

PROPOSTA PARA MODELAGEM DA DISCREPÂNCIA FÍSICA ENTRE DOIS SEGMENTOS DA RAFB RESPECTIVAMENTE VINCULADOS AO DATUM VERTICAL DE SANTANA E DE IMBITUBA

MARLY TEREZINHA QUADRI SIMÕES DA SILVA
SILVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS
REGIANE DALAZOANA

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Setor de Ciências da Terra
Centro Politécnico da UFPR – Bairro Jardim das Américas – Curitiba/PR
marly_q@yahoo.com.br
{sfreitas, regiane}@ufpr.br

RESUMO – No presente trabalho destaca-se um dos principais problemas associados com a Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB): a determinação da posição relativa dos dois *Data Verticais* (DVs) do Brasil respectivamente em Imbituba-SC e em Santana – AP, os quais não possuem conexão física em vista da inacessibilidade para nivelamento geométrico convencional região da foz do Rio Amazonas e Ilha de Marajó. Vislumbra-se resolver este problema com a modelagem de uma superfície equipotencial, relativamente à qual busca-se determinar as discrepâncias dos dois segmentos da RAFB existentes na região, e respectivamente ligados a cada um dos DVs. Neste sentido, a partir de alguns modelos físicos preliminares propostos por Montecino (2011), busca-se um novo modelo de superfície equipotencial regional com base no método dos elementos finitos aplicado ao espaço do geopotencial, em semelhança com o modelo hidrodinâmico para o transporte de massa estabelecido pela COPPE/UFRJ no espaço geométrico. São considerados, para tanto, o controle dos efeitos geostróficos com base em dados provenientes da altimetria por satélites e observações de marégrafos.

Palavras chave: Datum Vertical, Modelo Hidrodinâmico, Geopotencial, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT – In this paper we highlight one of the main problems associated with the Network Basic Altimetric Brazil (RAFB): determining the relative position of two Vertical Data (DVs) of Brazil respectively Imbituba-SC and Santana - AP, which did not have a physical connection in view of the inaccessibility to conventional leveling region of the mouth of the Rio Amazonas and Marajó Island. Sees to solve this problem by modeling an equipotential surface, on which seeks to determine the differences of the two segments in the region of RAFB and respectively connected to each of the DVs. In this sense, from some preliminary physical models proposed by Montecino (2011), we seek a new model of regional equipotential surface based on the finite element method applied to the space of the geopotential, in similarity to the hydrodynamic model for the transport of body established by COPPE/UFRJ in geometric space. Are considered for both the control geostrophic effects based on data from satellite altimetry and tide gauge observations.

Key words: Vertical Datum, Hydrodynamic Model, Geopotential, Finite Element Method.

1 INTRODUÇÃO

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) possibilitou o posicionamento geodésico com precisão na ordem do centímetro. No entanto, a altitude elipsóidica associada a esta rede não possui o necessário vínculo com o geopotencial e sem as características físicas exigidas nas aplicações da altimetria. Neste sentido a informação altimétrica é suprida pela Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB), porém na qual ainda persistem alguns problemas que a afastam da concepção de rede altimétrica moderna e impossibilitam seu vínculo

a um Sistema Global de Altitude (SGA). São tidos como principais problemas:

- A ausência de significado físico pleno para as altitudes, pois somente correções relativas ao campo da gravidade normal foram aplicadas nesta nova realização obtida de reajustamento global da rede, disponibilizado ao usuário em 2011 (IBGE, 2011). Persistiu nesta nova realização da RAFB a modelagem apenas do afastamento teórico das superfícies equipotenciais com a variação da latitude.

- A existência de dois segmentos da rede, parte vinculada ao Nível Médio do Mar (NMM) obtido no marégrafo de Imbituba, SC, e outra parte, ao norte da região da foz do Rio Amazonas, vinculada ao NMM obtido no marégrafo de Santana, AP (Luz e Guimarães, 2001).
- Um controle efetivo das deformações da RAFB ainda não estabelecido, bem como a evolução temporal dos níveis de referência. A Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) do IBGE, atualmente com 5 marégrafos, é uma estrutura fundamental a ser integrada à RAFB e que pode, em conjunto com novas plataformas orbitais aplicadas à altimetria, propiciar os controles ausentes.
- A RAFB, denominada oficialmente de Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) pelo IBGE, segundo Luz et al. (2008), não atende aos requisitos modernos de posicionamento vertical devido a falta de informações gravimétricas homogêneas vinculadas de forma sistemática à RAFB. Nas regiões costeiras a determinação das altitudes ainda apresenta dificuldades relacionadas à caracterização local das marés.

Montecino (2011) estabeleceu alguns modelos físicos visando à conexão de Santana e Imbituba com Modelos Globais do Geopotencial (MGGs) Satélite-Somente e *Residual Terrain Model* (RTM). Sugeriu que a modelagem adequada do potencial anômalo requer a implementação da modelagem hidrodinâmica e inserção de novas informações altimétricas e batimétricas na região da foz do Rio Amazonas.

Para Ferreira (2008), a unificação de *data* locais a um Datum global, com geopotencial W_0 , necessita do conhecimento dos efeitos gravitacionais das massas anômalas na região contígua aos *data verticais* em estudo pois a definição e realização de altitudes físicas dependem das características do campo da gravidade contíguos aos *data verticais*.

2 ÁREA DE ESTUDO

A figura 1 mostra a região que estabelecemos para os estudos ora propostos nos estados do Amapá e Pará, região norte do Brasil. Fica situada entre os paralelos 3°S e 3.5°N e entre os meridianos 55°W e 43°W.

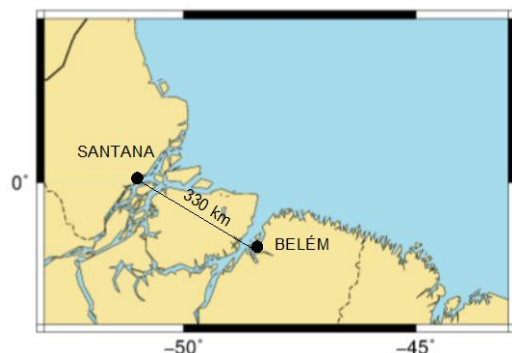


Figura 1 – Mapa da região em estudo

2.1 Aquisição de Dados

Os dados a serem utilizados nesta pesquisa englobam:

- informações de registros do nível d'água obtidos por marégrafos da região, incluso o de Santana da RMPG/IBGE;
- dados da missão GOCE;
- dados de batimetria (Global Multi-Resolution Topography, GMRT)
- dados das missões JASON II, ENVISAT e outros satélites altímetros;
- modelos de marés e carga oceânica do CSR3.0 e FES2004.

3 METODOLOGIA

A metodologia ora proposta tem por base a análise harmônica das variações periódicas e seculares da lâmina d'água na região. A modelagem deve ser realizada em vista de registros maregráficos existentes, modelagem hidrodinâmica por elementos finitos no espaço do geopotencial para geração de uma superfície de nível para referência regional. Serão considerados Modelos Digitais de Elevação (MDEs) inclusive as gerações mais recentes que incluam batimetria para análise de fluxo e perturbações gravitacionais de massas anômalas. Visa-se o controle externo com MGGs oriundos da missão GOCE e também por altimetria por satélites (Dalazoana et al., 2007) com dados obtidos na região oceânica e áreas da foz do Rio Amazonas.

3.1 Análise Harmônica

A análise harmônica busca reproduzir as amplitudes e fases de constituintes harmônicas de maré. Neste sentido pressupõe-se que as constituintes são estáveis e que o oceano se mantém com comportamento previsível ao longo do tempo devido às marés (Pugh, 1987). As marés e as suas correntes são formadas por forças gravitacionais e centrífugas cujo agente promotor é o potencial astronômico de marés. No entanto, a maré real difere daquela modelada pelos constituintes harmônicos, dita maré astronômica. Exatamente neste contexto insere-se o foco da pesquisa que é o da modelagem da maré anômala e seus efeitos sazonais para obtenção de superfície de nível mais representativa para referência regional.

Da análise de dados maregráficos observados determinam-se as constituintes harmônicas locais, e a partir destas realiza-se a previsão da variação do nível do mar local (maré). Assim pode-se descrever o nível de água por (adaptado de Rosman, 2000):

$$M(\phi, \lambda, t_i) = M_0 + \sum_{j=1}^m [f_j(t_0) A_j(\phi, \lambda) \cos(\omega_j t_i - G_j(\phi, \lambda) + u_j(t_0))] + M_m \quad (1)$$

onde

M	Nível de água observado no tempo t_i
M_0	Nível médio do mar
M_m	sinal residual de contribuições físicas diferentes das forças de maré
$A_j(\phi, \lambda)$	Amplitude teórica
ω_i	Frequência da onda de maré em radianos por unidade de tempo
$G_i(\phi, \lambda)$	Fase relativa ao Tempo de Greenwich (GMT) de cada componente harmônica; constituinte específico obtido a partir de dados observados
j	número de observações realizadas
i	número de componentes que podem ser resolvidos
m	número de observações realizadas
t	Tempo de Greenwich (GMT)

Na análise de maré será feita a comparação da maré real com a maré em condições ideais da maré dita astronômica. Também será feita a comparação da amplitude de cada constituinte, gerada pela análise, e o desvio da fase do constituinte observado em relação a fase do mesmo constituinte teórico.

3.2 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos tem sido usado na Geodésia já há alguns anos em diversos tipos de modelagem (e.g. Moritz, 1978; Schimit, 1981). Numa possível formulação de elementos finitos, o domínio da modelagem Ω deve ser subdividido em sub-regiões Ω_e ou elementos (NE). Os elementos estão unidos por nós. A integral resultante para o domínio resulta da soma das integrais de cada elemento do subdomínio como a figura 2 (Rosman, 2000)

$$\int_{\Omega} (\dots) d\Omega = \sum_{e=1}^{NE} \int_{\Omega_e} (\dots) d\Omega_e \quad (2)$$

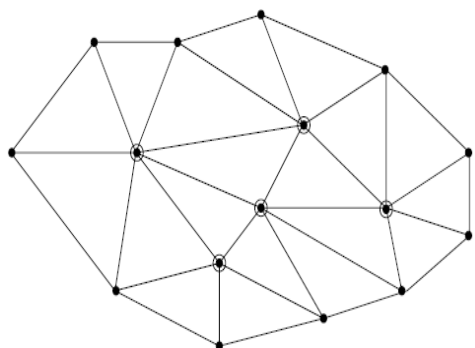


Figura 2 – Domínio Ω dividido em elementos finitos (NE)
Fonte: Adaptado de Rosman, 2000.

Visa-se aplicar o método dos elementos finitos em auxílio à solução do Problema do Valor de Contorno da

Geodésia (PVCG). A abordagem adotada utiliza a forma fixada, considerando a superfície física como conhecida e desta forma evitam-se reduções com base em hipóteses simplificativas da estrutura interna da crosta ou massas líquidas anômalas relativamente a uma superfície equipotencial de referência local, a qual é relacionada com um geóide global com base em MGGs, tal como contemplado na modelagem preliminar estabelecida por Montecino (2011). A base da modelagem por elementos finitos é estabelecida com base em que os efeitos anômalos, T , relativos a uma distribuição em equilíbrio na forma (Baker, 1988)

$$T(r, \theta, \lambda) = \sum_{i=1}^M a_i N_i(r, \theta, \lambda) \quad (3)$$

sendo

N_i	funções bases do elemento finito
a_i	correspondente coeficiente de relevância ou peso
M	número de nós de cada elemento

3.3 Modelo Hidrodinâmico

Dentre os modelos apresentados pelo Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental, SisBAHIA, desenvolvido pela COPPE/UFRJ, encontra-se o modelo hidrodinâmico advindo do FIST (*Filtered in Space and Time*). O FIST3D sendo um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH para corpos de águas naturais com base fundamental para qualquer análise, composto por:

- Módulo promediado na vertical ou bidimensional na horizontal, 2DH. Assim a elevação da superfície livre e velocidades de corrente são calculadas;
- Módulo 3D calculando o tempo de velocidades tridimensionais

O movimento de escoamento sendo regido pelas equações de Navier-Stokes e representando a conservação da quantidade de movimento, em conjunto com a equação da continuidade, equação de estado e equação de transporte de cada constituinte.

4 RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 Hidrodinâmica da região

Em busca de uma superfície equipotencial regional melhor ajustada ao nível médio do mar (NMM), assim a análise das componentes anômalas deve ser necessária para estudar o nível do mar nos mareógrafos próximos aos desníveis verticais. Na análise de maré, com as observações das estações mareográficas obtidas no banco de dados do IBGE e também em uma série de mareógrafos operados na região principalmente pela DHN, pode-se obter o nível médio do mar para uma determinada época, a amplitude e a fase para os principais componentes harmônicos e assim modelar o nível sintético para épocas atuais.

A tabela 1 mostra o valor das médias mensais obtidas com dados horários do nível do mar obtido no marégrafo de Santana (este a guisa de exemplo) com base em solução do SisBAHIA.

Intervalo	Santana 2008 (m)	Santana 2009 (m)	Santana 2010 (m)
Mês			
JAN	3,0681	3,2871	3,2682
FEV	3,2762	3,4976	3,4471
MAR	3,4391	3,6502	3,4828
ABR	3,5679	3,7892	3,6050
MAI	3,5432	3,8389	3,5150
JUN	3,4047	3,6364	3,3667
JUL	3,2720	3,5820	3,2089
AGO	3,3225	3,5096	3,3449
SET	3,2652	3,4032	3,1155
OUT	3,1397	2,6166	2,9041
NOV	3,0400	2,6078	2,8957
DEZ	3,0944	3,0091	2,9742
JAN à DEZ	3,2858	3,3643	3,2130

Tabela 1 – Nível médio do mar - resultados preliminares

Foreman (1977) sugere uma forma de classificar a maré temporal com base no cálculo relacionando a amplitude de algumas constituintes harmônicas como M_2, S_2, K_1 e O_1 denominada de número de forma (Dietrich, 1963) dado por:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (4)$$

Nesse sentido, a maré pode ser classificada como:

- Semi-diurna $0 \leq F \leq 0,25$
- Mista, principalmente Semi-diurna $0,25 \leq F \leq 1,5$
- Mista, principalmente Diurna $5 \leq F \leq 3,0$
- Diurna $F > 3,0$

Com o exposto acima se classifica a maré de Santana como sendo semi-diurna. Na figura 3 podem-se verificar as componentes harmônicas obtidas da análise das observações deste marégrafo.

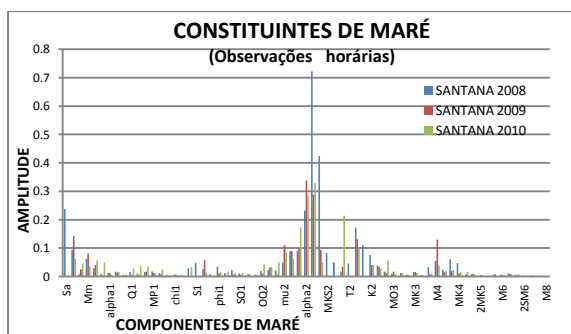


Figura 3 – Componentes harmônicas da maré em Santana

A média mensal da maré observada no marégrafo de Santana nos anos de 2008, 2009 e 2010, pode ser vista na figura 4. Observa-se a discrepância do nível das marés.

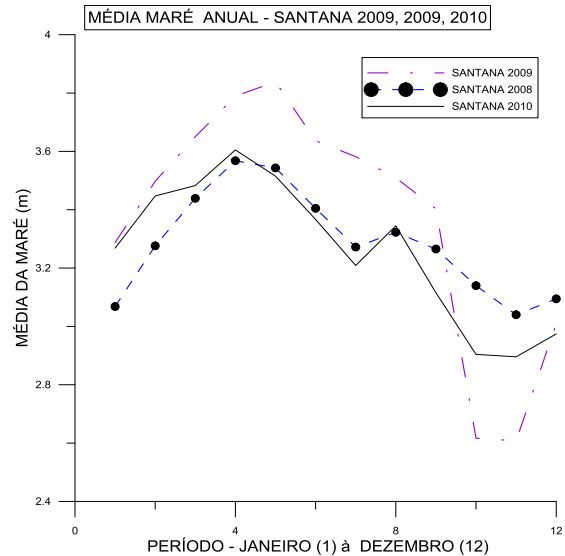


Figura 4 – Comparação do nível da maré no marégrafo de Santana.

A batimetria da área de estudos, a ser utilizada na implementação da modelagem pretendida, pode ser visualizada na figura 5. Esta foi gerada a partir de dados batimétricos. Os dados batimétricos de base foram obtidos do Marine Geoscience Data System disponível em www.geomapapp.org.

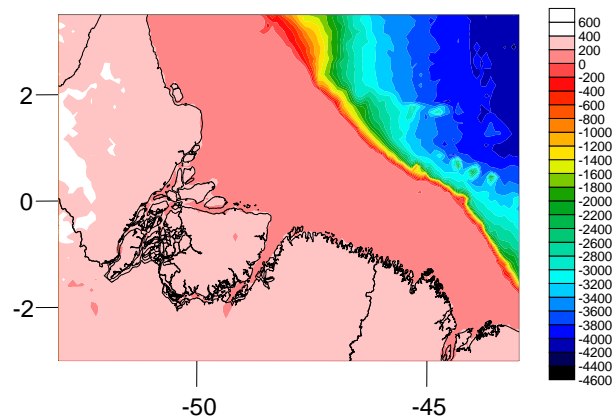


Figura 5 - Representação da superfície (m) da região em estudo (Amapá)

5 SUMÁRIO

Busca-se determinar o desnível geopotencial entre segmentos da RAFB vinculados aos dois Data Verticais do Brasil, introduzindo nos modelos físicos propostos por Montecino (2011) aspectos relacionados com a topografia anômala quase estacionária das superfícies líquidas na foz do Rio Amazonas relativamente a uma superfície equipotencial de referência. A modelagem hidrodinâmica

tem por base modelos geométricos desenvolvidos pela COPPE/UFRJ. Visa-se a modelagem no espaço do geopotencial incluindo adicionalmente a altimetria por satélites, Modelos Globais do Geopotencial, Modelos Digitais de Elevação e Batimétricos e observações maregráficas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pelo apoio financeiro e bolsa de doutorado (Processos 301797/2008-0 e 141665/2010-6), à COPPE/UFRJ pelo apoio na modelagem hidrodinâmica na região de estudo e ao IBGE pelo acesso às bases de dados maregráficos.

REFERÊNCIAS

BAKER, E. M. **A Finite Element Model of the Earth's Anomalous Gravitational Potential**. Department of Geodesy Science and Surveying. The Ohio State University, June 1988. Report nº 391.

DALAZOANA, R.; FREITAS, S. R. C. de; SOTO, J. C. B.; LUZ, R. T. **Brazilian Vertical Datum Monitoring - Vertical Land Movements and Sea Level Variations**. In: Chris Rizos; Paul Tregoning (Org.). *Dynamic Planet: Monitoring and understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic tools*. Springer, v. 130, p. 71-75, 2007.

DIETRICH, G. **General Oceanography**. John Wiley & Sons, 588 pp, 1963.

MARINE GEOCIENCE DATA SYSTEM (MGDS) Dados de batimetria disponível em <http://www.geomapapp.org/> Acesso 4 março 2012.

FERREIRA, V. G. **Análise da Componente Anômala do geopotencial no Datum Vertical Brasileiro com base no Sistema Lagunar de Imarui, SC**. 2008. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná.

FOREMAN, M.G.G. **Manual for tidal heights analysis and prediction Pacific Marine**. Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, BC., 101 pp, 1997.

IBGE. **Ajustamento Simultâneo da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**. Relatório. Rio de Janeiro, 2011. 62 pp.

LUZ, R. T.; BOSCH, W.; FREITAS, S. R. C. de; HECK, B. **Topografia do Nível Médio do Mar no Litoral Sul-Sudeste Brasileiro**. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife - PE, 8-11 de setembro de 2008.

LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. **Realidade e Perspectivas da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**. 2011 In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2., 2001,

Curitiba. UFPR. Disponível em http://www.ibge.gov.br/canal_artigos/a2001_1.php (PDF indisponível neste link; endereço para acesso direto: http://www.ibge.gov.br/canal_artigos/pdf/2001Realidade_e_Perspectivas_da_RAAPSGB.pdf), último acesso: 2/02/2011

MONTECINO, H. **Proposta de alternativas para conexão dos data verticais brasileiros de Imbituba e Santana**. 2011. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná.

MORITZ, H. **Least Squares Collocation**. *Reviews Of Geophysics And Space Physics*. vol. 16, no 3, 1978.

PUGH, D.T. **Tides Surges and Mean Sea Level**. John Wiley & Sons. 1987. 472 pp.

ROSMAN, P.C.C. **SisBAHIA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. Documentação de Referência Técnica. Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Universidade Federal de Rio de Janeiro (COPPE-PEnO/UFRJ), Rio de Janeiro, 2000.

SCHIMIT, H. F. **Sampling function and finite element method representation of the gravity field**. *Rev.Geophys*. 1981. 19(3), 421–436.