

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/1: 45-57
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO, LEAP-FROG, NO MONITORAMENTO DE RECALQUES EM BARRAGEM DE CONCRETO DE MÉDIO PORTE

*Avaliation of Trigonometric Leveling Method, Leap-frog, the Monitoring of
Settlements in Dam Concrete Midsize*

**Raquel Naiara Fernandes Silva¹; Pedro Luis Faggion²
& Luís Augusto Koenig Veiga²**

**¹Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Faculdade de Engenharia Civil**

Caixa Postal 593, CEP 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil
raquel.fernandes@feciv.ufu.br

**²Universidade Federal do Paraná - UFPR
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Setor de Ciências da Terra - Departamento de Geomática**
Caixa Postal 19001, CEP 81.531-990 Curitiba, PR, Brasil
{faggion, kngveiga}@ufpr.br

*Recebido em 15 de Abril, 2013/ Aceito em 02 de Novembro, 2013
Received on April 15, 2013/ Accepted on November 02, 2013*

RESUMO

Esse trabalho busca avaliar a acurácia do nivelamento trigonométrico, método *Leap-Frog*, no monitoramento de movimentos verticais (recalque) em grandes estruturas. Tradicionalmente, esses deslocamentos são determinados a partir do nivelamento geométrico de precisão, método das visadas iguais. Com a evolução das Estações Totais, hoje com precisão angular melhor que 1" e linear melhor que 2mm por quilômetro, busca-se determinar desníveis com precisão compatível à primeira ordem de forma indireta, ou seja, observando-se ângulos zenitais e distâncias inclinadas. O presente estudo foi conduzido durante a formação do reservatório da Usina Hidrelétrica de Mauá, através da determinação do desnível entre dois *benchmarks*, materializados a montante através de pilares de centragem forçada instalados um na margem direita e outro na margem esquerda (montante) e 17 marcos de superfície (MSU_i) engastadas na crista da barragem. Os desníveis obtidos utilizando Nivelamento Geométrico de Precisão (Método Direto) e os desníveis obtidos com Nivelamento Trigonométrico (Método Indireto) foram comparados, sendo determinadas as precisões obtidas com o nivelamento trigonométrico, com variação da ordem centimétrica para distâncias próximas a 1000 metros. Destaca-se com o estudo a importância dos efeitos de refração nos resultados obtidos. Foram também realizadas comparações com diferentes valores para o coeficiente de refração "k".

Palavras chaves: Monitoramento de Barragens de Concreto, Nivelamento Geométrico, Técnica *Leap-Frog*, Coeficiente de Refração.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the precision of trigonometric leveling, the leapfrog technique, applied to monitor vertical movements of structure. Traditionally, these displacements are determined using precision leveling. Considering the precision of the today's total stations, the speed and agility in the determination of the observations, this research try to determine height differences with precision compatible to the precise leveling, in an indirect way, by observing zenith angles and inclined distances. The present study was conducted during the formation of the Maua Hydroelectric Plant reservoir, by determining the height differences between two benchmarks, with forced centering pillars, installed on the right and left side of the dam (upstream) and 17 surface landmarks located on the crest of the dam. The height difference obtained using precise differential leveling (direct method) and the height difference obtained with trigonometric leveling (Indirect Method) were compared, with certain accuracies obtained with the trigonometric leveling, ranging from centimetric to order next 1000 meters distances. It were also studied the effects of refraction coefficient on the results. Comparisons were made with different values refraction coefficient "k".

Keywords: Monitoring Concret Dams, Precision Leveling, Leapfrog Technique, Refraction Coefficient.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de grandes estruturas utilizando a Auscultação Geodésica vem crescendo, porém são necessárias pesquisas que busquem a aplicação de metodologias que tornem mais ágil a coleta e processamento dos dados, objetivando a detecção e caracterização de eventuais deslocamentos da estrutura. Segundo Kuperman et. al., (2005) estes processos devem ser realizados durante toda a vida útil da estrutura, de forma a fornecer informações necessárias para uma eventual revisão ou adaptação nos procedimentos adotados na construção, operação ou manutenção. Assim, é possível definir a etapa de controle, permitindo ainda verificar se uma dada condição de risco está se desenvolvendo ou se é viável de ocorrer.

Associada ao monitoramento de estruturas a Auscultação Geodésica pode determinar e confrontar as coordenadas de pontos em épocas distintas e verificar se, dentro de certo nível de confiança, existem alterações significativas nestas coordenadas (ANDOLFATO, 2010). No estudo aqui proposto, se busca a determinação da variação da componente Z (movimentos verticais) em estruturas de grandes obras tais como barragens. A aplicação do nivelamento geométrico, método das visadas iguais, técnica essa considerada consagrada devido à consistência dos resultados, trata de um processo lento e conseqüentemente oneroso. Em decorrência disso, abre-se assim um caminho para alternativas baseadas nos métodos indiretos, entre eles o nivelamento trigonométrico e a utilização do GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Pensando nisso, e associando à otimização do tempo ao se utilizar Estações Totais robotizadas, fica evidenciado o assunto desse trabalho: avaliação da utilização de Métodos Indiretos, neste caso no monitoramento de movimentos verticais em estruturas.

Muitas obras de engenharia necessitam desse tipo de monitoramento, tais como: edifícios, pontes, estádios, barragens, entre outras. Este trabalho, em particular, teve como área de estudo a da barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá, vinculado ao projeto "Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco".

A proposta é avaliar o nivelamento trigonométrico, método *Leap-Frog*, tendo em vista que esse último é conduzido com Estação Total, otimizando o tempo de coleta de dados em campo com o uso de estações totais robotizadas, que permitem a realização das leituras de forma automática. Para viabilizar este experimento foram realizadas cinco campanhas para coletar dados aplicando nivelamento geométrico de primeira ordem e nivelamento trigonométrico utilizando Estação Total robotizada. A partir dos dados obtidos com a Estação Total determinou-se o desnível pela técnica *Leap-Frog*. Foram comparados os recalques obtidos com as duas técnicas utilizando diferentes valores para o coeficiente de refração k.

2. ÁREA DE ESTUDO

Segundo o Consórcio Energético Cruzeiro do Sul (2011) a UHE Mauá é composta de uma barragem de concreto compactado a rolo (CCR)

de aproximadamente 85m de altura máxima, 745m de comprimento de crista, com 361MW de potência instalada e um volume total do reservatório de aproximadamente $6,3 \times 10^5$ m³. O trabalho de construção da barragem no Rio Tibagi, iniciado em agosto de 2009, teve

duração de 19 meses incluindo o período de ensacamento e preparação do leito do rio e da margem esquerda para o lançamento do concreto. Localiza-se entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, a aproximadamente 280 km da capital Curitiba (Figura 01).

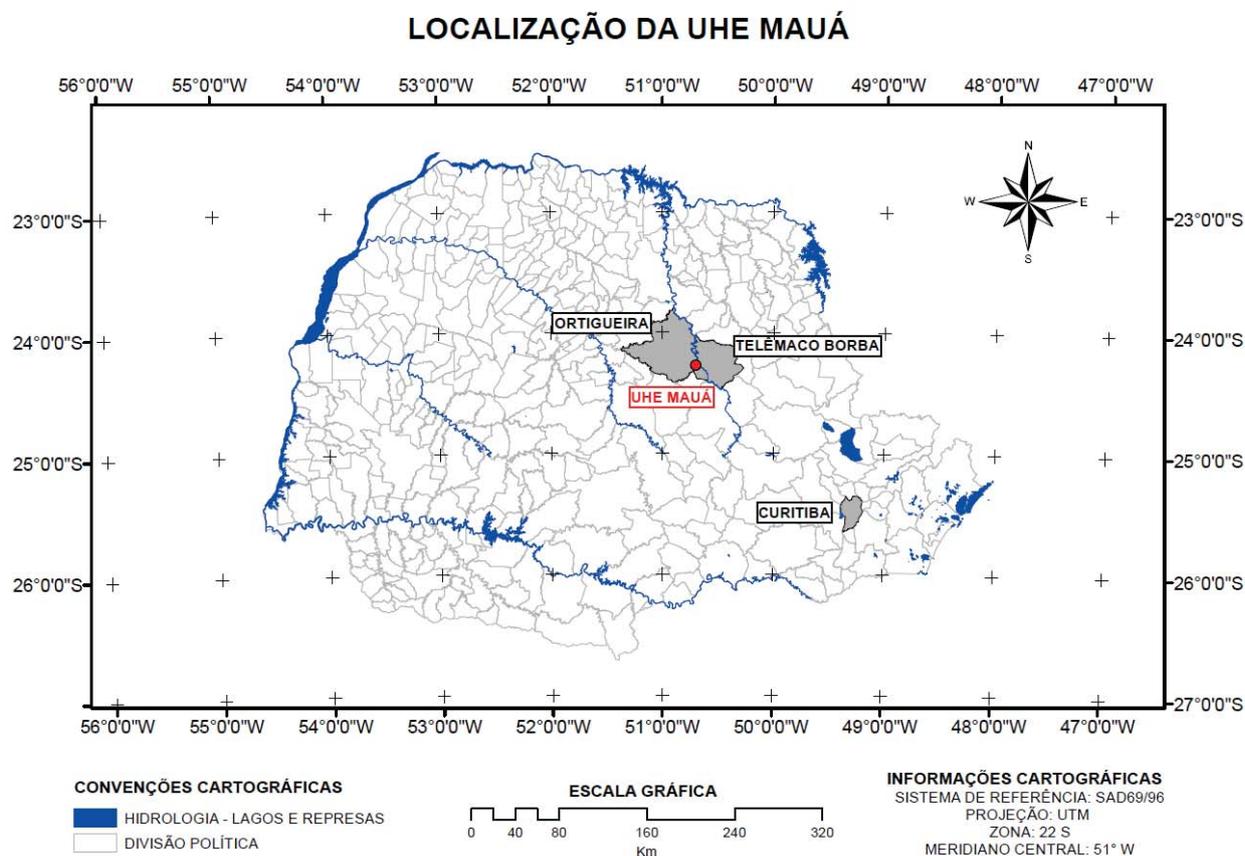


Fig. 1 - Mapa da localização da UHE Mauá.

3. METODOLOGIA

Nessa seção será realizada uma descrição da área em estudo e os desenvolvimentos necessários para a determinação do desnível utilizando nivelamento geométrico e nivelamento trigonométrico.

3.1 Nivelamento Geométrico

O método direto adotado para a determinação dos desníveis foi o nivelamento geométrico empregando-se visadas iguais, com um erro de fechamento admissível para as seções de 1mm (k refere-se à média das distâncias nivelada e contra-nivelada). Além disso, foram determinadas 19 seções de nivelamento entre os pilares PG01 e PG02 (pontos de referência utilizados no monitoramento geodésico). Na estrutura do pilar PG01 existe uma chapa

metálica denominada de RN-5, que também foi utilizada para a conexão dos pilares (Figura 02).



Fig. 2 - PG01 com a chapa metálica (RN-5).

A figura 3 mostra como foi executado o nivelamento a partir do pilar PG01.



Fig. 3 - Determinação do desnível a partir do PG01.

Além da RN-5, foram utilizados os 17 Marcos de Superfície (MSU_i) localizados na mureta de proteção na crista da barragem, na face a montante. A fim de minimizar os erros de colimação vertical do nível, de curvatura da Terra e refração atmosférica foi aplicado o método de visadas iguais, como foi mencionado anteriormente. O nível foi instalado a igual distância entre MSU_i - $MSU_{(i+1)}$, com i variando de 1 a 17 e respeitando uma tolerância máxima de 2m entre a distância de ré e vante.

Para o início do nivelamento a partir do PG01 e chegada no PG02, foi realizada uma marcação com o auxílio de um punção sobre a base de centragem forçada (FIGURA 4), a fim de repetir sempre a mesma posição de ocupação da mira em todas as campanhas.

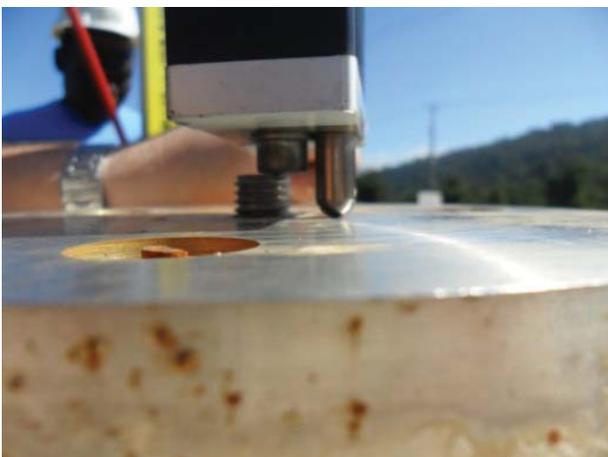


Fig. 4 - Marca no pilar para o posicionamento da mira.

Para as outras seções a mira foi apoiada sobre os pinos de aço inoxidável com altura aproximada de 2cm, como mostram as figuras 5-a e 5-b.



Fig. 5 - Mira apoiada sobre um pino e medição da altura.

Com os dados coletados a partir das 4 campanhas foram calculados os desníveis. Esses resultados são importantes para este trabalho, pois foram utilizados como referência para uma análise da qualidade da técnica *Leap-Frog*.

Para viabilizar a determinação do desnível entre os marcos da crista (MSU_i) foi necessário o projeto e adaptação de um tripé, pois os pinos encontram-se engastados sobre a mureta de proteção à 1,5m da pista. Com este tripé foi possível efetuar leituras na mira a uma altura de 2m em relação à pista que foi construída sobre a barragem. (Figuras 6-a e 6-b).

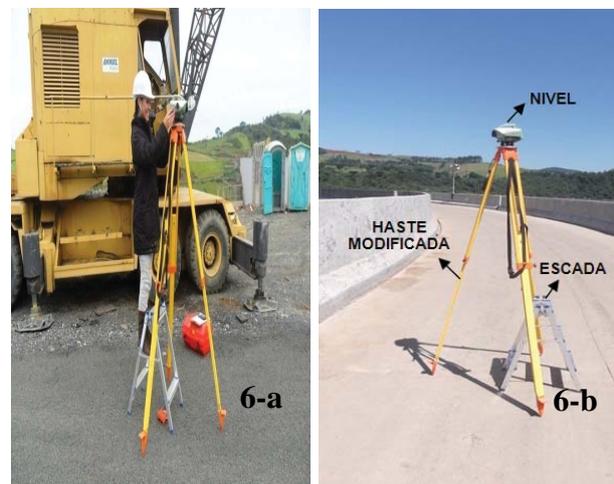


Fig. 6 - Tripé modificado.

Outro problema encontrado foi verticalizar a mira sobre o marco de superfície, tendo em vista que o nível esférico utilizado para este fim, a aproximadamente 2m da pista. A alternativa encontrada foi desenvolver um suporte com espelho que uma vez instalado na mira, permite a visualização do nível esférico (Figura 7).



Fig. 7 - Suporte para o espelho.

A figura 8 ilustra como é feito o nivelamento da bolha com o auxílio do sistema de espelho ilustrado.

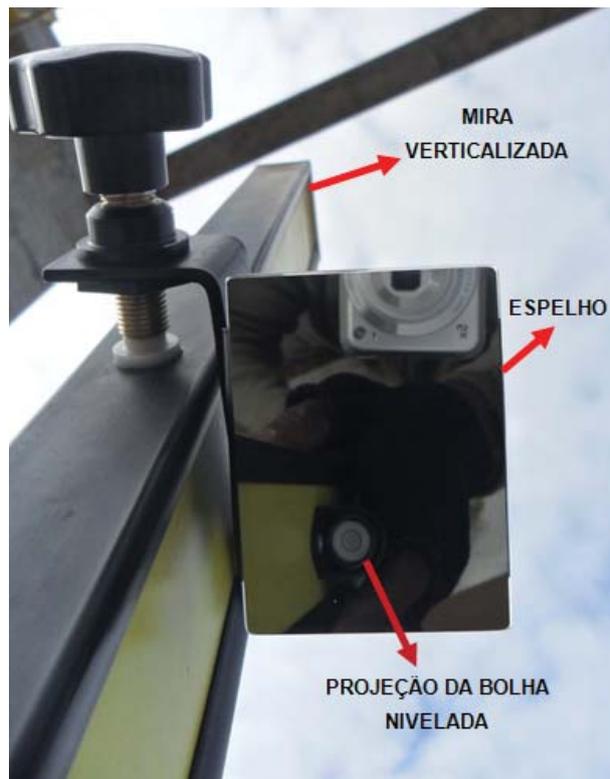


Fig. 8 - Visão da bolha no espelho acoplado à mira.

Outro equipamento desenvolvido foi um bipé para garantir a estabilização da mira posicionada sobre os marcos de superfície (Figura 9).

3.2 Nivelamento trigonométrico

A fim de analisar a precisão desse método nas condições da área de estudo, foi feito o nivelamento ocupando o pilar PG01 com a estação total, orientando-se a mesma no pilar PG02 e fazendo as visadas de vante para os 17 marcos de superfície MSU_i (Figura 10).



Fig. 9 - Bipé para garantir a verticalidade da mira.

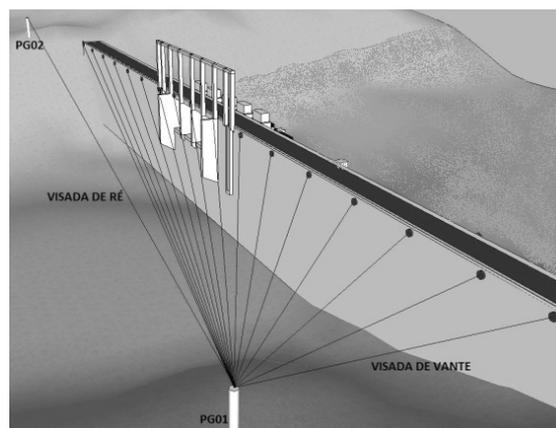


Fig. 10 - Esquema das visadas a partir do PG01.

Para instalar o refletor sobre os pinos MSU_i foram necessários utilizar adaptadores como o apresentado na figura 11.

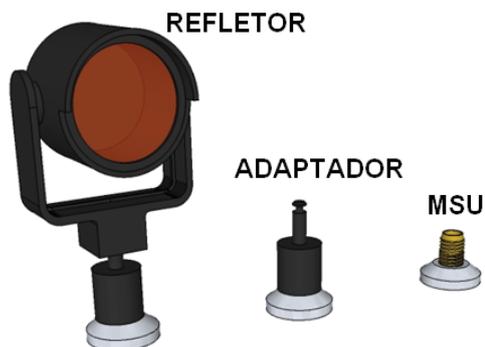


Fig. 11 - Prisma, pino adaptador e pino de aço.

Como a estação total não foi instalada a igual distância dos pontos, os efeitos da curvatura e refração atmosférica foram considerados, acrescentando-se assim a correção decorrente dos mesmos nas leituras de ré e vante. Os mesmos

desníveis foram determinados sem a aplicação da referida correção e foram comparados os resultados obtidos. A equação 1 foi utilizada para a determinação dos desníveis.

$$\Delta H_{AB} = \left(di_{VANTE} \cdot \cos(Z_{VANTE}) - h_{PVANTE} + \left(\frac{D_{hVANTE}^2}{2R} - \frac{D_{hVANTE}^2 \cdot k}{2R} \right) \right) - \left(di_{RÉ} \cdot \cos(Z_{RÉ}) - h_{PRÉ} + \left(\frac{D_{hRÉ}^2}{2R} - \frac{D_{hRÉ}^2 \cdot k}{2R} \right) \right)$$

Onde:

- ΔH_{AB} : Desnível entre dois pontos (A e B);
- di_{VANTE} : distância inclinada de vante;
- Z_{VANTE} : ângulo zenital;
- h_{PVANTE} : altura do prisma de vante;
- D_{hVANTE} : distância horizontal de vante;
- $di_{RÉ}$: distância inclinada de ré;
- $Z_{RÉ}$: ângulo zenital de ré;
- $h_{PRÉ}$: altura do prisma de ré;
- $D_{hRÉ}$: distância horizontal de ré;
- R: raio de curvatura aproximado da Terra;
- k: coeficiente de refração;

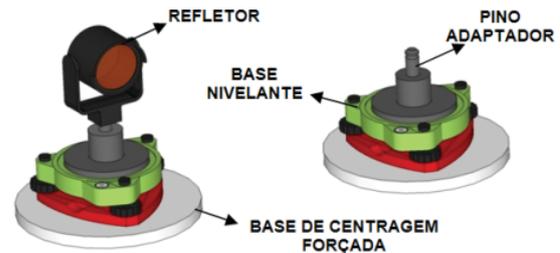


Fig. 12 - Prisma na base nivelante.

O cálculo do coeficiente de refração “k”, para a região do experimento, utilizando a equação 2, consiste em isolar o coeficiente de refração “k” da equação para o cálculo do desnível utilizando nivelamento trigonométrico. Já a equação 3 obteve-se a partir do nivelamento trigonométrico utilizando visadas recíprocas e simultâneas.

$$k = \frac{2R}{D^2} (-\Delta h_{AB} + d_i \cos Z + h_i - h_p) + 1 \quad (2)$$

$$k = 1 - \frac{Z_1 + Z_2 - 180^\circ}{180^\circ/\pi} * \frac{R}{D} \quad (3)$$

Para as duas determinações utilizou-se o pilar P01 e P02, pois o desnível entre eles foi determinado por nivelamento geométrico de precisão.

É importante salientar que a altura do prisma de ré foi diferente da altura do prisma de vante. Na ré o prisma foi colocado em uma base nivelante (Figura 12) e na vante sobre os marcos da crista como já foi descrito anteriormente (Figura 13).

Os desníveis determinados com a estação total estão referenciados ao centro do prisma, o qual está instalado nos marcos de superfície de montante com o auxílio de um pino de adaptação.



Fig. 13 - Prisma sobre Marcos de Superfície.

para o mesmo plano de referência utilizado no nivelamento geométrico, onde as miras foram posicionadas sobre o pino. Para tanto foi determinado o valor da constante a ser aplicada para esta redução (Figura 14). Estas medidas foram realizadas com auxílio de um paquímetro.

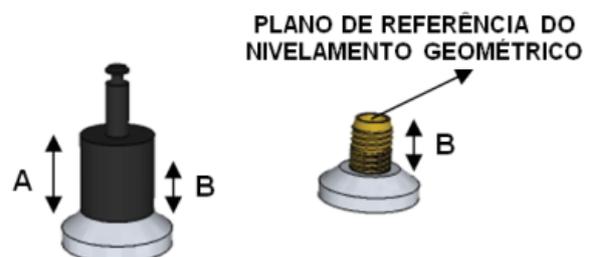


Fig. 14 - Sistema de adaptação do prisma.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados os desníveis entre os MSU_i obtidos no processamento dos dados obtidos a partir do método direto (Nivelamento Geométrico de Precisão) e indireto (Nivelamento Trigonométrico, método *Leap-Frog*), com a aplicação da correção da curvatura da terra e refração atmosférica, utilizando o valor

de k igual a 0,13 e calculando esta constante para a região da barragem utilizando as equações 2 e 3. Outro teste que foi realizado consistiu em calcular os mesmos desníveis sem a aplicação da curvatura da terra e refração atmosférica.

A tabela 1 apresenta os valores obtidos a partir do nivelamento geométrico, referente às campanhas realizadas em março, junho, julho e agosto de 2012.

Tabela 1: Desníveis relativos obtidos a partir do nivelamento geométrico.

Linha	Desnível (mm) Mar/12	Desnível (mm) Jun/12	Desnível (mm) Jul/12	Desnível (mm) Ago/12
PILAR01 - RN05	-1259,6	-1259,8	-1259,7	-1259,8
RN05 - SMU01	-2844,6	-2843,2	-2844	-2844,1
MSU01 - MSU02	-3,5	-3,7	-3,9	-3,6
MSU02 - MSU03	-1,3	-1,5	-2,2	-2,3
MSU03 - MSU04	-1,9	-2,2	-2,5	-3,0
MSU04 - MSU05	1,7	1,8	1,5	1,4
MSU05 - MSU06	1,1	0,7	0,5	0,5
MSU06 - MSU07	-4,9	-5,2	-5,2	-5,1
MSU07 - MSU08	0,4	0,2	0,4	0,3
MSU08 - MSU09	-0,3	-0,7	-0,8	-0,7
MSU09 - MSU10	4,2	4,4	4,3	4,5
MSU10 - MSU11	3,8	3,6	3,6	3,4
MSU11 - MSU12	-3,7	-3,1	-3,1	-3,2
MSU12 - MSU13	-0,8	-0,6	-0,4	-0,6
MSU13 - MSU14	5,2	5,6	5,9	5,6
MSU14 - MSU15	-2,9	-2,4	-2,0	-1,7
MSU15 - MSU16	1,8	2,3	2,4	2,3
MSU16 - MSU17	-2,1	-2,2	-2,0	-2,0
MSU17 - PILAR02	15403,9	15405,2	15407,3	15403,2
PILAR01 - PILAR02	11296,6	11299,1	11299,9	11294,8

Na sequência apresenta-se a diferença entre os desníveis, apresentados na tabela anterior, utilizando como referência os desníveis obtidos em março. Cabe ressaltar que em março e junho o túnel de deriva do rio ainda estava

aberto, portanto antes de iniciar a formação do reservatório. Já as campanhas de julho e agosto foram conduzidas durante a formação do reservatório.

Tabela 2: Diferença entre os desníveis obtidos pelo método direto.

Linha	Agosto/março (mm)	Julho/março (mm)	Junho/março (mm)
PILAR01 - RN05	-0,2	-0,1	-0,2
RN05 - SMU01	0,5	0,6	1,4
MSU01 - MSU02	-0,1	-0,4	-0,2
MSU02 - MSU03	-1,0	-0,9	-0,2
MSU03 - MSU04	-1,1	-0,6	-0,3
MSU04 - MSU05	-0,3	-0,2	0,1

MSU05 - MSU06	-0,6	-0,6	-0,4
MSU06 - MSU07	-0,2	-0,3	-0,3
MSU07 - MSU08	-0,1	0	-0,2
MSU08 - MSU09	-0,4	-0,5	-0,4
MSU09 - MSU10	0,3	0,1	0,2
MSU10 - MSU11	-0,4	-0,2	-0,2
MSU11 - MSU12	0,5	0,6	0,6
MSU12 - MSU13	0,2	0,4	0,2
MSU13 - MSU14	0,4	0,7	0,4
MSU14 - MSU15	1,2	0,9	0,5
MSU15 - MSU16	0,5	0,6	0,5
MSU16 - MSU17	0,1	0,1	-0,1
MSU17 - PILAR02	-0,7	3,4	1,3
PILAR01 - PILAR02	-1,8	3,3	2,5

As diferenças encontradas entre as campanhas estão abaixo do milímetro, portanto dentro do erro admissível (1mm√k).

A figura 15 apresenta um gráfico com as

diferenças apresentada na Tabela 1. Como é possível observar na tabela e no gráfico também, as maiores diferenças, embora próximas do milímetro, estão nas duas ombreiras da barragem.

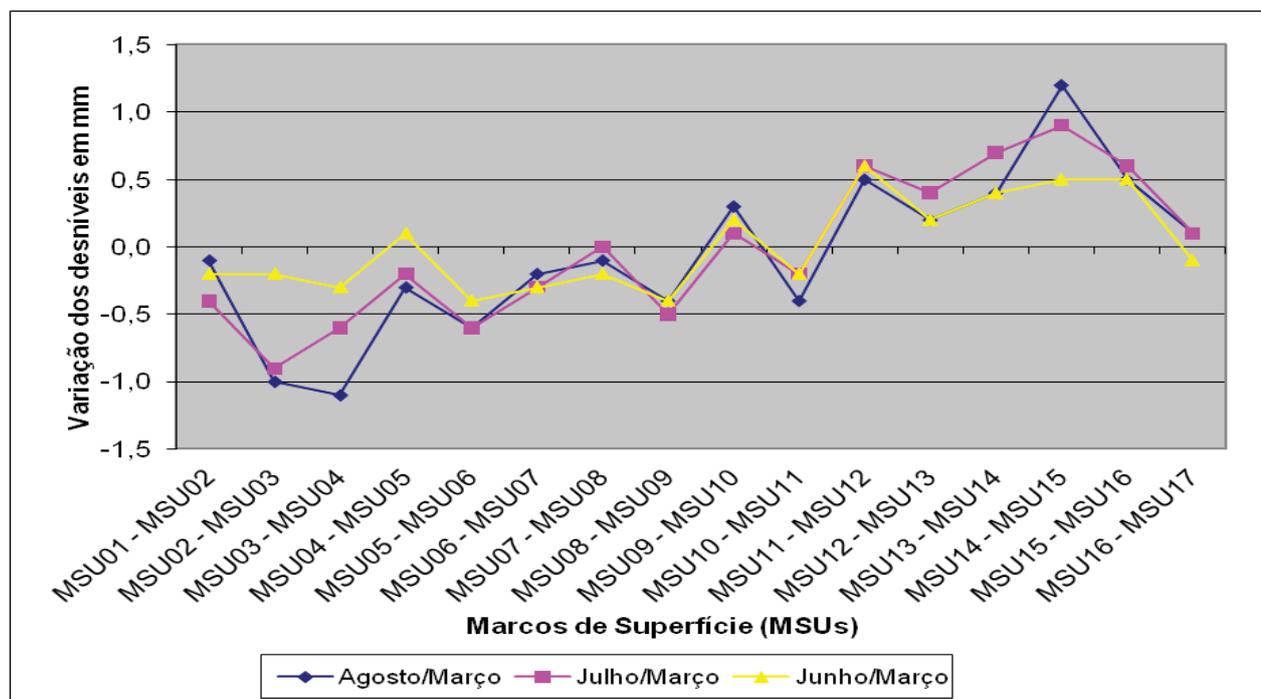


Fig. 15 - Diferenças dos desníveis entre os Marcos de Superfície – Nivelamento geométrico.

Com o nivelamento trigonométrico, utilizando *Leap-Frog* e aplicando a correção devido os efeitos de refração e curvatura da terra (com $k = 0,13$), obteve-se os desníveis para os

MSU_i, a partir dos pilares PG01 e PG02, para todas as campanhas. Com essa informação foi possível calcular a média e os desníveis entre os MSU_i, tabela 3.

Tabela 3: Desníveis relativos a partir da média entre os pilares PG01 e PG02.

Linha	Desnível (m)	Desnível (m)	Desnível (m)	Desnível (m)
	Mar/12	Jun/12	Jul/12	Ago/12
MSU01 - MSU02	-3,0	-4,0	-5,0	-4,0
MSU02 - MSU03	1,0	-2,0	-1,0	-6,0

MSU03 - MSU04	-4,0	-2,0	-4,0	-2,0
MSU04 - MSU05	1,0	2,0	0,0	1,0
MSU05 - MSU06	2,0	1,0	2,0	29,0
MSU06 - MSU07	14,0	-5,0	-6,0	-7,0
MSU07 - MSU08	0,0	0,0	1,0	1,0
MSU08 - MSU09	2,0	-1,0	2,0	2,0
MSU09 - MSU10	-6,0	4,0	1,0	1,0
MSU10 - MSU11	5,0	4,0	4,0	4,0
MSU11 - MSU12	-2,0	-3,0	-1,0	-3,0
MSU12 - MSU13	0,0	-1,0	-1,0	-2,0
MSU13 - MSU14	2,0	6,0	6,0	6,0
MSU14 - MSU15	1,0	-2,0	0,0	-1,0
MSU15 - MSU16	1,0	2,0	2,0	2,0
MSU16 - MSU17	-3,0	-2,0	-1,0	-2,0

Na sequência, utilizando a campanha de março como referência, calculou-se a diferença dos desníveis para as campanhas de junho, julho e agosto. Como dito anteriormente as campanhas de março e junho o túnel de deriva do

rio ainda estava aberto, portanto antes de iniciar a formação do reservatório. Já as campanhas de julho e agosto foram conduzidas durante a formação do reservatório.

Tabela 4: Diferença utilizando a campanha de março como referência.

Linha	agosto/março	julho/março	junho/março
	(mm)	(mm)	(mm)
MSU01 - MSU02	-1,0	-2,0	-1,0
MSU02 - MSU03	-----	-2,0	-3,0
MSU03 - MSU04	2,0	0,0	2,0
MSU04 - MSU05	0,0	-1,0	1,0
MSU05 - MSU06	-----	0,0	-1,0
MSU06 - MSU07	-----	-----	-----
MSU07 - MSU08	0,0	0,0	0,0
MSU08 - MSU09	0,0	0,0	-3,0
MSU09 - MSU10	-----	-----	-----
MSU10 - MSU11	-1,0	-1,0	-1,0
MSU11 - MSU12	-1,0	1,0	-1,0
MSU12 - MSU13	-2,0	-1,0	-1,0
MSU13 - MSU14	4,0	4,0	4,0
MSU14 - MSU15	-2,0	-1,0	-3,0
MSU15 - MSU16	1,0	1,0	1,0

Provavelmente devido a um erro no posicionamento do prisma sobre o MSU3 e o MSU6 na campanha de agosto, e MSU7 e 9 na campanha março ocorreu um erro grosseiro no desnível MSU2-3, MSU5-6, e MSU6-7 e MSU9-10. Em função disso, a comparação das

diferenças entre as campanhas nestes casos ficou prejudicada. Por este motivo não foram apresentadas na tabela.

O gráfico da figura 16 apresenta as diferenças entre os Marcos de Superfície, utilizando o Nivelamento Trigonométrico.

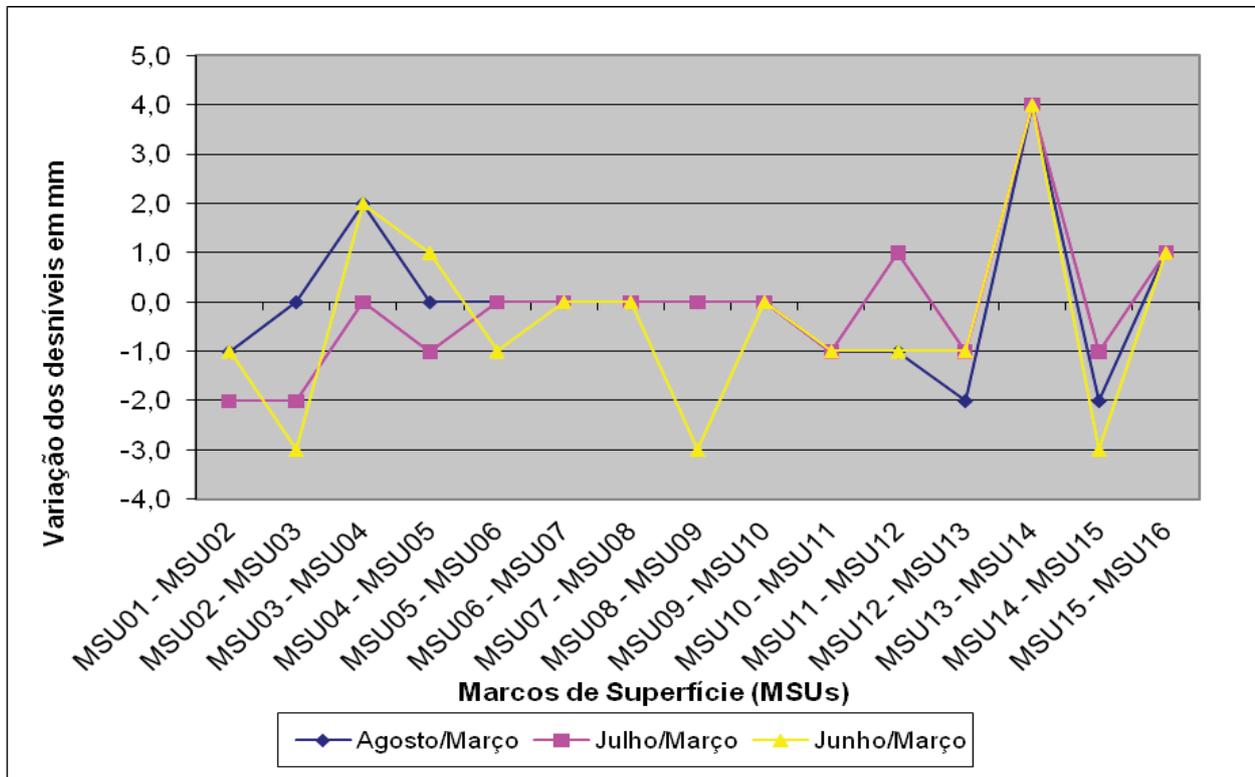


Fig. 16 – Diferenças dos desníveis entre os Marcos de Superfície – Nivelamento Trigonométrico.

Como se pode observar na tabela 2 e no gráfico da figura 17, as maiores diferenças, com exceção dos desníveis entre os MSU_i 8 e 9 na campanha de agosto, também estão nas ombreiras. Além disso, é possível observar também que o método proposto tem uma acuracidade próxima de 1 mm na maioria dos casos.

Com o objetivo de avaliar a influência da refração atmosférica e curvatura da terra no cálculo do desnível utilizando *Leap-Frog*, determinou-se este coeficiente para o local e horário da coleta dos dados utilizando as equações já apresentadas (Equações 2 e 3).

As tabelas 5 e 6 apresentam o resultado da comparação entre os desníveis obtidos utilizando *Leap-Frog* variando o *k* e ainda sem aplicar a correção dos efeitos de curvatura e refração. Os desníveis obtidos foram comparados com os mesmos desníveis obtidos com o Nivelamento Geométrico de Precisão (Tabela 5).

Tabela 5: Desníveis variando “k”

Pontos	Valor de K			
	3,00	-1,03	0,13	Sem
MSU01 - MSU02	0,5	6,3	4,8	-3,6
MSU02 - MSU03	-6,9	4,4	1,3	1,1
MSU03 - MSU04	-2,8	6,0	3,5	-1,8
MSU04 - MSU05	-4,4	1,4	-0,1	1,3
MSU05 - MSU06	-6,2	-0,3	-1,7	2,7
MSU06 - MSU07	9,5	4,6	6,4	-7,8
MSU07 - MSU08	3,1	-3,5	-0,9	-1,0
MSU08 - MSU09	-4,0	-1,7	-2,0	2,1
MSU09 - MSU10	-2,0	-1,2	-1,1	1,2
MSU10 - MSU11	-3,7	-3,6	-3,5	3,4
MSU11 - MSU12	1,3	0,6	1,4	-2,1
MSU12 - MSU13	1,6	0,0	0,9	-1,6
MSU13 - MSU14	-3,9	-7,1	-5,6	4,5
MSU14 - MSU15	2,5	-1,3	0,5	-1,7
MSU15 - MSU16	0,1	-4,0	-2,3	1,0
MSU16 - MSU17	10,7	-5,6	0,7	-5,3
MSU06 - MSU07	0,5	6,3	4,8	-3,6

Os valores de k utilizados para o cálculo dos desníveis apresentados na tabela 5 tem a seguinte configuração. $k = 3,00$ foi obtido com a equação 01 e o $k = -1,03$ com a equação 02. Admitindo que os desníveis obtidos com o nivelamento geométrico de primeira ordem são mais confiáveis, pois o erro de fechamento de uma seção é menor do que 1mm/km , estes serão utilizados como padrão. A tabela 6 apresenta esta comparação.

Tabela 6: Comparação dos desníveis

	Diferença Sem k e Geométrico	Diferença $k=0,13$ e Geométrico	Diferença $k= -1,03$ e Geométrico	Diferença $k= 3,00$ e Geométrico
PG01-MSU01	-1,3	-9,6	-13,6	0,6
PG01-MSU02	-5,2	-4,6	-11,7	13,0
PG01-MSU03	-2,8	-6,6	-12,6	8,0

PG01-MSU04	-0,2	0,0	-4,3	10,6
PG01-MSU05	-4,6	2,1	-2,8	14,0
PG01-MSU06	-5,2	-5,2	-5,2	-5,2
PG01-MSU07	0,4	0,4	0,4	0,4
PG01-MSU08	-4,9	0,6	-3,1	9,8
PG01-MSU09	1,6	5,4	3,3	10,5
PG01-MSU10	0,3	6,1	5,1	8,7
PG01-MSU11	-4,3	-4,4	-7,8	4,1
PG01-MSU12	-0,1	-2,1	-4,0	2,4
PG01-MSU13	-0,4	10,9	9,0	15,4
PG01-MSU14	-2,3	-2,7	-3,8	0,5
PG01-MSU15	-0,9	5,0	4,1	7,1
PG01-MSU16	-1,3	-9,6	-13,6	0,6
PG01-MSU17	-5,2	-4,6	-11,7	13,0

Na sequência apresentam-se os resultados da tabela 6 em forma de gráfico, através da figura 17.

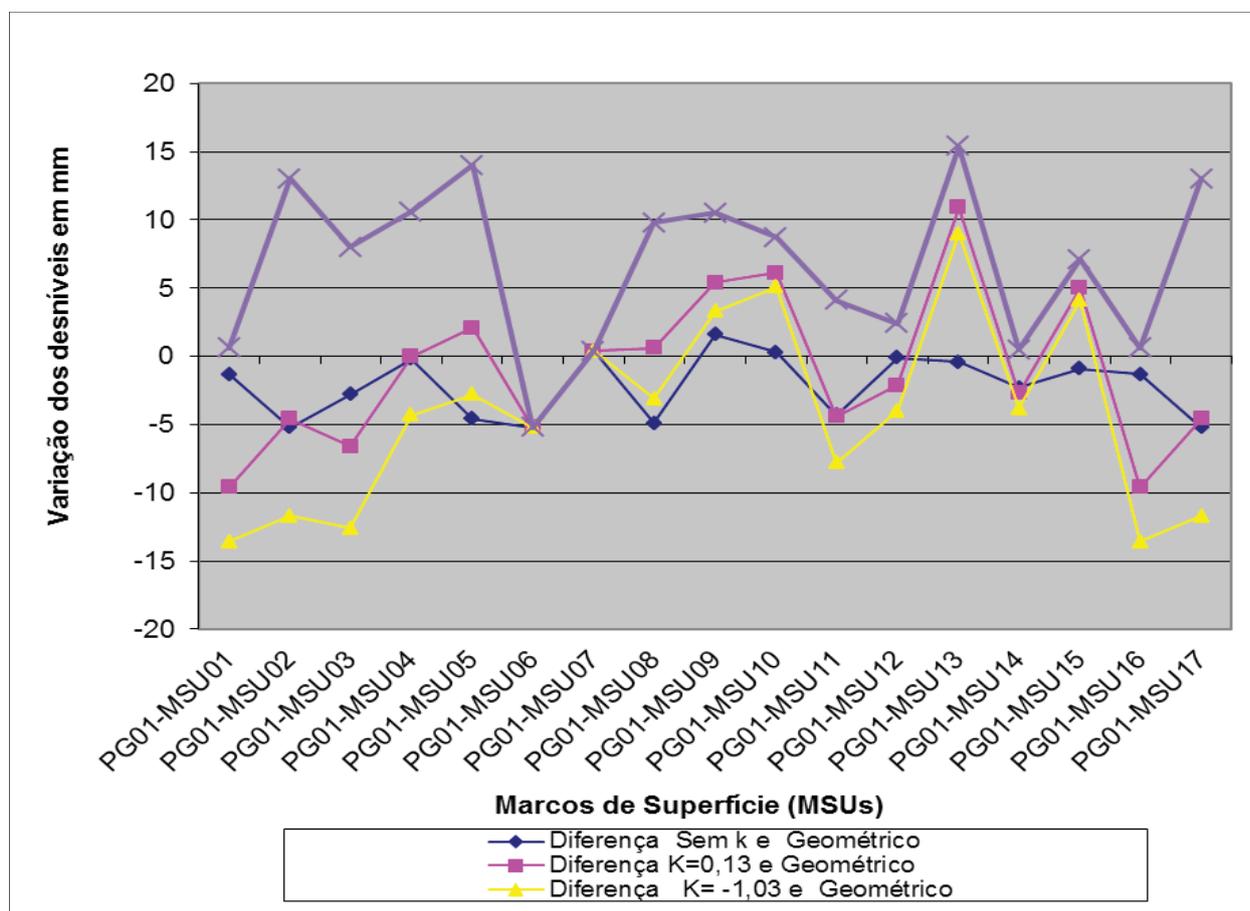


Fig. 17 - Comparação dos desníveis.

A sequência 1 exibe a diferença dos desníveis obtidos entre nivelamento geométrico e o nivelamento trigonométrico sem a utilização da correção causada pela refração atmosférica e curvatura da terra e assim sucessivamente.

5. CONCLUSÕES

Os resultados da primeira campanha encontrados com a técnica *Leap-Frog* tiveram uma precisão no fechamento por seção variando de $0,1$ a $8,9\text{mm}$, porém em 73% dos resultados atingiram uma precisão de até 2mm .

Como a distância entre os MSU_i , é pequena, aproximadamente 50m, diferenças de 2mm entre o Nivelamento Geométrico e Trigonométrico geram um erro de fechamento de aproximadamente $10\text{mm}\sqrt{k}$.

A segunda campanha apresentou alguns problemas relacionados ao horário que o levantamento foi realizado. Como foi utilizada uma estação total robotizada, a penumbra dificultou o processo de localização dos alvos. Novos testes deverão ser realizados nestas condições para avaliar melhor os resultados.

A terceira campanha atingiu uma precisão de um nivelamento de primeira ordem em 100% dos resultados, com uma variação de 1,0 a 3,8mm, sendo, portanto a campanha com um melhor aproveitamento. Na quarta campanha, em agosto, somente 23% dos resultados alcançaram uma precisão inferior a 3mm apresentando uma variação de 1,2 a 6,3mm.

Para validar a técnica *Leap-Frog* calculou-se a média entre os valores encontrados a partir do PG01 e PG02, obtendo uma melhora na qualidade dos dados, onde a precisão média apresentou resultados mais próximos à primeira ordem.

A partir das figuras 16 e 17 pôde-se observar que o valor dos desníveis possui um comportamento próximo ao das séries obtidas com o nivelamento geométrico para cada época. Com isso foi possível perceber que a técnica *Leap-Frog*, pode abrir um caminho como uma alternativa de monitoramento geodésico durante e após o período de formação do reservatório da UHE Mauá, criando assim opções de novas ferramentas que poderão ser empregadas em outras grandes estruturas.

A partir daí é possível perceber que com a continuidade dos estudos da técnica *Leap-Frog*, uma alternativa de nivelamento de precisão compatível ao nivelamento geométrico, pode ser concretizada.

Uma limitação do nivelamento trigonométrico e conseqüentemente também do método *Leap-Frog* é a influência da refração atmosférica na medida do ângulo zenital. Neste trabalho, este efeito foi modelado e em alguns casos a não aplicação desta correção gerou resultados melhores, isso ocorreu em função da pequena distância entre os MSU_i , e visadas sobre a superfície de água do reservatório.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa teve o incentivo da Universidade Federal do Paraná através do Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática e Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas que colocaram à disposição os equipamentos, instalações e aplicativos computacionais do Laboratório de Topografia (LABTOPO), de Instrumentação Geodésica (LAIG) e de Geodésia Aplicada a Engenharia (LaGAE).

O apoio financeiro foi dado pela CAPES através do consentimento da bolsa de estudos.

Este trabalho encontra-se vinculado ao projeto “Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco.” Este projeto está sendo executado numa parceria entre a COPEL/ ANEEL, LACTEC e UFPR, através de um contrato tripartite. Todos os recursos necessários para a coleta de dados foram financiados por este projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDOLFATO, S. H. D.; **Sistema de automação de níveis digitais**. Tese (doutorado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2010.

Consórcio Energético Cruzeiro do Sul. **Notícia: Concluído o lançamento de concreto na barragem da UHE Mauá**. Geração. 2011. Disponível em: < <http://www.usinamaua.com.br/noticia/35> > Acesso em: 06/09/2011.

KUPERMAN, S. C. **Barragens brasileiras de concreto compactado com rolo – Passado, presente e futuro**. In: Seminário Nacional de Concreto Compactado com Rolo, 2., Curitiba. Anais... Curitiba, 1996. p. 240-255.

RÜEGER, J. M. **Electronic Distance Measurement: an introduction**. 3th Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1996.

SILVA, R. N. F. **Avaliação da técnica de nivelamento trigonométrico, método *Leap-Frog*, na determinação de recalque em grandes estruturas**. Dissertação (mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade

Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2012.

VEIGA, L. A. K., FAGGION, P. L., *et al.* (2012). Primeiro relatório técnico do projeto

Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco.