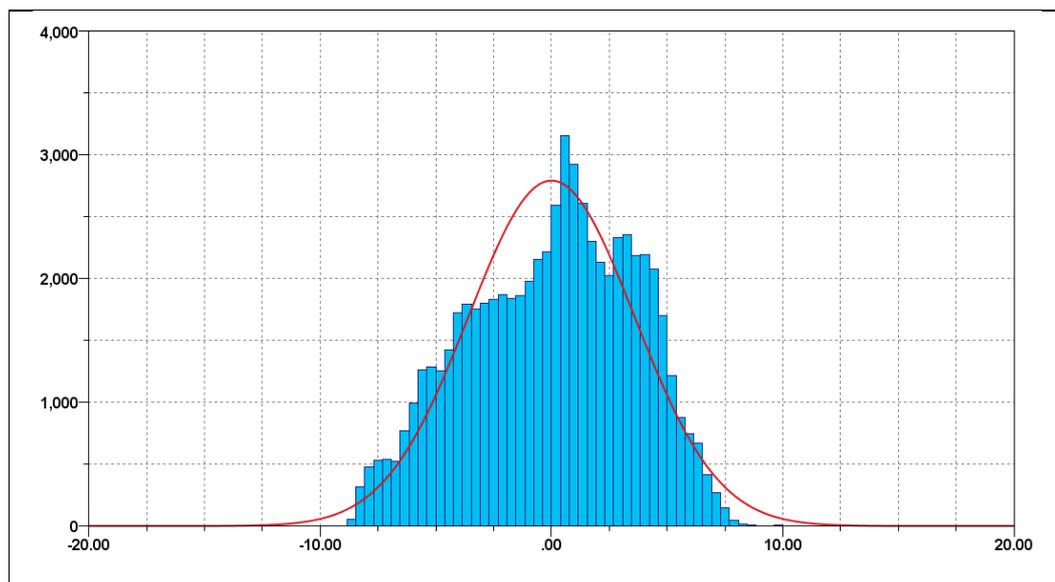


Figura 27 – Histograma com a curva normal dos erros do Polinomial Global.

6.2.5. Krigagem

Antes de iniciar o processo da Krigagem é necessário verificar se a amostra apresenta tendência. Isso é feito através do Gráfico de Tendência, conforme mostrado na Figura 28.

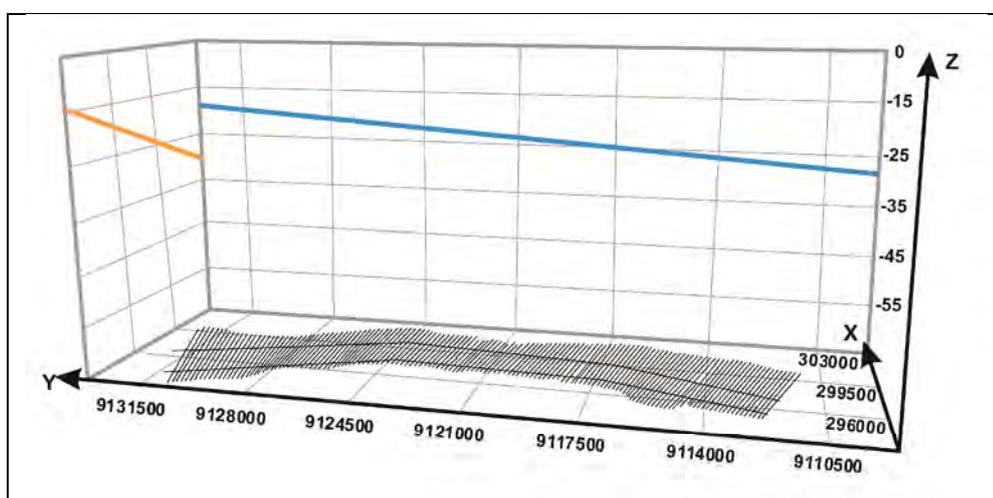


Figura 28 - Gráfico de Tendência das amostras batimétricas em estudo.

No gráfico da Figura 28 identificam-se tendências decrescentes nos sentidos Leste-Oeste (Eixo Y) e Norte-Sul (Eixo X), conforme observado nas linhas azul e amarelo respectivamente. Para solucionar esse problema, as tendências foram removidas usando um polinômio de primeira ordem.

O método Geoestatístico da Krigagem foi realizado usando a Krigagem Ordinária. Os pontos foram ajustados no variograma do tipo esférico, tendo o Alcance

(A) de 237,0653 metros, o Patamar (C_1) de 1,9502 metros, e o Efeito Pepita (C_0) de 0,2468 metros.

Os parâmetros adotados para a seleção dos pontos vizinhos na construção da interpolação tiveram os mesmos valores usados pelos IDP, e os resultados das estatísticas para os erros podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros da Parâmetros Validação Cruzada da *Krigagem*.

<i>Interpolador</i>	<i>Média dos erros</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Erro Padrão dos Erros</i>	<i>Intervalo para média com 95% de Confiança</i>	
				<i>Limite -</i>	<i>Limite +</i>
Krigagem	.0032213	.6830434	.0026782	-.0020280	.0084707

O teste de K-S para os erros é mostrado na Tabela 13, identificando-se a não normalidade da distribuição (p -value < 0,05).

Tabela 13 – Teste da normalidade para os erros interpolados pela *Krigagem*.

<i>Teste da Normalidade de Kolmogorov-Smirnov</i>			
<i>Variáveis</i>	<i>D_{cal}</i>	<i>GL</i>	<i>p-value</i>
Krigagem	.135	65041	.000

Como a amostra é muito grande ($n= 65.725$), analisa-se graficamente a sua distribuição (Figura 28), concluindo-se sobre sua normalidade.

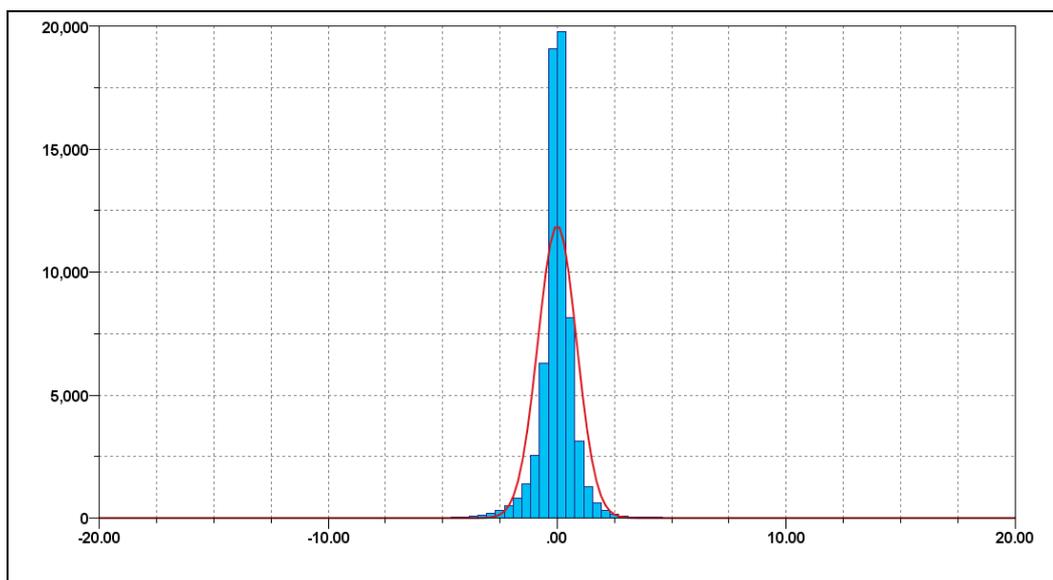


Figura 29 – Histograma com a curva normal dos erros da Krigagem.

6.3. Análises dos Resultados

A estatística descritiva para a os Erros, é mostrada Tabela 14.

Tabela 14 – Estatística descritiva para dos Erros das Interpolações.

<i>Interpoladores</i>	<i>Média dos erros</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Erro Padrão</i>	<i>Intervalo para média com 95% de Confiança</i>	
				<i>Limite -</i>	<i>Limite +</i>
IDP	.0056804	.6979112	.0027365	.0003167	.0110441
Polinomial Local	.0028979	.7002147	.0027456	-.0024834	.0082793
FBR	.0024291	.6922131	.0027142	-.0028907	.0077490
Polinomial Global	.0000399	3.576930	.0140254	-.0274499	.0275298
Krigagem	.0032213	.6830434	.0026782	-.0020280	.0084707

O interpolador IDP apresenta intervalo de confiança para a média dos erros, com 95% de confiança, variando entre 0.0003167 e 0.0110441. Como esse intervalo não contém o zero, que é a média esperada para os erros, esse interpolador é rejeitado.

O Interpolador Polinomial Global apresenta intervalo de confiança para a média dos erros, com 95% de confiança, variando entre -0.0274499 e 0.0275298. Apesar de esse intervalo conter o zero, o interpolador é rejeitado porque o seu erro padrão (0.0140254) é sete vezes maior que o erro padrão dos demais interpoladores, e também porque é impossível que a superfície real seja um plano inclinado. Por esses motivos, este interpolador é rejeitado.

O Interpoladores RBF, Polinomial Local e Krigagem, apresentam intervalos de confiança para a média dos erros, com 95% de confiança, contendo o zero, e seus erros padrão possuem valores muito próximos. Assim, qualquer um desses interpoladores pode ser aplicado. Resta ainda, verificar se, do ponto de vista estatístico, não existe diferença significativa entre eles. Isso pode ser feito pelo teste t de Amostras Emparelhadas.

A Tabela 15 apresenta os resultados deste teste, mostrando que dentro de um nível de confiança de 95%, os três interpoladores não diferem (Sig > 0,05 para todos os pares).

Tabela 15 – Estatística descritiva para o teste *t* de amostras emparelhadas.

<i>Pares de Interpoladores</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Erro Padrão</i>	<i>Intervalo para média com 95% de Confiança</i>		<i>t</i>	<i>GL</i>	<i>Sig</i>
				<i>Limite -</i>	<i>Limite +</i>			
Local - FBR	.0004688	.1714870	.0006724	-.0012632	.0022009	.697	65040	.486
Local - <i>Krigagem</i>	-.0003233	.1942125	.0007615	-.0022850	.0016382	-.425	65040	.671
FBR - <i>Krigagem</i>	-.0007922	.1925926	.0007551	-.0027374	.0011530	-1.049	65040	.294

Dessa forma, pode-se afirmar que qualquer um desses três métodos é indicado para ser usado como interpolador para a área de estudo. Entretanto, em virtude de a *Krigagem* ser o único interpolador capaz de espacializar a distribuição dos erros sobre a superfície, seleciona-se este como o mais indicado.

6.4. Criação da Superfície Tridimensional

A superfície batimétrica da área piloto e a superfície de erros geradas pela *Krigagem* são apresentadas na Figura 30 (a) e (b), respectivamente.

Na Figura 30 (b), observa-se que os menores erros estão espacializados mais próximos dos pontos amostrais, e na vizinhança desses pontos, localizados justamente sobre os perfis de dados coletados.

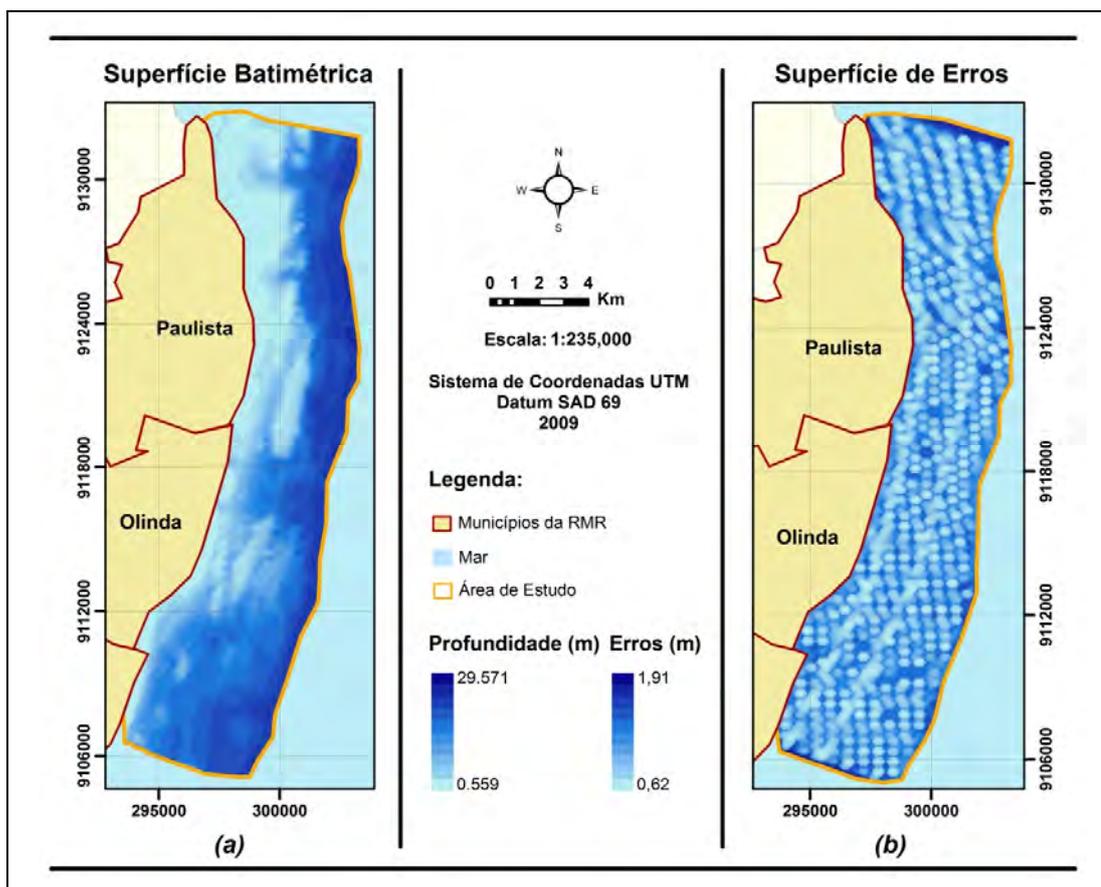


Figura 30 - Superfície batimétrica obtida pela Krigagem (a), e sua Superfície de Erros (b).

A visualização do modelo tridimensional consiste na transferência do modelo gerado para um plano de visualização 3D, permitindo que o observador perceba a sensação tridimensional original da Plataforma Interna Continental adjacente aos Municípios de Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes.

A representação tridimensional da superfície gerada pela Krigagem pode ser visualizada em diversos ângulos e perspectivas na Figuras 31.

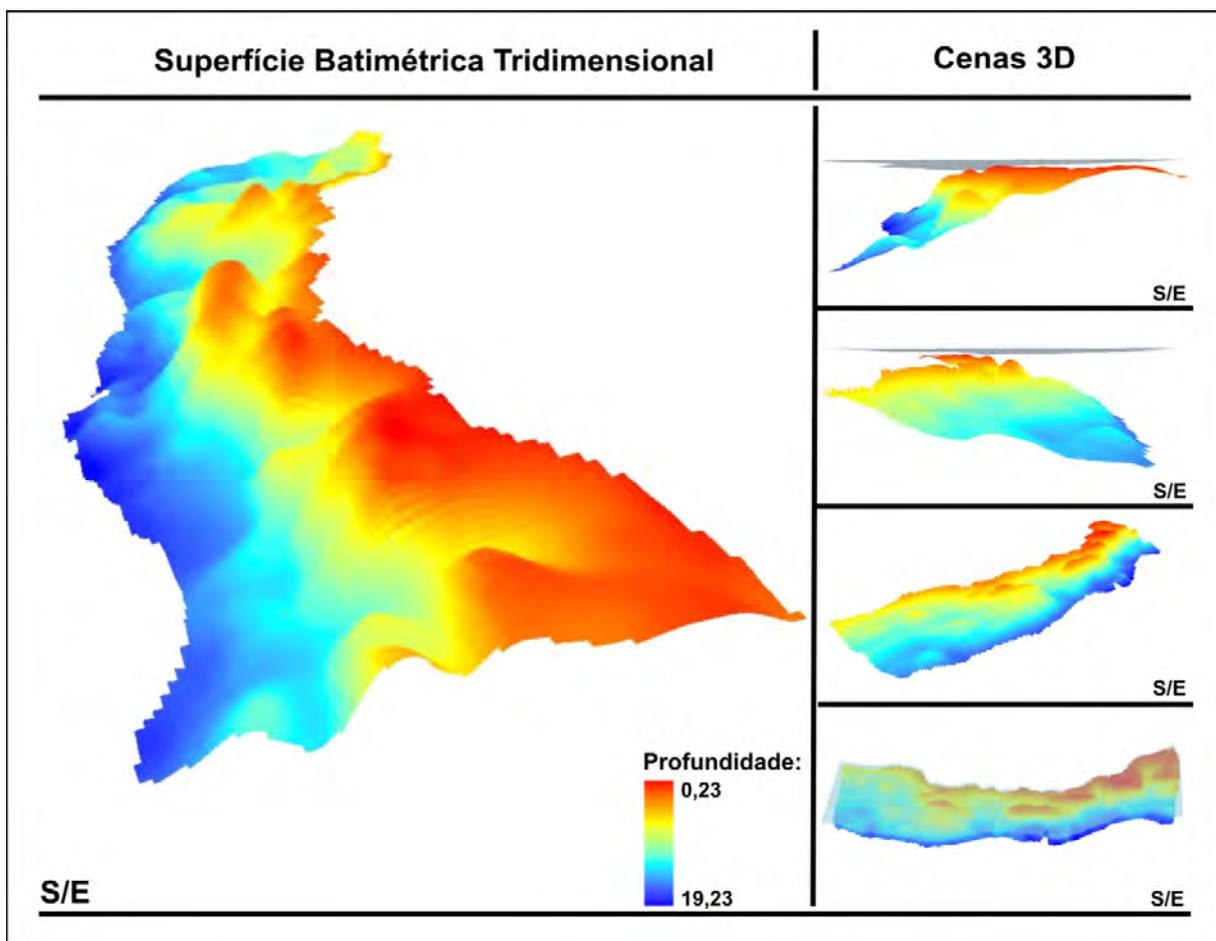


Figura 31 – Representação Batimétrica Tridimensional gerada.

Essas duas superfícies sobrepostas permitem identificar a coordenada batimétrica predita de qualquer ponto e, o erro associado a ele.

Pode-se acessar essa informação através de uma consulta espacial sobre a superfície gerada. De acordo com a Figura 40, ao sobrepor os pontos batimétricos, e as duas superfícies geradas pela Krigagem, encontram-se para os Pontos 01, 02 e 03, as seguintes coordenadas (em metros) mostradas na Tabela 16.

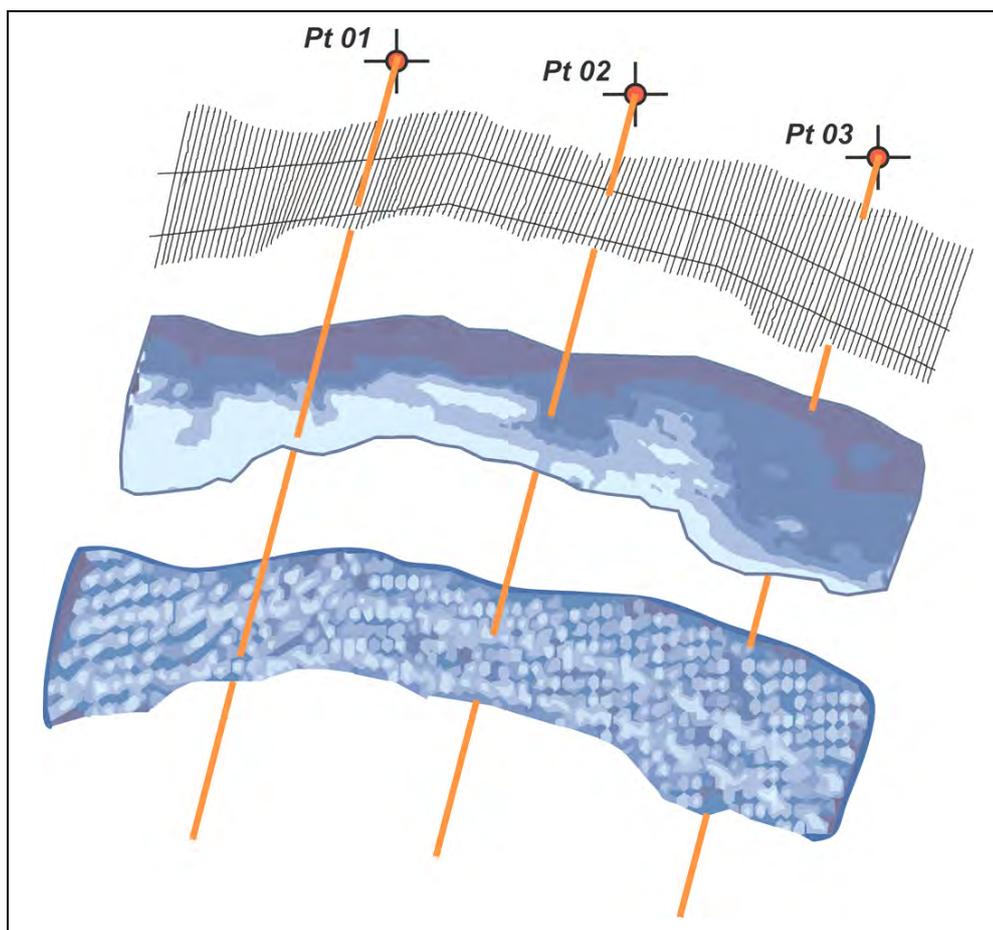


Figura 32 – Consulta espacial a superfície interpolada pela Krigagem, e o seu erro associado.

Tabela 16 – Coordenadas dos Pontos 01, 02 e 03.

Ponto	Coordenada E	Coordenada N	Batimetria (m)	Erro (m)
01	299033,630	9127074,799	0,17	1,11
02	300072,162	9117021,802	11,40	1,57
03	300122,565	9109288,905	16,84	1,52

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa teve como princípio a avaliação de diferentes modelos de interpoladores com o objetivo de encontrar o modelo que representasse de forma mais real um conjunto de amostras batimétricas pertencente a uma área piloto em estudo.

De modo geral, as etapas definidas pela metodologia desenvolvida foram ordenadamente às seguintes: aquisição e análise dos dados batimétricos; implementação das interpolações; análise dos resultados; e criação da superfície tridimensional.

A aquisição dos dados da área piloto ocorreu junto à coordenação do Projeto MAI. A amostra constou de 65.041 pontos batimétricos, espacializados em 2 perfis na direção norte-sul, e 137 perfis na direção oeste-leste, ao longo de uma superfície de aproximadamente 121Km², compreendida entre os Municípios Paulista, Olinda, e Recife. A distância de 200 metros entre os perfis na direção oeste-leste foi inicialmente questionada, entretanto a Coordenação do MAI esclareceu que esse espaçamento se encontra dentro dos padrões estipulados, e não comprometeria a pesquisa.

A análise descritiva dos dados batimétricos identificou a impossibilidade da aplicação de testes paramétricos diretamente sobre os pontos batimétricos. Isso aconteceu porque a distribuição desses pontos não era normal, e também por não se encontrar um modelo de normalização. Como condição de contorno, optou-se por fazer

uma análise dos erros, entendidos como a diferença entre o valor medido e o valor predito, obtido por validação cruzada, para cada interpolador estudado.

A implementação das interpolações foi caracterizada pela aplicação dos seguintes modelos: Inverso da Distância Ponderada (IDP), Polinomial Local, Função de Base Radial (FBR), Polinomial Global e Krigagem.

A análise dos erros baseou-se nos seguintes indicadores paramétricos: normalidade da distribuição, média, desvio padrão, intervalo de confiança para a média e, diferença média entre duas amostras. Como resultado, identificou-se que o IDP foi rejeitado ao nível de significância de 95%. O interpolador Polinomial Global também foi rejeitado porque sabe-se que a superfície gerada por ele é um plano inclinado, o que não condiz com a realidade. Os demais interpoladores não apresentaram diferença significativa, ao nível de confiança de 95%.

Apesar desse resultado, a Krigagem foi escolhida, pelas seguintes razões: possibilidade de remoção da tendência da amostra e geração de uma superfície de erros.

Com base nessas conclusões, afirma-se que a essa pesquisa cumpriu os objetivos propostos, sugerindo-se o seguinte para estudos posteriores:

- Comparar a distribuição das amostras estudadas com outras formas de distribuições não-normais;

- Empregar testes estatísticos não paramétricos diretamente sobre os pontos batimétricos estudados; e
- Implementar essa metodologia em outras áreas da plataforma continental;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSHER, T. M.; BORZONE, C. A.; BRANDINI, F. P.; LANA, P. da C.; SPACH, H. L.; MARONE, E. **Subsídios para Estudos Ambientais em Áreas Costeiras**. Trabalho técnico – Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná, 2002.

AGRA, M. C. da M. **Avaliação de Interpoladores para Geração de Modelo Numérico de Elevação**. Recife, 2007. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

ARONOFF, S. **Geographic Information System: a Management Perspective**. WBL Publications. Ottawa, 1989.

AYRES, A.; NETO, J. A. B. Métodos Diretos e Indiretos de Investigação do Fundo Oceânico. In NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. **Introdução à geologia marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. cap. 6.

BAILEY, T. C.; GATRELL, A. C. **Interactive Spatial Data Analysis**. Prentice Hall; Pap/Dsk edition. 1995. 432p.

BAJJALI, W. **Model the Effect of Four Artificial Recharge Dams on the Quality of Groundwater using Geostatistical Methods in GIS Environment, Oman**. 2002. Journal of Spatial Hydrology Fall, Vol. 5, N^o. 2. Department of Biology and Earth Sciences, University of Wisconsin – Superior, Superior, WI 54880.

BARROS FILHO, M. N. M. **Krigagem Ordinária aplicada à análise espacial da habitabilidade intra-urbana. O caso da Cidade do Recife (Brasil)**. In: VII Congresso Internacional da Sociedade Latino-Americana de Estudos Imobiliários, 2007, São Paulo, SP. VII Congresso Internacional da Sociedade Latino-Americana de Estudos Imobiliários, 2007.

BIRD, E.C.F. (1981) **Recent changes on the world's sandy shorelines**. In: BIRD, E.C.F e KOIKE, K. (eds). Coastal dynamics and scientific sites: 5-30. Department of Geography, Kowazawa University, Japan.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Artigo 225, §4^o. Brasília, DF, Senado, 1988.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems**. Oxford University Press. Oxford, 1998.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Clarendon Press. Oxford, 1986.

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING)**. 1997. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Divisão de Processamento de Imagens, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1997.

CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; **Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density**. *Geomorphology* – Vol 77, Issues 1 – 2, Pages 126 – 141, 15 July 2006.

CHIN-SHUNG, Y.; SZU-PYNG, K.; FEN-BIN, L.; PEN-SHAN H.P **Twelve Different Interpolation Methods: A Case Study of Surfer 8.0**. XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress. Istanbul, 2004.

COWEN D.J., **GIS Versus CAD Versus DBMS: What are the Differences?** *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54: 1551-1554. 1988.

DHN - DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Levantamentos Hidrográficos**. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/chm/levhidrograficos/levanta.html>>. Acesso em 2 de julho de 2009.

DIAS, J. A.; POLETTE, M.; CARMO, J. A. **O Desafio da Gestão Costeira Integrada** (Prefácio). *Revista de Gestão Costeira Integrada* Vol. 7(1): pág 3-4, 2007.

ESTRADA, L.; SAFRIET, C. **Advanced Techniques for Geographic Information Systems**. 2006. SPA Computer Lab. Disponível em <www.spa.ucla.edu/up206b/interpolation_methods.htm>, acesso em 25/11/2006.

FIELD, A. P. (2009). **Descobrimo a estatística usando o SPSS**. Porto Alegre, Brasil, Artmed, 2a edição.

FONSECA, L.; MAYER, L.; PATON, M. **ArcView Objects in the Fledermaus Interactive 3-D Visualization System: An Exemple from the STRATAFORM GIS. Undersea with GIS.** Chapter 1, page 1-21. ESRI, 2002.

HOEFEL, F. **Morfodinâmica de Praias.** Ed. UNIVALI. Itajaí, Santa Catarina, Brasil. 1998.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. **Uso de Métodos de Interpolação Espacial de Dados nas Análises Sociodemográficas.** XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, Caxambú: ABEP, 2006.

KRUEGER, C. P. **Levantamentos Batimétricos.** Revista InfoGPS, Edição 10, 29/08/2005. Artigo disponível em: <http://www.mundogeo.com.br/revistas-interna.php?id_noticia=4673> . Acessado em 04 de mar 2008.

_____. **Investigações sobre aplicações de alta precisão no âmbito marinho.** 1996. Tese apresentada ao Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de doutora. Curitiba, 1996.

_____. SOUZA, E. C. B.; TEDESCO, A. **Modelagem Tridimensional de Superfícies: Abordagem sobre Interpoladores na Geração de Modelos Batimétricos.** Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, maio de 2003, Curitiba PR. Disponível em: <<http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm2/papers/231.pdf>>. Acesso em 07 de Fevereiro de 2010.

KRUG, L. A.; NOEMBERG, M. A. **Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Brasil.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3077-3084.

MAI. Monitoramento Ambiental Integrado – Avaliação dos Processos de Erosão Costeira nos Municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes. **Projeto executivo.** UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

MAI. Projeto Monitoramento Ambiental Integrado – Avaliação dos processos de erosão costeira nos Municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes. **Relatório Final - Volume 1.** UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO JR., P. J.; OLIVEIRA, M. S. **Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis***. Revista SCIENTIA FORESTALIS n. 69, p.25-37, dez. 2005, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF.

MICHAEL, R.; TRIVELONI, C. A. P. **Uso de Inferência Estatística e Análise de Superfície de Tendência para Avaliação em Massa de Imóveis**. UFSC – Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis/SC. COBRAC 2006 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - UFSC - Florianópolis - 15 a 19 de Outubro 2006.

NETO, J. A. B.; SILVA, C. G.; In NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. **Introdução à geologia marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. cap. 6.

NICOLODI, J. L.; TOLDO JR, E. E. **Morfodinâmica de praias: uma ferramenta para gestores de ambientes costeiros - o caso da Praia de Fora, Parque Estadual de Itapuã, RS**. Natureza e Conservação . pp. 22-32 Artigos Científicos. Vol 1 . nº2 . Out 2003.

RIBEIRO, S.; CENTENO, A.; KRUEGER, C. **Estimativa de profundidade a partir de levantamento batimétrico e dados ikonos ii mediante redes neurais artificiais**. Boletim de Ciências Geodésicas, América do Sul, 14 18 07 2008.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S. **Variabilidade Espacial de Plantas Daninhas em Dois Sistemas de Manejo de Solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 1, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662007000100007&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 10 Agosto 2007.

SERAFINI, L. Z. **O Zoneamento Costeiro e as Competências Municipais: Uma Análise a luz da Legislação Ambiental Brasileira**. 2010. Disponível em: <www.ibap.org/teses2004/teses2004d26.doc>. Acesso em 04 de Fevereiro de 2010.

SILVEIRA, T. A.; PORTUGAL, J. L.; BARROS FILHO, M. B. B. **O Diagrama de Voronoi e suas aplicações nos Sistemas da Geoinformação**. II Jornada Nacional de Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica. São Luís– MA, 2007.

SMITH, T. R.; MENON, S.; STAR, J. L.; ESTER J. E.; **Requirements and Principles for the Implementation and Construction of Large Scale Geographical Information System**. International Journal of Geographical Information System, vol 1 nº1, pages 13-31, 1987.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: Instituto Superior Técnico (IST) Press, 2000.

WRIGHT, D. J.; BLOGENWICZ, M. J.; HALPIN, Patrick N.; BREMAN, J. Foreword by Jane Lubchenco. **Arc Marine: GIS for a Blue Planet**. 1ª Edition, ESRI, California, 2007.