

# A influência da base topográfica nos quantitativos de projetos conceituais de ferrovias greenfield

Paulo Henrique Torres<sup>1</sup>, Rafael Witiuk<sup>1\*</sup>, Ray William Ferraz Moraes<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Rumo Logística, Rua Emilio Bertolini, 80210-360, Curitiba Paraná

e-mail: paulo.torres@rumolog.com, [rafael.witiuk@rumolog.com](mailto:rafael.witiuk@rumolog.com), ray.ferraz@rumolog.com

**Resumo** A qualidade de projetos de infraestrutura estão diretamente associados à precisão e confiabilidade dos dados de campo. Entretanto, os levantamentos in-loco são morosos e onerosos, de modo que o uso de modelos digitais de elevação (MDEs) públicos tem sido utilizados frequentemente em estudos e projetos iniciais, muitas vezes sem a devida atenção às imprecisões incidentes nos quantitativos do projeto. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo determinar o erro estatisticamente significativo de uma base topográfica pública na região Centro Sul do Mato Grosso e sua repercussão nos quantitativos de projeto. Para a análise estatística, foram obtidas 8 amostras contendo 96 pontos de controle em terrenos ondulado e plano e determinou-se os parâmetros de estatística descritiva, bem como o intervalo de confiança da estimação do erro. Foram realizadas ainda simulações de traçado, para definir a variação dos quantitativos em função do aumento da precisão da base topográfica. Pode-se concluir pelos resultados dos parâmetros de dispersão e da estimação do erro com nível de significância de 5%, que o MDE do SRTM em regiões de topografia plana é mais preciso que para topografia ondulada. Conclui-se ainda que o erro da base topográfica SRTM pode aumentar de 60% a 100% dos quantitativos de terraplenagem e em até 400% os quantitativos de OAE.

**Palavras-Chaves:** Projeto de infraestrutura, LiDAR, SRTM

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as disciplinas de um projeto de engenharia, destacam-se os estudos e levantamentos topográficos como uma das mais importantes etapas de projeto, pois seu objetivo é definir a condição real do terreno na região estudada. A precisão das informações topográficas e suas características, definem, no âmbito de um projeto conceitual, a confiabilidade das estimativas dos volumes de terraplenagem, *trade-offs* de corte *versus* túnel e aterro *versus* viaduto. Em linhas gerais, a topografia subsidia o desenvolvimento de todas as demais disciplinas de projeto, exercendo, portanto, uma considerável influência nos quantitativos decorrentes da concepção de engenharia.

Todavia, não raras ocasiões, as empresas de desenvolvimento de projeto utilizam bases topográficas ou, modelos digitais de elevação

(MDE), públicos em virtude do elevado custo e morosidade da aquisição das informações topográficas em campo frente ao cronograma exíguo e a escassez de recursos para projetos desta natureza. Entretanto, o nível detalhamento da topografia compromete consideravelmente a confiabilidade dos produtos desenvolvidos. Desde o início dos anos 2000 um dos principais MDEs utilizados em projetos de engenharia tem sido a base *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) cuja precisão figura na ordem de 1 ponto de topografia a cada 30 metros [1,2]. Para um projeto de ferrovia, cuja geometria vertical geralmente não deve apresentar inclinações superiores a 1,5% em nenhuma condição de terreno [3], dispor de uma base topográfica de tal precisão pode impactar diretamente não apenas o aspecto econômico, mas também operacional de uma ferrovia.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo definir o erro médio estatisticamente significativo e uma estimativa da variação do quantitativo para construção de obras de infraestrutura ferroviária *greenfield* devido ao uso de bases topográficas SRTM.

## 2. PROJETOS DE INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA

No âmbito dos projetos de infraestrutura de transportes, as primeiras atividades a serem desenvolvidas, são os estudos hidrológicos, geológicos, geotécnicos e de traçado. Tais estudos constituem os elementos básicos para concepção, primeiramente, dos projetos geométricos, de interferência e de terraplenagem, que definem os limites de impacto a obra. Em seguida são desenvolvidos os projetos de drenagem, sinalização, pavimentação, obras complementares, obras de arte especiais e desapropriação, que completam os elementos da solução de engenharia.

Dentre os principais elementos que determinam a qualidade da documentação a ser desenvolvida, pode-se destacar a precisão dos dados adquiridos em campo.

Ressalta-se que os principais dados de campo de interesse em um projeto de infraestrutura estão associados a: caracterização do material de subleito, resultado dos estudos, ensaios e sondagens geotécnicos; prospecção de insumos de obra, que permite definir a qualidade e quantidade de materiais para construção e sua localização; definição das características de cheia e da qualidade das águas dos rios, por meio dos estudos batimétricos, hidrológicos e ambientais; e as condições morfológicas do terreno resultante dos levantamentos topográficos [4].

Os dados topográficos permitem a definição do modelo digital do terreno no qual são desenvolvidas todas as disciplinas de projeto. Os estudos de traçado e o projeto de geometria são particularmente dependentes dos aspectos topográficos, pois o terreno é a condicionante básica para a elaboração da diretriz de traçado em consonância com as premissas de projeto, tais quais os raios mínimos e rampas máximas. Eventuais imprecisões dos dados apresentados no modelo do terreno acarretam a alteração do

traçado e das soluções de engenharia adotadas, provocando alterações em todas as disciplinas de projeto.

## 3. SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM)

Dentre as bases topográficas ou modelos digitais de elevação (MDE) públicos o mais empregado e conhecido para o desenvolvimento de estudos de engenharia é resultado da missão especial Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Tais dados são empregados em estudos conceituais de traçado para infraestruturas lineares, tais quais estradas e dutovias, além de serem utilizadas nos estudos hidrológicos para definição de bacias e sub-bacias, necessárias para o dimensionamento dos bueiros, galerias e pontes.

A precisão de 1 ponto a cada 30 metros ou 1 arco-segundo de latitude permite a realização de estudos de traçado em nível conceitual e a delimitação de bacias hidrológicas com precisão semelhante à obtida por meio da vetorização de cartas topográficas elaboradas pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Ministério do Exército, sendo este último o método tradicionalmente mais empregado.

## 4. METODOLOGIA

Para determinação do erro estatisticamente significativo, foram tratadas 8 amostras com 96 resultados de erro obtidos em diferentes regiões de projeto e contidas em um raio limite de 5 quilômetros por amostra. Todos os dados utilizados foram extraídos de uma base topográfica LiDAR tratada com precisão da cota altimétrica de 5 centímetros utilizada para o desenvolvimento de projetos executivos de engenharia.

Os 8 conjuntos de pontos de controle foram tratados para a identificação e exclusão de possíveis *outliers* por meio do teste de Grubbs, que consiste no ordenamento crescente dos dados e identificação dos valores críticos. Tais valores são determinados por meio das equações 1 e 2, em que  $T_1$  e  $T_n$  são os resultados do fator estatístico crítico, que deve ser menor que a estatística do teste,  $\bar{x}$  é a média,  $x_1$  é o primeiro valor da amostra,  $x_n$  é o último valor da amostra e  $s$  é o desvio padrão

$$T_1 = \frac{(\bar{x} - x_1)}{s} \quad (1)$$

$$T_n = \frac{(x_n - \bar{x})}{s} \quad (2)$$

Após a eliminação dos indivíduos além do limite crítico foram calculados os valores das médias, desvio padrão, máximo, mínimo e amplitude do conjunto de dados. Após a conclusão da etapa de estatística descritiva, foi definido o intervalo de confiança para os dados de erro amostral considerando nível de significância de 5% por meio da equação 3 a seguir

$$IC = (L_i; L_s) = \left( \bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (3)$$

Onde  $\bar{x}$  é a média,  $t$  é o valor tabelado de Student para nível de confiança de 95% e 95 graus de Liberdade (gl),  $s$  é o desvio padrão amostral e  $n$  é o tamanho da amostra.

Com o intuito de determinar um valor aproximado para a variação dos quantitativos de projeto foram realizadas duas simulações de traçado ferroviário com auxílio do software AutoCAD Civil 3D a partir de uma base topográfica SRTM em terreno ondulado e em terreno plano e ondulado.

## 5. ESTUDO DAS BASES TOPOGRÁFICAS

O presente estudo foi desenvolvido a partir da obtenção de pontos de controle das bases topográficas SRTM e LiDAR, ambas utilizadas para a realização de um projeto de infraestrutura ferroviária. Os referidos pontos foram comparados com o objetivo de definir o erro relativo entre ambas as bases conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Erros amostrais entre os MDEs estudados

Nº	P4	P5	P6	P7	O1	O2	O3	O4
1	-9,7	-48,9	-14,5	-14,6	-50,5	-48,9	-50,7	-49,2
2	-9,2	-48,5	-14,4	-14,3	-48,9	-48,2	-47,0	-48,6
3	-8,4	-46,6	-13,7	-14,3	-48,5	-40,6	-43,3	-46,0
4	-7,7	-43,2	-13,2	-14,2	-47,5	-39,5	-43,2	-44,9
5	-7,6	-42,9	-13,2	-12,7	-46,9	-31,6	-42,8	-41,5
6	-7,4	-41,9	-13,2	-10,6	-46,9	-30,7	-42,4	-40,4
7	-7,0	-40,3	-13,1	-10,6	-46,0	-28,0	-42,0	-40,2
8	-6,6	-36,4	-13,0	-9,8	-45,6	-27,5	-38,9	-39,9
9	-6,4	-35,2	-13,0	-9,7	-43,2	-25,7	-34,2	-35,5
10	-6,0	-33,1	-12,6	-9,5	-42,4	-25,5	-28,8	-34,7
11	-5,7	-31,5	-12,5	-9,2	-40,0	-25,5	-27,9	-34,2
12	-5,1	-30,9	-12,4	-7,3	-39,6	-24,4	-27,6	-33,3

Nº	P4	P5	P6	P7	O1	O2	O3	O4
13	-5,1	-30,6	-12,4	-7,0	-38,4	-21,9	-27,6	-31,8
14	-4,9	-28,4	-12,3	-6,6	-37,9	-17,5	-27,2	-28,8
15	-4,9	-25,3	-12,1	-6,1	-33,6	-17,1	-26,7	-26,3
16	-4,8	-24,2	-11,7	-5,7	-30,4	-16,6	-26,5	-25,3
17	-4,5	-24,0	-11,7	-5,7	-27,2	-16,6	-25,8	-22,7
18	-4,5	-24,0	-11,7	-5,1	-27,2	-15,5	-25,3	-22,4
19	-4,0	-23,7	-11,6	-4,4	-26,5	-12,2	-25,2	-21,9
20	-3,8	-23,6	-11,5	-4,2	-26,4	-11,1	-23,7	-21,9
21	-3,5	-23,2	-10,9	-2,8	-25,2	-10,6	-23,3	-19,0
22	-3,5	-22,9	-10,9	-2,7	-24,5	-10,1	-22,7	-18,3
23	-2,4	-22,2	-10,3	-2,6	-23,2	-10,0	-20,7	-15,4
24	-2,3	-20,8	-10,2	-2,6	-22,5	-10,0	-20,7	-15,4
25	-2,0	-20,4	-10,2	-1,7	-22,4	-9,8	-19,7	-15,0
26	-2,0	-20,3	-10,0	-1,7	-22,4	-9,3	-18,9	-14,5
27	-1,9	-20,0	-10,0	-1,6	-22,4	-8,6	-18,6	-14,1
28	-1,8	-19,7	-9,9	-1,5	-22,4	-7,6	-17,8	-13,8
29	-1,8	-19,2	-9,8	-1,4	-21,9	-5,7	-16,9	-13,7
30	-1,7	-19,2	-9,5	-1,1	-21,4	-3,6	-16,4	-13,6
31	-1,5	-18,2	-9,2	-0,8	-20,5	-2,9	-16,1	-13,6
32	-1,4	-18,2	-8,9	-0,4	-16,6	-1,5	-15,5	-12,5
33	-1,3	-17,9	-8,6	-0,4	-16,4	-0,6	-14,1	-12,2
34	-1,2	-16,9	-8,5	-0,2	-16,3	0,0	-11,9	-11,3
35	-0,5	-15,9	-8,4	-0,1	-13,9	0,5	-10,5	-11,1
36	-0,1	-15,5	-7,9	-0,1	-13,8	1,5	-9,7	-9,8
37	0,0	-14,5	-7,5	0,3	-12,3	2,2	-8,2	-8,4
38	0,5	-12,6	-7,1	0,7	-11,0	3,0	-7,7	-7,5
39	0,5	-12,6	-6,1	1,0	-10,5	3,5	-7,2	-5,5
40	1,0	-12,0	-6,0	1,1	-10,2	3,5	-5,6	-4,4
41	1,2	-11,9	-5,4	1,5	-8,9	4,5	-5,3	-3,9
42	1,3	-11,8	-4,6	3,1	-8,7	5,5	-5,1	-1,6
43	1,4	-11,3	-4,5	3,3	-8,3	5,6	-4,0	-1,5
44	1,8	-10,7	-4,2	3,4	-7,3	6,5	-3,2	-0,3
45	1,9	-10,5	-3,8	3,5	-7,1	7,2	-0,8	0,2
46	1,9	-9,9	-3,0	3,9	-7,0	9,4	0,0	1,0
47	1,9	-9,0	-1,9	4,6	-6,2	10,2	0,4	2,0
48	2,4	-8,9	-1,4	4,8	-5,5	10,9	0,7	3,0
49	3,2	-7,3	-0,1	5,1	-4,8	11,8	1,3	3,3
50	3,3	-7,2	0,8	5,2	-1,7	12,7	4,8	4,3
51	3,5	-7,0	1,1	5,4	-1,7	13,5	6,5	4,5
52	3,6	-6,4	1,2	5,4	-1,3	14,0	6,7	4,6
53	4,1	-5,9	1,6	5,6	-0,2	14,1	7,6	5,4
54	4,2	-5,8	1,9	6,0	0,5	15,9	8,7	5,7
55	4,5	-5,5	3,4	6,1	1,8	16,3	9,3	7,2
56	4,8	-5,1	4,1	6,2	2,1	18,4	10,2	8,0
57	4,9	-5,1	4,3	6,9	2,7	19,9	11,8	8,1
58	5,1	-4,4	5,0	6,9	2,8	20,2	12,6	10,0
59	5,3	-4,2	5,9	7,0	3,2	20,5	12,9	12,5
60	5,3	-3,7	6,2	7,3	3,6	21,2	15,9	14,6
61	5,6	-3,5	6,6	7,6	3,6	23,3	17,5	15,2
62	5,8	-2,3	6,6	7,8	4,1	23,8	17,7	15,5
63	6,0	-1,5	7,1	7,8	4,5	23,8	18,3	15,6
64	6,1	-1,3	7,7	7,9	4,7	24,5	18,4	15,9
65	6,5	-0,4	7,9	7,9	4,8	25,3	19,0	19,3
66	6,6	-0,4	8,3	8,1	5,0	25,8	20,3	20,6
67	7,1	-0,4	9,8	8,2	7,1	25,8	25,3	21,0
68	7,5	-0,1	10,3	8,4	7,1	25,9	27,2	21,8
69	7,5	0,3	10,3	8,5	7,3	28,2	28,0	22,6
70	7,6	2,8	10,6	8,8	7,5	28,3	29,0	22,7
71	7,8	2,8	11,3	8,9	8,2	28,9	29,2	23,4
72	7,9	3,0	11,4	9,2	9,7	29,9	29,3	24,6
73	7,9	3,5	11,7	9,4	12,6	30,1	29,5	25,5
74	8,1	5,8	11,7	9,5	13,7	31,1	29,8	29,1
75	8,4	5,9	11,8	10,0	14,8	31,3	30,3	30,9
76	8,8	5,9	12,0	10,4	16,2	34,6	31,0	33,8
77	9,0	6,0	12,1	10,5	18,2	35,0	31,1	34,1
78	9,6	6,9	12,4	10,8	18,6	35,6	31,9	34,4
79	10,5	7,5	12,4	10,9	21,0	36,2	34,4	34,4
80	10,9	10,2	12,5	11,0	24,6	36,2	34,7	34,6



Nº	P4	P5	P6	P7	O1	O2	O3	O4
81	11,1	11,3	13,1	11,4	26,7	36,8	35,4	34,8
82	11,2	14,6	13,1	11,4	28,0	37,5	35,8	35,9
83	11,4	16,0	13,1	11,7	29,9	38,1	36,6	35,9
84	11,4	19,8	13,2	11,9	30,1	39,6	39,8	36,2
85	11,8	20,9	13,4	12,1	31,7	40,6	40,8	37,6
86	11,9	22,7	13,9	12,1	33,6	40,8	41,3	38,6
87	12,3	24,2	14,1	12,1	34,3	41,1	42,3	39,1
88	12,4	28,5	14,2	12,6	34,7	42,1	42,3	39,5
89	13,3	29,0	14,4	12,6	34,9	42,1	43,4	39,9
90	14,4	29,8	14,6	15,0	35,1	42,5	44,7	40,1
91	14,5	31,5	15,2	15,2	35,4	42,7	45,3	40,7
92	16,0	41,6	15,4	16,8	35,7	42,9	46,3	44,0
93	16,5	42,5	17,2	18,3	36,2	44,6	46,5	44,4
94	17,4	43,5	19,5	23,6	42,7	46,4	48,1	44,8
95	18,7	45,6	20,9	24,3	44,5	47,0	48,2	46,1
96	19,1	47,8	25,1	25,7	46,6	47,9	48,4	48,4

A diferença de precisão entre as bases apresentadas acima pode ser ilustrada nas cartas hipsométricas da região de análise apresentadas na Figura 1. Na Figura 2 estão representados exemplares de uma região plana ondulada de projeto com curvas de nível a cada 10 metros

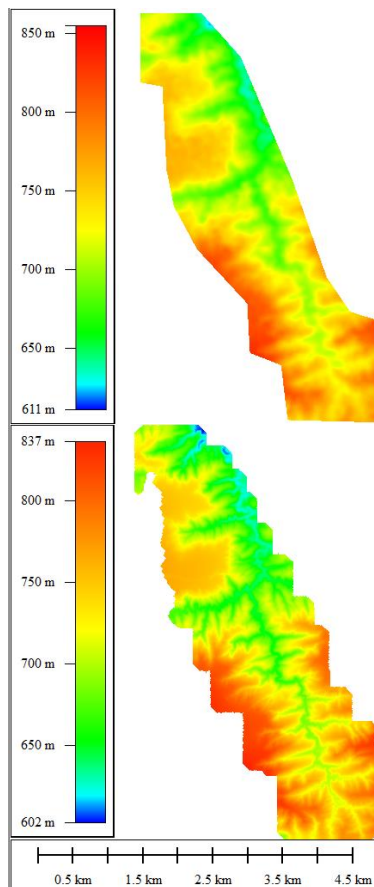


Fig. 1 Representação da base de dados SRTM (esq.) e base topográfica LiDAR (dir.) de uma mesma região de projeto.

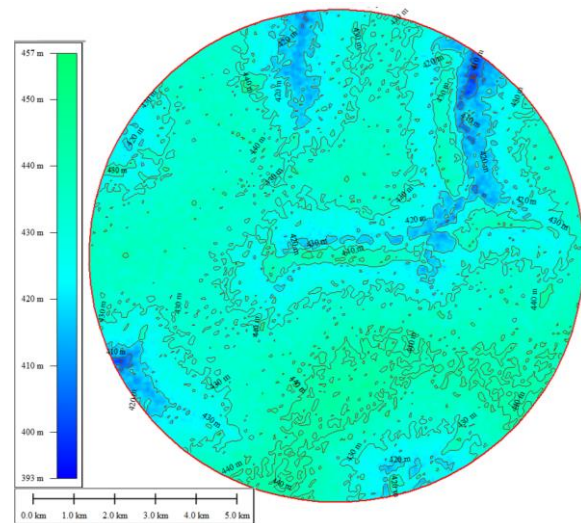
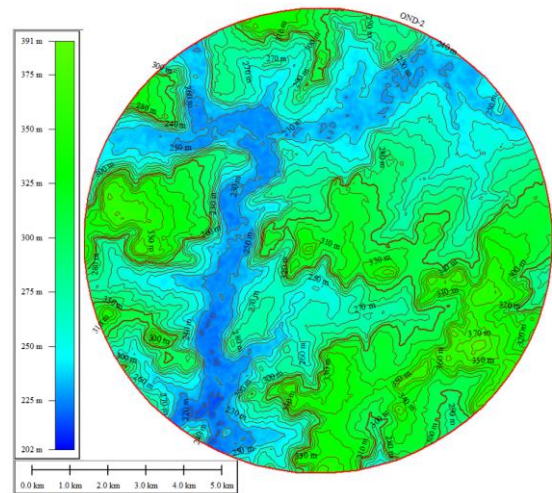


Fig. 2 Representação da base de dados SRTM em terreno ondulado – OND 2 - (esq.) e plano – PLANO 6 (dir.).

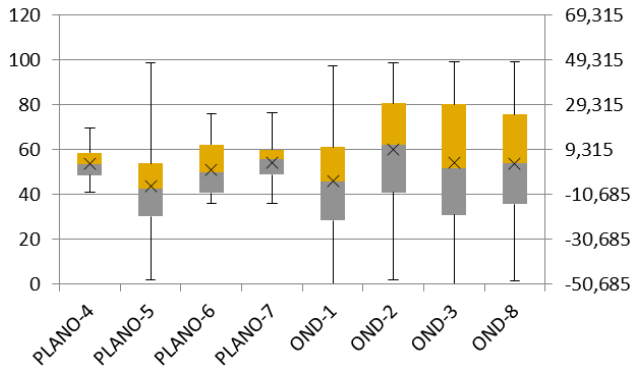
A referida base de dados foi tratada para viabilizar a eliminação dos valores críticos – ou outliers – por meio do método de Grubbs. Em seguida, foram determinados os parâmetros de estatística descritiva, tais quais a média, o desvio padrão e a amplitude dos dados. Os resultados da estatística descritiva estão apresentados na Tabela 2

Tabela 2. Resultado dos parâmetros da estatística descritiva das amostras

	$\bar{x}$	Med.	SD	Var.
<b>PLANO4</b>	3,06	2,81	7,05	49,67
<b>PLANO5</b>	-7,05	-8,12	21,62	467,34
<b>PLANO6</b>	0,29	-0,75	10,97	120,32
<b>PLANO7</b>	3,43	4,94	8,71	75,87
<b>OND-1</b>	-4,6	-5,14	25,49	649,82
<b>OND-2</b>	9,52	11,33	24,7	610,14
<b>OND-3</b>	3,43	1,03	27,91	779,1
<b>OND-8</b>	3,02	3,15	26,79	717,73

Assim, como resultado da estatística descritiva é apresentado no Gráfico 1 o box-plot da variação dos erros de topografia obitods.

Gráfico 1. Box-plot das amostras de erro entre os MDEs



No âmbito da estimação do erro foram definidos os intervalos de confiança para um nível de significância de 0,5% e 95 graus de liberdade por meio da Eq. 3, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Intervalo de confiança para o erro da base topográfica SRTM obtida estatisticamente.

	Média	SD	IC Inf.	IC Sup.	Amplitude do erro
<b>PLANO-4</b>	3,06	7,05	1,41	4,71	3,29
<b>PLANO-5</b>	-7,05	21,62	-12,10	-2,00	10,10
<b>PLANO-6</b>	0,29	10,97	-2,27	2,85	5,13
<b>PLANO-7</b>	3,43	8,71	1,39	5,47	4,07
<b>OND-1</b>	-4,6	25,49	-10,56	1,36	11,91
<b>OND-2</b>	9,52	24,7	3,75	15,29	11,54
<b>OND-3</b>	3,43	27,91	-3,09	9,95	13,04
<b>OND-8</b>	3,02	26,79	-3,24	9,28	12,52

## 6. SIMULAÇÃO DE TRAÇADO

As simulações de traçado desenvolvidas foram realizadas a partir de premissas de geometria de 1% de rampa máxima no sentido exportação e importação, altura máxima de corte de 50 metros, altura máxima de aterro de 40 metros e seção tipo com 8 metros de plataforma de terraplenagem inclinação de talude de corte e aterro de 1:1 e 1,5:1, respectivamente.

Os referidas premissas possibilitaram o desenvolvimento de traçados viáveis em ambas as bases topográficas tanto para as condições de terreno ondulado quanto para as condições de terreno plano e ondulado.

O estudo de traçado desenvolvido para o terreno ondulado a partir de uma análise local mais reduzida – com extensão de

aproximadamente 10km – evidenciaram que a alteração da base topográfica afeta principalmente os custos de terraplenagem e OAE. Os quantitativos de terraplenagem aumentaram em 105% em função da variação dos dados topográficos, principalmente na região dos talwegues, devido ao aumento do erro decorrente da cobertura vegetal, conforme apresentado na Figura 3.

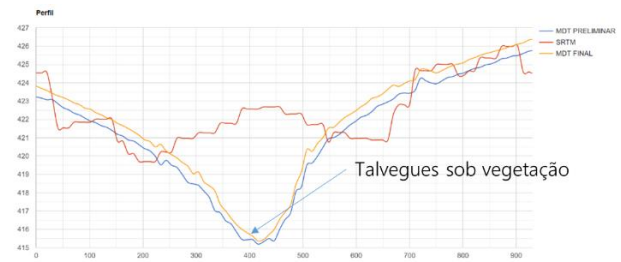


Fig. 3 Representação do perfil do terreno sob a ferrovia.

Esta característica do MDE da base SRTM é resultante do fato de que muitas vezes o ponto de amarração obtido na varredura ficou localizado na copa da vegetação. O levantamento topográfico laser, que apresenta maior densidade de pontos, permite obter ao menos um ponto no terreno sob a vegetação.

Em função da imprecisão dos dados topográficos na região dos talwegues há o aumento da quantidade de OAEs ao longo do projeto. Para a avaliação local o estudo desenvolvido na base SRTM não apresentava nenhum obra de arte especial. No entanto, com o aumento da precisão da topografia surgiu a necessidade de construção de um viaduto pois a premissa do limite de altura do aterro foi superada. Este processo é apresentado na Figura 4.

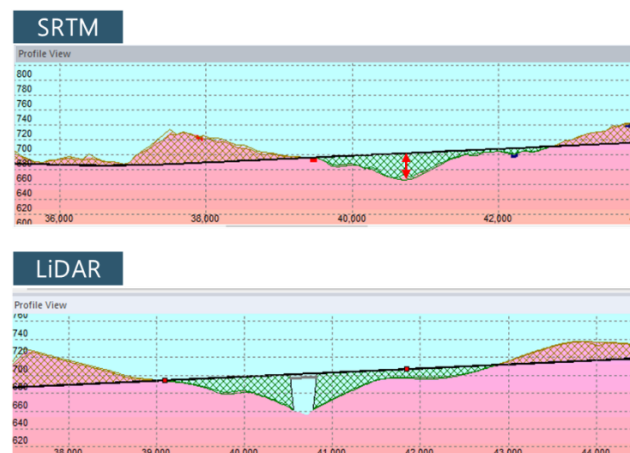


Fig. 4 Nova OAE necessária decorrente da alteração da base topográfica.

Por fim, os resultados obtidos a partir de um estudo de traçado em regiões de topografia ondulada e plana para um projeto de grandes dimensões necessitou de ajustes da posição do traçado, ao contrário da simulação de traçado local.

Este fato decorre, dentre outros aspetos; do:

- Aumento da profundidade dos talwegues;
- Refinamento da posição dos cursos d'água;
- Identificação de novos cursos d'água não representados no MDE do SRTM por estarem sob a vegetação;
- E aumento da inclinação do terreno.

Para manter a confiabilidade do estudo e não comparar traçados incompatíveis com o terreno, prosseguiu-se com os ajustes da posição do traçado, conforme representado na Figura 5.

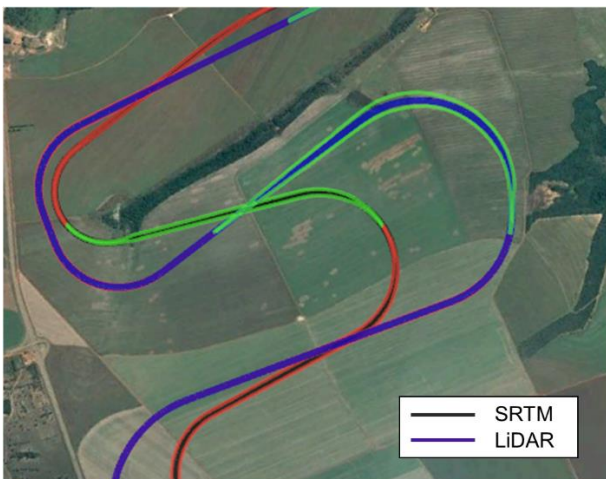


Fig. 5 Representação dos ajustes de traçado em função da variação do terreno de SRTM e LiDAR.

Apesar dos ajustes realizados para o traçado foram observados aumento de 63% no volume de terraplenagem e 403% na extensão de obras de arte especiais (OAE), notadamente, pontes e viadutos.

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Os resultados obtidos evidenciam as características de tendência central e dispersão das amostras de erro entre os modelos digitais de elevação (MDE) oriundos do SRTM e obtidos em campo por meio de levantamento LiDAR.

Observa-se primeiramente que os resultados de dispersão, traduzidos pelo desvio padrão amostral para os 4 conjuntos de amostras de terreno ondulado estão entre 24 m<sup>2</sup> e 27 m<sup>2</sup>, muito superiores aos resultados obtidos para as amostras em terreno plano, que variam de 7m<sup>2</sup> até 21m<sup>2</sup>.

No entanto, os resultados da média e mediana para as 4 amostras combinadas em terreno plano e terreno ondulado apresentam amplitudes semelhantes. Isto porque os resultados de amplitude da média e mediana é 10,48 e 13,062, respectivamente, para terrenos planos e 14,11 e 16,47, respectivamente, para terrenos ondulados.

Ao avaliar a dispersão em cada amostra individualmente, por meio da estimação do intervalo de confiança, constata-se que a amplitude do erro em terrenos planos apresenta média de aproximadamente 5 m enquanto a amplitude do erro médio para terrenos ondulados é superior a 12 metros.

Os resultados apresentados podem indicar ainda que a comparação das amostras por meio de parâmetros de tendência central – tais quais médias e medianas – não seriam os mais adequados pois os próprios pontos de controle amostrados apresentam tendência central. Esta pode ser uma razão que justifica a não definição de um padrão de erro médio para as diferentes classes de declividade do terreno.

No que se refere às simulações de traçado desenvolvidas em uma abordagem local e ampla, constata-se que a variação da base topográfica não apenas encareceu o projeto, quanto ensejou na necessidade de ajustes expressivos de geometria. Os maiores aumentos estão associados aos custos de pontes e viadutos, tendo em vista que o SRTM apresenta maior imprecisão para as regiões de talvegue.

Ademais, a terraplenagem é outro fator que promove um aumento expressivo dos quantitativos de projeto tendo em vista que esta disciplina está muito sujeita à variação, ainda que pequena, do terreno, especialmente em aterros de grande altura. Para o projeto em questão, o aumento de 64% dos custos de terraplenagem definido na simulação de traçado geral poderia ser muito superior caso



não tivessem sido realizados os ajustes de geometria.

## 7. CONCLUSÃO.

Por meio dos resultados de estatística descritiva constatou-se que os parâmetros de tendência central para as amostras de erro chegaram a atingir valores de média de até 9 metros, mediana de 11 e desvio padrão superior a 27 metros. Os resultados de dispersão indicaram que os dados de MDE do SRTM em terrenos ondulados apresentam maiores erros de altimetria quando comparados aos terrenos planos.

O erro amostral do intervalo de confiança também corroborou com a hipótese de que os dados de altimetria para terrenos ondulados são menos precisos comparado a terrenos planos.

Conclui-se ainda que a aplicação das ferramentas de tratamento estatístico para a definição da precisão de dados topográficos permitiu atingir aos objetivos evidenciados no presente trabalho, com enfoque para a necessidade de uso de parâmetros de dispersão preferencialmente frente aos parâmetros de tendência central.

Por fim, as simulações de traçado desenvolvidas permitiram evidenciar que os MDEs do SRTM subdimensionaram o CAPEX da ferrovia, como também impactam na viabilidade técnica das soluções projetadas, demonstrando a necessidade de evitar o uso indiscriminado destes dados topográficos para o desenvolvimento de projetos de engenharia.

## 8. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Coronel Paulo Afonso Lopes da Silva pelo apoio no tratamento estatístico realizado no presente estudo e aos valorosos profissionais da Topocart, em especial ao Rodrigo Vieira, pelo auxílio da tabulação dos dados.

## 8. REFERÊNCIAS

[1] UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission

(SRTM) Non-Void Filled. Disponível em: <[https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)>. Acesso em: 09 mai. 2021.

- [2] FARR, T. G., & KOBRICK, M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2000. p.583-585. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/EO081i048p00583>>. Acesso em: 09 mai. 2021.
- [3] PEREIRA, A. L. Estradas – Rodovias e Ferrovias: Projeto e Construção. Rio de Janeiro: Livro Técnico Ltda, 1958. 594 p.
- [4] NABAIS, J. da S. Manual básico de engenharia ferroviária. São Paulo, Oficina de Textos, p. 20-40, 2014.