

## Avaliação de técnicas de nivelamento e métodos de posicionamento GNSS para determinação de desnível de primeira ordem

### RESUMO

Este artigo descreve estudos realizados com o intuito de verificar e avaliar a precisão obtida através do emprego de diferentes técnicas de nivelamento e métodos de posicionamento GNSS com diferentes métodos de processamento. As técnicas de nivelamento utilizadas foram: nivelamento geométrico de precisão – método de visadas iguais com nível eletrônico; nivelamento trigonométrico de precisão – técnica Leap-Frog – com estações totais de média e alta precisão; e adaptação de metodologia recomendada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE para travessia de rios com nivelamento de precisão, utilizando nível óptico. As diferentes técnicas de posicionamento e processamento GNSS utilizados foram: método relativo estático com efemérides transmitidas; método relativo estático com efemérides precisas; e Processamento por Ponto Preciso [PPP], do IBGE. Após a realização dos experimentos, como resultado observou-se que todas as técnicas de nivelamento apresentaram precisão dentro dos limites indicados pelo IBGE na Resolução para nivelamento pelo IBGE para nivelamento de 1ª ordem (3mm/vk). Com relação ao uso dos métodos de posicionamento GNSS, os resultados obtidos foram insatisfatórios para a precisão exigida. Em especial, a adaptação da técnica de travessia de rios com nivelamento de precisão mostrou-se como uma possível aplicação para determinação de desnível que, apesar de antiga e pouco difundida, forneceu a precisão adequada à operação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nivelamento Geométrico; Nivelamento Trigonométrico; Travessia de Rio; Leap-Frog; Levantamento Altimétrico de Alta Precisão; Posicionamento GNSS.

#### Eurico Nicacio

[euriconicaciojr@gmail.com](mailto:euriconicaciojr@gmail.com)  
[orcid.org/0000-0001-6949-8757](https://orcid.org/0000-0001-6949-8757)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR),  
Curitiba, Paraná, Brasil.

#### Andrea Galudht Santacruz Jaramillo

[andreasantacruzj@gmail.com](mailto:andreasantacruzj@gmail.com)  
[orcid.org/0000-0002-6648-9879](https://orcid.org/0000-0002-6648-9879)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR),  
Curitiba, Paraná, Brasil.

#### Gabriel Zehnpfennig Zanetti

[zzanetti20@gmail.com](mailto:zzanetti20@gmail.com)  
[orcid.org/0000-0003-3324-3319](https://orcid.org/0000-0003-3324-3319)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR),  
Curitiba, Paraná, Brasil.

#### Pedro Luis Faggion

[pedro.faggion@gmail.com](mailto:pedro.faggion@gmail.com)  
[orcid.org/0000-0002-4881-8720](https://orcid.org/0000-0002-4881-8720)  
Universidade Federal do Paraná (UFPR),  
Curitiba, Paraná, Brasil.

## INTRODUÇÃO

A determinação de desníveis entre dois pontos quaisquer sobre a superfície terrestre representa uma das operações fundamentais sob responsabilidade e que demandam atuação da Geodésia, quando consideradas interferências causadas pela forma e dimensões da Terra. Técnicas variadas foram abordadas com este propósito por renomados autores da área, como pode ser constatado em Kahmen e Faig (1988), Chrzanowski e Secord (1999), dentre outros. Todavia, com o surgimento de novas tecnologias, houve um aumento na diversidade de maneiras de obter o desnível entre dois pontos, acompanhada de um aumento na quantidade e variedade de equipamentos, cada um com sua precisão, com os quais cada técnica pode ser desenvolvida.

Tradicionalmente, a determinação de desníveis pode ser realizada por meio de técnicas de nivelamento, as quais dividem-se em dois grupos principais: os métodos diretos e os métodos indiretos. Tais métodos diferenciam-se pelo fato dos primeiros fornecerem de maneira direta, ou seja, como observações realizadas pelos equipamentos, o valor do desnível entre dois pontos dados, ao passo que os últimos fornecem tal desnível após a realização de uma série de operações matemáticas utilizando as observações realizadas pelos equipamentos.

IBGE (2017a) recomenda a aplicação de técnicas de Levantamento Altimétrico de Alta Precisão para determinação de desníveis nestes termos; este tipo de levantamento é frequentemente referido como de 1ª ordem. Adicionalmente trata-se do método tradicional que deve ser quando o objetivo seja garantir a vinculação destes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), conforme referência já citada e IBGE (1983). Segundo Silva (2012), é possível dividir o nivelamento geométrico em quatro métodos: visadas iguais, visadas extremas, visadas recíprocas e visadas equidistantes. O primeiro deles, o método de visadas iguais, foi escolhido e aplicado neste trabalho, por possibilitar a minimização do erro de colimação vertical no equipamento empregado para medições e por minimizar o erro devido à curvatura terrestre – o nível.

Ainda referente aos métodos diretos, pode-se destacar um outro método específico abordado e aplicado por IBGE (1981), denominado método para travessia de cursos de água ou de rios. Segundo a mesma referência, tal método surgiu da necessidade de transpor, com linhas de nivelamento de 1ª ordem, rios e outros espaços onde comprimentos normais de visadas são insuficientes. Foi aplicado pela primeira vez nas vizinhanças de Nova Orleans, nos Estados Unidos, quando foi preciso atravessar o Rio Mississippi, em um trecho com 1,2 quilômetros de largura e sem ponte. Tal método foi adaptado e simulado no presente trabalho, inclusive com a confecção de acessórios inerentes à metodologia referenciada, para fins de verificação de sua eficácia e aplicabilidade.

No que diz respeito aos métodos indiretos para determinação de desnível, o mais amplamente difundido é o nivelamento trigonométrico. Conforme descrito por Silva (2012), trata-se de uma técnica baseada na resolução de um triângulo retângulo, sendo necessário coletar, em campo, informações relativas à distância (horizontal e inclinada), ângulos verticais (zenitais ou nadirais) e altura do instrumento e do refletor. Adicionalmente, Kahmen e Faig (1988) apresentam uma técnica denominada *Leap-Frog*, que pode ser traduzido livremente como “salto de rã” ou “passo à frente”. Segundo Silva (2012), a técnica consiste em

instalar o equipamento – a estação total – entre os dois pontos dos quais se deseja obter o desnível, instalando-se sobre os referidos pontos dois bastões de mesma altura com prismas refletores, para realização de visadas e obtenção das distâncias inclinadas e dos ângulos zenitais de ré e de vante. Tal método foi utilizado neste trabalho pois, consonante Kahmen e Faig (1988), esse procedimento faz com que a medida da altura do instrumento não seja necessária aos cálculos, descartando esta possível fonte de erros.

Além das técnicas de nivelamento, é possível determinar o desnível entre dois pontos, tomada certa referência de precisão, utilizando-se posicionamento GNSS. Conforme descrito por Monico (2008), o GNSS é um sistema de rádio-navegação com ampla aplicação (como em geodinâmica, navegação, levantamentos geodésicos, estabelecimento de redes geodésicas, determinação altimétrica, entre outros) que fornece altitudes e diferenças de nível de natureza geométrica ( $h$ ), ligadas à modelagem matemática da Terra segundo o elipsoide de referência, diferentemente das altitudes niveladas ( $H$ ), ligadas ao campo da gravidade da Terra e sua modelagem física segundo superfícies equipotenciais. Para solucionar tal diferença, basta aplicar a Equação 1, que demanda o conhecimento da altura geoidal ( $N$ ), proveniente de um modelo geoidal, como o MAPGEO2015. (IBGE, 2015). Trabalhos anteriores, como Arana (2000) e Castro (2002) já mostraram que em pequenas porções da superfície terrestre, o valor de  $N$  tende a sofrer poucas variações ou mesmo a ser considerado constante; neste caso o nivelamento pode ser feito da forma citada.

$$H \cong h - N \quad (1)$$

Em posse dos conceitos introdutórios descritos acima e de demais aprofundamentos que se fizeram necessário ao longo do trabalho, os autores aplicaram as referidas técnicas de nivelamento e diferentes métodos de posicionamento GNSS, objetivando avaliar a possível obtenção de desníveis de 1ª ordem em uma área de estudo, almejando alcançar precisão de 1ª ordem (IBGE, 1983).

Para fins práticos, não foram detalhadas no texto observações como as correções normais-ortométricas aplicadas às altitudes niveladas para correção do não-parallelismo das superfícies equipotenciais do campo da gravidade, ou mesmo a possibilidade da altura geoidal não ser potencialmente a melhor relação entre as altitudes elipsoidais de as altitudes normais-ortométricas. Todavia, estas foram estudadas e não afetaram os resultados finais ora expostos.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

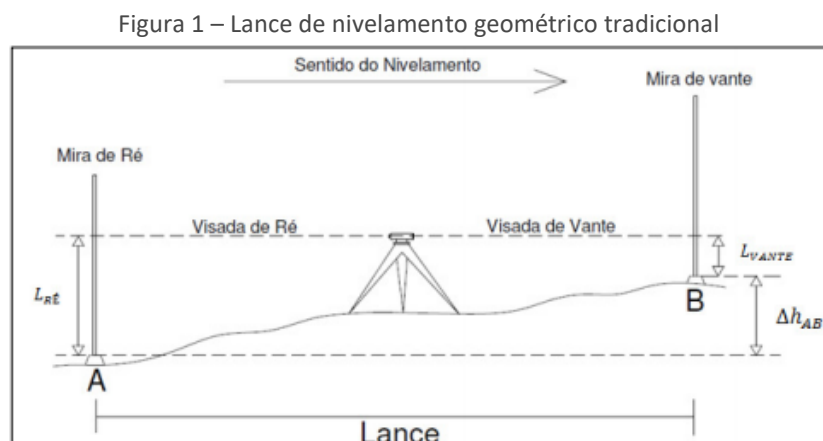
### TÉCNICAS DE NIVELAMENTO

As seções deste item correspondem às indicações teóricas gerais sobre procedimentos utilizados nos levantamentos ao longo deste trabalho. Maiores detalhamentos sobre cada uma destas são transmitidos em momento cabível ao longo do item de Materiais e Métodos.

### Nivelamento geométrico tradicional com método de visadas iguais

Conforme descrito na introdução deste artigo, trata-se do método tradicional utilizado para determinação de desníveis de precisão (IBGE, 1983).

Aplicando-se a técnica de visadas iguais ao realizá-lo, minimiza-se o erro de colimação vertical do equipamento e o erro devido à curvatura terrestre (KAHMEN e FAIG, 1988). Tal técnica consiste em instalar o equipamento, em cada lance, com uma distância equivalente entre os pontos de ré e vante, inferior a 20 metros – com tolerância de aproximadamente 2 metros (IBGE, 1983). O desnível entre dois pontos A e B é dada como na Figura 1 e na Equação 2.



Fonte: Silva (2012).

$$\Delta h_{AB} = L_{RÉ} - L_{VANTE} \quad (2)$$

onde:  $\Delta h_{AB}$  é o desnível de A para B,  $L_{RÉ}$  é a leitura realizada com a mira na posição A (leitura de ré) e  $L_{VANTE}$  é a leitura realizada com a mira na posição B (leitura de vante). A soma dos desníveis de diversos lances, caracterizando uma seção, fornece o desnível entre ambos os pontos.

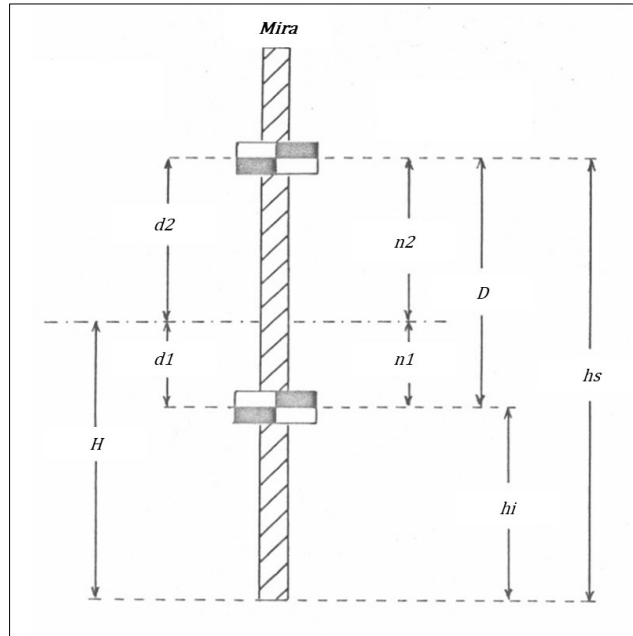
### Nivelamento geométrico com técnica de travessia de rio

Baseado no método de nivelamento trigonométrico modificado sem os valores absolutos dos ângulos verticais, o método com técnica de travessia de rio foi empregado em diversos levantamentos onde se tinha que atravessar vários trechos com cursos de água.

Neste método, são utilizados dois visores fixos em cada uma das miras colocadas nas duas margens do rio, um abaixo e outro acima da linha de visada a nível. A leitura instrumental obtém-se agindo com o parafuso basculante do nível e anotando as graduações existentes nesse parafuso, de 0 a 50 (IBGE, 1981). As leituras são lidas com estimativa das partes decimais com o visor superior, com a visada a nível ou com o visor inferior. Com as graduações da mira correspondentes aos dois visores, pode-se calcular por simples regra de três, a graduação que corresponde à visada a nível. Assim, obtém-se a visada de vante na mira da margem oposta. A visada de ré na mira da mesma margem é obtida da forma convencional.

Na Figura 2, observa-se a mira com os visores acoplados para o cálculo da visada a nível.

Figura 2 – Mira com visores acoplados



Fonte: Adaptado do IBGE (1983).

As quantidades conhecidas nesse caso são:

- a) altura do visor inferior ( $hi$ );
- b) altura do visor superior ( $hs$ );
- c) distância entre os visores ( $D$ );
- d) número de graduações Nível – Inferior ( $n1$ );
- e) número de graduações Nível – Superior ( $n2$ ).

As quantidades desconhecidas a se estimar são:

- a) distância na mira proporcional a  $n1$  ( $d1$ );
- b) visada de vante ( $H = hi + d1$ );

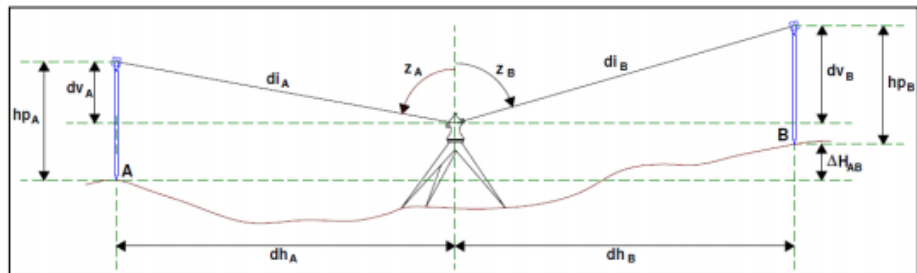
Para o cálculo da visada a nível aplica-se a Equação 3:

$$\frac{d1}{n1} = \frac{D}{n1+n2} \quad (3)$$

### Nivelamento trigonométrico com técnica *leap-frog*

Como relatado no item das Metodologias Empregadas, foram desenvolvidos quatro métodos com a presente técnica. Todavia, em todas elas, seguiu-se o mesmo princípio descrito em Silva (2012), como exposto na Figura 3.

Figura 3 – Lance de nivelamento trigonométrico tradicional



Fonte: Silva (2012).

A expressão que fornece o desnível entre os pontos A e B pelo método trigonométrico, desconsiderando-se inicialmente quaisquer correções a serem realizadas, é apresentada na Equação 4. As referidas correções são apresentadas no item seguinte.

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = hp_A - dv_A + dv_B - hp_B \quad (4)$$

Como, do princípio da técnica *Leap-Frog*, tem-se que  $hp_B = hp_A$  (GOMES, 2006), vem o descrito na Equação 5:

$$\Delta H_{AB} = dv_B - dv_A = di_B \cdot \cos(Z_B) - di_A \cdot \cos(Z_A) \quad (5)$$

onde  $di$  e  $Z$  representam, respectivamente a distância inclinada e ângulo zenital em cada pontaria – observações fornecidas pela Estação Total – ET.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos foram realizados no campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Foram utilizados equipamentos atinentes a cada uma das técnicas e metodologia alinhada com o preconizado na literatura em referência, conforme apresentado o nos itens a seguir.

## ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo pertence ao interior do campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – UFPR. Foram selecionadas duas referências de nível (RRNN) em seu entorno, por ser tratarem de pontos já materializados no terreno. As RRNN escolhidas fazem parte da rede vertical do IBGE e são as seguintes: referência de nível (RN) 2053D (denominada neste artigo de RN01) e RN 3278B (aqui denominada de RN02); ambas podem ser visualizadas na Figura 4. A distância horizontal entre as duas RRNN é de aproximadamente 215 metros.

## ASPECTOS PRÁTICOS DAS METODOLOGIAS EMPREGADAS

Conforme descrito na Introdução, avanços tecnológicos e estudos acadêmicos aprofundados aumentaram a diversidade de métodos com os quais é possível calcular o desnível entre dois pontos. Objetivando alcançar precisão

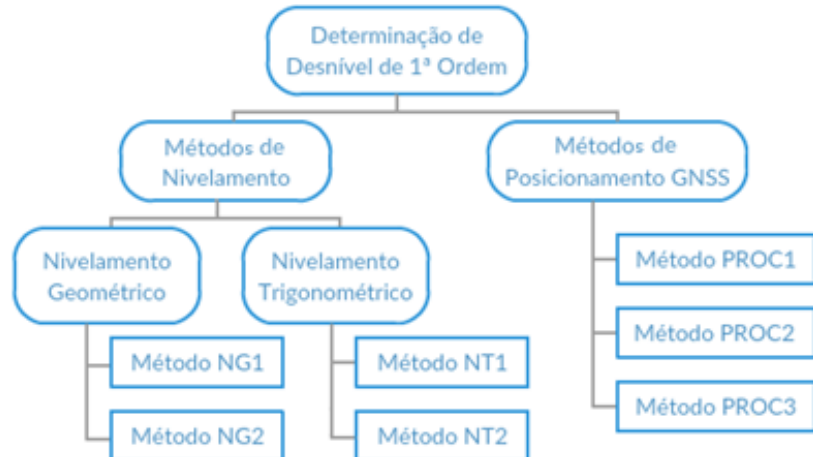
equivalente com levantamento altimétrico de 1ª ordem, foram utilizadas as metodologias conforme é apresentado na Figura 5.

Figura 4 – Área de estudo



Fonte: Adaptado de GOOGLE (2015).

Figura 5 – Metodologias empregadas para determinação do desnível



Fonte: Autoria própria (2017).

Descrevendo cada um dos métodos dispostos na Figura 5, tem-se:

### Nivelamento geométrico

- a) método NG1 – nivelamento geométrico tradicional com a método de visadas iguais, descrito no item das técnicas de nivelamento, tomado como referência;
- b) método NG2 – nivelamento geométrico utilizando a adaptação da técnica de travessia de rio exposta em IBGE (1981).

### Nivelamento trigonométrico – Técnica *Leap-Frog*

- a) método NT1 – nivelamento trigonométrico com a técnica *Leap-Frog*, utilizando estação total (ET) de precisão média, conforme ABNT (1994);



- b) método NT2 – nivelamento trigonométrico com a técnica *Leap-Frog*, utilizando estação total (ET) de precisão alta, conforme ABNT (1994);

#### **Posicionamento GNSS**

- a) método PROC1 – Processamento pelo método relativo estático com o uso de efemérides transmitidas;
- b) método PROC2 – Processamento pelo método relativo estático com o uso de efemérides precisas;
- c) método PROC3 – Processamento por Ponto Preciso (IBGE-PPP).

Para as operações de nivelamento geométrico tradicional, a seção de nivelamento deste trabalho foi composta por 8 lances e a seção de contranivelamento foi composta por 6 lances. Ressalta-se ainda a utilização do conjunto de nível eletrônico e miras de códigos de barras como facilitador das leituras, bem como do conjunto de mira e um par de balizas cruzadas a sua retaguarda para assegurar sua verticalidade estática. Por fim, outra medida tomada foi a utilização de miras aos pares, cuidando-se para que a mira na RN de partida fosse posicionada na RN de chegada, para eliminar o erro de índice das miras.

No tocante ao nivelamento geométrico pela técnica de travessia de rio, ainda no contexto de aplicação do presente trabalho, devido à disponibilidade de um único nível óptico para realização das medições, foi realizada uma adaptação da metodologia proposta pelo IBGE. Entretanto, esta abordagem alternativa não afetou os resultados finais, conforme abordado nos próximos itens. Adicionalmente foram fabricados dois visores com as mesmas medidas e especificações dos visores tipo USC&GS / IBGE, descritos em IBGE (1981). O acoplamento dos visores às miras utilizadas para o levantamento foi realizado com sucesso, devido aos parafusos que permitem aproximar as bordas superior/inferior do visor com uma graduação da mira.

Para a aplicação deste método, foi necessário observar as seguintes condições:

- a) reciprocidade e simultaneidade das observações – usando dois níveis e dois operadores para realizar as leituras ao mesmo tempo. Esta condição garante a diminuição da influência da refração no momento de realizar as observações. Para o presente trabalho, aplicamos dito método com um nível para realizar uma primeira avaliação, a qual foi satisfatória porque atingiu a precisão esperada (ver seção de resultados e discussão). O resto da metodologia foi aplicada como é detalhada em IBGE (1981);
- b) igualdade das visadas longas e recíprocas – para que no possível sejam visadas recíprocas;
- c) rapidez nas observações – considera-se 15 minutos o intervalo de tempo ideal de cada série constituída por 25 leituras. Com isto evita-se alterações nas leituras pela variação da refração e temperatura. No levantamento realizado, realizou-se as leituras de forma eficaz para evitar esses erros indiretos nas medições;



- d) altura das visadas – superior a três metros;
- e) comprimento da visada curta – mínimo de 5 a 15 metros;
- f) posição dos visores – devem ser colocados de forma que não obstruam a visada de ré e que entre os dois caia a visada de vante a nível;
- g) hora das observações – entre 10 e 14 horas;
- h) retificação e apoio do instrumental.

No que tange ao nivelamento trigonométrico empregado, foram realizadas 4 conjuntos de 3 séries de observações para cada seção – nivelamento e contranivelamento. Cada uma das séries de observações foi composta por sequências de 4 observações em ré e em vante, utilizando-se o processo direto (PD) e o processo inverso (PI), com o intuito eliminar o erro de zênite instrumental. As observações duplicadas deram origem a valores médios para a observação. Cada uma das sequências ocorreu como mostrado como segue:  $PD_{RÉ} \rightarrow PD_{VANTE} \rightarrow PI_{VANTE} \rightarrow PI_{RÉ}$ .

Ressalta-se ainda a utilização concomitante ao rastreamento do aneroide, do termômetro ambiente e do higrômetro para aferição da pressão, da temperatura e da umidade relativa do ar, respectivamente. Tais informações foram utilizadas no cálculo das correções, conforme constante onde são apresentados os cálculos e processamento dos dados.

Inseridos no contexto teórico e operacional, os procedimentos de nivelamento trigonométrico foram divididos em quatro métodos diferentes. Estes métodos possuem as mesmas bases teóricas supracitadas e foram desenvolvidos na mesma área de estudo, com algumas modificações para buscar resultados cada vez mais precisos. As modificações entre os métodos NT1-NT2 foram introduzidas nas metodologias empregadas, e são detalhadas na sequência.

Para o método NT1, foi empregada ET de precisão média (*Leica TC 407*) e, para fins de facilitação de emprego do método, o ponto ocupado pela ET localizou-se bem mais próximo de uma das RRNN do que em relação à outra (a saber: distância aproximada até a RN01: 19 m; distância aproximada até a RN02: 195 m). Demais possíveis fontes de erros, não corrigidas pela aplicação das fórmulas apresentadas no item dos cálculos e processamentos dos dados obtidos, foram desconsideradas.

Para o método NT2, foram tomadas as mesmas medidas que no método NT1, exceto pelo emprego de ET de precisão alta (*Leica TS02*). Adicionalmente, levando-se em consideração as facilidades impostas pelo uso de uma ET robótica, dividiu-se este procedimento em 3 categorias, de acordo com o número de séries de medições realizadas. Desta forma, o método NT2 dividiu-se em NT2.1, com 20 séries de medições, NT2.2, com 60 séries de medições e NT2.3, com 120 séries de medições. Cada série foi composta por um conjunto de 4 observações da forma PD em ré – PD em vante – PI em vante – PI em ré.

## EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Para cada técnica de nivelamento e para a técnica de posicionamento GNSS foram utilizados os materiais e equipamentos indicados a seguir.

Para o caso do nivelamento geométrico, utilizou-se:

- a) nível digital marca *Leica* modelo DNA03, com precisão nominal de 0,3mm por km de duplo nivelamento (LEICA, 2002);
- b) duas miras de invar de código de barras, para leitura do nível eletrônico;
- c) quatro balizas, sendo acopladas aos pares em cada mira, para apoiar o suporte vertical e mantê-las totalmente verticalizadas;
- d) demais acessórios: duas sapatas e tripé de alumínio.

Para o nivelamento geométrico pela técnica travessia de rio, utilizou-se:

- a) nível óptico marca Wild modelo N3, com precisão nominal de 0,3mm por km de duplo nivelamento;
- b) duas miras de invar, para leitura do nível óptico;
- c) oito balizas, sendo acopladas quatro em cada mira, para apoiar o suporte vertical e mantê-las totalmente verticalizadas;
- d) quatro alvos para leitura, adaptados do descrito por IBGE (1981);
- e) demais acessórios: tripé de alumínio e caderneta.

Para o nivelamento trigonométrico pela técnica *Leap-Frog*, utilizou-se:

- a) estação total topográfica marca *Leica* modelo TC 407, com precisão linear nominal de  $\pm (5\text{mm} + 2\text{ppm})$  e precisão angular nominal de  $7''$  (FAGGION et al., 2013);
- b) estação total robótica marca *Leica* modelo TS02, com precisão linear nominal de  $\pm (1,5\text{ mm} + 2\text{ppm})$  e precisão angular nominal de  $3''$  (LEICA, 2009);
- c) dois conjuntos de bipé e bastão para prisma com calibração por meio de sistema interferométrico;
- d) demais acessórios: dois prismas, tripé de alumínio, termômetro ambiente, higrômetro e aneroide.

No caso do posicionamento GNSS, utilizou-se:

- a) um par de rastreadores GPS geodésicos de dupla frequência (L1/L2) marca *Leica* modelo GX1230, com antenas AX1202;
- b) demais acessórios: dois conjuntos de bipé e bastão para GPS.

## CÁLCULOS E PROCESSAMENTO DOS DADOS OBTIDOS

Para o método NG1, os cálculos foram deveras simples. Tanto para a seção de nivelamento quanto para a de contranivelamento, o desnível foi obtido pela soma dos desníveis entre os pontos ocupados, observados os aspectos descritos na secção do método NG1. O erro cometido e, conseqüentemente, a precisão da técnica foi obtida pela diferença entre os desníveis obtidos em ambas as seções, ao passo que o erro permitido foi calculado conforme preconizado em IBGE (1983), baseado no comprimento total nivelado. De modo similar, para o método NG2, os cálculos foram simples, mas realizados à exaustão, conforme preconizado em IBGE (1981) e possibilitado pela adaptação empregada.

Para os métodos NT1 e NT2, os cálculos foram precedidos pela aplicação das correções cabíveis – a saber: correção meteorológica aplicada às distâncias observadas conforme a fórmula de Barrel e Sears (SILVA e SEGANTINE, 2015) e correção de curvatura terrestre e de refração atmosférica aos termos da Equação 6 (GOMES, 2006). Dessa forma, obteve-se como equação final para determinação do desnível pelo método trigonométrico a Equação 6.

$$\Delta H_{AB} = \left( D_{iB} \cdot \cos(Z_B) + (1-k) \cdot \frac{(D_{iB} \cdot \sin(Z_B))^2}{2R} \right) - \left( D_{iA} \cdot \cos(Z_A) + (1-k) \cdot \frac{(D_{iA} \cdot \sin(Z_A))^2}{2R} \right) \quad (6)$$

onde  $Z$  é o ângulo zenital médio entre as observações em PD e em PI,  $k$  é o coeficiente de refração atmosférica, adotado no Brasil com o valor de 0,13 (BRASIL, 1975, apud GOMES, 2006),  $R$  é o raio médio da Terra e  $Di$  é a média das distâncias inclinadas observadas em PD e em PI após a correção meteorológica, conforme observado na Equação 7.

$$Di = di + di \cdot \left( 281,5 - \frac{0,29035 \cdot p}{1 + 0,00366 \cdot t} + \frac{11,27 \cdot u}{100 \cdot (273,16 + t)} \cdot 10^x \right), \quad (7)$$

sendo:  $x = \frac{7,5t}{237,3 + t} + 0,7857$

e onde  $p$ ,  $u$  e  $t$  representam, respectivamente, a pressão, a umidade e a temperatura aferidas no momento e local da medição. Não são aprofundadas bases teóricas para as correções por questão de brevidade, mas elas podem ser consultadas nas referências citadas.

De maneira análoga ao nivelamento geométrico, o erro cometido e, conseqüentemente, a precisão da técnica foi obtida pela diferença entre os desníveis obtidos em ambas as seções, ao passo que o erro permitido foi calculado conforme preconizado em IBGE (1983), baseado no comprimento total nivelado. Um algoritmo em ambiente MATLAB foi desenvolvido para realizar os cálculos.

## PROCESSAMENTO DOS POSICIONAMENTO GNSS

Para a análise do posicionamento GNSS, foi realizado um único rastreamento em ambas as RRNN, modificando-se apenas a maneira como os dados foram processados. Cada rastreamento teve a duração de uma hora, com a intenção de

majorar a duração recomendada em cada caso e eliminar eventuais inconsistências, e obter as precisões proporcionadas segundo IBGE (2008) e IBGE (2017a).

### Processamento pelo método relativo estático com efemérides transmitidas

Utilizando-se o *software Leica Geo Office 5.0*, proprietário do equipamento empregado, realizou-se o processamento dos pontos rastreados pelo método relativo estático, inicialmente com as efemérides transmitidas durante o próprio rastreamento.

Em ambos os casos, adotou-se como base de referência a estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC – da UFPR, interna ao *campus* e distante aproximadamente 565 m da RN01 e 615 m da RN02. Na Tabela 1, apresenta-se os parâmetros do rastreamento da RN01 com efemérides precisas e transmitidas.

### Processamento pelo método relativo estático com efemérides precisas

Em momento posterior, utilizando-se novamente o referido software, realizou-se novo processamento dos pontos rastreados pelo método relativo estático, com as efemérides finais disponibilizadas pelo *International GNSS Service (IGS)* em sua página na web para cada dia, organizados pelo número da semana GPS. Mais uma vez, adotou-se como base de referência a estação RBMC UFPR os parâmetros de rastreamento são apresentados ainda na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de processamento do método relativo com efemérides transmitidas da RN01

Parâmetro	Valor
Semana	1931
Frequência	L1+L2
Solução	Forward
Máscara de elevação	10.0 °
Modelo ionosférico	Iono-free
Modelo troposférico	Saastamoinen
Val thres	3.0
Antena	LEIATX1230
Altura da antena	2,000 (m)
Posição de Referência	Latitude= -25° 26' 54,1269" ± 0,0002
	Longitude= -49° 13' 51,43720" ± 0,0003
	h= 925.8070 ± 0,0007 (m)

Fonte: Adaptado dos arquivos do levantamento GNSS da RN01.

A Tabela 2 apresenta os valores finais de coordenadas da RN01 obtidos para cada um dos processamentos.

Tabela 2 – Coordenadas finais da RN01, obtidas com processamento utilizando efemérides transmitidas e precisas.

Efemérides transmitidas	Efemérides precisas
Latitude= -25° 27' 11,63606" ± 0,0003	Latitude= -25° 27' 11,63614" ± 0,0002
Longitude= -49° 13' 58,29214" ± 0,0004	Longitude= -49° 13' 58,29239" ± 0,0003
h= 920,2622 ± 0,0007 (m)	h= 920,1772 ± 0,0008 (m)

Fonte: Adaptado dos arquivos do levantamento GNSS da RN01.

### Processamento por ponto preciso (IBGE-PPP)

O último método empregado para processamento dos rastreios foi o Posicionamento por Ponto Preciso. Trata-se de um método de posicionamento em que apenas um receptor é empregado, com o objetivo primário de se estimar as coordenadas do ponto ocupado. No processamento todos os erros sistemáticos devem ser corrigidos. Uma opção de software on-line para processamento de PPP é o disponibilizado gratuitamente pelo IBGE, para pós-processamento de dados GPS/GNSS. Neste software, as coordenadas finais são referenciadas ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000), na época atual e na época 2000,4 (IBGE, 2017b).

Para sua utilização, foi necessário converter os dados obtidos no rastreamento para o formato RINEX. Esta operação foi realizada com o uso do software TEQC, um aplicativo de linha de comando de uso livre, desenvolvido e mantido pela fundação norte-americana UNAVCO.

A Tabela 3 contém as precisões esperadas com o uso do PPP, consoante IBGE (2017b). Ressalta-se que, no presente trabalho, o rastreamento GNSS teve duração de uma hora e foi utilizado equipamento de duas frequências.

Tabela 3 – Precisão esperada para coordenada altimétrica no levantamento estático (metros).

Receptor	Uma frequência			Duas frequências		
	Latitude	Longitude	Altitude	Latitude	Longitude	Altitude
Após 1 hora	0,248	0,645	0,596	0,013	0,039	0,042
Após 2 horas	0,145	0,311	0,331	0,005	0,008	0,018

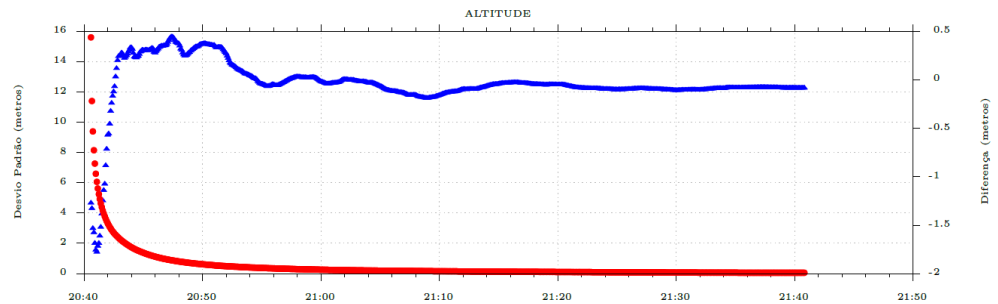
Fonte: Adaptado de IBGE (2017a).

Na Figura 6, pode-se analisar a coordenada UP (altitude elipsoidal) da RN01, a qual obteve um desvio padrão tendendo a zero depois de 15 minutos de rastreamento. A mesma tendência se obteve na RN02.

### CONSIDERAÇÃO SOBRE O USO DA ALTITUDE ELIPSOIDAL

Conforme discorrido na introdução do presente artigo, far-se-ia necessário realizar o cálculo das altitudes niveladas  $H$  (denominadas pelo IBGE, à época de execução deste trabalho de "altitudes ortométricas", mas sendo de fato "altitudes normais-ortométricas") a partir das altitudes elipsoidais  $h$  obtidas nos três métodos de processamento, com o uso da Equação 1. No entanto, após a realização deste procedimento, sua adoção para os fins avaliativos deste artigo foi descartada, pelos motivos que seguem:

Figura 6 – Altitude elipsoidal de RN01



Fonte: Autoria Própria (2017).

- a) Analisando-se o modelo de ondulação geoidal nacional corrente – o MAPGEO2015 – verificou-se que, na área de estudo, não há alterações acentuadas para  $N$  (a saber, a diferença entre o valor gerado para as RRNN foi de 0,01 m);
- b) Neste trabalho, considerou-se como melhor relação entre a altitude normal-ortométrica de RN01 e sua altitude elipsoidal como sendo a altura geoidal; entretanto, há trabalhos anteriores (FERREIRA et al., 2013; NICACIO, 2017; NICACIO, DALAZOANA e DE FREITAS, 2018) que mostram que a relação entre estas grandezas pode ser melhor modelada pela anomalia de altura em determinadas regiões e segundo determinadas circunstâncias. Optou-se por utilizar apenas o MAPGEO2015 e as alturas geoidais dele provenientes pelo fato deste ser o modelo oficial corrente no país para esta finalidade;
- c) A inserção e consideração deste valor no cálculo do desnível acarretaria em uma grande perda na precisão, devido à propagação de erros da Equação 1. As precisões dos valores obtidos para as altitudes elipsoidais são da ordem de 1 mm. Segundo informado no próprio software MAPGEO2015, as alturas geoidais por ele fornecidas têm precisão de aproximadamente 170 mm, o que acarretaria uma precisão final de altitude ortométrica também da ordem de 170 mm, à luz do proposto por Gemael et al. (2015), bastante prejudicial para a presente finalidade.
- d) Conforme apontado no próximo item, mesmo com esta consideração, com nenhum dos três métodos de posicionamento foi possível obter valores de desnível dentro dos limites preconizados por IBGE (1983). Sendo assim, trata-se de uma técnica sem validade para levantamentos de 1ª ordem nas condições estudadas.

## RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Os resultados finais obtidos para cada um dos desníveis constam na Tabela 4. Ressalta-se que, como o método NG1 foi adotado como referência, por ser indicado em IBGE (1983), ele é gerador da tolerância para a comparação de diferença entre os outros métodos. Utilizando-se a expressão  $3mm\sqrt{k}$ , onde  $k$  é o comprimento total nivelado (IBGE, 1983), tem-se que a tolerância para a comparação de diferença é de 1,43 mm.

Tabela 4 – Resultados obtidos para todos os métodos.

Método	Desnível (mm)	Precisão (mm)	Diferença (mm)
NG1	351,660	0,740	-
NG2	351,610	2,474	0,050
NT1	352,509	1,456	0,849
NT2.1	351,154	0,295	0,506
NT2.2	351,994	0,194	0,334
NT2.3	353,060	0,115	1,400
PROC1	316,800	0,013	34,860
PROC2	316,700	0,013	34,960
PROC3	300,000	0,054	51,660

Fonte: Autoria própria (2017).

Baseando-se nos resultados e nas hipóteses tomadas para realização dos trabalhos, pode-se afirmar o seguinte:

- a) O nivelamento geométrico pelo método de travessia de rio apresentou a menor diferença em milímetros, a qual é considerada a melhor das alternativas para obter desníveis com precisão compatível com o requisitado por IBGE (1983) para Levantamentos altimétricos de 1ª ordem;
- b) Independentemente de métodos e equipamentos, todas as operações de nivelamento trigonométrico também atenderam a precisão desejada;
- c) O aumento da variabilidade de observações e do tempo de operação do equipamento usados no procedimento NT2.3 foi, provavelmente, uma das principais causas de obtenção de resultado aquém dos outros dois obtidos com o mesmo equipamento;
- d) O resultado dos métodos de processamento GNSS diferem dos demais métodos em valores superiores ao tolerado, independentemente da realização de processamento pelo método relativo estático com o uso de efemérides precisas ou transmitidas, ou por meio do processamento por ponto preciso. Como a linha de base é curta, era esperado que os resultados não se alterassem significativamente. Um fator que pode ter corroborado para isto é o uso da altura geoidal como variável que relaciona a altitude elipsoidal e a altitude normal-ortométrica, conforme brevemente abordado na conclusão. Cabe aqui dizer que o 0,01 m do N ou o valor não conhecido de  $\zeta$  estão presentes na componente da diferença.
- e) Comparando-se os métodos de processamento PROC1 e PROC2, os quais diferem entre si apenas pelo uso de efemérides precisas ou transmitidas, verifica-se que, para este trabalho, a diferença foi submilimétrica. Desta forma, considerando as ordens de grandeza das medições realizadas, não houve ganhos significativos pela adoção das efemérides precisas;



- f) Por fim, ressalta-se que na aplicação ora desempenhada, o método de posicionamento por ponto preciso obteve o pior resultado dentre todos os testados.

## CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de nivelamento aplicadas no presente estudo, quer sejam geométricos ou trigonométricos, com todos os equipamentos utilizados, apresentaram precisão dentro dos padrões estabelecidos pelo IBGE para nivelamento de 1ª ordem ( $3mm\sqrt{k}$ ). Com isto conclui-se que se pode usar tanto técnicas antigas como novas e obter resultados coerentes com as exigências de precisão. Também se considera esta afirmação em relação aos equipamentos usados, avaliando sua técnica de medição e sua tecnologia.

Baseando-se nos resultados, na discussão apresentadas e nas hipóteses tomadas para realização dos trabalhos, conclui-se a adaptação da técnica de travessia de rio apresentada em IBGE (1981) e ora realizada permitiu a obtenção de resultados adequados e coerentes com os requisitos de precisão. Portanto, esta técnica, apesar de pouco conhecida, possui potencial para utilização quando cabível. Um exemplo de possível aplicação seria quando se apresentam obstáculos no terreno para realizar os levantamentos.

Por outra parte, analisou-se os resultados referentes aos métodos de processamento GNSS aplicadas no levantamento, as quais apresentam discrepâncias que não atingem aos padrões do IBGE para nivelamento de 1ª ordem, mas que proporcionam valores próximos aos calculados com outros métodos. O valor que se apresentou com mais discrepância foi o obtido pelo método IBGE-PPP (aproximadamente 50 mm) o qual somente provê uma estimativa imprecisa do levantamento, mas não pode ser aplicado para trabalhos que exigem precisão de 1ª ordem. Adicionalmente, as discrepâncias maiores obtidas pela técnica GNSS podem ser associadas a alguns fatores, tais como: imprecisão na aferição da altura das antenas dos GPS usados; deslocamentos e variações de centro de fase de antenas receptoras; ocorrência do efeito de multicaminho durante o rastreamento, produzido por uma edificação de grande porte e por densa vegetação, ambas localizadas perto de um dos pontos levantados; entre outras, ou mesmo, a combinação destas.

Não foram calculadas as altitudes “ortométricas” devido à perda da precisão (de 35mm/50mm para 170mm) ao calcular as alturas geoidais com o MAPGEO2015, as quais tem uma precisão inferior à do levantamento. Entretanto, testes realizados indicaram que, mesmo que se optasse pelo cálculo em questão, em detrimento da precisão das medições, não seria possível alcançar a precisão exigida com dados oriundos do rastreamento GNSS. Destarte, reforça-se que as três técnicas de processamento GNSS empregadas apresentam resultados suficientes apenas para que se tenha uma ideia geral do desnível, não sendo adequadas para determinação de desnível de 1ª ordem.

# Evaluation of levelling techniques and GNSS positioning methods for 1st order height difference determination

## ABSTRACT

The techniques of leveling used were: precision geometric leveling with equal aims method and electronic level; precision trigonometric leveling - Leap-Frog technique - with medium and high precision total stations; and an adaptation of a methodology recommended by the Brazilian Institute of Geography and Statistics - IBGE for river crossing with precision leveling, using optical level. The different GNSS positioning and processing techniques used were: static relative method with transmitted ephemeris; static relative method with precise ephemeris; and Precise Point Positioning [PPP], from IBGE. After the experiments carried out, it was observed that all the leveling techniques presented accuracy within the limits indicated by IBGE for first order leveling (3mmvk). Regarding the use of GNSS positioning methods, the results obtained were unsatisfactory to the required precision. In particular, the adaptation of the river crossing technique with precision leveling proved to be a possible application for the determination of unevenness that, although old and not very widespread, provided the proper precision to the operation.

**KEYWORDS:** Geometric Levelling; Trigonometric Levelling; River-crossing; Leap-Frog; High Precision; GNSS Positioning.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao PPGCG-UFPR – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela estrutura, equipamentos e recursos humanos integrados que possibilitaram a execução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13133 - Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, ABNT, 1994.

ARANA, J. M. **O uso do GPS na elaboração da Carta Geoidal**. 2002. 394 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, UFPR, Curitiba.

CASTRO, A. L. P. **Nivelamento através do GPS: avaliação e proposição de estratégias**. 2002. 175 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, Presidente Prudente.

CHRZANOWSKI, A.; SECORD J. M. Tilt measurement. In: **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook**, Ed., J. G. Webster, CRC Press LLC, p. 15-1 – 15-11, 1999.

FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; SILVA, T. F.; ANDOLFATO, S. H. D. Estudo na aplicação de estações totais para a determinação de deslocamentos relativos em laboratório. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba. v. 19, n. 1, p. 34-44, jan/mar. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702013000100003>.

FERREIRA, V. G.; ZHANG, Y.; DE FREITAS, S. R. C. Validation of GOCE gravity field models using GPS-leveling data and EGM08: a case study in Brazil. **Journal of Geodetic Science**, V. 3, n. 3, 2013. <https://doi.org/10.2478/jogs-2013-0027>.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações – aplicações geodésicas**. 2. Ed. Curitiba: Editora UFPR, 2015.

GOMES, J. P. **Determinação de desníveis de precisão utilizando estação total**. 2006. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, UFPR, Curitiba.

GOOGLE Earth Pro. Version 7.1.5.1557: Google Inc, 2015.

IBGE. Experiência do IBGE nas travessias de rios com nivelamento de precisão. Superintendência de Geodésia: 1º Distrito de Levantamentos Geodésicos, Fortaleza, 1981.

IBGE. Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos. PR nº 22/83, Boletim de Serviço nº 1602 (Suplemento), Rio de Janeiro, 1983.

IBGE. Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos – GPS. Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro, 2008.

IBGE. O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015. Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro, 2015.

IBGE. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro, 2017a.

IBGE. Manual do Usuário – Aplicativo Online IBGE-PPP. Diretoria de Geociências, Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro, 2017b.

KAHMEN, H.; FAIG, W. **Surveying**. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1988.

LEICA GEOSYSTEMS. Estação Total Leica Flexline TS02: livreto. Heerbrugg, Switzerland, 2009. 2 p.

LEICA GEOSYSTEMS. Leica DNA digital levels: livreto. Heerbrugg, Switzerland, 2002. 6 p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. Ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. p. 29-37.

NICACIO, E. L. **Alternativa para determinação de altitudes normais-ortométricas na Amazônia Legal Brasileira**. 2017. 223 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, UFPR, Curitiba.

NICACIO, E.; DALAZOANA, R.; DE FREITAS, S. R. C. Evaluation of recent combined global geopotential models in Brazil. **Journal of Geodetic Science**, V. 8, n. 1, p. 72-82, 2018.

SILVA, R. N. F. **Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de vaso para a UHE Mauá.** 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, UFPR, Curitiba.

SILVA, I.; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia para engenharia: teoria e prática de geomática.** 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

**Recebido:** 04 ago. 2017

**Aprovado:** 05 dez. 2018

**DOI:** 10.3895/rbgeo.v6n4.6889

**Como citar:** NICACIO, E.; SANTACRUZ JARAMILLO, A. G.; ZANETTI, G. Z.; FAGGION, P. L. Avaliação de técnicas de nivelamento e métodos de posicionamento GNSS para determinação de desnível de primeira ordem. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 6, n. 4, p. 274-293, out/dez. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Eurico Nicacio

Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 210, CEP 81531-990, Curitiba, Paraná, Brasil.

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

