



CONEXÃO ENTRE SEGMENTOS DA REDE VERTICAL DE REFERÊNCIA DO BRASIL (RVRB) NO ESPAÇO DO GEOPOTENCIAL

Andrea G. Santacruz Jaramillo¹

Sílvio R. Correia de Freitas¹

Vagner G. Ferreira²

José L. Carrión Sánchez³

(1) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil

(2) Universidade Hohai (HHU), Nanjing, China

(3) Instituto Geográfico Militar (IGM-EC), Departamento de Geodesia, Quito, Equador

11-14 de Novembro de 2019



CONSIDERAÇÕES INICIAIS

PROBLEMAS:

- Heterogeneidade das redes; pouca acessibilidade; dependência de dados e DV locais; trabalhos sem continuidade.
- Dois segmentos da Rede Vertical de Referência do Brasil (RVRB) → *Datum* Vertical Imbituba (DVB-I) e o *Datum* Vertical Santana (DVB-S), ainda não consistentes com o IHR5 e sem conexão entre eles.

SOLUÇÕES:

- Modernização da Rede Vertical de Referência do Brasil (RVRB), IBGE, 2018 → C, H^N ;
- IHR5 e realização através do IHRF.

Rede Altimétrica com os DVBs



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia.

Adaptado do IBGE, 2019

Como realizar a conexão dos dois segmentos da RVRB no espaço do geopotencial?

ÁREA DE ESTUDO

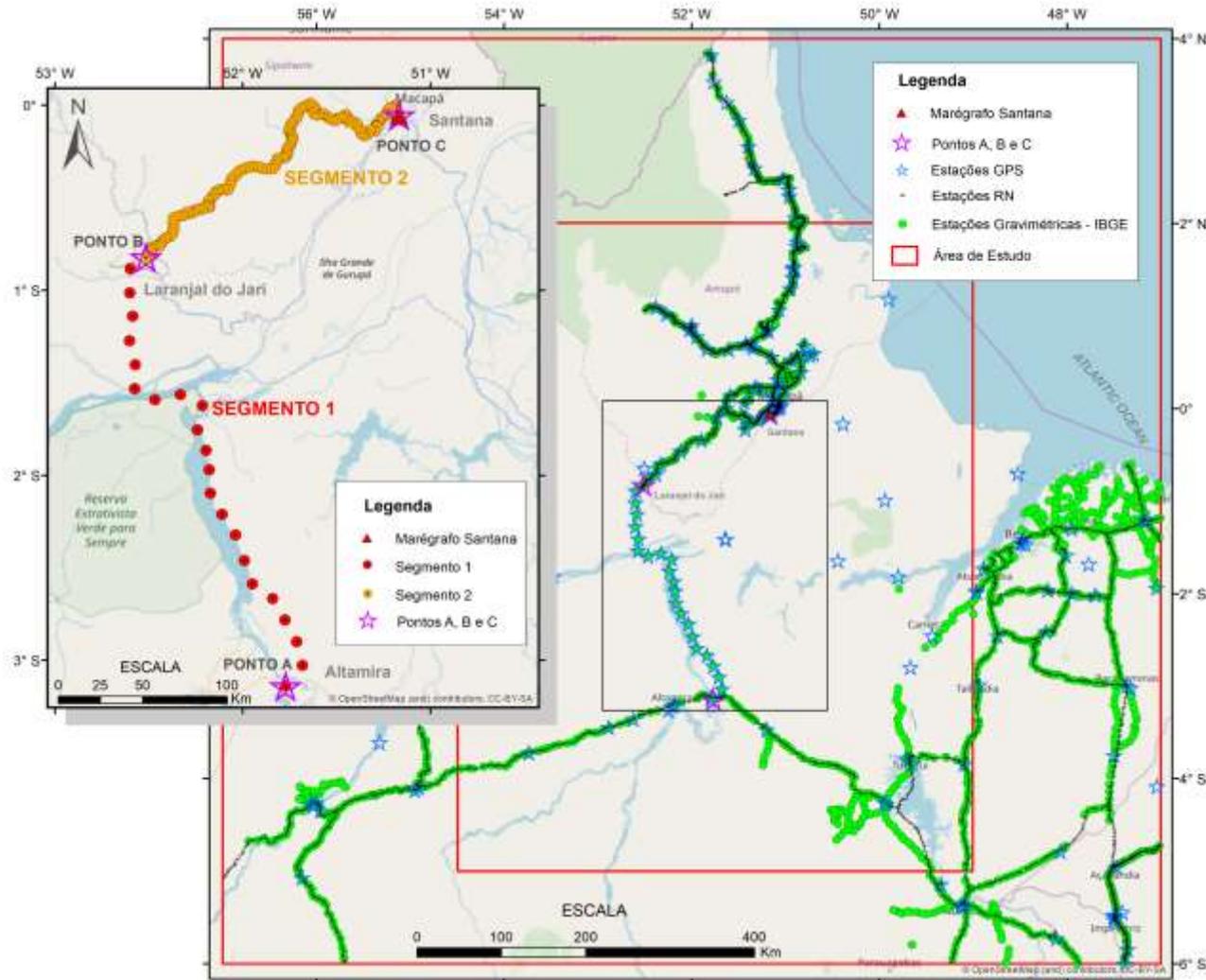
Latitudes 2°N e 5,5°S
Longitudes 49°W e 55°W

SEGMENTO 1 → da EC- A
(Altamira) para a EC-B
(Laranjal do Jari)

- DV-I
- 23 pontos GPS + GRAV
- Distância 269,2544 km

SEGMENTO 2 → da EC-C
(Santana) para a EC-B
(Laranjal do Jari)

- DV-S
- 131 pontos NIV + GRAV
- Distância 172,4278 km



- Determinação do geopotencial nas Estações de Conexão (EC)
- Cálculo e análise das discrepâncias dos segmentos (local e global)

DESENVOLVIMENTO INICIAL

DOI 10.1590/s1982-21702019000100006

ORIGINAL ARTICLE

PHYSICAL CONNECTION BETWEEN BVRF SEGMENTS BASED ON LEVELING ASSOCIATED WITH GRAVIMETRY

Conexão física entre segmentos da RVRB com base em nivelamento associado a gravimetria

Andrea Santacruz Jaramillo¹ – ORCID: 0000-0002-6648-9879

Sílvio Rogério Correia de Freitas¹ – ORCID: 0000-0003-0830-6541

Roberto Teixeira Luz² – ORCID: 0000-0002-0686-952X

¹ Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná, Brasil

E-mail: andrea.santacruz@ufpr.br; sfreitas@ufpr.br

² Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Coordenação de Geodésia, Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: roberto.luz@ibge.gov.br

Received in September 06st 2018

Accepted in December 20th 2018

Dados: **SEGMENTO 1** (A-B) → GPS + GRAVIMETRIA
SEGMENTO 2 (C-B) → NIVELAMENTO + GRAVIMETRIA

- Soluções foram desenvolvidas buscando evidenciar o *offset* entre os dois segmentos da RVRB mediante desníveis geopotenciais, aplicando:
 - métodos clássicos de propagação em números geopotenciais e altitudes com base em correções normais;
 - diferenças de anomalias de altitude advindas de MGGs.
- Foi considerado o novo ajustamento do IBGE 2018.
- Foram usados estudos preliminares relacionados à conexão dos DVB-I e DVB-S em realizações anteriores da RVRB (DE FREITAS, et al., 2018) com base em estratégias indiretas e ajustes regionais GPS/Nivelamento e funcionais derivadas de MGGs, para comparação.

Estratégia para o cálculo de Altitudes Normais E Números Geopotenciais

$$C_{Pi} = W_{0i} - W_P = \int_{0i}^P g dn \cong \sum g_{mj} \Delta n_j \longrightarrow H^N = \frac{C}{\gamma_m}$$

- Para a EC-A (ponto indireto da RVRB), foi considerado :

$$H_{2018}^N - H_{2011}^{NO} \cong -216 \text{ mm}$$

Condição aplicada à solução.

- Considerou-se a correção da gravidade nas diferenças de nível observadas em ambos segmentos.

$$H_{2i}^N = H_{1i}^N + \delta H_{(1-2)i}$$

Iteração

$$\delta H_{(1-2)c}^N = \frac{g_{m(1-2)} * \delta H_{(1-2)i}}{\gamma_{m_2}}$$

Altitude normal corrigida

$$H_{2c}^N = H_{1c}^N + \delta H_{(1-2)c}$$

Solução GPS + GRAV com MGG → Uso de diferenças de anomalia de altitude (ζ) em cada seção nivelada por GPS. Foi usado o MGG GECO 2015 (g/o 2190).

Abordagem que melhora o cálculo de diferenças de nível GPS para obter diferenças de C e H^N .

ALTITUDES NORMAIS E NÚMEROS GEOPOTENCIAIS DO PONTO B

H^N (m)			C (m ² s ⁻²)		
Segmento 1	Segmento 2	Offset	Segmento 1	Segmento 2	Offset
53,1311	51,8936	1,237(±0,06m)*	519,6400	507,5371347	12,1028

* Considerando o erro relativo de 1/10'000.000 tanto do posicionamento GNSS como das ζ oriundas do GECO 2015.

OFFSETS CALCULADOS ENTRE DV-I e DV-S

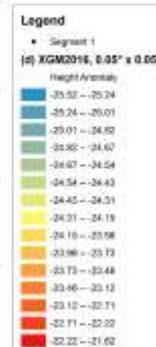
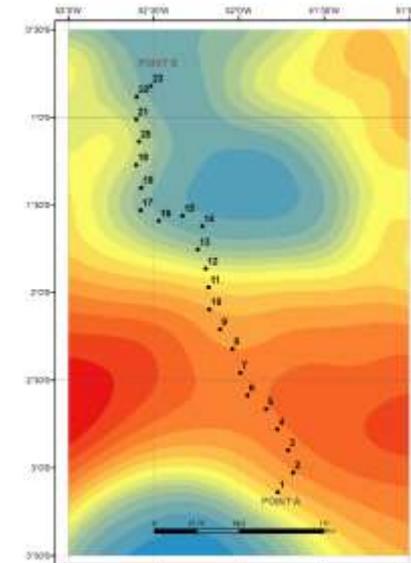
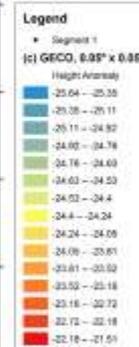
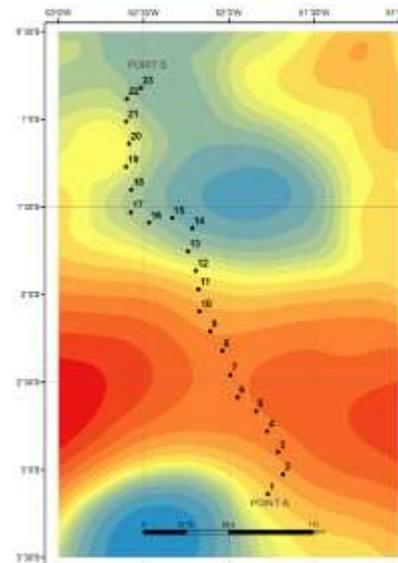
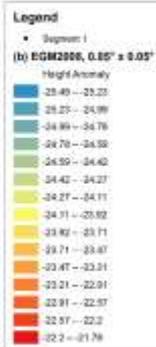
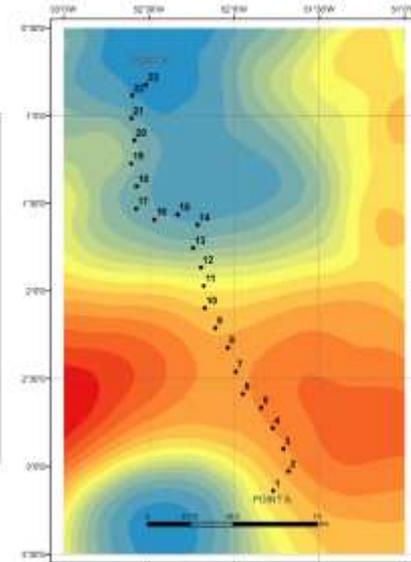
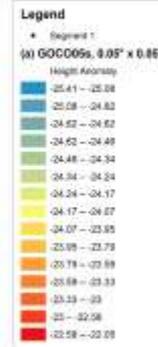
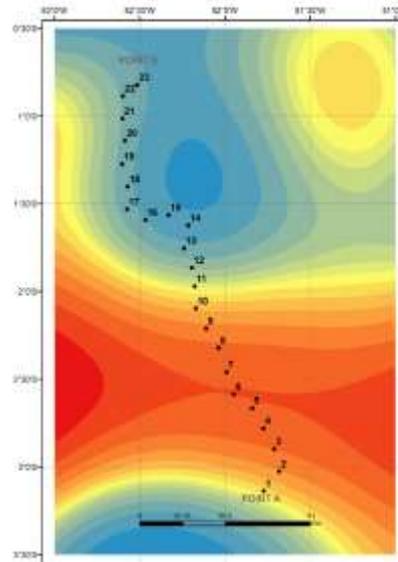
Estudos prévios: SANTANA acima de IMBITUBA				
Autores	Ano de Conclusão do Estudo	Offset (m)	Realização RVRB	Método
Montecino & De Freitas	2014	1,354(±0,59m)	RAAP/AAGP(1992)	LSA+GGMs+RTM
Moreira & De Freitas	2016	1,084(±0,21m)	RAAP/2011	LSA+GGM+ η
De Freitas et al.	2016	1,200(±0,21m)	RAAP/2011	Mix LSA e MGGs

Fortes Anomalias do Campo do Geopotencial detectadas em Anomalias de Altitudes

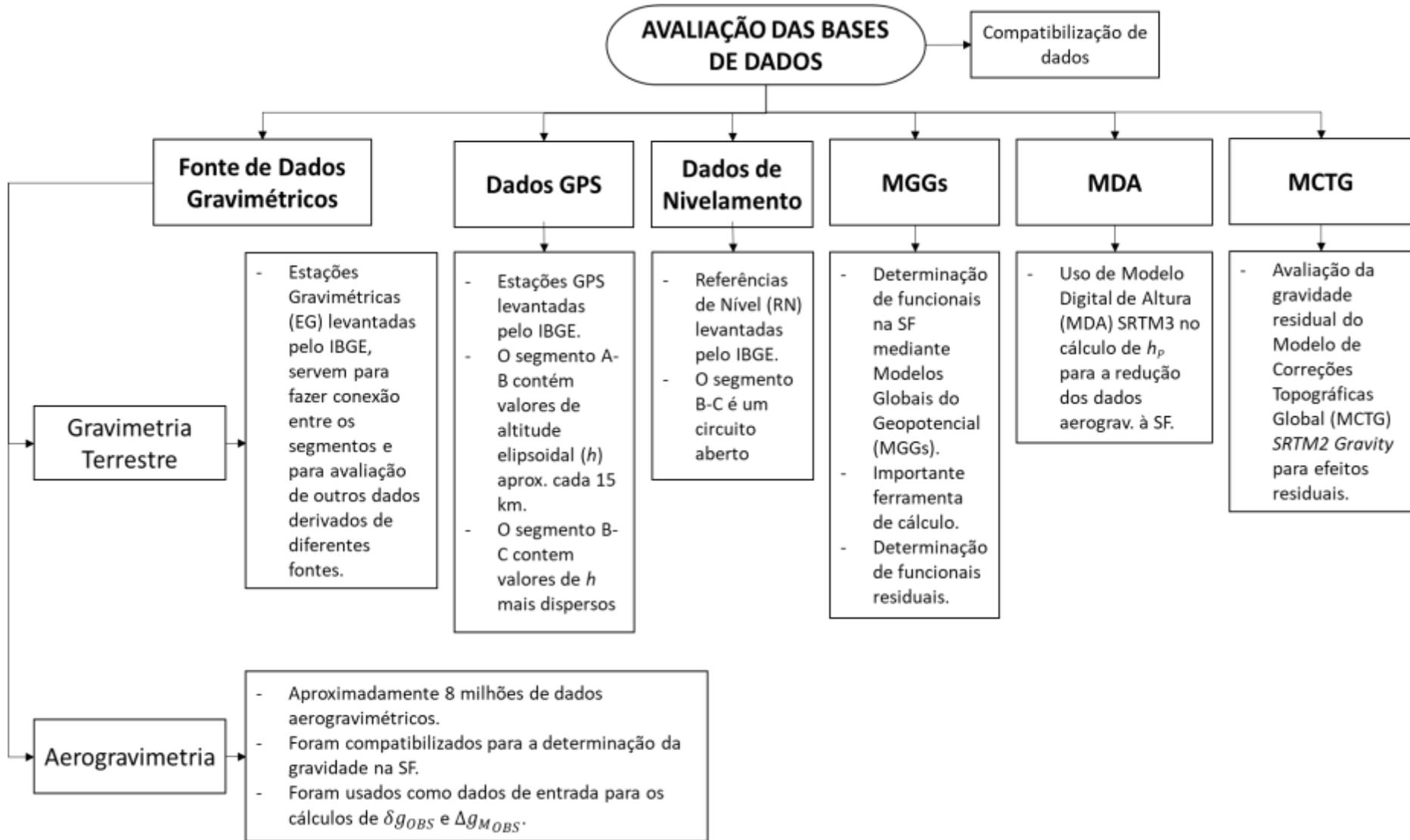
MAPAS DE ζ DERIVADAS DE:

- a) **GOCO 05S**, MGG satélite somente;
- b) **EGM2008**, MGG combinado de alta resolução;
- c) **GECO**, MGG aumentado;
- d) **XGM2016** MGG próxima geração combinada.

Evidencia de fortes variações físicas provenientes de heterogeneidades regionais da crosta.



INFRAESTRUTURA E FONTE DE DADOS



METODOLOGIA, RESULTADOS E ANÁLISES PRELIMINARES

ANÁLISE E DEPURAÇÃO DE DADOS

Depuração e análise qualitativa previa dos arquivos fornecidos pelo IBGE:

- Completude, consistência existência, duplicidade, heterogeneidade dos dados

ALINHAMENTO E COMPATIBILIZAÇÃO DE DADOS

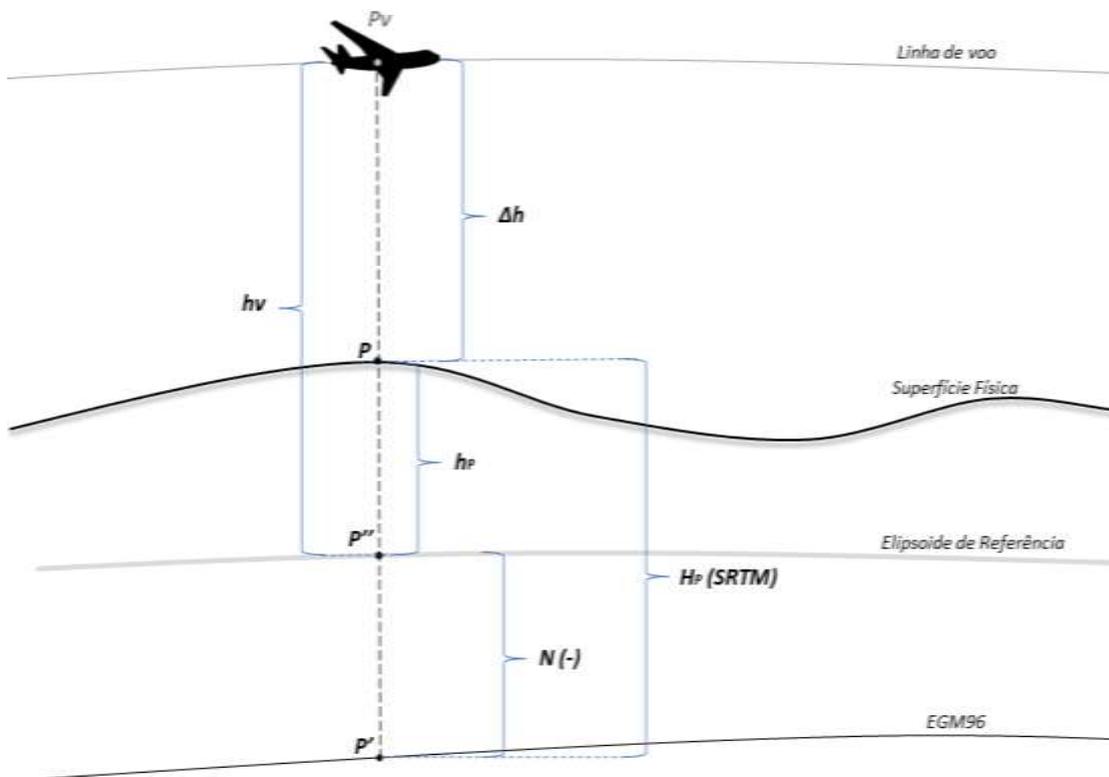
De acordo com:

- Resolução 1/2015 da IAG: Definição e realização do IHRS.
- Resolução 3/2019 da IAG: Estabelecimento do IHRF.

FORMAÇÃO DE BASE DE DADOS A PARTIR DE OBSERVÁVEIS

Determinação de Valores de Gravidade na SF a partir de Aerogravimetria

Gravidade na SF $g_P \rightarrow \delta g_{OBS_i}$



Considerar:

Compatibilização de dados \rightarrow SR, SMP;
Cálculos em cada ponto c/aerogravimetria.

$$h_P = H_{P(SRTM)} + N_{EGM96}$$

$$\Delta h = h_v - h_P$$

$$g_P = g_v + \frac{\partial \gamma}{\partial h} \Delta h$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial h} = \frac{2\gamma}{a} (1 + f + m - 2 \text{sen}^2 \varphi)$$

$$\delta g = g_P - \gamma_P$$

$$\gamma_{P_{SF}} = \gamma_{P''} - \frac{\partial \gamma}{\partial h} h_P$$

GERAÇÃO EM GRADE DE VALORES DE DISTÚRBIOS DA GRAVIDADE E ANOMALIAS DE MOLODENSKY OBSERVADOS

$$g_P \rightarrow \delta g_{OBS_i} \rightarrow \delta g = g_P - \gamma_P$$

$$\delta g_{MGG_i} \rightarrow \text{MMG EGM2008, g/o máx}$$

Deteccção de **Outliers** para cada grupo das Estação de Conexão (A, B e C)

$$x_i = \delta g_{OBS_i} - \delta g_{MGG_i}$$

3RMS

Distúrbios da gravidade observados (δg_{OBS})

$$\delta g_{OBS} = g_P - \gamma_P$$

$$\delta g_{RES} = \delta g_{OBS} - \delta g_{MGG} - \delta g_{MCTG}$$

GRADE
1'X1'

GRADE
1'X1'

Anomalias da superfície observados (Δg_{MOBS})

$$\Delta g_{MOBS} = g_P - \gamma_\Sigma$$

$$\gamma_\Sigma = \gamma Q_0 \left[1 - 2(1 + f + 2f \text{sen}^2 \varphi) \frac{H^N}{a} + 3 \left(\frac{H^N}{a} \right)^2 \right]$$

$$H^N = h_P - \zeta$$

$$\Delta g_{MRES} = \Delta g_{MOBS} - \Delta g_{MGG} - \Delta g_{MCTG}$$

GERAÇÃO EM GRADE DE VALORES DE ANOMALIAS DE MOLODENSKY E DISTÚRBIOS DA GRAVIDADE A PARTIR DE MGG

Cálculo dos funcionais com o MGG EGM08

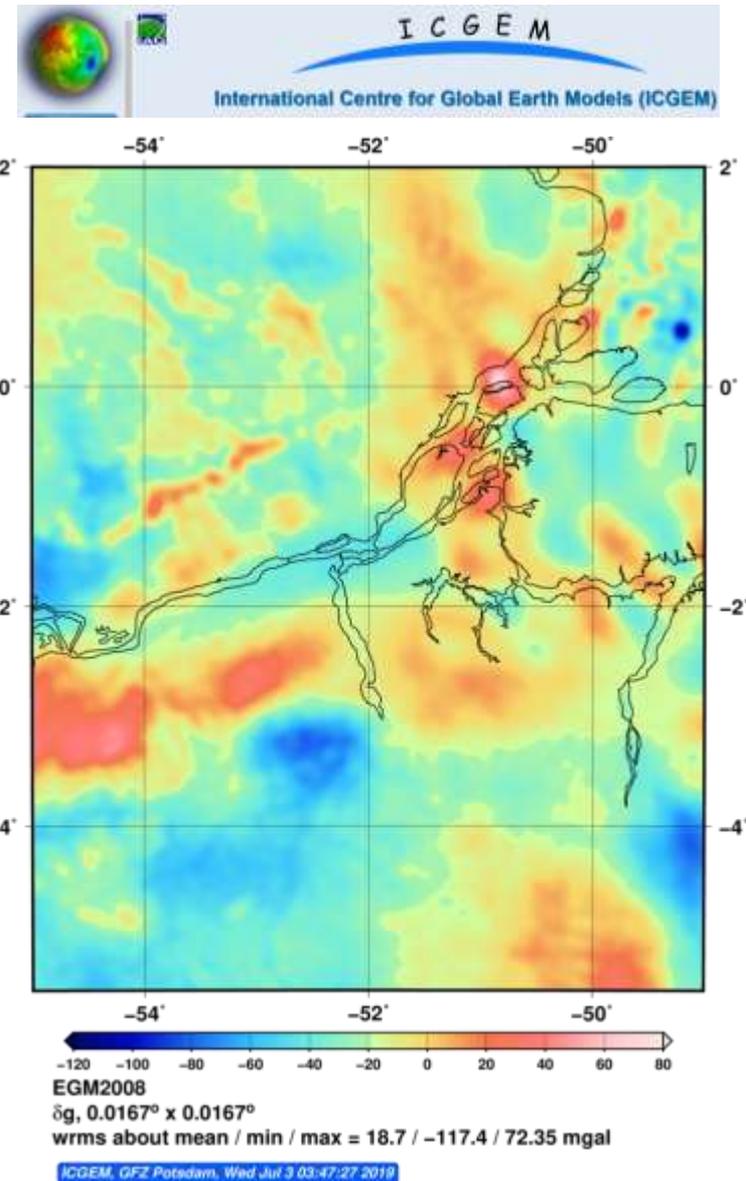
- Sistema de Referência GRS80;
- Sistema de Maré *Zero Tide*;
- Máximo g/o do modelo;
- Uso do Termo de ordem de grau zero;
- Grade de 1'X1'.

Anomalias da superfície do MGG (Δg_{MGG})

$$\Delta g_{MRES} = \Delta g_{MOBS} - \Delta g_{MGG} - \Delta g_{MCTG}$$

Distúrbios da gravidade do MGG (δg_{MGG})

$$\delta g_{RES} = \delta g_{OBS} - \delta g_{MGG} - \delta g_{MCTG}$$



GERAÇÃO EM GRADE DE VALORES DE ANOMALIAS DE MOLODENSKY E DISTÚRBIOS DA GRAVIDADE A PARTIR DE MCTG

Modelo de Correções Topográficas Global (MCTG) *SRTM2Gravity*

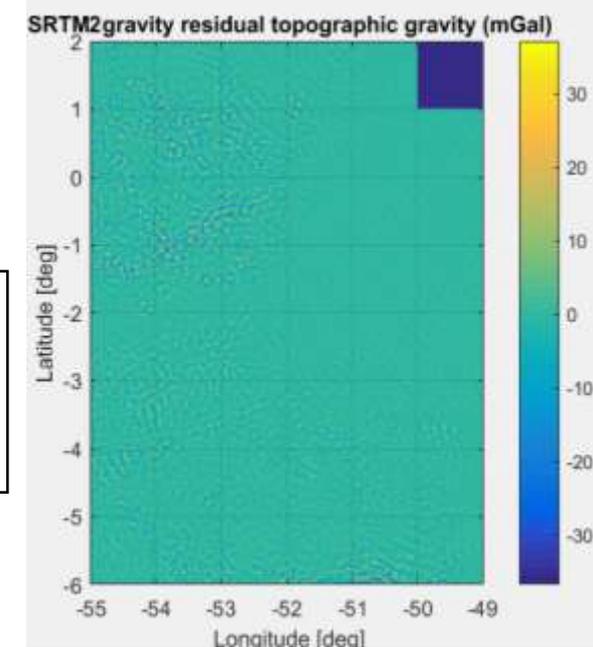
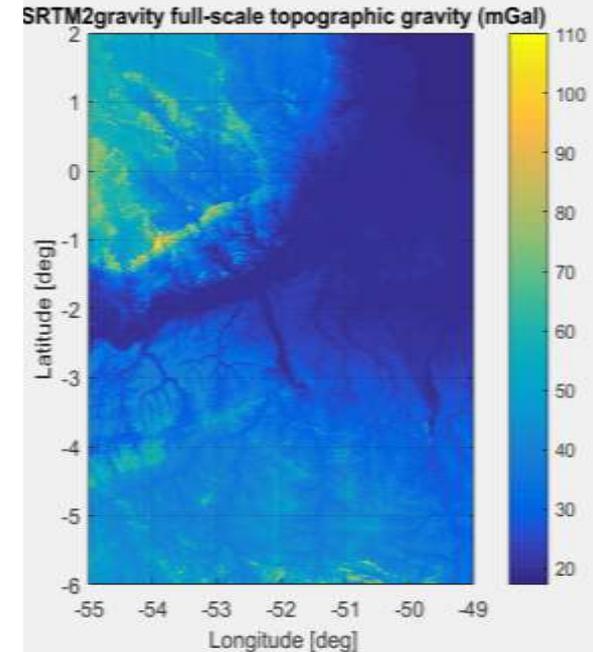
- Cálculo do campo da gravidade gerado pela topografia residual com base no SRTM;
- Resolução de 3 arcseg (~90m), precisão de ~0,2 mGal, densidade da crosta 2670 kg m^{-3} ;
- Limitações → É um modelo do campo da gravidade implícito da topografia pura, não contém valores de gravidade observados e efeitos das heterogeneidades de densidades da crosta.

Cálculo de anomalias de superfície do MCTG (Δg_{MCTG})

$$\Delta g_{MRES} = \Delta g_{MOBS} - \Delta g_{MMGG} - \Delta g_{MDA/MCTG}$$

Cálculo de distúrbios da gravidade do MCTG (δg_{MCTG})

$$\delta g_{RES} = \delta g_{OBS} - \delta g_{MGG} - \delta g_{MDA/MCTG}$$



USO DA DECOMPOSIÇÃO ESPECTRAL NO PROBLEMA DO VALOR DE CONTOURO DA GEODÉSIA (PVCG)

Remover

Cálculo de anomalias de superfície residuais

$$\Delta g_{MRES} = \Delta g_{MOBS} - \Delta g_{MMGG} - \Delta g_{MMCTG}$$

Cálculo de distúrbios da gravidade residuais

$$\delta g_{RES} = \delta g_{OBS} - \delta g_{MGG} - \delta g_{MCTG}$$

O PVCG determina o campo da gravidade externo às massas

ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO PARA O PVCG

$$T = W - U = (V + \Phi) - (V_N + \Phi)$$

Evita reduções hipotéticas devido às estruturas da crosta e superfícies desconhecidas

Solução do PVCG na Forma Livre

Solução do PVCG na Forma Fixada

ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO PARA O PVCG

Solução do PVCG da Forma Livre

$$T = \frac{R}{r\pi} \int_{\sigma} (Z_0 + Z_1 + Z_2 \dots) S(\psi) d\sigma$$

$$Z_0 = \Delta g_{MRES}$$

$$Z_1 = \frac{R^2}{2\pi} \int_{\sigma} \frac{h - h_P}{l_0^3} \left[\Delta g_{MRES} + \frac{3\bar{g}}{2R} \zeta_0 \right] d\sigma$$

Solução do PVCG da Forma Fixada

$$T = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} (\mu_0 + \mu_1 + \mu_2 \dots) H(\psi) d\sigma$$

$$\mu_0 = \delta g_{RES}$$

$$\mu_1 = \frac{R^2}{2\pi} \iint_{\sigma} \frac{h - h_P}{l_0^3} \delta g_{RES} d\sigma$$

$$T = T_0 + T_1 + T_2 + \dots$$

Fórmula de Bruns

$$\zeta = \frac{T}{\gamma_0}$$

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 + \zeta_2 + \dots$$

$$\zeta_P = \zeta_{RES} + \zeta_{MGG} + \zeta_{MCTG}$$

$$T_P = \zeta_P * \gamma_0$$

Restaurar

Determinação do Geopotencial (W)
 $W_P = T_P + U_P$

Geopotencial
 W_A, W_B, W_C

Offset
 Local e Global

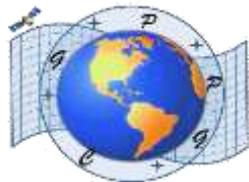
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

- Possibilidade de controle sobre as linhas de nivelamento de conexão: determinação de C ou ζ relacionados ao IHRS/IHRF e verificação de suas discrepâncias com respeito às ζ da solução apresentada.
- Continuidade no estudo e análise das metodologias, programas e ferramentas computacionais para o desenvolvimento das soluções do PVCG, tendo em vista a constante atualização dos *road-maps* do *WG on strategy for the realization of the IHRS* (GGOS/IAG).
- A solução do PVCG da forma livre, está sendo desenvolvida por integração numérica, usando programas desenvolvidos por Ferreira (2018).
- A solução do PVCG da forma fixada, está sendo desenvolvida segundo a metodologia da IAG *Geoid School* considerando os programas do pacote computacional GRAVSOFTE devidamente implementados pelo método *Fast Collocation* (BOTTONI e BARZAGHI, 1993).
- Resolver o PVCG em todas as estações que tenham valores GPS/GRAV determinando, portanto, desníveis geopotenciais para confrontar a metodologia e resultados conforme Santacruz *et al.* (2019).

REFERÊNCIAS

- BROVAR, V. On the solutions of Molodensky's boundary value problem. **Bulletin Géodésique (1946 - 1975)**, Springer Berlin / Heidelberg, v. 72, p. 167–173, 1964.
- DE FREITAS, SILVIO R. C. SIRGAS-WGIII activities for unifying height systems in Latin America. **Revista Cartográfica**, v. 91, p. 75-92, 2015.
- DE FREITAS, S.R.C.; FERREIRA, V.G.; LUZ, R. Efforts for aligning the Brazilian Height System to the International Height Reference System. **(Schw) Ehre, wem (Schw) Ehre gebuehrt: Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Dr. hc Bernhard Heck**, p. 75, 2018.
- FERREIRA, V. G. **Geodesia Física**. Disciplina de Métodos Físicos em Geodesia no. PPGCG- UFPR, nov, 2018.
- HEISKANEN, W. A.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1967.
- HIRT, C.; YANG, M.; KUHN, M.; et al. SRTM2gravity: An Ultrahigh Resolution Global Model of Gravimetric Terrain Corrections. **Geophysical Research Letters**, 2019.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. New York: Springer Wien, 2006.
- International Association of Geodesy (IAG). **Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHR)**. München – Germany, 2015.
- International Association of Geodesy (IAG). Resolution 3: **Establishment of the International Height Reference Frame (IHRF)**. Montreal - Canada, July 8-18, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais 2ª edição**. Rio de Janeiro, 2019.
- INTERNATIONAL CENTRE FOR GLOBAL EARTH MODELS (ICGEM). **Calculation of Gravity Field Functionals**. Disponível em: <<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>>. Acesso em: abr. 2019.
- SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M. G. Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHR). **Geophysical Journal International**, v. 209, n. 2, p. 570-586, 2017.
- SANTACRUZ, A.; DE FREITAS, S.R.C.; LUZ, R. Physical Connection between BVRF Segments Based on leveling associated with Gravimetry. **Bolletim de Ciências Geodésicas**. 2019.

AGRADECIMENTOS



Simposio SIRGAS 2019



SIRGAS

Sistema de Referencia Geocéntrico
para las Américas

2019

Rio de Janeiro,
Brasil



OBRIGADA!
GRACIAS!
THANK YOU!

andrea.santacruz@ufpr.br

sfreitas@ufpr.br

vagnergf@hhu.edu.cn

josecarrionsa@gmail.com

