

## **TENDÊNCIAS MODERNAS E QUESTÕES RELACIONADAS COM A DEFINIÇÃO E REALIZAÇÃO DE SISTEMAS VERTICAIS: A EXPERIÊNCIA CANADENSE**

*Modern Trends and Issues Related to the Definition of Vertical Systems:  
The Canadian Experience*

**Marcelo Carvalho dos Santos**

**University of New Brunswick – UNB**  
**Department of Geodesy and Geomatics Engineering**  
P. O. Box 4400, Fredericton, NB, E3B 5A3, Canada  
msantos@unb.ca

*Recebido em 17 de Dezembro, 2014/ Aceito em 15 de Março, 2015*  
*Received on December 17, 2014/ Accepted on March 15, 2015*

### **RESUMO**

O Canadá adotou recentemente um novo sistema vertical de referência baseado na escolha de uma superfície equipotencial em detrimento do nível médio dos mares como utilizado durante o século passado e durante a primeira década deste século. Esta escolha tem implicações importantes a nível científico e a nível prático. Este artigo busca discutir os motivos e as implicações desta escolha. Se por um lado ela oferece uma melhor representação da altitude ortométrica, por outro lado ela sepulta a rede de nivelamento geométrico de primeira ordem. Se por um lado ela facilita a manutenção do sistema vertical, por outro ela acarreta uma perda da “realidade no terreno.” Para os usuários, criam-se uma série de desafios, que, se sobrepujados com sucesso, trarão benefícios para as diversas atividades, notadamente aquelas que lidam com água, por exemplo, saneamento, inundações, e irrigação. O artigo também inclui uma discussão introdutória sobre sistemas de altitudes e sistemas verticais.

**Palavras chaves:** CGVD2013, Geoide, Sistema Vertical, Altitude Ortométrica.

### **ABSTRACT**

Canada has recently adopted a new vertical reference system based on the choice of an equipotential surface instead of the mean sea level as used during the last century and during the first decade of this century. This choice has important implications at the scientific and practical level. This article discusses the reasons and implications of this choice. On the one hand it provides a better representation of orthometric height; on the other hand it represents the demise of the levelling network of first order. On the one hand it facilitates the maintenance of the vertical system; on the other it entails a loss of “reality on the ground.” For users, it creates a number of challenges, which if successfully surmounted, will bring benefits for the various activities, especially those that deal with water, for example, sanitation, floods, and irrigation. The article also includes an introductory discussion about systems of heights and vertical systems.

**Keywords:** CGVD2013, Geoid, Vertical System, Orthometric Height.

## 1. INTRODUÇÃO

Enquanto que o estabelecimento e utilização de um sistema de referência Cartesiano global tri-dimensional está aparentemente resolvido, a questão de um sistema vertical global ainda se encontra em discussão. A busca de uma altitude que tenha sentido físico passa necessariamente pela conexão com o campo da gravidade terrestre, e seu acesso pode ser feito por meio de um sistema vertical de marés ou de um sistema vertical gravimétrico. O objetivo final é o acesso à altitude ortométrica de pontos sobre a superfície terrestre, altitude esta contada a partir de uma referência vertical, o geóide. O problema consiste em como realizar a superfície do geóide, seja a nível regional ou a nível global, bem como em como efetivar conexões entre a realização de um geóide global com as diversas realizações locais do geóide.

O Canadá até recentemente utilizou um sistema vertical de marés, densificado através de uma rede de nivelamento geométrico de primeira ordem. Recentemente, o Canadá passou a adotar um geóide gravimétrico como o seu sistema vertical. Os motivos desta decisão, bem como os seus prós e contras, são discutidos neste artigo.

O artigo está estruturado da seguinte forma. Primeiramente, é apresentada uma discussão sobre sistemas de altitude e sobre as diversas realizações do geóide. Após isso, elabora-se sobre os modos de acesso à altitude ortométrica, sobre os sistemas verticais que permitem este acesso, e sobre como conectá-los com um sistema vertical global. Segue-se então a discussão sobre a experiência canadense com o novo sistema vertical gravimétrico e as consequências de natureza prática e científica desta adoção.

Antes de continuar, uma pequena pausa para explicar que neste artigo iremos usar a palavra altitudes e não alturas. Ao fazermos isso, cremos que estamos de acordo com a terminologia empregada no Brasil (por exemplo, Gemael [1999]), que define altitude como um caso particular de altura, tendo como referência o geóide (ou algo muito próximo dele). Ressalta-se também que sistema vertical é usado como sinônimo de datum vertical, e que a referência a definição e materialização de um sistema vertical está, na maior parte, implícita no texto. Porém, o

contexto deixa claro quando se trata de definição ou de materialização.

## 2. SISTEMAS DE ALTITUDES

Numa perspectiva prática, nós necessitamos de Sistemas de Altitude para definir a altura de pontos em relação a uma referência vertical. A melhor referência, dentro de um sentido físico, é o geóide, porque ele relaciona a Terra física (campo de gravidade) com medições, e pode ser definido globalmente. As dificuldades afloram ao se tentar materializar o geóide

### 2.1 Geóide e $W_0$

Para termos altitudes precisamos então ter acesso ao geóide. Isto apresenta-se como um problema porque não poderemos acessá-lo diretamente mas apenas representá-lo matematicamente através de modelos. E, dependendo da formulação matemática, da solução numérica, e do conjunto de dados utilizados, os modelos acabam sendo diferentes (“geóides diferentes”, como alguns erroneamente dizem). Um outro problema é que como o geóide está diretamente relacionado ao campo da gravidade da Terra, e este último se relaciona a distribuição de massa, variações na massa ao longo do tempo causam variações no campo da gravidade, e, por conseguinte, provocam variações temporais do geóide.

Quando se apresenta uma definição do geóide, por exemplo, “geóide: superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra que mais se aproxima do nível médio dos mares, no sentido dos mínimos quadrados”, a palavra “potencial” tem um papel muito grande. Ela indica que a água está em “repouso.” Ela sugere também que é possível associar-se ao geóide um valor numérico relativo ao potencial. A dificuldade é como determinar este valor.

Existem vários valores estimados para o potencial do geóide ( $W_0$ ), sendo que o determinado por Burša et al. [1998] tem sido adotado pela União Astronômica Internacional (IAU) e pelo Serviço Internacional de Rotação da Terra (IERS) (ver, por exemplo, IERS [2010]). Este valor foi estimado a partir de 4 anos de dados altimétricos da missão Topex/Poseidon, e sua estabilidade vem sendo monitorada [Burša et al., 2007]. Tal determinação realiza o potencial de um geóide global.

É importante ressaltar que outras estimativas de  $W_0$  existem, resultando em valores numéricos diferentes. Este fato reforça o comentário feito acima sobre a existência de “geóides diferentes” ou seja, de diferentes realizações do geóide. A Tabela 1 apresenta alguns valores do potencial do geóide indicando a origem (ou autor) da determinação, o quanto a diferença em potencial representa em metros, e a superfície usada como referência. Na mesma tabela, CGG10 significa o geóide gravimétrico canadense de 2010.

## 2.2 Altitudes

A revisão apresentada nesta Seção tem como objetivo tornar evidente a conexão entre o potencial do geóide  $W_0$  e a altitude ortométrica. Maiores detalhes devem ser buscados na literatura, por exemplo, Torge and Müller [2012].

Diversos sistemas de altitude podem ser empregados, cada um com características próprias. De início, pode-se usar a diferença entre o valor do potencial de um ponto qualquer A e o valor do potencial do geóide  $W_0$  como a altitude de um ponto. Esta diferença é conhecida

Tabela 1: Alguns valores do potencial do geóide ( $W_0$ ). [1] Solução global; [2] Nivel médio do mar; [3] Nivelamento; [4] Rimouski

Superfície	Potencial ( $m^2/s^2$ )	Separação (m)	Descrição e Superfície de Referência
SIRGAS	62636853.40	+0.26	Sanches et al. 2013; [1]
	62636854.20	+0.18	Dayoub et al. 2012; [1]
Costa Leste do Canadá	62636854.51	+0.15	CGG10/Marégrafo; [2]
EGM08	62636855.69	+0.03	Burša et al. ; [1]
IAU/IERS	62636856.00	0.00	Burša et al. ; [1]
CGVD28	62636856.79	-0.08	CGG10/BM; [3]
EGM06	62636856.88	-0.09	Burša et al.; [1]
Rimouski (marégrafo)	62636859.22	-0.32	CGG10/marégrafo; [4]
NAVD88 (Canadá)	62636864.45	-0.84	CGG10/BM; [2]

É importante ressaltar a importância destas soluções no contexto de um sistema vertical global. Como iremos tratar mais tarde, conexões podem ser estabelecidas com sistemas verticais locais, ou seja, com os sistemas verticais adotados por países ou continentes, desde que possuam um grande número de referência de nível ocupadas com GNSS e com a ajuda de um modelo do geopotencial global [Burša et al., 1999; Burša et al., 2001]

Burša et al. [2007] afirma que para um sistema vertical global, o valor de  $W_0$  pode ser escolhido arbitrariamente. Sanches et al. [2013] defende que  $W_0$  deve ser determinado usando o maior e mais acurado conjunto de observações possíveis.

como número do geopotencial (C), em unidades de potencial ( $m^2/s^2$ ), guardando relação direta entre a variação da gravidade  $g$  e a a diferença de altura obtida por nivelamento  $dL$ :

$$C_A = W_0 - W_A = \int_0^A g dL. \quad (1)$$

Para evitar o emprego de unidades de potencial, o número do geopotencial é dividido por um valor de gravidade de referência (G), resultando na altitude dinâmica (HD), dada em metros:

$$H^D = \frac{C}{G} \quad (2)$$

A altitude dinâmica seria a mais indicada

para se trabalhar com água. Porém, por ela respeitar a falta de paralelismo das superfícies equipotenciais, ele perde um pouco um sentido geométrico. Prefere-se, por este modo, usar-se a altitude ortométrica (HO), por seu caráter mais prático:

$$H^D = \frac{c}{g_m}, \quad (3)$$

onde  $g_m$  representa o valor médio da gravidade ao longo da vertical (curva) entre o ponto de interesse e o geóide. No caso de se desconhecer este valor  $g_m$  sugere-se empregar o valor de uma gravidade teórica média  $g_m$ , contada ao longo da normal entre o ponto de interesse e o elipsóide de referência, resultando na altitude normal (HN):

$$H^N = \frac{c}{\gamma_m}, \quad (4)$$

Uma outra diferença entre a altitude ortométrica e a altitude normal é que a segunda se refere a uma superfície muito próxima do geóide, o quasi-geóide. A Tabela 2 resume as diferenças entre estas duas modalidades de altitudes.

Para terminar, deve-se mencionar que tem sido comum, no passado, calcular-se a altitude ortométrica usando a gravidade normal  $g$  nas regiões onde inexista medições da gravidade real  $g$  (ou seja, mesclando  $g$  e  $g$ ). Esta altitude é, curiosamente, chamada de “normal ortométrica.”

Tabela 2: Altitude ortométrica e altitude normal

Altitude Ortométrica	Altitude Normal	Observação
Referência vertical é o geóide	Referência vertical é o quasi-geóide	$H^o$ tem conexão com a física da Terra
Depende do conhecimento da distribuição de massa	Depende de uma Terra normal (hipotética)	$H^o$ precisa de medições de gravidade $g$
Solução sobre o geóide: suave	Solução sobre a superfície física da Terra: irregular	Solução de $H^N$ necessita de “regularização”
Usado nas Américas	Usado na Europa	Resto do mundo tira “cara-ou-coroa”

Diferentemente, quem usa GNSS obtém a

chamada altura geométrica  $h$ , contada a partir do elipsóide de referência. A altura geométrica não serve para representar altitudes, notadamente para as aplicações que lidem com água. Este fato pode ser exemplificado pela Figura 1, que mostra uma linha de pontos ao longo do Rio São Lourenço, no Canadá, começando em Portneuf até Sept-Îles. A altitude ortométrica está representada pelo perfil rosa (quadrados) enquanto que a altura geométrica está representada pelo perfil em azul (triângulos). Enquanto que a altitude ortométrica se aproxima de zero (afinal, o rio caminha para o mar), a altura geométrica aumenta em valor. Quem usasse a altura geométrica iria pensar que a água estaria fluindo no sentido oposto ao do rio.

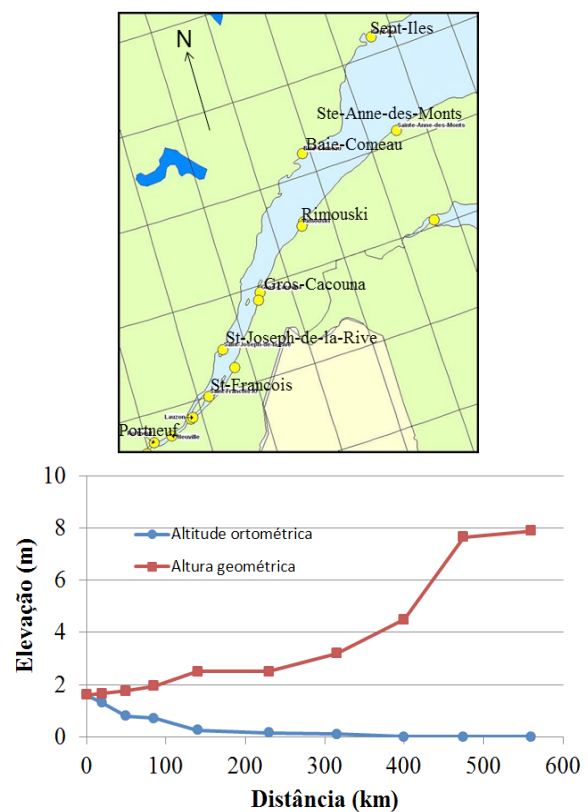


Fig. 1 – Perfil de 550 km de altitude ortométrica (azul) e altura geométrica (vermelho) ao longo do Rio São Lourenço (cortesia: NRCan).

A altura geométrica se relaciona com a altitude ortométrica através da altura geoidal (N), que indica a separação vertical entre o geóide e o elipsóide de referência:

$$h = H^o + N. \quad (5)$$

Para quem deseja a altitude normal, a relação ocorre através da anomalia de altura (z),

que indica a separação vertical entre o quasi-geóide e o elipsóide de referência:

$$h = H^N + z. \quad (6)$$

## 2. ACESSO A ALTITUDE ORTOMÉTRICA

A altitude ortométrica pode ser determinada por dois caminhos distintos, a partir de um datum vertical de marés, e a partir de um datum vertical gravimétrico, conforme representado na Figura 2.

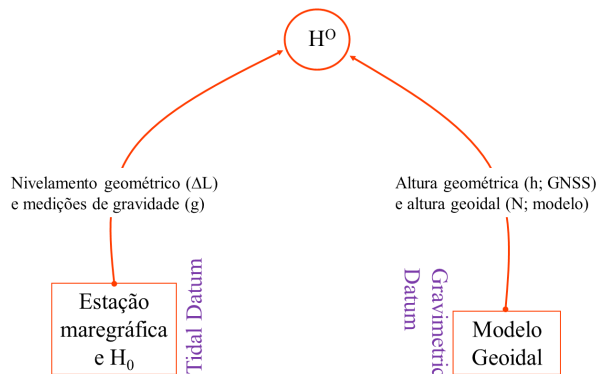


Fig. 2 – Os dois caminhos de acesso à altitude ortométrica: (a) a partir de um datum de marés (tidal datum); (b) a partir de um datum gravimétrico (gravimetric datum).

Em termos diferenciais, a altitude ortométrica pode ser obtida, a partir do datum de marés, como uma função da diferença de altura oriunda do nivelamento geométrico (DL) e da correção ortométrica (OC, determinada em função da gravidade observada ao longo das linhas de nivelamento  $g$  e de um valor de gravidade de referência  $G$ ). O erro desta determinação pode ser propagado em função da incerteza (desvio padrão) do nivelamento geométrico  $sDL$ , da correção ortométrica  $sOC$  e da altitude inicial  $sH$ :

$$\Delta H^o = \Delta L + OC(g_m, G), \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta H^o} = \sqrt{(\sigma_{\Delta L})^2 + (\sigma_{OC})^2 + (\sigma_H)^2}. \quad (8)$$

Alternativamente, e ainda em termos diferenciais, a altitude ortométrica pode ser obtida, a partir do datum gravimétrico, como uma função da diferença de altura geométrica ( $Dh$ ) e da diferença de altura geoidal  $DN$ . O erro desta determinação pode ser propagado em função da incerteza da diferença de altura geométrica  $sDh$ ,

e da incerteza da diferença de altura geoidal  $sDN$ :

$$\Delta H^o = \Delta h - \Delta N, \quad (9)$$

$$\sigma_{\Delta H^o} = \sqrt{(\sigma_{\Delta h})^2 + (\sigma_{\Delta N})^2}. \quad (10)$$

## 3. SISTEMAS VERTICAIS (DATUM VERTICAL)

As principais características dos sistemas verticais são apresentadas abaixo. O sistema vertical oriundo de observação das marés (datum de marés) tem sido o mais utilizado para a realização de sistemas verticais locais, regionais e continentais, ao passo que o sistema vertical baseado em um modelo geoidal (datum gravimétrico) é o mais apropriado para a realização de um sistema vertical global. Após isso, a questão da conexão entre sistemas verticais regionais e um sistema global é introduzida. Apesar de apresentados independentemente, os dois sistemas verticais podem, e devem, co-existir.

### 3.1 Sistemas Verticais

O Sistema de Marés e o Sistema Gravimétrico são tratados abaixo.

#### 3.1.1 Sistema de Marés

Um Sistema de Marés se baseia na determinação de um “nível médio das águas” em estações maregráficas. Posteriormente, conexões para o interior são efetuadas através de nivelamento geométrico e medições da gravidade, permitindo o cálculo de altitudes ortométricas (na verdade, diferença de altitudes ortométricas). Conforme mencionado acima, na ausência de valores de gravidade observados no terreno foi comum usar-se valores teóricos de gravidade (gravidade normal) para completar vazios, sendo as altitudes resultantes chamadas de altitudes “normais ortométricas.” O sistema de marés emprega a técnica de nivelamento geométrico, que é altamente preciso e acurado, principalmente cobrindo linhas de extensão média, na ordem de alguns milímetros por quilômetros. O sistema de marés é empregado para a na realização de sistemas verticais locais, regionais ou continentais.



Problemas associados a um sistema de marés, incluem a lentidão e custo para sua implantação e manutenção; ele é pontual (ou seja, realizado ao longo de estradas pelas RRNN) não provendo uma cobertura em todo o território de interesse; passível de acumulação de erros sobre distâncias longas; necessita a repetição de ajustamentos para incorporar novas linhas; e, é acessível através das RRNN, o que leva alguns a considerá-lo “incompatível com GNSS” (um termo que eu julgo exagerado, e geralmente utilizado quando se promove um modelo geoidal).

### 3.1.2 Sistema Gravimétrico

Um Sistema Gravimétrico se baseia em um modelo geoidal. Este se constrói a partir da determinação de uma superfície equipotencial, e utiliza dados oriundos de gravimetria (esparsa), altimetria por satélite, e dados satelitais (perturbação, aceleração, gradiometria). É mais rápido e mais barato, se descontarmos o tempo e custo para a coleta de dados gravimétricos e o custo dos satélites. Um modelo geoidal pode prover uma cobertura global, porém ainda discreta, já que a representação é em grade (ou seja, um modelo geoidal possui restrições em termos de resolução espacial). É considerado como sendo totalmente compatível com GNSS, no sentido que pode-se obter altitude ortométrica a partir da altura geométrica oriunda de GNSS em qualquer ponto do território. Um sistema gravimétrico serve para a realização de sistemas verticais locais, regionais, continentais ou global. A importância deste último será enfatizada na próxima Seção.

Problemas associados a um sistema gravimétrico incluem a limitação teórica para 1 cm de acurácia para a determinação do geóide. Porém, na prática, a acurácia é difícil de avaliar, lançando-se mão, para tais avaliações, de alturas geoidais oriundas de determinações GNSS sobre RRNN ou da comparação com outros modelos geoidais, geralmente, modelos geoidais derivados de modelos do geopotencial, cujas diferenças chegam a ser maiores do que a precisão interna destes modelos. Um outro problema é que tal sistema depende da escolha de um campo de gravidade normal (por exemplo, o GRS80, e um elipsóide de referência associado) e uma convenção adicional para o valor de  $W_0$ .

## 3.2 Conexões

Conforme dito acima, um sistema vertical global apenas pode ser realizado através de um modelo geoidal (sistema gravimétrico). A questão torna-se como efetuar a conexão deste sistema vertical global com os diversos outros sistemas verticais locais, regionais ou continentais (em sua esmagadora maioria, sistemas de marés). Este é um dos assuntos mais apaixonantes do meio científico geodésico da atualidade. Em um aspecto simples, tal conexão pode ser feita conforme mostra a Figura 3, e a explicação que se segue.

A Figura 3 mostra os elementos básicos necessários para a conexão entre um sistema vertical global (materializado por um modelo do geóide global) e dois sistemas verticais locais, cujas origens foram determinadas a partir de observações do nível de mar nos marégrafos localizados em OA e em OB.

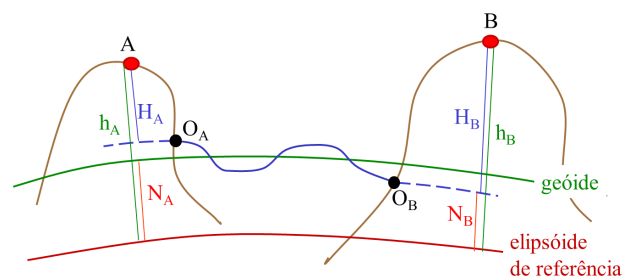


Fig. 3 – Conexão entre um sistema vertical global e dois sistemas verticais locais.

A conexão se dá a partir das relações entre o geóide global, o elipsóide de referência e os geóides locais A e B. Começando-se com A:

$$h_A - N_A = H_A + \Delta N_A, \quad (11)$$

onde  $\Delta N_A$  representa a separação entre o datum local A e o datum global. De modo semelhante, para B:

$$h_B - N_B = H_B + \Delta N_B, \quad (12)$$

onde  $\Delta N_B$  representa a separação entre o datum local B e o datum global. A diferença entre as equações (12) e (11) resulta em:

$$h_A - h_B - (N_A + N_B) = H_A - H_B + (\Delta N_A - \Delta N_B) \quad (13)$$

onde  $N_A N_A$  e  $N_B N_B$  são alturas geoidais calculadas por algum modelo do geopotencial, tal como o EGM08 ou algum modelo gerado pelo GOCE. De qualquer modo, estes valores de  $NN$  não representam o geopotencial de forma completa, sendo esta definição chamada de “erro de omissão.” Em uma modelagem mais completa que a representada pela equação (13), o erro de omissão deve ser levado em consideração.

A diferença entre o nível médio dos mares e a superfície equipotencial melhor ajustada é chamada de topografia oceânica dinâmica média (Mean Dynamic Ocean Topography MDT). Esta diferença varia entre 1 a 2 metros, e existem modelos oceanográficos e geodésicos que a representam [Knudsen et al., 2011]. Na Figura 3, ela pode ser ilustrada, em parte, pela diferença entre os pontos OA e em OB e o geóide sobre eles.

A Figura 4 mostra um exemplo de interconexão entre sistemas verticais nacionais usados pelos países europeus e um sistema vertical continental, o EVRF2007 (European Vertical Reference Frame of 2007), exemplificando uma situação de um datum vertical global. Os números sobrepostos sobre cada país representam a diferença, em milímetros, que separa cada um deles.

Um último comentário para fechar esta Seção é que o ideal é que todas as informações existentes sejam utilizadas para a realização de um sistema vertical global. O estabelecimento de conexões, de certo modo, permite que isso ocorra.

#### 4. CGVD2013

Iremos agora tratar do novo sistema vertical canadense, o Canadian Gravimetric Vertical Datum of 2013 (CGVD2013).

O CGVD2013 é um modelo geoidal baseado no Método de Stokes-Helmert (um bom resumo pode ser encontrado em Ellmann and Vaníček [2007]), usando o elipsóide de referência (GRS80) e uma superfície equipotencial terrestre ( $W_0$ ) de valor igual a 62.636.856,0 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>. Ele substitui o sistema de marés Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928 (CGVD28), adotado em 1935, e usado até os dias de hoje. Existem três mudanças importantes com a adoção do

CGVD2013: (a) uma nova definição, uma superfície equipotencial substituindo o nível médio dos mares; (b) uma nova realização, a integração de dados gravimétricos ao invés de ajustamento de nivelamentos; (c) um novo modo de acesso, através de um modelo geoidal ao invés de referências de nível, ou seja, torna-se desnecessário ocupar RRNN. O CGVD2013 pode ser acessado de qualquer lugar usando-se GNSS, e um programa de transformação dedicado.

Os motivos que levaram a adoção de um sistema vertical gravimétrico ao oposto de um sistema de marés são de natureza técnica e econômica. Existe o constante movimento da

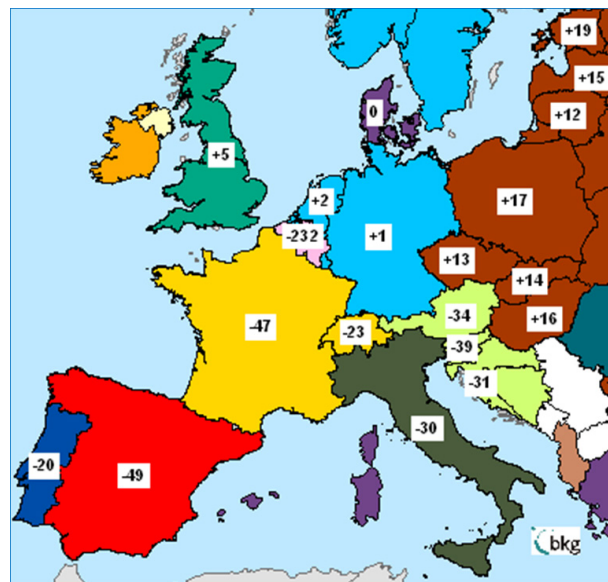


Fig. 4 - Diferenças entre “datums verticais nacionais” com EVRF2007 (Cortesia: BKG).

crosta sobre o Canadá devido ao soerguimento pós-glacial, e a rede de nivelamento geométricos não tem extensão espacial nem temporal suficientes para retratá-lo em toda a sua plenitude. Existe também a dificuldade de se modelar corretamente os erros sistemáticos oriundos do nivelamento geométrico considerando-se a grande extensão territorial do Canadá. Repetindo, as linhas de nivelamento não cobrem todo o território canadense. E existe o problema econômico de que a necessária atualização das linhas de nivelamento geométrico, e manutenção dos monumentos, não pode ser feita dentro de uma realidade de restrições orçamentárias por parte do governo federal. Este

fato é evidenciado pela Figura 5. Ela mostra a quantidade de nivelamento geométrico em termos de “quilômetro de nivelamento,” desde o início do século passado. Pode-se perceber que a intensidade varia tremendamente, e que, desde 2007, nenhum nivelamento geométrico tem sido efetuado.

Com a adoção do CGVD2013 toda a extensão territorial do Canadá passa a ter um valor numérico para altitude ortométrica, acessível através de determinação com GNSS e emprego de um programa dedicado (GPS-H).

permite, por exemplo, levar em consideração as variações temporais do geóide. A Figura 6 mostra a variação vertical do terreno (como observada com o GPS) e a variação do geóide (como observada pela missão GRACE). Chama-se a atenção da escala, sendo que a variação do geóide é, em geral, 10% daquela da superfície.

Dois comentários merecem ser feitos neste momento.

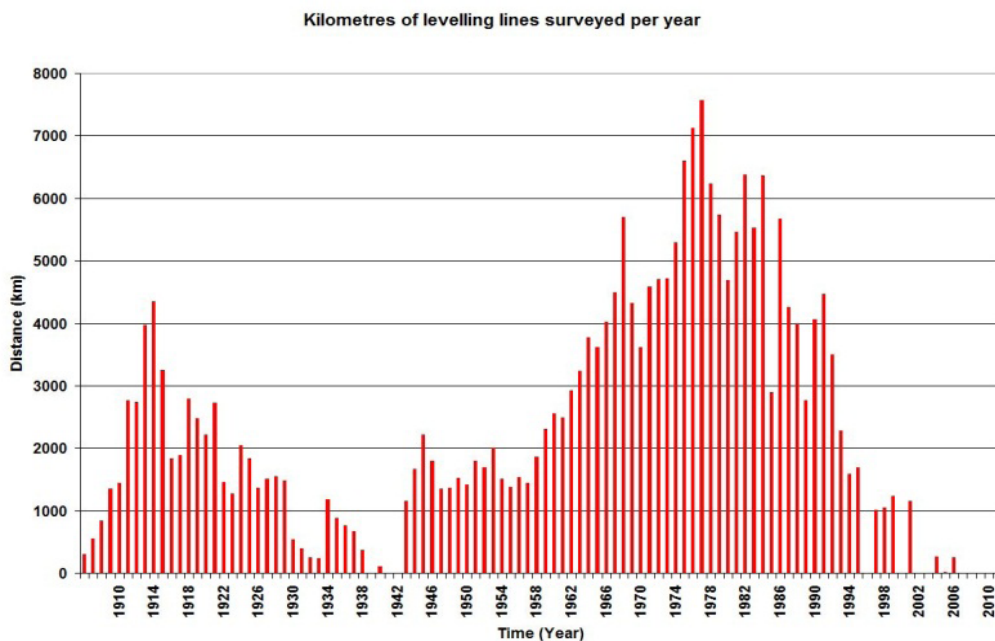


Fig. 5 – Quilômetros de linhas de nivelamento efetuadas por ano (Cortesia: NRCan).

O primeiro é relacionado a se afirmar que um modelo de marés, como o CGVD28, é a operação de nivelamento geométrico não será mais utilizada para a manutenção do datum vertical, muito embora o nivelamento geométrico seja recomendado para trabalhos localizados e de distâncias curtas. As RRNN não serão mais mantidas, e, muito embora os valores de altitude das RRNN tenham sido reajustados visando compatibilidade com CGVD2013, os valores das altitudes no CGVD28 não serão mais garantidas pelo governo federal. A Infra-estrutura para posicionamento são as estações GNSS permanentes do Canadian Active Control Stations (CACS) e os pilares da rede do Canadian Base Network (CBN). Passa-se a enfatizar as alternativas modernas para posicionamento: precise point positioning (PPP), GNSS diferencial, e as Redes RTK públicas e privadas.

Uma vantagem do CGVD2013 sobre o CGVD28 é a capacidade de atualização, o que incompatível com o GNSS. Eu não considero esta afirmação correta. Apesar do acesso a um modelo de marés se efetuar primariamente através das RRNN, ele também pode ser acessado através de um modelo geoidal, e esta tem sido uma prática comum. As eventuais vantagens do CGVD2013 sobre o CGVD28 são de outra natureza, conforme discutido acima.

O segundo comentário está relacionado ao apodrecimento da rede de nivelamento geométrico. Muito embora um datum gravimétrico ter sido um desejo da comunidade científica canadense, nunca se imaginou que ele aconteceria com este ônus. A perda da rede de nivelamento impacta de modo negativo estudos de movimentos crustais bem como perde-se uma ferramenta importante na aferição de modelos geoidais.



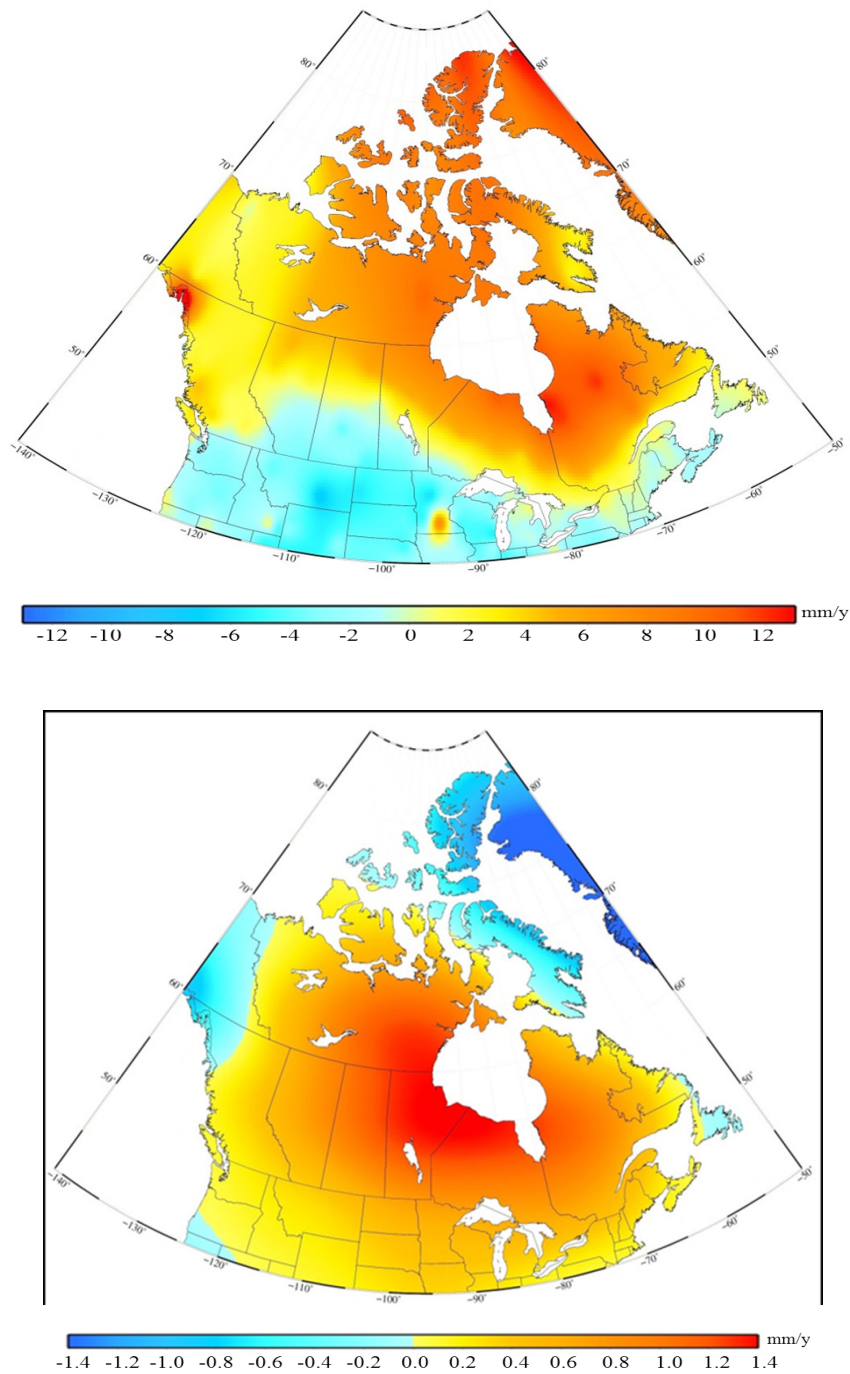


Fig. 6 – Velocidade vertical da superfície (acima; Escala: de -14 mm/a a 14 mm/a) e velocidade vertical do geóide (abaixo; Escala: de -1.4 mm/a a 1.4 mm/a).

## 5. IMPACTOS COM A ADOÇÃO DE UM GEÓIDE COMO SISTEMA DE REFERÊNCIA

Nós fizemos um estudo para compreender o impacto advindo com a adoção do CGVD2013 na província de New Brunswick. Neste estudo, diversos setores foram entrevistados, na tentativa de se compreender os impactos quantitativos e qualitativos, os esforços de preparação e mitigação da mudança, bem como nas experiências do passado relacionadas a mudança

do datum horizontal.

A Figura 7 ilustra a diferença em altitudes ortométricas entre o CGVD28 e o CGVD2013 em New Brunswick. A diferença é sempre positiva, variando entre 20 e 65 centímetros. São diferenças pequenas, porém grandes demais para serem ignoradas em aplicações de engenharia e cadastro. New Brunswick sofre com ressacas e inundações anuais (associadas principalmente ao degelo da primavera) e a altimetria é muito importante. Um outro fator importante, mostrado na Figura 8, é que a diferença entre altitudes

ortométricas ao longo da costa varia de um lugar para outro, ou seja, a altitude ortométrica de valor zero no CGVD28 assume um valor variável no CGVD2013. É claro que o nível médio dos mares está sendo melhor representado pelo CGVD2013, mas esta variação confunde muita gente.

A Tabela 3 mostra a diferença em altitudes ortométricas entre o CGVD28 e o CGVD2013

nos maiores agrupamentos urbanos de New Brunswick. Estas pequenas diferenças podem levar a os departamentos de engenharia e cadastro destas municipalidades tomarem atitudes tais como simplesmente ignorarem a mudança, ou adotarem um valor constante como correção, ao invés de adotarem o CGVD2013 totalmente.

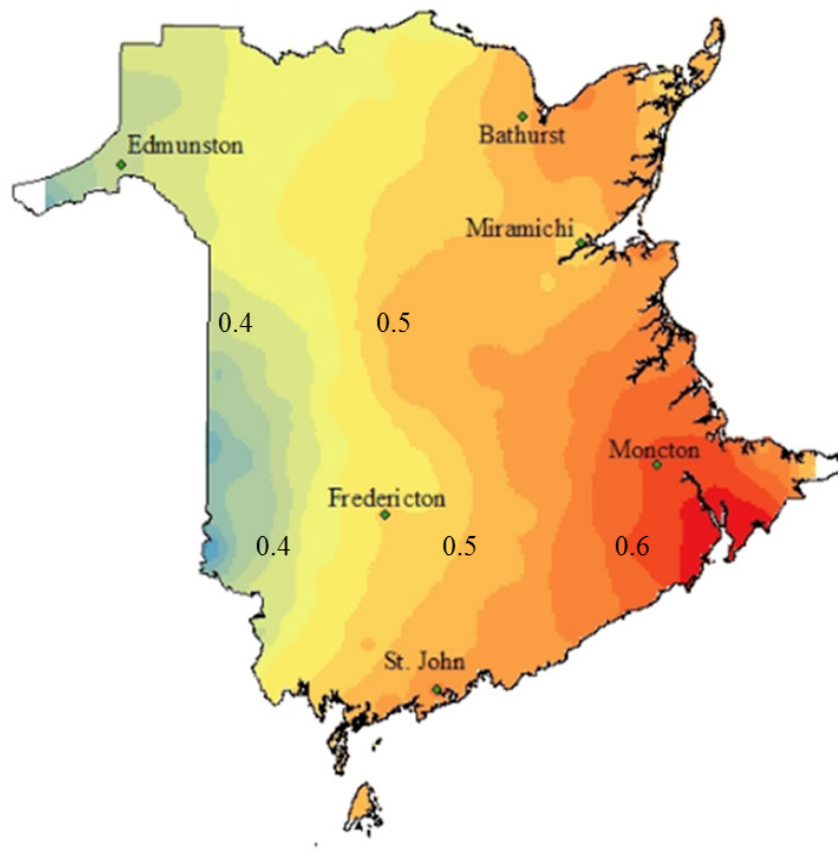


Fig. 7 – Diferença em altitudes ortométricas entre o CGVD28 e o CGVD2013 em New Brunswick.

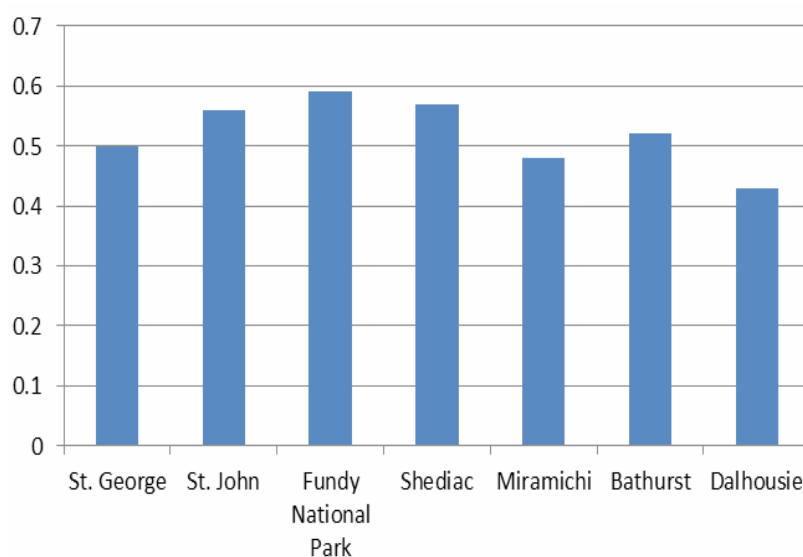


Fig. 8 - Diferença em altitudes ortométricas entre o CGVD28 e o CGVD2013 ao longo da costa de New Brunswick.

Tabela 3: Diferença em altitudes ortométricas entre o CGVD28 e o CGVD2013 nos maiores agrupamentos urbanos de New Brunswick

Cidade	$\Delta H$ (m)
Fredericton	48
Saint John	58
Moncton	61
Miramichi	49
Bathurst	52
Edmundston	40

O fato é toda a mudança de referencial, seja horizontal ou vertical, vem associada a riscos e custos. Riscos de se usar o referencial errado ou de usar os dois referencias sem distinção, e custos associados a transformação dos bancos de dados entre eles.

Em termos práticos, a nível de impactos quantitativos, algumas atitudes podem ser tomadas:

- Se as altitudes no CGVD28 têm apenas alguns metros de acurácia e/ou estão arredondadas para o metro, então a diferença entre CGVD28 e CGVD2013 pode ser negligenciada.
- Se as altitudes no CGVD28 são precisas (< 10 cm) e/ou sobre um corredor longo (por exemplo, um levantamento usando LiDAR), então a diferença entre CGVD28 e CGVD2013 deve ser considerada.
- Se as altitudes no CGVD28 são precisas (< 2 cm) porém cobrem uma região pequena (por exemplo, banco de dados de um município), então a diferença entre CGVD28 e CGVD2013 deve ser considerada, mas, geralmente, um mesmo valor de correção pode ser aplicado para todos os dados.

Além disso, mais do que nunca é fundamental que as altitudes, sejam elas quais forem (ortométrica, geométrica ou geoidal) sejam acompanhados por indicadores tais como a precisão associada, a época, o sistema vertical associado, e o modelo geoidal.

Em termos de impactos qualitativos, deve-se verificar o que fazer com respeito a

- Conjunto de dados expresso no CGVD28. As escolhas são de

transformá-los de uma só vez, transformá-los quando necessário (por demanda) ou simplesmente não transformá-los (usar dados antigos).

- Evitar confusão por parte dos usuários. É fundamental que os dados sejam apropriadamente identificados, evitando-se assim confusão no seu uso. Existe grande preocupação com o aumento de usuários e de “tecnologia amigável.” Isso leva ao risco da manipulação de dados por pessoal sem o conhecimento apropriado, ou seja, treinamento é importante. Outro fator que pode criar problemas seria decorrente a negligenciar as diferenças entre os dois sistemas verticais.
- Custo para os usuários, relativo a treinamento e a conversão dos dados antigos, notadamente para grandes conjuntos de dados (sensoriamento remoto). Existe um custo relacionado aos provedores (governo federal) ligados a estabelecer e manter o geóide, prover ferramentas e comunicação, bem como efetuar nivelamento de primeira ordem quando necessário (se isso vier a ocorrer).
- Impactos Legais. No Canadá, a legislação relacionada aos dados geospaciais é prerrogativa das províncias, de modo que dois documentos legais devem ser alterados, o New Brunswick Air Space Act (que está relacionado aos direitos do espaço, por exemplo, em prédios e condomínios) e o New Brunswick Mining Act (relacionado a atividade de mineração). Existem também aspectos legais relativos ao gerenciamento de água (por exemplo, inundação, confusão entre os datums; e a possibilidade de se criar um passivo legal), acessos (por exemplo, aproximação de navios grandes, confusão entre os datums; e a possibilidade de se criar um passivo legal), mapeamento topográfico (nova realização de zonas de inundação e servidões das vias aéreas, com a conseqüente diminuição do valor das edificações localizadas em novas zonas

de inundação, e aumento do valor do seguro destas propriedades).

Tendo em vista estes impactos quantitativos e qualitativos, uma série de medidas preparatórias e mitigatórias podem ser tomadas. Elas incluem:

- Legado dos dados. Uma ferramenta para conversão existe e está disponível (programa GPS-H), e é possível minimizar o impacto se os dados só forem convertidos quando necessário.
- Confusão por parte dos usuários. Isso exige comunicação entre os governos nas esferas federal e provincial com os usuários e entre eles. Cheques internos e controle de qualidade devem ser implementados. Um grande problema em relação a adoção de datum é a existência de uma grande quantidade de usuários, em grande parte ignorantes em geodésia e cartografia.
- Economia para os usuários, devido ao acesso ao CGVD2013 através do GNSS.
- Economia para os Provedores (e contribuintes). O custo estimado para a manutenção do CGVD28 é de 1.4 milhões de dólares por ano, valor este que não será gasto (com a eventual redução das RRNN). Referencial pode ser estabelecido com GNSS.
- Impactos Legais. Na lei, tanto comum e da sociedade civil, a regra fundamental é que o objetivo das partes, celebrado no momento do contrato, deve prevalecer, e devem ser considerados à luz da finalidade do contrato ou legislação.

## 6. PALAVRAS FINAIS

Este artigo tratou da adoção de um novo sistema vertical de referência no Canadá, o CGVD2013, e implicações da sua adoção. O sistema vertical canadense CGVD28 estava se tornando ultrapassado. Existiam grandes erros sistemáticos e distorções acumulando-se desde a data da sua realização, em 1935. O acesso ao CGVD28 se dava através das RRNN (ou interpolações). A rede de nivelamento não cobria toda a extensão do Canadá, existindo grandes vazios no norte do país. A manutenção da rede de nivelamento de primeira order era cara, e, na prática, ela deixou de ser mantida em 2007.

Decidiu-se então adotar o novo sistema baseado em um modelo geoidal.

A adoção do CGVD2013 causa impactos, científicos e de engenharia, bem como nos usuários. A nível nacional, os novos valores para as altitudes ortométricas apresentam diferenças com respeito ao CGVD28 variando entre -65 cm e + 55 cm. As novas altitudes geométricas são, contudo, mais compatíveis para aplicações que lidem com água (saneamento, inundações, irrigação, etc.) e a representação vertical é mais próxima da realidade física.

Um estudo feito para a Província de New Brunswick, mostra a necessidade de metadatos para a altitude, de modo a que os sistemas verticais utilizados sejam distinguidos, bem como que se crie o costume de indicar informações referentes a precisão da altitude, e sua época. Este estudo mostrou também a importância de preparação e mitigação dos impactos, notadamente a nível dos usuários, comparado com experiências passadas, e da necessidade de comunicação com usuários e provedores, bem como de educação, de modo a que a informação altimétrica seja utilizada corretamente.

Um problema que existe é a perda da realidade “no terreno.” Com o abandono da rede de nivelamento de primeira ordem, uma informação unicamente oferecida pelo nivelamento repetitivo das redes de nivelamento (geodésico) serão perdidas, por exemplo, relacionadas a movimentos da crosta, bem como a perda da possibilidade de aferição de modelos do geopotencial (através do emprego de GNSS sobre RRNN).

Este artigo também discutiu, de forma resumida, sobre sistemas verticais, o sistema de marés e o sistema gravimétrico, e sobre as formas de acesso a altitudes ortométricas. A questão da inter-conexão entre um sistema vertical local, regional ou continental, e um sistema vertical global também foi apresentada.

Seria interessante terminar este artigo com uma opinião pessoal. Do ponto-de-vista científico, deve-se sempre buscar o melhor. Do ponto-de-vista do usuário, deve-se buscar o suficiente para as aplicações usuais. Isso quer dizer que a manutenção constante de um sistema vertical de referência de um país deve ser um esforço ininterrupto realizado ao nível dos “serviços geodésicos”, sem que isso implique em



uma mudança frequente dos valores numéricos oficiais das altitudes para os usuários. Esta manutenção deve também incluir a conexão com um sistema vertical global.

Espero que a discussão presente neste artigo, dos erros e acertos, contribua no esforço constante de refinamento do sistema vertical do Brasil.

#### **AGRADECIMENTOS**

À Comissão Organizadora do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, realizado em Gramado, 2014, pelo convite para participar do evento. À agência de fomento canadense NSERC (National Science and Engineering Research Council) por financiamento, em parte, deste trabalho. Agradecimentos também aos stakeholders da província de New Brunswick que participaram deste estudo.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BURŠA, M.; KOUBA, J.; RADEJ, K.; TRUE, S. S.; VATR, V.; VOJTŠKOVA, M. Mean Earth's equipotential surface from TOPEX/POSEIDON altimetry. **Studia Geophysica et Geodaetica**, Vol. 42, 1998. pp. 459-466.
- BURŠA, M.; KOUBA, J.; KUMAR, M.; MÜLLER, A.; RADEJ, K.; TRUE, S. S.; VATR V.; VOJTŠKOVA, M. Geoidal geopotential and world height system. **Studia Geophysica et Geodaetica**, Vol. 43, 1999. pp. 327-337.
- BURŠA, M.; KOUBA, J.; MÜLLER, A.; RADEJ, K.; TRUE, S. S.; VATR, V.; VOJTŠKOVA, M. Determination of geopotential differences between local vertical datums and realization of a world height system. **Studia Geophysica et Geodaetica**, Vol. 45, 2001. pp. 127-132.
- BURŠA M.; ŠÍMA, Z.; KENYON, S.; KOUBA, J.; VATR V.; VOJTŠKOVÁ, M. Twelve years of developments: geoidal geopotential  $W_0$  for the establishment of a world height system - present and future. **Proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service**, Istanbul, 2007. p. 121-123.
- DAYOUB N.; EDWARDS S. J.; MOORE, P. The Gauss-Listing potential value  $W_0$  and its rate from altimetric mean sea level and GRACE. **Journal of Geodesy**, Vol. 86, 2012. pp. 681 - 694. DOI: 10.1007/s00190-012-1547-6.
- ELLMANN, A., & VANÍČEK, P. UNB application of Stokes-Helmert's approach to geoid computation. **Journal of Geodynamics**, Vol. 43, No. 2, 2007. pp. 200-213.
- GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba Editora Universidade Federal do Paraná, 1999, 302 páginas.
- IERS (2010). IERS Conventions (2010). **IERS Technical Note 36**, PETIT & LUZUM (Ed.), Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- KNUDSEN, P.; BINGHAM, R.; ANDERSEN, O.; RIO, M.-H. A global mean dynamic ocean topography and ocean circulation estimation using a preliminary GOCE model. **Journal of Geodesy**, Vol. 85, No. 11, 2011. pp. 861-879.
- SÁNCHEZ, L. Towards a vertical datum standardisation under the umbrella of Global Geodetic Observing System. **Journal of Geodetic Science**, 2(4): 325 - 342, 2013. DOI:10.2478/v10156-012-0002-x.
- TORGE, W., & MÜLLER, J. **Geodesy**. Berlin, De Gruyter, 2012, 416 páginas.