

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

CARLOS HENRIQUE SOPCHAKI

INFLUÊNCIA DO N AMOSTRAL E DAS CARACTERÍSTICAS DO RELEVO NA
QUALIDADE DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

TESE DE DOUTORADO

CURITIBA
2016

CARLOS HENRIQUE SOPCHAKI

INFLUÊNCIA DO N AMOSTRAL E DAS CARACTERÍSTICAS DO RELEVO NA
QUALIDADE DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Tony Vinicius
Moreira Sampaio

CURITIBA
2016

Sopchaki, Carlos Henrique

Influência do N amostral e das características do relevo na
qualidade de modelos digitais do terreno / Carlos Henrique Sopchaki. –
Curitiba, 2016.

161 f. : il., tabs.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Orientador: Tony Vinícius Moreira Sampaio

Bibliografia: p.120-137

1. Acurácia. 2. Modelos digitais do terreno. 3. Declividade. I.
Sampaio, Tony Vinícius Moreira. II. Título.

CDD 574.52




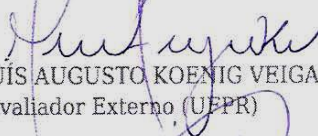
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS DA TERRA
Programa de Pós Graduação em GEOGRAFIA
Código CAPES: 40001016035P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **CARLOS HENRIQUE SOPCHAKI**, intitulada: "**INFLUÊNCIA DO N AMOSTRAL E DAS CARACTERÍSTICAS DO RELEVO NA QUALIDADE DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO.**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação.

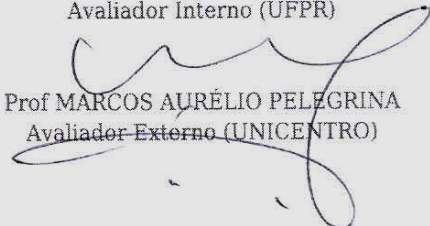
Curitiba, 27 de Julho de 2016.


Prof TONY VINICIUS MOREIRA SAMPAIO
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


Prof LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA
Avaliador Externo (UFPR)


Prof MARIA CECILIA BONATO BRANDALIZE
Avaliador Externo (UFPR)


Prof CLAUDINEI TABOR DA SILVEIRA
Avaliador Interno (UFPR)


Prof MARCOS AURÉLIO PELEGRINA
Avaliador Externo (UNICENTRO)

Dedico:

Aos meus pais: João e Marlize.

À minha esposa: Samara.

À minha filha: Kauane.

Ao amigo: Juba.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, pela estrutura disponibilizada para o meu aprendizado durante a graduação, a especialização, o mestrado e o doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPR, por ter me concedido a oportunidade de fazer este doutorado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal em Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de fomento.

À secretaria do Programa de Pós-Graduação em Geografia, na pessoa da Sr^a Adriana Cristina Oliveira e do Sr. Luiz Carlos Zem, pela competência, amizade e por estarem sempre dispostos a ajudar!

À Prof^a Dr^a Olga Lúcia Castreghini de Freitas Firkowski, pelo voto de confiança e oportunidade concedida durante o doutorado.

À professora Dr^a Maria Cecília Bonato Brandalize e aos professores Dr. Claudinei Taborda da Silveira e Dr. Luís Augusto Koenig Veiga, pelas contribuições sugeridas nas bancas de qualificação e de defesa desta tese.

Ao professor Dr. Marcos Aurélio Pelegrina pelas contribuições sugeridas na banca de defesa.

Ao Prof^o Dr. Tony Vinicius Moreira Sampaio, pela orientação, amizade e convivência nos últimos sete anos. Por sempre estar disposto a compartilhar os seus conhecimentos. Tony, sinto-me honrado em poder ter sido seu orientando. Muito obrigado!

Ao Seu Abelardo, Dona Noemi e família, moradores da Reserva de Desenvolvimento Sustentável de Lavras, em Cajati/SP, pelo acolhimento, recepção e estrutura concedida para a realização dos trabalhos de campo. E pelas boas conversas!

Ao Otacílio Lopes de Souza da Paz, colega do Laboratório de Análise de Padrões Espaciais e Cartografia Temática (LAPE-CT), que teve a ousadia de passar cerca de dois meses gerando o ICR para todo o território brasileiro.

Ao grande amigo/irmão Juliano Sartori Langaro, pela companhia, pelo apoio, pelas palavras e atitudes de incentivo, pela contribuições incondicionais, pela participação no planejamento e nos trabalhos de campo. Pela mais verdadeira e sincera amizade. Juba, não teria finalizado essa Tese sem a sua ajuda, muito obrigado!

Aos meus pais, João Carlos Sopchaki e Marlize Terezinha Sopchaki: os meus maiores exemplos. Por todo o apoio, ajuda e incentivo dados para que eu pudesse realizar o sonho de trilhar esse caminho. Pai e mãe, sem vocês jamais teria chego até aqui. Muito obrigado! Eu amo vocês!

À minha linda e amada filha Kauane, por ter sempre me apoiado com gestos e palavras e por estar sempre me ensinando dia após dia. Por compreender as minhas ausências. Pela paciência! Filha, tenho muito orgulho de ser seu pai, obrigado por fazer parte da minha vida. Papai ama muito você!

À minha amada esposa Samara, pela convivência, pela cumplicidade, pela paciência, pela compreensão, por fazer parte de minha vida, pela parceria e dedicação! Amo muito você! Sem você esse sonho não teria se concretizado!

*"Ver só com os olhos
É fácil e vão:
Por dentro das coisas
É que as coisas são."*

Carlos Queirós

RESUMO

Os Modelos Digitais do Terreno (MDTs) são importantes ferramentas para representação digital do relevo. MDTs são utilizados para obtenção de informações e avaliações de fenômenos e processos, tais como: modelagem do fluxo de água, suscetibilidade a movimento de massas, avaliação de riscos naturais e outros. Por esse motivo têm sido utilizados por diversos ramos da ciência, como Geotecnia, Geografia, Engenharias, Geologia e Gemorfologia. A qualidade dos MDTs e de seus atributos derivados é influenciada por fatores como escala, resolução espacial, interpolador, densidade amostral e morfologia do terreno. No tocante à densidade amostral e à morfologia do terreno, há uma escassez de estudos com o propósito de investigar as influências desses sobre a qualidade dos MDTs e atributos derivados. Esta carência é ainda maior, no que se refere à escalas iguais ou maiores do que 1:5000 e, sob características morfológicas do relevo em paisagens brasileiras. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa foi o de verificar a influência do n amostral e do relevo na geração de MDTs entre as escalas 1:1000 e 1:5000. Foram analisadas três tipologias de relevo, a saber: terrenos com Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado, todas situadas na região da Serra do Mar (Cajati/SP). Para o levantamento de campo foi utilizada estação total Leica TS12P, tendo sido geradas nuvens de pontos com densidades amostrais de 5,7 pontos/m² na área de ICR Ondulado, 9,6 pontos/m² na área de ICR Fortemente Ondulado e 4,5 pontos/m² na área de ICR Escarpado. Todos os pontos levantados em campo privilegiaram a máxima densidade possível e a identificação de todas as feições relevantes para caracterização do relevo. Foram separados 20 pontos de validação em cada área e gerados 24 pares de MDTs, tendo cada par o mesmo n amostral porém diferentes arranjos. Os pares de MDTs foram gerados a partir da densidade de 45 pontos/ha (0,0045 pontos/m²), chegando a 43200 pontos/ha (4,32 pontos/m²). Foi avaliado o enquadramento nas escalas 1:1000, 1:2000 e 1:5000 junto à NBR 13133, ao PEC nas classes A, B e C e ao PEC-PCD nas classes A, B, C e D. Foram efetuadas análises comparativas e estatísticas para os pares de MDTs, tanto para altimetria, quanto para a declividade. Os resultados demonstraram que quanto maior a classe de ICR, maior a densidade amostral necessária para garantir que MDTs gerados na mesma área, com mesmo n amostral, porém arranjos amostrais diferentes tenham o mesmo padrão de acurácia. A pesquisa permitiu chegar aos valores aproximados de densidade amostral que são necessários para que um MDT atinja a Classe A do PEC-PCD para as escalas 1:1000 e 1:2000, e 1:5000, nas três classes de ICR distintas. Foram deduzidas equações para o cálculo aproximado da densidade amostral necessária para que se alcance um valor desejado de acurácia (para níveis de significância de 90% e 95%). A qualidade altimétrica observada nos MDTs não foi alcançada na obtenção da declividade, a qual se mostrou extremamente sensível a quaisquer alterações na altimetria.

Palavras chave: Acurácia. MDT. Declividade. NBR 13133. PEC-PCD.

ABSTRACT

The Digital Terrain Models (DTMs) are important tools for digital relief representation. DTMs are used to obtain information and assessments of phenomena and processes, such as modeling of water flow, susceptibility to mass movement, natural hazards assessment and others. For this reason it has been used for many areas of science, such as Geotechnical, Geography, Engineering, Geology and Gemorphology. The quality of the DTMs and their derived attributes is influenced by factors such as scale, spatial resolution, interpolator, sample density and terrain morphology. Regarding the sample density and terrain morphology, there is a shortage of studies in order to investigate the influence of these on the quality of DTMs and derived attributes. This shortage is even greater in relation to the scales equal to or greater than 1: 5000 and morphological characteristics under the Brazilian landscapes relief. Thus, the aim of this study was to investigate the influence of sampling density and relief characteristics in the generation of DTMs between the scales 1: 1000 and 1: 5000. Three different types of relief were analyzed: terrains with Roughness Concentration Index (RCI) Wavy, Strongly Wavy and Rugged, all located in the region of Serra do Mar (Cajati/SP). For the field survey was used total station Leica TS12P and point clouds were generated with sample density of 5.7 points/m² in the area of RCI Wavy, 9.6 points/m² in RCI Strongly Wavy area and 4.5 points/m² in the area of RCI rugged. All points measured in the field work emphasize the maximum possible density and the identification of all relevant features to characterize the relief. Twenty check points were separated into each area and 24 pairs of DTMs were generated, each pair having the same sample size but different arrangements. Pair of DTMs were generated from 45 points/ha density (0.0045 points/m²), reaching 43200 points/ha (4.32 points/m²). The acceptance on the scales 1:1000, 1:2000 and 1:5000 of the NBR 13133, the PEC in classes A, B and C and the PEC-PCD in classes A, B, C and D was evaluated. Comparative and statistical analyzes were performed for the pairs of DTMs, both altimetry, and for the slope. The results showed that the higher the RCI class, the greater sample density required to ensure that DTMs generated in the same area with the same sample size, but different arrangements have the same pattern accuracy. The study allowed to infer approximate values of sample density which are required for a DTM reach the Class A PEC-PCD for scales 1:1000 and 1:2000 and 1:5000 in the three different classes of RCI. Equations were deduced for the approximate calculation of the sample density required for achieving a desired amount of accuracy (for significance levels of 90% and 95%). The altimetric quality observed in the DTMs was not reached in obtaining the slope, which proved extremely sensitive to any changes in the altimetry.

Keywords: Accuracy. DTM. Slope. NBR 13133. PEC-PCD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hipótese principal adotada por esta pesquisa - H1	21
Figura 2 – Antítese – hipótese nula – H0	21
Figura 3 – Localização das áreas de estudo.....	24
Figura 4 – Mapa de Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) do Brasil	26
Figura 5 – Área ICR Ondulado	27
Figura 6 – Área ICR Fortemente Ondulado.....	28
Figura 7 – Área ICR Escarpado	29
Figura 8 – Radar – Bandas X e P.....	33
Figura 9 – Atributos topográficos primários	41
Figura 10 – Diferença entre algoritmos para cálculo de declividade	43
Figura 11 – Janela móvel de 3x3	45
Figura 12 – Classificação das Cartas de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica	54
Figura 13 – PEC-PCD Altimetria – Pontos Cotados, MDS, MDE e MDT – escalas de detalhe	56
Figura 14 – PEC-PCD Altimetria – Curvas de Nível	56
Figura 15 – Pontos Amostrais – Áreas de ICR Ondulado, ICR Fortemente Ondulado e ICR Escarpado	63
Figura 16 – Arranjos amostrais nas áreas de ICR Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado	66
Figura 17 – Fórmula e exemplo de cálculo do IDW.....	67
Figura 18 – MDTs 45 pontos amostrais/ha – Área de ICR Ondulado	76
Figura 19 – Declividades obtidas em MDTs gerados com 14400 pontos/ha	96
Figura 20 – MDTs 360 pontos/ha – Área de ICR Fortemente Ondulado	105
Figura 21 - MDTs gerados a partir de densidade amostral de 360 pontos/ha sobrepostos, com curvas de nível a cada metro - Área de ICR Fortemente Ondulado	106

Figura 22 - MDTs (360 pontos/ha), com curvas de nível a cada metro e diagrama com divergências altimétricas entre os modelos - Área de ICR Fortemente Ondulado	106
Figura 23 – Quadro Síntese com os principais elementos identificados a partir dos MDTs nos artigos levantados por esta pesquisa	113

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre valores de acurácia absoluta, densidade amostral e ICR	85
Gráfico 2 – Valores absolutos das divergências altimétricas entre os pares de MDTs	86
Gráfico 3 – Percentual de divergências altimétricas acima do limite da Classe A do PEC-PCD	87
Gráfico 4 – Regressão Linear: densidades amostrais e concordâncias altimétricas – ICR Ondulado	88
Gráfico 5 – Regressão Linear: densidades amostrais e concordâncias altimétricas – ICR Fortemente Ondulado	89
Gráfico 6 – Regressão Linear: densidades amostrais e concordâncias altimétricas – ICR Escarpado	89
Gráficos 7 – Valores da acurácia para níveis de significância de 95% e 90%	91
Gráfico 8 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (95%) – ICR Ondulado	92
Gráfico 9 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (90%) – ICR Ondulado	92
Gráfico 10 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (95%) – ICR Fortemente Ondulado	92
Gráfico 11 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (90%) – ICR Fortemente Ondulado	93
Gráfico 12 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (95%) – ICR Escarpado	93
Gráfico 13 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (90%) – ICR Escarpado	93
Gráfico 14 – Comparativo Declividades: áreas concordantes entre os pares de MDTs - declividades discretizadas conforme Pereira e Lombardi Neto (2004)	95
Gráfico 15 – Índice de Exatidão Global entre as declividades	98
Gráfico 16 – Índice de Exatidão Global entre os MDTs	98
Gráfico 17 – Índice de Exatidão Global entre as declividades – ICR Fortemente Ondulado	99

Gráfico 18 – Coeficiente de Correlação Linear entre os MDTs	101
Gráfico 19 – Coeficiente de Correlação Linear entre as declividades	101
Gráficos 20 – Gráficos de Correlação Linear (área de ICR Ondulado)	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – NBR 13133 – Levantamentos topográficos altimétricos	52
Tabela 2 – N amostral dos MDTs gerados e relação com densidade amostral estipulada pela NBR 13133	65
Tabela 3 – Síntese dos Resultados dos MDTs	78
Tabela 4 – Densidades amostrais e enquadramento junto às normas brasileiras	84
Tabela 5 – Equações para cálculo de densidades amostrais e valores de acurácia.	94
Tabela 6 – Índices de Exatidão Global e Coeficientes de Correlação Linear para MDTs e Declividades gerados a partir de densidade Amostral de 1440 e 21600 pontos/ha (Área de ICR Ondulado)	103

LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTER	- <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CONCAR	- Comissão Nacional de Cartografia
DSG	- Diretoria do Serviço Geográfico
DTM	- <i>Digital Terrain Model</i>
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMQ	- Erro Médio Quadrático
ET-ADGV	- Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
ET-CQDG	- Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais
FS	- Fator de Segurança
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
ICR	- Índice de Concentração de Rugosidade
IDW	- <i>Inverse Distance Weighted</i>
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
LASER	- <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance</i>
LIDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
MDA	- Modelo Digital Altimétrico
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDS	- Modelo Digital de Superfície
MDT	- Modelo Digital do Terreno
MDTs	- Modelos Digitais do Terreno
MNE	- Modelo Numérico de Elevação
MNT	- Modelo Numérico do Terreno
NMAS	- <i>National Map Accuracy Standards</i>
NSSDA	- <i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>
PAP-PCD	- Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais
PEC	- Padrões de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	- Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
SCN	- Sistema Cartográfico Nacional

- SHALSTAB - *Shallow Landslide Stability Method*
- SIG - *Sistema de Informações Geográficas*
- SINMAP - *Stability Index Mapping*
- SMCE - *Spatial Multi-Criteria Evaluation*
- SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
- TRIGRS - *The Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*
- USGS - *United States Geological Survey*

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	15
2 - CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	24
2.1 – ÁREA DE ICR ONDULADO	26
2.2 – ÁREAS DE ICR FORTEMENTE ONDULADO E ICR ESCARPADO	27
3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA	30
3.1 – CONCEITUAÇÃO E NOMENCLATURA DE MODELOS DE REPRESENTAÇÃO DO TERRENO	30
3.2 – APLICAÇÕES ENVOLVENDO MODELOS DIGITAIS DO TERRENO	33
3.3 – ATRIBUTOS DERIVADOS DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO.....	40
3.4 – QUALIDADE	49
3.5 – PARÂMETROS, LEGISLAÇÃO E NORMAS DE VALIDAÇÃO.....	52
3.6 – APLICAÇÕES ENVOLVENDO VALIDAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO	58
4 – MATERIAIS E MÉTODOS	60
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
5.1 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA ENQUADRAMENTO JUNTO ÀS NORMAS	79
5.2 – ENQUADRAMENTO JUNTO ÀS NORMAS, ACURÁCIA, INFLUÊNCIAS DO TERRENO E DA DENSIDADE AMSTRAL	82
5.3 – DECLIVIDADE: AVALIAÇÃO DA QUALIDADE	94
5.4 – CORRELAÇÃO LINEAR	100
5.5 - IMPLICAÇÕES À UTILIZAÇÃO	104
5.5.1 – Altimetria	104
5.5.2 – Declividade	107
5.6 – ADEQUAÇÃO AO USO	110
6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
REFERÊNCIAS.....	120
APÊNDICES	138
I – ÁREA DE ICR ONDULADO	138
II – ÁREA DE ICR FORTEMENTE ONDULADO	146
III – ÁREA DE ICR ESCARPADO	155

1 – INTRODUÇÃO

Desde Miller e Laflamme (1958¹) os Modelos Digitais do Terreno (MDTs) foram ganhando espaço e são amplamente utilizados em topografia, geologia, geofísica, engenharias civil e de mineração e outras disciplinas de ciências da terra (PETRIE; KENNIE, 1990; WEIBEL; HELLER, 1993).

Na década de 1980, Ebner, Reinhardt e Hobler (1988) já afirmavam que, possivelmente, num futuro próximo os MDTs se tornariam um “produto utilizado quase que com unanimidade nas análises geoespaciais”. Erdoğan (2010) afirma que nas décadas recentes os “MDTs tornaram-se populares nas ciências ambientais para descrever a superfície topográfica”, bem como para modelar a relação entre diferentes componentes da paisagem.

Segundo Weibel e Heller (1993), os MDTs são extremamente importantes para o processamento de informações geográficas, pois auxiliam a representação, a análise e a modelagem de fenômenos inerentes à superfície terrestre, sendo portanto, a base para um “grande número” de aplicações nas ciências da terra e nas engenharias.

Aguilar *et al.* (2005) afirmam que MDTs são empregados em análises hidrológicas, gestão de recursos naturais, planejamento de transportes, análise de impactos ambientais, no cálculo do risco de inundações nas zonas urbanas, em aplicações militares e em análises do potencial de erosão de solos agrícolas.

Conforme Zhilin (2008), os MDTs encontraram ampla aplicação, pois oferecem grande flexibilidade, portanto têm sido utilizados para a análise da superfície terrestre, através do cálculo de declividade, aspecto, área, volume, parâmetros de rugosidade e parâmetros hidrológicos. No entanto, segundo o autor, a representação da superfície do terreno com precisão continua sendo um desafio para geógrafos, geomorfólogos, geólogos e engenheiros.

Os MDTs, de acordo com Shi, Wang e Tian (2014), são utilizados para representação digital do relevo, análises geoespaciais e como fonte de dados para obtenção das características do terreno, como declividade, aspecto e curvaturas.

MDTs e seus atributos derivados são parâmetros importantes para a extração de informação ou avaliação de quaisquer fenômenos ou processos através

¹ MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The Digital Terrain Model: Theory and Application. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 24, 433–422, 1958.

da análise de terreno e por isso acabam sendo pré-requisito em diferentes aplicações, tais como modelagem do fluxo de água, suscetibilidade a movimento de massas, criação de mapas em relevo, avaliação de riscos naturais e outros (MUKHERJEE *et al.*, 2015).

Modelos Digitais do Terreno possuem distintas conceituações, tais como conjuntos ordenados de números que representam a distribuição espacial das características do terreno (DOYLE, 1978), representações digitais da superfície terrestre de uma determinada região geográfica (ZHOU; LEES; TANG, 2008), ou ainda, representações digitais de variáveis referentes à uma superfície topográfica (FLORINSKY, 1998; CHAPLOT *et al.*, 2006; ERDOĞAN, 2010).

Ebner, Reinhardt e Hobler (1988) afirmavam que, na década de 1980, havia três métodos de aquisição de dados possíveis para geração de MDT: digitalização de cartas topográficas, fotogrametria e levantamento topográfico convencional.

Conforme Weibel e Heller (1993) os MDTs são gerados a partir de pontos cotados, fotogrametria (nos modos manual, semiautomático ou automático), digitalização de bases cartográficas, radar, *laser* e sonar (para terrenos subaquáticos).

De acordo com Casas *et al.* (2006) os dados de terreno para geração de MDTs podem ser coletados com levantamento topográfico ou com técnicas de fotogrametria, ou de sensoriamento remoto.

Os MDTs podem ser gerados utilizando-se tanto produtos primários, como interferometria radar, interferometria LIDAR - *Light Detection and Ranging* (aerotransportado ou terrestre), fotografias aéreas (paralaxe), e pontos cotados (com GPS ou estação total); quanto secundários, como cartas topográficas (CHAPLOT *et al.*, 2006; ERDOĞAN, 2010; CONSTANTINO; ANGELINI, 2013).

Na maioria das vezes, MDTs terão resultados (altimetria, declividade, curvaturas, e outros atributos derivados) “completamente diferentes” ao serem gerados em escalas distintas (SCHOORL; VELDKAMP, 2005).

Walsh, Butler e Malanson (1998), ao discorrerem acerca da relação entre processos e escala, afirmam que as formas são resultados de processos modeladores complexos, que atuam em determinadas faixas de escala e que, a análise desses processos irá variar de acordo com a escala adotada pelo MDT.

Assim, a observação de fenômenos sob diferentes escalas pode causar significativas alterações na sua interpretação, gerando questionamentos sobre o

impacto da observação de um fenômeno, bem como na sua forma de representação (MENEZES; COELHO NETO, 1999).

Nesse sentido, autores como Zhang e Montgomery (1994), Gao (1997), Brasington e Richards (1998), Florinsky e Kuryakova (2000), Armstrong e Martz (2003), Claessens *et al.* (2005), Chaplot (2005), Pain (2005), Sørensen e Seibert (2007), Lee, Tachikawa e Takara (2009), Hasan, Pilesjö e Persson (2012), Goulden *et al.* (2014), Shi, Wang e Tian (2014), Siefert *et al.* (2014), Mukherjee *et al.* (2015), entre outros, já demonstraram a influência nos resultados dos MDTs com a alteração tanto da escala, quanto da resolução para obtenção de atributos topográficos e modelagem de processos atuantes.

Outros autores afirmam que além da escala e resolução espacial, o interpolador utilizado também influenciará no resultado do MDT e que diferentes interpoladores aplicados sobre os mesmos dados irão gerar resultados divergentes (HUTCHINSON; GALLANT, 1999; WATSON, 1992; FISHER ; TATE, 2006).

Fisher e Tate (2006) afirmam que assim como diferentes métodos de interpolação irão gerar MDTs com divergência na altimetria, esses métodos também irão produzir quantidades de erros diferentes nos MDTs.

Assim, autores como Schut (1976), Maceachren e Davidson (1987), Li (1994), Hunter e Goodchild (1995), Desmet (1997), Gao (1997), Rees (2000), Wise (2000), Yang e Hodler (2000), Pinheiro e Kux (2003), Aguilar *et al.*, (2005), Chaplot *et al.* (2006), Su e Bork (2006), Luo, Taylor e Parker (2008), Moura (2010), Galvanin e Dal Poz (2012), Godone e Garnerio (2013), Jesus e Ladwig (2013), Giacomini *et al.* (2014), Tan e Xu (2014), entre outros, já demonstraram a influência do processo de interpolação sobre a qualidade dos MDTs.

Contudo, além da escala e resolução, o MDT é também influenciado pelas características do terreno, pelo n amostral e arranjo amostral (MAKAROVIC, 1973; ACKERMAN, 1996; AGUILAR *et al.*, 2005; CASAS *et al.*, 2006). Rodriguez, Bocher e Chancibault (2013) afirmam que MDTs podem ter acurácia maior em áreas de relevo mais suave e menor em áreas de relevo mais acidentado. Li (1992) e Li e Gold (2005²) *apud* Hobi e Ginzler (2012) afirmam que a acurácia do MDT depende da rugosidade do terreno, assim como da precisão, densidade e distribuição dos pontos amostrais.

² LI, Z.; GOLD, C. Accuracy of Digital Terrain Models. In LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. **Digital Terrain Modeling**. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005.

De acordo com Constantino e Angelini (2013) e Gong *et al.* (2000) *apud* Erdoğan (2010), MDTs são afetados por “diversas” fontes de erros, que podem ser agrupadas em três classes principais: precisão, densidade e distribuição dos dados amostrais, características da superfície e algoritmos de interpolação.

Chaplot *et al.* (2006) afirmam que dentre os trabalhos que avaliaram fatores que influenciam a acurácia de MDTs, há escassez de estudos que busquem examinar a influência do tamanho da amostra de dados e os tipos de paisagens.

Day e Muller (1988) demonstraram as alterações provocadas por arranjos e n amostrais diferentes em uma mesma área na Montanha Santa Victória, na França. Os testes foram feitos com MDTs gerados a partir de aerofotogrametria e também com digitalização de cartas topográficas, com resoluções espaciais de 30m e 80m.

Li (1992) verificou a influência da declividade do terreno gerando um MDT em uma área da Suíça e dois MDTs em área alemã a partir de aerofotogrametria com resoluções espaciais de 10m, 20m e 30m.

Aguilar *et al.* (2005) geraram sete MDTs em diferentes padrões de relevo no sudeste da Espanha, a partir de fotointerpretação, com resolução espacial de 2m, a fim de demonstrar a influência da morfologia do terreno e da resolução espacial.

Su e Bork (2006) demonstraram a influência da declividade do terreno na qualidade de MDTs gerados a partir de LIDAR (*Light Detection and Ranging*) em áreas em Edmonton, no Canadá, com densidade média das amostras de 0,75 pontos por m².

Chaplot *et al.* (2006) demonstraram a influência das características do terreno e do n amostral em MDTs gerados a partir de cartas topográficas em áreas no Laos e na França.

Erdoğan (2010) testou a influência do n amostral com intervalos de espaçamento de 2m, 4m, 10m e 20m obtidos a partir de levantamento topográfico em uma área na Turquia e chegou à conclusão de que, independente do interpolador utilizado, a densidade maior dos pontos amostrais gerava MDTs com maior acurácia e de que a magnitude e a distribuição dos erros no MDT estavam relacionadas às características do terreno e à densidade dos dados.

Guo *et al.* (2010) investigaram os efeitos da variabilidade topográfica e do n amostral em MDTs gerados a partir de LIDAR com densidade de 1,32 pontos por m², em uma área da Califórnia. Os autores concluíram que em MDTs com altas

resoluções espaciais (até 1m) o aumento da densidade amostral é capaz de reduzir significativamente os erros.

Gosciewski (2013) gerou pontos cotados fictícios a partir de uma função matemática e elaborou MDTs com densidades de 0,3; 1,4; 5,7 e 14,3 pontos a cada 100m² a fim de avaliar o efeito da densidade amostral na acurácia de MDTs.

Esta pesquisa não localizou trabalho em território brasileiro que tenha efetuado uma avaliação acerca da influência da densidade amostral e/ou arranjo amostral.

Possivelmente um dos únicos trabalhos que avaliou a influência das características morfológicas do terreno em ambientes brasileiros foi o de Miceli *et al.* (2010). Os autores analisaram a acurácia de diferentes MDTs (SRTM, TOPODATA, ASTER, EMBRAPA) para uma área na Região Amazônica e para outra área em Petrópolis-RJ e chegaram à conclusão que os mesmos MDTs apresentam padrões de acurácia distintos para cada região.

Dentre os trabalhos que buscaram avaliar os efeitos da alteração do n amostral e/ou das características do terreno percebe-se: escassez no que diz respeito a pesquisas em escalas de detalhe (escalas maiores que 1:5000); escassez em avaliações com densidades amostrais superiores a 45 pontos por hectare; uma lacuna no que diz respeito à avaliação da influência das características morfológicas do terreno em paisagens brasileiras.

Cabe destacar que há uma demanda crescente pelos MDTs em escala de detalhe, objetivando mapear formas e processos na escala da vertente em diversas áreas do conhecimento, tais como geotecnia, geofísica, pedologia, geomorfologia, avaliação ambiental e avaliação de risco, conforme pode ser observado em Paiva *et al.* (2001), Gomes (2003), Corradini, Fachini e Stevaux (2006), Uagoda, Avelar e Coelho Netto (2006), Camargo (2012), Mota *et al.* (2013).

MDTs em escala de detalhe são importantes para subsidiar a análise de suscetibilidade a deslizamentos, processos nas vertentes, morfologia fluvial, neotectônica, formações vulcânicas, estudos sobre rodovias e canais artificiais (TAROLLI, 2014).

Conforme Erdoğan (2010), MDTs em escalas de detalhe estão sendo requisitados para aplicações como mapeamento de áreas propensas a deslizamentos e análise de riscos hidrológicos.

Evans, Hengl e Gorsevski (2009) afirmam que os MDTs estão sendo construídos em escalas decimétricas e centimétricas e que os mesmos permitiriam análises precisas acerca das formas e processos.

Para Oksanen e Sarjakoski (2005), embora a utilização de MDTs em escalas de detalhe venha aumentando nas ciências ambientais, há uma escassez de estudos acerca da propagação de erros em MDTs nessas escalas.

Em suma, há referências à influência do n amostral, do arranjo amostral e das características do terreno nos MDTs (MAKAROVIC, 1973; DAY; MULLER, 1988; LI, 1992; ACKERMAN, 1996; GONG *et al.*, 2000; AGUILAR *et al.*, 2005; LI; GOLD, 2005³ *apud* HOBI; GINZLER, 2012; CASAS *et al.*, 2006; CHAPLOT *et al.*, 2006; SU; BORK, 2006; ERDOĞAN, 2010; GUO *et al.*, 2010; CONSTANTINO; ANGELINI, 2013; GOSCIIEWSKI, 2013), contudo há escassez nos estudos de avaliação dessas influências na qualidade do MDT, bem como há uma lacuna desses estudos em paisagens brasileiras.

Assim, esta pesquisa parte do seguinte pressuposto:

Se o n amostral e o arranjo amostral influenciam a acurácia dos MDTs, então dois MDTs gerados na mesma área, a partir do mesmo n amostral, porém com distintos arranjos amostrais, irão gerar resultados divergentes. Pressupõe-se que as divergências entre os modelos possam superar os limiares admissíveis para a escala, em função da diversidade de formas de relevo e dos padrões de acurácia estabelecidos.

Isto posto, a hipótese principal (H1) adotada por esta pesquisa é a de que arranjos amostrais distintos com n amostral similar, ainda que em conformidade com a densidade amostral estabelecida pelas normas brasileiras, irão gerar MDTs cujos resultados (altimetria e declividade) terão variações acima dos limiares admissíveis para a escala (Figura 1).

A fim de contrapor a hipótese principal (H1), foi formulada a sua antítese (hipótese nula – H0), na qual se admite que MDTs construídos com mesmo n amostral, porém com distintos arranjos, gerarão variações dentro dos limiares admissíveis para a escala (Figura 2).

³ LI, Z.; GOLD, C. Accuracy of Digital Terrain Models. In LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. **Digital Terrain Modeling**. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005.

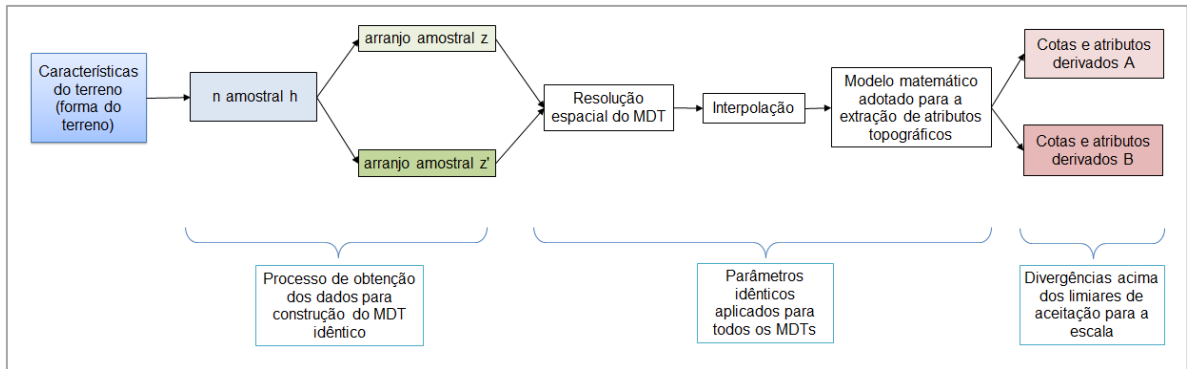


Figura 1 – Hipótese principal adotada por esta pesquisa - H1

Fonte: elaborado pelo autor (2014).

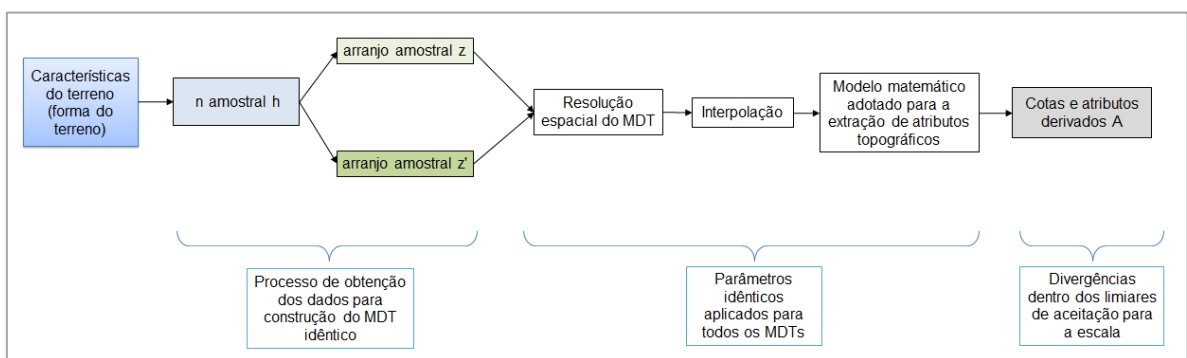


Figura 2 – Antítese – hipótese nula – H0

Fonte: elaborado pelo autor (2014).

O objetivo principal desta pesquisa é testar a hipótese principal (H1) descrita anteriormente, buscando verificar a influência do n amostral na geração de MDTs, bem como das características do terreno, adotando como referencial de análise terrenos com Índice de Concentração de Rugosidade Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado, em território nacional, nas escalas 1:1000, 1:2000 e 1:5000.

O recorte escalar se justifica devido à crescente demanda por MDTs em escalas maiores do que 1:5000, tanto por parte de profissionais da geografia, como de outros ramos da ciência, tais como geotecnia, geologia, geomorfologia, hidrologia e engenharias. O recorte espacial se justifica devido à lacuna existente no que diz respeito ao estudo da influência das características morfológicas do terreno em paisagens brasileiras.

Embora, conforme exposto anteriormente, os MDTs possam ser gerados a partir de diversos meios, o enfoque desta pesquisa será sobre MDTs obtidos a partir de pontos amostrais com grids irregulares (não sistemáticos), que podem ser obtidos a partir de pontos cotados com GPS ou estação total, ou por interferometria LIDAR (aerotransportado).

No que concerne à interferometria LIDAR, os grids irregulares ocorrem principalmente em áreas com cobertura vegetal mais densa (COELHO; VARGAS, 2007; SCHIMALESKY, 2007). Nesse sentido, Brandalize (2001) afirma que a distribuição dos pontos depende do padrão de varredura utilizado e tende a ser dispersa em áreas com vegetação densa.

Além de buscar atingir o objetivo principal, exposto anteriormente, buscar-se-á também responder às seguintes questões:

- Os valores de declividade extraídos de MDTs apresentam variação similar aos valores de altimetria?

- Quais tipologias de relevo (caracterizadas pelas classes de ICR) apresentam as maiores e menores divergências?

- A partir de qual n amostral os MDTs estarão enquadrados junto à NBR 13133 (ABNT, 1994) para as diferentes tipologias de relevo, independente do arranjo amostral?

- A partir de qual n amostral os MDTs estarão enquadrados junto aos Padrões de Exatidão Cartográfica - PEC, constantes no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 (Brasil, 1984) para as diferentes tipologias de relevo, independente do arranjo amostral?

- A partir de qual n amostral os MDTs estarão enquadrados junto à Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais – ET-ADGV (DSG, 2011) para as diferentes tipologias de relevo, independente do arranjo amostral?

- Os parâmetros estabelecidos pela NBR 13133 (ABNT, 1994) são suficientes para garantir a acurácia de MDTs gerados a partir de levantamento topográfico altimétrico?

- Os parâmetros estabelecidos pelo PEC (Brasil, 1984) são suficientes para garantir a acurácia dos MDTs?

- Os parâmetros estabelecidos pela Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais – ET-ADGV (DSG, 2011) garantem a acurácia dos MDTs?

- Dois MDTs distintos gerados para a mesma área e enquadrados junto à NBR 13133, junto à PEC e junto à ET-ADGV apresentam variações de altimetria e declividade dentro dos limiares aceitos para a escala?

- A partir de qual n amostral é possível confiar nos parâmetros obtidos junto aos MDTs para as diferentes tipologias de relevo, independente do arranjo amostral? Neste caso, qual o padrão de acurácia do modelo de acordo com os parâmetros do *National Standard for Spatial Data Accuracy* – NSSDA (FGDC, 1998)?

- Trabalhos que utilizam MDTs têm avaliado a qualidade dos modelos utilizados?

- Há uma padronização metodológica no que diz respeito às “adequações ao uso” envolvendo MDTs?

2 - CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Foram eleitas três áreas de estudo, objetivando caracterizar as três tipologias de relevo: ICR Ondulado, ICR Fortemente Ondulado e ICR Escarpado. As três porções de vertentes objeto de estudo desta pesquisa estão localizadas no município de Cajati-SP, que dista cerca de 230 km da capital paulista. Cajati faz fronteira com Jacupiranga (à leste), Eldorado (à noroeste) e Barra do Turvo (à sudoeste) (Figura 3).

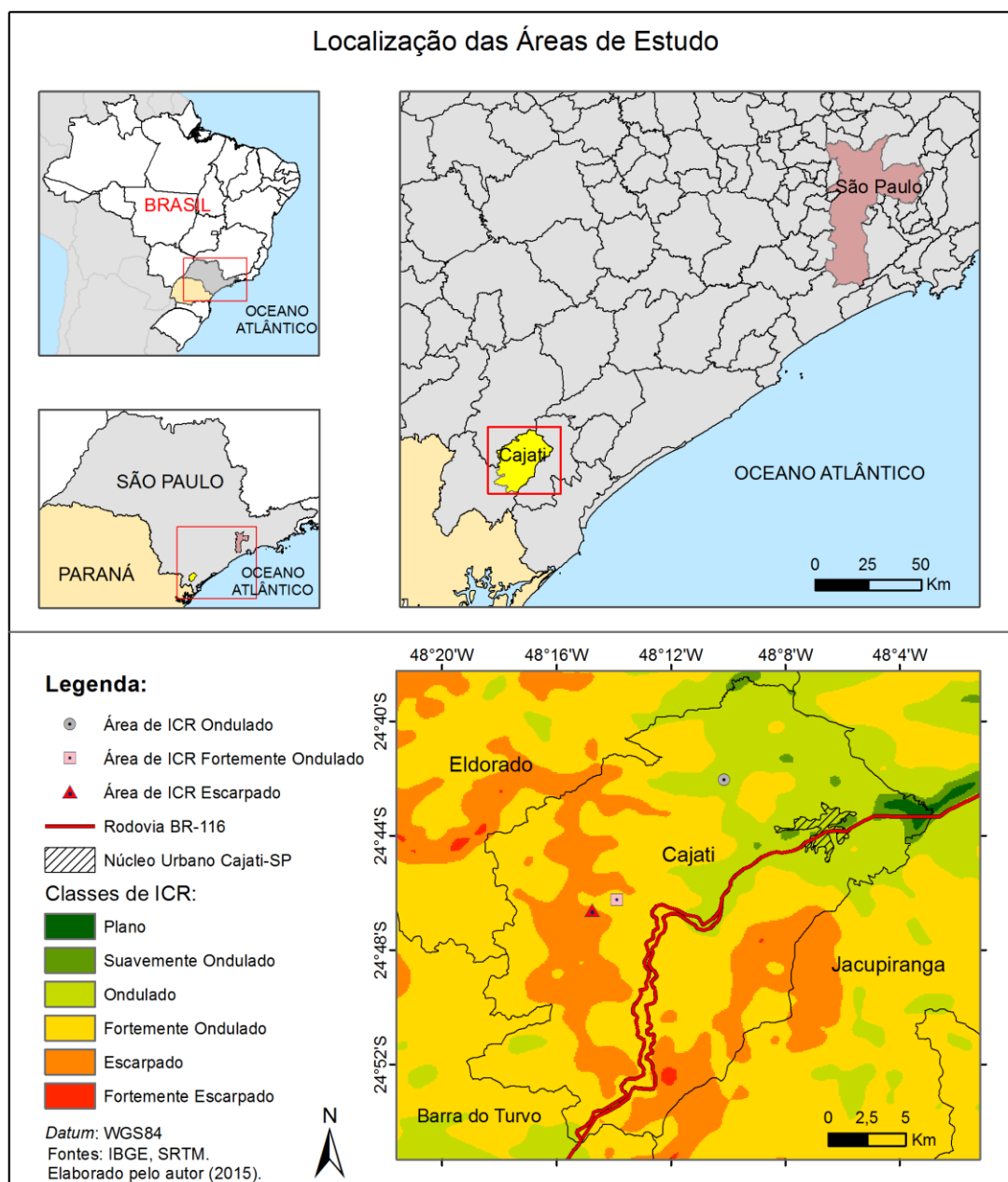


Figura 3 – Localização das áreas de estudo
Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A escolha das áreas de estudo neste município se deveu ao fato de o mesmo estar inserido em região da Serra do Mar, bem como pela disponibilidade de três vertentes nas classes de ICR previamente definidas, desprovidas de vegetação arbórea.

A escolha pelas três classes de ICR (ICR ondulado, ICR fortemente ondulado e ICR escarpado) justifica-se pelo fato da maioria dos grandes centros urbanos brasileiros estarem assentados sobre essas três classes (Figura 4), além do que, são nessas classes que predominam os acidentes geológicos em território brasileiro, conforme pode ser observado em Wolle e Carvalho (1989), Cavalcanti, Cerqueira e Rozante (2006), Tonus (2009), Vieira e Ramos (2015) e outros.

As vertentes objeto de estudo estão inseridas na Região da Serra do Mar, pois diversos autores (TROPMAIR; FERREIRA, 1987; WOLLE; CARVALHO, 1989; CAVALCANTI; CERQUEIRA; ROZANTE, 2006; TONUS, 2009; SILVEIRA *et al.*, 2013a, VIEIRA; RAMOS, 2015; dentre outros) realizaram trabalhos e inventários de movimentos de massa demonstrando o predomínio de tais acidentes em regiões de Serra do Mar, enfatizando a demanda de MDT acurados a fim de se extrair parâmetros morfométricos para inferir gênese e evolução dos processos envolvidos.

De acordo com Maack (2002), nas regiões da Serra do Mar são registrados altos valores pluviométricos, pois, a Serra constitui uma barreira natural para os ventos que sopram do oceano, que se concentram em forma de estratos, ocorrendo com frequência fenômenos de chuvas orográficas.

Ab'Saber (2003) afirma que na Serra do Mar os processos de intemperismo são frequentes e que há predomínio de morros de formas residuais, com movimentos de massa generalizados.

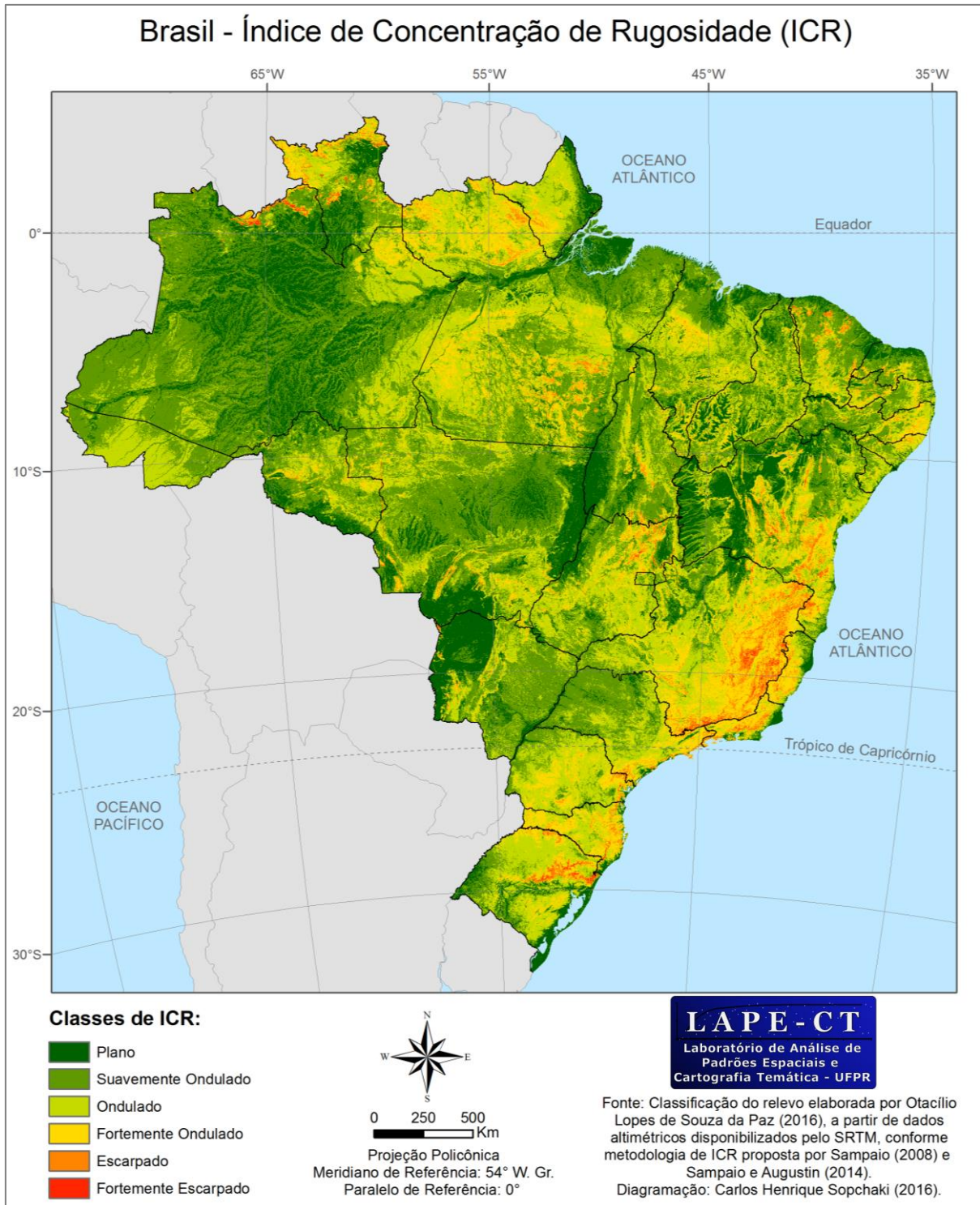


Figura 4 – Mapa de Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) do Brasil
 Fonte: Organizado pelo autor (2016).

2.1 – ÁREA DE ICR ONDULADO

A área de ICR Ondulado (Figura 5), conforme IPT (1981), localiza-se em unidade de Relevo de Morros, com morros de topos achatados, predomínio de

declividades médias a altas (acima de 15%), amplitudes locais de 100m a 200m, drenagem de média densidade, vales fechados com topos achatados e extensos e vertentes com perfis retilíneos a convexos.



Figura 5 – Área ICR Ondulado
Fonte: o autor (2015).

Com relação à litologia, esta área insere-se na Unidade Jacupiranga, do Complexo Alcalino, apresentando rochas ígneas, entre elas Dunito, Clinopiroxenito, Gabro e Quartzo Sienito (CPRM, 2006).

No que diz respeito à pedologia, de acordo com Lepsch *et al.* (1999), esta área está inserida junto à classe dos Latossolos variação Una Distróficos ou Álicos.

O clima do município de Cajati, onde está localizada a área de ICR Ondulado, de acordo com a classificação de Köppen (1948), corresponde ao Clima Tropical Úmido ou Subúmido (Am), o qual trata-se de uma transição entre o Clima Tropical Úmido ou Superúmido sem estação seca (Af) e o Clima Tropical com Inverno Seco (Aw). O clima do tipo Am apresenta temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C, com estação seca de pequena duração e totais elevados de precipitação.

De acordo com CEPAGRI (2015) a média de precipitação anual na região é de cerca de 1500mm e as temperaturas médias anuais variam entre 19,8°C e 27,8°C.

2.2 – ÁREAS DE ICR FORTEMENTE ONDULADO E ICR ESCARPADO

No que se refere à geomorfologia, de acordo com IPT (1981), as áreas de ICR Fortemente Ondulado (Figura 6) e de ICR Escarpado (Figura 7) estão inseridas em Unidade de Serras Alongadas, com Relevo Montanhoso, predomínio de declividades médias a altas (acima de 15%) e amplitudes locais acima de 300m. Esta unidade conta com vales fechados, topos angulosos, vertentes ravinadas com

perfis retilíneos, por vezes abruptas. A drenagem é descrita como sendo de alta densidade.

A litologia dessas áreas, conforme CPRM (2006), corresponde à Unidade de xistos Turvo-Cajati, que apresenta rochas metamórficas, tais como Metasiltito, Metarritmito, Anfibólio xisto, Filito e Xisto.

Com relação à pedologia, Lepsch *et al.* (1999) caracterizam os solos destas áreas como pertencentes à classe de Cambissolos Distróficos, a qual apresenta também Argissolos Vermelhos.

Assim como a área de ICR Ondulado, as áreas de ICR Fortemente Ondulado e ICR Escarpado estão localizadas em região de Clima Tropical Úmido ou Subúmido (Am), com média de precipitação anual de cerca de 1500mm e temperaturas médias anuais variando entre 19,8°C e 27,8°C.



Figura 6 – Área ICR Fortemente Ondulado
Fonte: o autor (2015).



Figura 7 – Área ICR Escarpado
Fonte: o autor (2015).

3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

3.1 – CONCEITUAÇÃO E NOMENCLATURA DE MODELOS DE REPRESENTAÇÃO DO TERRENO

Diversas formas de se reportar aos modelos de representação da superfície do terreno são encontradas na bibliografia, fazendo referência ora às elevações do terreno considerando os objetos dispostos sobre ele (vegetação, edificações, entre outros), ora às elevações do terreno propriamente ditas, desconsiderando os objetos sobre ele dispostos.

Segundo Doyle (1978), MDT (Modelo Digital do Terreno) é um conjunto ordenado de números que representa a distribuição espacial das características do terreno. Florinsky (1998) define MDT como representações digitais de variáveis referentes à uma superfície topográfica.

Para Chaplot *et al.* (2006) um MDT é uma representação numérica da topografia, normalmente construída com células de igual tamanho, cada uma contendo um valor de elevação.

Weibel e Heller (1993) definem MDT como uma representação digital de uma porção da superfície terrestre. Raaflaub e Collins (2006) definem MDTs como representações da elevação do terreno em função da localização geográfica. Para Erdogan *et al.* (2010) MDTs são representações digitais da topografia terrestre.

Doyle (1978) e Matos (2008) afirmam que o conceito inicial de MDT surgiu no final da década de 1950, associado à representação do terreno por perfis, em pesquisas de Miller e LaFlamme (1958⁴), no Instituto de Tecnologia de Massachusetts.

Miller e LaFlamme (1958⁷) *apud* El-Sheimy, Valeo e Habib (2005) afirmam que MDT é uma representação estatística da superfície contínua do solo por um grande número de pontos selecionados com coordenadas X , Y e Z conhecidas.

Matos (2008) afirma que MDTs são quaisquer conjuntos de dados numéricos que permitam associar a qualquer ponto do plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude.

⁴ MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The Digital Terrain Model: Theory and Application. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 24, 433–422, 1958.

Segundo Miranda (2010), quando a informação analógica referente à topografia é disponibilizada na forma digital, passa-se a chamar MDT ou MNT (Modelo Numérico do Terreno), que para o autor, são casos específicos do MNE (Modelo Numérico de Elevação). O autor afirma que o MNE se refere a qualquer imagem que armazene dados de elevação de uma superfície e que, quando essa elevação refere-se à altitude, denomina-se então MNT ou MDT.

Fitz (2000) afirma que os MNT atribuem valores digitais z para uma determinada porção da superfície com localização (x, y) conhecida. Segundo o autor, MNT, MDE e MDT são sinônimos.

Para Assad e Sano (1998) MNT refere-se a uma representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço, portanto, embora o termo seja frequentemente associado à altimetria, também pode ser utilizado para modelar outros tipos de informações, tais como informações geológicas ou pedológicas.

Wise (2000) chama a atenção para o fato de que termos como MDE e MDT são frequentemente utilizados como sinônimos. No entanto, segundo o autor, o MDE modela apenas a altitude, enquanto o MDT modela também as formas do terreno.

Mikhail *et al.* (1978) e Collins e Moon (1981) afirmam que diversos atributos podem ser representados via emprego de MDT, tais como elevação, pedologia, geologia, uso da terra, entre outros. Segundo os autores, os modelos são chamados de MDE quando o único atributo apresentado é a elevação.

Da mesma forma, Jordan (2007) afirma que os MDT são matrizes ordenadas de números que representam a distribuição espacial dos atributos do terreno, enquanto os MDE são conjuntos ordenados de números que representam a distribuição espacial das elevações acima de um *Datum* arbitrário em determinada paisagem.

Podobnikar (2005) afirma que em um MDT, além das informações de altitude – encontradas nos MDEs – estão disponíveis outros elementos que descrevem a superfície terrestre, tais como topografia, declividade, altimetria, curvatura, entre outros.

Casella e Padova (2013) afirmam que um MDE é a reconstrução matemática de uma superfície, independentemente do que ele representa: o terreno nu (MDT), ou o terreno mais vegetação e edifícios (MDS – Modelo Digital de Superfície).

Jordan (2007) e Mikhail *et al.* (1978) consideram os MDE como o tipo mais básico de MDT.

Para Lang (2009) MDE são representações digitais de superfícies “reais”, tais como telhados de casas e dosséis de árvores e, MDT é sinônimo de MDA (Modelo Digital Altimétrico), o qual, segundo o autor, é uma representação digital da superfície terrestre (altitude medida acima do nível do mar).

Portanto há incongruências com relação aos conceitos envolvendo modelos digitais. Contudo, autores como Mikhail *et al.* (1978), Collins e Moon (1981), Assad e Sano (1998), Wise (2000), Podobnikar (2005) e Jordan (2007) partilham da definição de que MDE seria uma representação digital da superfície que representa a altitude do terreno com todos os seus objetos (árvores, construções, entre outros), enquanto o MDT seria a representação digital da superfície, levando-se em consideração apenas o terreno propriamente dito, ou seja, no MDT não haveria a representação de objetos dispostos no terreno (casas, dosséis, entre outros).

As incongruências encontradas no meio acadêmico, no que diz respeito à conceituação de modelos digitais, não se repetem nas definições das empresas que os comercializam. Para grande parte dessas empresas (ESTEIO, 2013; ASTRIUM-GEO, 2013; MAPMART, 2013; SPATIAL ENERGY, 2013; INTERMAP, 2013), MDE refere-se ao modelo que inclui os objetos presentes na superfície (vegetação e edificações), enquanto MDT refere-se ao MDE pós-processado, a partir da filtragem dos pontos que não fazem parte da superfície (vegetação e edificações).

A definição comercial para os modelos digitais de representação do terreno gerados a partir de interferometria radar apresenta diferenças em relação aos demais tipos de modelos, em função da particularidade para obtenção dos mesmos.

Como exemplo, a ORBISAT (2013) define como Modelo Digital de Superfície (MDS) o produto gerado a partir da Banda-X, a qual inclui a altura da vegetação no modelo e, como Modelo Digital do Terreno (MDT) o produto gerado a partir da Banda-P, que tem a capacidade de penetrar na vegetação, gerando assim, um modelo que leva em consideração o terreno propriamente dito, sem representar a altura da vegetação (Figura 8).

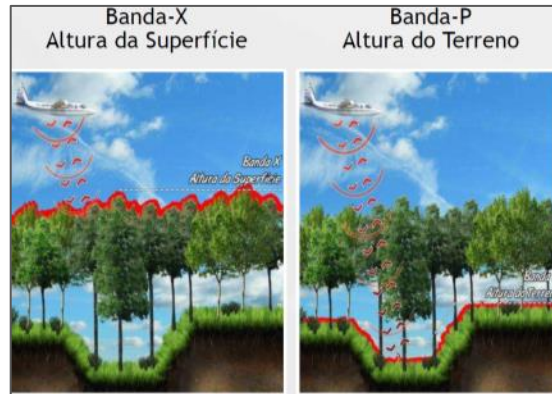


Figura 8 – Radar – Bandas X e P
Fonte: ORBISAT (2013).

Observa-se que a conceituação utilizada por vários autores como Mikhail *et al.* (1978), Collins e Moon (1981), Assad e Sano (1998), Wise (2000), Podobnikar (2005) e Jordan (2007) coincide com a definição comercial para tais produtos, definindo como MDE o modelo que inclui os objetos presentes na superfície e MDT o modelo que representa o terreno propriamente dito, sem levar em consideração os objetos sobre ela dispostos.

Por sua vez, para os produtos obtidos a partir de interferometria radar são definidos como MDS os modelos que incluem a vegetação e como MDTs os modelos que representam o terreno, sem levar em conta a vegetação.

Considerando as incongruências e divergências nos conceitos de MDT, MDE, MNT, MDA e MDS, conforme exposto anteriormente, esta pesquisa adota a conceituação de MDE para o modelo que inclui os objetos presentes na superfície e de MDT para o modelo que representa o terreno em si (desconsiderando os objetos sobre ele dispostos), em conformidade com os autores Mikhail *et al.* (1978), Collins e Moon (1981), Assad e Sano (1998), Wise (2000), Podobnikar (2005) e Jordan (2007).

3.2 – APLICAÇÕES ENVOLVENDO MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Os Modelos Digitais do Terreno têm sido aplicados em diversas áreas do conhecimento como topografia, geologia, geofísica, engenharias civil e de mineração e outras disciplinas das ciências da terra com a finalidade de obter dados das

características do terreno, como declividade, aspecto e curvaturas (PETRIE; KENNIE, 1990; WEIBEL; HELLER, 1993; SHI; WANG; TIAN, 2014).

Steinke e Sano (2011) utilizaram um MDT gerado a partir da interpolação de curvas de nível (equidistância de 5m) para identificar e delimitar padrões de formas de relevo semelhantes no Distrito Federal. Os autores identificaram chapadas, planícies e colinas.

Marchioro *et al.* (2011), ao realizarem a modelagem de produção de sedimentos em uma bacia no noroeste fluminense, geraram o MDT, a fim de extrair declividade e comprimento de rampa, a partir de interpolação de curvas de nível originadas de restituição de fotografias aéreas nas escalas de 1:20000 e 1:30000.

Couto Junior *et al.* (2011) geraram um MDT a partir de uma base cartográfica na escala 1:50000, com equidistância das curvas de nível de 20m. Os autores utilizaram o MDT para extrair dados de altimetria e declividade da Serra da Canastra a fim de evidenciar a distribuição da vegetação em relação ao relevo.

Um MDT gerado a partir de pontos cotados, com resolução espacial de 100m, foi utilizado por Conti (2009) para extração de declividade, curvatura e direção de fluxos na Plataforma Continental da região de São Sebastião-SP. Os dados foram utilizados para estudo de evidências de evolução de paleodrenagens na área de estudo.

Utilizando um MDT com resolução espacial de 100m, Stewart *et al.* (2012) extraíram dados de altitude de clareiras utilizadas por ursos em uma região do Canadá, a fim de estudar o impacto causado pelas cidades mais próximas nesses locais.

Com a finalidade de delinear unidades ambientais na região do Vulcão La Malinche, no México, Castillo-Rodríguez *et al.* (2010) extraíram dados de altitude, declividade e curvatura a partir de um MDT com resolução de 20m, gerado a partir de interpolação de curvas de nível em carta topográfica com escala 1:50000.

Com o propósito de comparar a “área real” das bacias e o “comprimento real” das drenagens com os obtidos a partir de planialtimetria, Fernandes *et al.* (2012) utilizaram para produção do MDT uma base cartográfica na escala 1:10000. Segundo os autores, os resultados demonstraram uma variação de 17,86% na área das bacias de drenagem.

Dias e Coelho Netto (2011) estudaram a influência da topografia na distribuição de gramíneas em um fragmento de floresta atlântica no Maciço da Tijuca

– RJ utilizando um MDT na escala 1:10000 para mensuração de áreas, orientação de encostas e posição topográfica.

Em trabalho de mapeamento de feições morfológicas na planície de inundação do Alto Rio Paraná, Andrade e Souza Filho (2011) geraram um MDT a partir dos dados do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER). Os autores utilizaram o MDT para geração de perfis altimétricos em diferentes locais das planícies de inundação.

Vanacôr e Rolim (2012) geraram um MDT a partir de carta planialtimétrica na escala 1:50000 para obter a altimetria, a declividade e a orientação de vertentes com o propósito de analisar a suscetibilidade a deslizamentos em uma região no nordeste do Rio Grande do Sul.

Rodriguez-Galiano e Chica-Olmo (2012) em pesquisa em uma área do Mediterrâneo, na Espanha, utilizaram um MDT com resolução espacial de 20m para extrair dados de elevação, declividade e curvatura. No entanto os autores não especificaram qual era a origem do MDT.

Santos, De Paula e Grochocki (2009) utilizaram mapeamento topográfico na escala 1:25000 para gerarem um MDT da área de drenagem da Baía de Antonina, a fim de obterem os dados de hipsometria, declividade e formas das vertentes.

Silveira *et al.* (2012) extraíram de MDT os atributos topográficos: declividade, índice de corrente máximo de fluxo, índice de umidade, índice de capacidade de transporte de sedimentos da Bacia do Arroio Do Corvo-PR. O MDT foi gerado a partir de folhas topográficas na escala 1:10000. Os autores encontraram inconsistências em posições de topos e planícies, que segundo os mesmos, se deve ao nível de generalização do MDT.

Com um MDT de resolução espacial de 75m, Geri, Amici e Rocchini (2011) extraíram dados de declividade, curvatura e orientação de vertentes na Província de Viena, no Mediterrâneo, a fim de efetuar um estudo de dinâmica da paisagem florestal da região. Os autores, porém, não informaram qual a base de dados utilizada para geração do MDT.

Gao e Liu (2012) utilizaram um MDT obtido a partir dos dados ASTER, com resolução espacial de 30m, a fim de identificar altitude e declividade de áreas desmatadas em uma província na China.

Um MDT com resolução espacial de 5m foi utilizado por Tomczyk (2011) para calcular comprimento, declividade e curvatura de vertentes em um parque na Polônia, no entanto a autora não mencionou a origem dos dados.

Por meio de regressão ponderada, Jaimes *et al.* (2010) analisaram os fatores de desmatamento no Estado do México e, para alcançar o objetivo, utilizaram um MDT com escala de 1:250000 a fim de calcular altitude e declividade das vertentes, no entanto, os autores não explicitaram qual a base de dados que originou o MDT.

Ao estudar os fatores de variação da cobertura florestal na Cordilheira Cantábrica, na Espanha, Morán-Ordóñez *et al.* (2011) extraíram dados de topografia e declividade das vertentes com o auxílio de um MDT com resolução espacial de 30m, porém os autores não apontaram qual a origem do MDT.

Um MDT com resolução espacial de 50m, reamostrado para 30m de resolução foi utilizado por Gaughan, Binford e Southworth (2009) para identificar terras altas e planície de inundação em uma bacia hidrográfica no Camboja. Os autores não fizeram menção à origem dos dados para geração do MDT.

Para verificar aspectos físicos de áreas onde ocorreram desmatamentos em uma floresta no Marrocos, Waroux e Lambin (2012) extraíram dados de altitude, curvatura e orientação de vertentes, utilizando um MDT com 25m de resolução espacial, oriundo do ASTER.

Ibarra (2012), com o intuito de identificar os fatores que agravaram o impacto de uma inundação extrema na cidade turística de Calpe, na Espanha, gerou um MDT a partir de uma base cartográfica com escala de 1:10000. O autor utilizou o modelo para delimitar as bacias hidrográficas e para extração da declividade das vertentes.

Em pesquisa sobre vulnerabilidade de espécies de plantas à mudanças climáticas na Tailândia, Trisurat, Shrestha e Kjelgren (2011) geraram um MDT a partir de interpolação de curvas de nível com equidistância de 20m. De posse do MDT, os autores extraíram dados de altitude, declividade e curvatura de vertentes da área de estudo.

Com um MDT de resolução espacial de 75m, Geri, Amici e Rocchini (2011) extraíram dados de declividade, curvatura e orientação de vertentes na Província de Viena, no Mediterrâneo, a fim de efetuarem um estudo de dinâmica da paisagem florestal da região.

Badia *et al.* (2011) extraíram dados de altitude, curvatura e orientação de vertentes a partir de um MDT com resolução de 30m.

Martin, Brabyn e Potter (2011), em pesquisa sobre as características de áreas escolhidas por furões em estações de visitação em uma floresta na Nova Zelândia, utilizaram um MDT com resolução de 25m para extrair dados de declividade, altitude, curvatura e orientação de vertentes.

Com a finalidade de efetuar a modelagem do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica na França, Fox *et al.* (2012) utilizaram um MDT com resolução espacial de 25m.

Uma classificação do micro relevo e de áreas suscetíveis à inundação foi realizada no Rio Thu Bom, no Vietnã, por Ho e Umitu (2011), utilizando MDT gerado a partir dos dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Um MDT gerado a partir do SRTM foi utilizado também por Corrêa (2011), que o associou à fotografias aéreas na escala 1:30000 a fim de extrair dados morfométricos da bacia do Riacho Salgado, gerando como resultado final mapas geomorfológicos com escalas entre 1:25000 e 1:500.

Embora Ho e Umitu (2011) e Corrêa (2011) tenham utilizado MDT gerados a partir do SRTM para identificar feições em escalas de detalhe, Miceli *et al.* (2010) demonstraram que o SRTM (resolução de 90m) atende aos Padrões de Exatidão Cartográfica (PEC) da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) na classe A apenas para a escala de 1:100000. Na escala 1:50000, na região amazônica, o SRTM não atingiu sequer o PEC classe C.

Robaina *et al.* (2011), a fim de identificar áreas de risco de movimento de massa na Região Metropolitana de Porto, em Portugal, geraram um MDT a partir de interpolação de curvas de nível de mapa base na escala 1:2000. Os autores utilizaram o MDT para cálculo da declividade das vertentes.

A fim de identificar áreas suscetíveis a escorregamento na região do Córrego Independência, em Minas Gerais, Zaidan e Fernandes (2009) utilizaram um MDT obtido a partir de interpolação de curvas de nível na escala 1:2000.

Um MDT gerado a partir de varredura de radar aerotransportado com resolução espacial de 2,5m foi utilizado por Merbitz *et al.* (2012) para mapear diferentes paisagens urbanas e identificar ilhas de calor.

Cummings *et al.* (2012) efetuaram uma pesquisa utilizando um MDT com resolução espacial de 1m, gerado a partir de LIDAR. A pesquisa versou acerca de

riscos associados ao crescimento de um lago, em Dakota do Norte, para avaliar possíveis medidas de realocação de população.

Quintanilha e Oliveira (2013) geraram um MDT a partir de cartas topográficas na escala 1:10000 a fim de mapear áreas sujeitas à inundações na região de Campos dos Goytacazes-RJ.

Silveira *et al.* (2013a) e Silveira *et al.* (2013b) produziram um MDT com resolução espacial de 5m a partir de dados planialtimétricos na escala 1:5000, os quais foram gerados a partir de fotografias aéreas na escala 1:25000.

Silveira *et al.* (2013a), extraíram através do MDT, valores referentes à declividade das vertentes a fim de utilizarem na equação do Fator de Segurança e avaliar a estabilidade das vertentes na Bacia do Rio Jacareí-PR.

Silveira *et al.* (2013b) utilizaram o MDT para obter altimetria, declividade e curvatura com a finalidade de efetuar um mapeamento de suscetibilidade a processos geoambientais na Bacia do rio Jacareí-PR.

Michel, Kobiyama e Goerl (2014) utilizaram MDT gerado a partir de digitalização de curvas de nível com espaçamento de 5m para extração de declividade e área de contribuição a fim de alimentarem os modelos SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Method*) e SINMAP (*Stability Index Mapping*), ambos baseados no Fator de Segurança (FS), para averiguar a suscetibilidade a deslizamentos na Bacia do Rio Cunha-SC.

Listo e Vieira (2015) utilizaram um MDT com 25m de resolução espacial, gerado a partir de fotointerpretação, a fim de efetuar previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos utilizando o software *TRIGRS* (*The Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*), o qual é baseado no FS.

Vieira e Ramos (2015) efetuaram mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba-SP utilizando o método SHALSTAB e utilizaram MDT com resolução de 5m gerado a partir de carta topográfica na escala 1:10000 para extrair declividade e área de contribuição.

Pradhan e Kim (2016) utilizaram MDT gerado a partir de LIDAR para obter os atributos elevação, declividade, aspecto, curvatura e índice de umidade a fim de avaliarem suscetibilidade a deslizamento aplicando os métodos SHALSTAB e SMCE (*Spatial Multi-Criteria Evaluation*), contudo, os autores não mencionaram escala, resolução espacial do MDT, bem como densidade de pontos e demais parâmetros do LIDAR.

Oberski (2016) afirma que utilizou um MDT com resolução de 1m e acurácia de 0,15m para áreas abertas a fim de testar métodos de identificação de áreas côncavas na região de Stawiguda, na Polônia.

Zhou *et al.* (2016) utilizaram um MDT produzido na escala 1:5000 com a finalidade de obter elevações e curvatura em perfil para produzirem um estudo de suscetibilidade à dolinas em área cárstica na China.

Dentre os trabalhos pesquisados para verificar aplicações envolvendo MDT destaca-se que muitos autores acabaram omitindo informações, tais como origem dos dados que foram utilizados para gerar o MDT, resolução espacial do MDT, escala do MDT. Os dados que estavam disponíveis nas pesquisas foram incluídos nos parágrafos que antecedem a este.

Ao se analisar os trabalhos que, de algum modo, extraíram dados em escala de detalhe, tais como curvatura de vertentes, orientação de vertentes e declividade das vertentes, infere-se que os mesmos dados foram extraídos a partir de MDTs com resoluções díspares. Há citações de utilizações de MDTs com as seguintes resoluções espaciais: 5m, 20m, 25m, 30m e 75m. Os trabalhos que extraíram os mesmos dados, mas que fizeram referência apenas à escala da origem dos dados do MDT apontaram para escalas da base cartográfica de 1:2000, 1:10000, 1:20000, 1:30000, 1:25000 e 1:50000.

Os trabalhos que modelaram fluxo e escoamento superficial em bacias hidrográficas utilizaram MDTs com resoluções espaciais de 25m e de 100m, bem como MDT gerado a partir de folha topográfica na escala de 1:10000.

A análise dos MDTs com resoluções espaciais entre 20m e 30m demonstra também uma gama de informações que foram derivadas desses modelos e, mais uma vez, a diversidade de escalas dessas informações: delimitação de chapadas, delimitação de planícies, perfis altimétricos de planícies de inundação, hipsometria, declividade, curvatura de vertentes e orientação de vertentes.

Ressalta-se ainda que praticamente não há menção à processos de validação dos MDTs na maioria dos trabalhos, embora haja na literatura a indicação de que é necessário proceder uma validação adequada para verificar se o MDT representa o terreno com a precisão necessária para o trabalho (EBNER; REINHARDT; HÖßLER, 1988).

3.3 – ATRIBUTOS DERIVADOS DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Zhu *et al.* (2008) afirmam que os atributos derivados a partir de MDTs estão entre os principais parâmetros para análises utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Raaflaub e Collins (2006) afirmam que atributos derivados de MDTs tem “grande aplicabilidade” nas ciências ambientais.

Os atributos derivados podem ser divididos em atributos primários, como declividade, orientação, curvatura em perfil (ou vertical), curvatura planar (ou horizontal), área de captação, e em atributos secundários como índice de umidade topográfica, índice de fluxo de energia, índice de radiação e índice de temperatura (WILSON; GALLANT, 2000; OKSANEN; SARJAKOSKI, 2005; OLAYA, 2008; MUKHERJEE *et al.*, 2015).

Wilson e Gallant (2000) afirmam que atributos primários são computados diretamente do MDT e atributos secundários (ou compostos) envolvem a combinação de atributos primários.

Segundo EL-Sheimy, Valeo e Habib (2005) os atributos são chamados de derivados porque derivam da diferença de uma célula do MDT em relação aos seus vizinhos.

Moore, Grayson e Ladson (1991) descrevem 17 atributos topográficos primários e denominam os atributos secundários como índices topográficos analiticamente compostos.

Wilson e Gallant (2000) descrevem 19 atributos topográficos primários (Figura 9) e quatro atributos topográficos secundários (índice de umidade topográfica, índice de fluxo de energia, índice de radiação e índice de temperatura) que podem ser derivados a partir de um MDT.

Valeriano (2008) classifica a declividade e a orientação como derivadas de 1ª ordem, curvaturas vertical e horizontal como derivadas de 2ª ordem e a altimetria (obtida diretamente no MDT) como derivada de ordem zero.

Esta pesquisa dará ênfase no atributo primário declividade, pois ele será objeto de análise posterior.

A declividade, conforme Florinsky (1998), é definida como o ângulo entre a tangente e um plano horizontal num dado ponto da superfície terrestre. Weibel e Heller (1993) afirmam que a declividade é um plano tangencial à superfície do MDT

em qualquer ponto e compreende duas componentes: gradiente (taxa de diferença de altitude) e orientação (direção angular).

Attribute	Definition	Significance
Altitude	Elevation	Climate, vegetation, potential energy
Upslope height	Mean height of upslope area	Potential energy
Aspect	Slope azimuth	Solar insolation, evapotranspiration, flora and fauna distribution and abundance
Slope	Gradient	Overland and subsurface flow velocity and runoff rate, precipitation, vegetation, geomorphology, soil water content, land capability class
Upslope slope	Mean slope of upslope area	Runoff velocity
Dispersal slope	Mean slope of dispersal area	Rate of soil drainage
Catchment slope	Average slope over the catchment	Time of concentration
Upslope area	Catchment area above a short length of contour	Runoff volume, steady-state runoff rate
Dispersal area	Area downslope from a short length of contour	Soil drainage rate
Catchment area	Area draining to catchment outlet	Runoff volume
Specific catchment area	Upslope area per unit width of contour	Runoff volume, steady-state runoff rate, soil characteristics, soil-water content, geomorphology
Flow path length	Maximum distance of water flow to a point in the catchment	Erosion rates, sediment yield, time of concentration
Upslope length	Mean length of flow paths to a point in the catchment	Flow acceleration, erosion rates
Dispersal length	Distance from a point in the catchment to the outlet	Impedance of soil drainage
Catchment length	Distance from highest point to outlet	Overland flow attenuation
Profile curvature	Slope profile curvature	Flow acceleration, erosion/deposition rate, geomorphology
Plan curvature	Contour curvature	Converging/diverging flow, soil-water content, soil characteristics
Tangential curvature	Plan curvature multiplied by slope	Provides alternative measure of local flow convergence and divergence
Elevation percentile	Proportion of cells in a user-defined circle lower than the center cell	Relative landscape position, flora and fauna distribution and abundance

Source. Adapted with permission from Moore, Grayson, and Ladson (1991) Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and ecological applications. *Hydrological Processes* 5: 3–30. Copyright © 1991 by John Wiley and Sons Ltd.

Figura 9 – Atributos topográficos primários
Fonte: Wilson e Gallant (2000).

O gradiente refere-se à taxa de mudança de altitude e a orientação (ou aspecto) refere-se à direção angular (WEIBEL; HELLER, 1993).

Oksanen e Sarjakoski (2005) e Valeriano (2008) afirmam que a importância da orientação está na sua influência no comportamento espacial da radiação solar incidente sobre a superfície do solo e, por isso, ela é “muito utilizada” no planejamento de atividades agrícolas. Wilson e Gallant (2000) afirmam que a orientação pode ser útil para visualizar paisagens e que é um atributo frequentemente utilizado em pesquisas ecológicas.

Raaflaub e Collins (2006) afirmam que a declividade era calculada originalmente a partir das curvas de nível obtidas em cartas topográficas e que, desta forma, seria quase impossível obter os mesmos valores para uma mesma área devido aos cálculos manuais. Os autores descreveram, de maneira expedita, oito diferentes algoritmos para cálculo de declividade a partir de MDTs e enfatizam que a escolha entre diferentes métodos gera resultados divergentes mesmo utilizando como base um MDT similar (Figura 10):

1 – Superfície utilizando um plano de três pontos (O'NEILL; MARK, 1987⁵ *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): este método utiliza três vizinhos da grade para calcular a inclinação, o ponto para onde se deseja calcular a inclinação e os seus vizinhos ao norte e a leste.

2 – Quatro vizinhos mais próximos (HOFFER *et al.*, 1979⁶ *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): utiliza os quatro vizinhos cardeais (norte, sul, leste e oeste) para calcular a declividade.

⁵ O'NEILL, M.; MARK, D. M. On the frequency distribution of land slope. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, n. 2, p. 127-136, 1987.

⁶ HOFFER, R. M.; FLEMING, M. D.; BARTOLUCCI, L. A.; DAVIS, S. M.; NELSON, R. F. **Digital processing of LANDSAT MSS and topographic data to improve capabilities for computerized mapping of forest cover types.**[San Juan Mountains, Colorado. 1979.

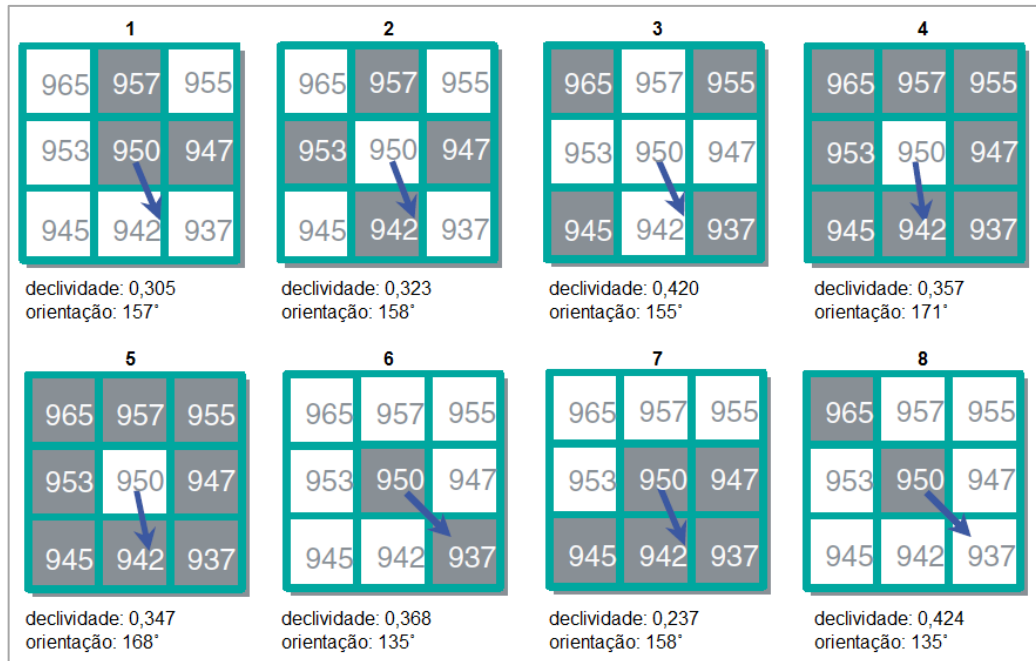


Figura 10 – Diferença entre algoritmos para cálculo de declividade
Fonte: Raaflaub e Collins (2006), adaptado pelo autor (2015).

3 – Quatro vizinhos diagonais (JONES, 1998⁷ *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): utiliza os vizinhos a nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste do ponto central para calcular a declividade.

4 – Oito vizinhos não ponderados (SHARPNACK; AKIN, 1969⁸ *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): utiliza os oito pontos adjacentes para calcular a declividade.

5 – Um sobre a distância ao quadrado (HORN, 1981⁹ *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): utiliza os oito pontos vizinhos e calcula a declividade a partir de média ponderada ao inverso do quadrado das distâncias.

6 – Gradiente máximo de descida (O'CALLAGHAN; MARK, 1984¹⁰ *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): procura entre os oito vizinhos adjacentes o que possui o valor mais baixo de altitude.

⁷ JONES, K. H. A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. **Computers & Geosciences**, v. 24, n. 4, p. 315-323, 1998.

⁸ SHARPNACK, D. A.; AKIN, G. An algorithm for computing slope and aspect from elevations. **Photogrammetric Engineering**, v. 35, n. 3, p. 247-&, 1969.

⁹ HORN, B. K.P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, v. 69, n. 1, p. 14-47, 1981.

¹⁰ O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer vision, graphics, and image processing**, v. 28, n. 3, p. 323-344, 1984.

7 – Múltiplos vizinhos de descida (QUINN *et al.*, 1991¹¹ *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): procura entre os oito vizinhos adjacentes todos os que possuem cotas altimétricas de valores inferiores ao ponto central e calcula a declividade através da média entre estes vizinhos.

8 – Máximo gradiente adjacente (SKIDMORE, 1989¹² *apud* RAAFLAUB; COLLINS, 2006): este algoritmo busca entre os oito vizinhos adjacentes o que possui a cota altimétrica maior e atribui a declividade para a direção oposta.

Embora haja diversos algoritmos para o cálculo da declividade, a proposta de Horn (1981) é a que está implementada nos principais softwares de SIG, como ArcGis (ESRI, 2015), QGIS (QGIS, 2015) e SPRING (CÂMARA *et al.*, 1996) e por esse motivo está entre as mais utilizadas.

Horn (1981) propôs um algoritmo para cálculo da declividade baseado em uma matriz de vizinhança de 3x3 (Figura 11). Inicialmente o autor afirma que a estimação do gradiente para o ponto Z_0 poderia ser feita apenas com a média da diferença dos vizinhos ao norte, sul, leste e oeste (algo parecido com a proposta '2' citada anteriormente, de HOFFER *et al.*, 1979¹³):

$$d_x = \frac{(Z_5 - Z_4)}{2\Delta x} \quad (1)$$

$$d_y = \frac{(Z_2 - Z_7)}{2\Delta x} \quad (2)$$

onde Δx refere-se ao espaçamento da grade do MDT, d_x refere-se à diferença no sentido leste-oeste e d_y refere-se à diferença no sentido norte-sul.

¹¹ QUINN, P. F. B. J.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 59-79, 1991.

¹² SKIDMORE, A. K. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. **International Journal of Geographical Information System**, v. 3, n. 4, p. 323-334, 1989.

¹³ HOFFER, R. M.; FLEMING, M. D.; BARTOLUCCI, L. A.; DAVIS, S. M.; NELSON, R. F. **Digital processing of LANDSAT MSS and topographic data to improve capabilities for computerized mapping of forest cover types.**[San Juan Mountains, Colorado. 1979.

Z_1	Z_2	Z_3
Z_4	Z_0	Z_5
Z_6	Z_7	Z_8

Figura 11 – Janela móvel de 3x3
Fonte: organizado pelo autor (2015).

Contudo o autor verificou, a partir de testes, que uma estimativa mais confiável seria obtida a partir da média ponderada da diferença entre três pontos para cada lado:

$$d_x = \frac{(Z_3 + 2Z_5 + Z_8) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_6)}{8\Delta x} \quad (3)$$

$$d_y = \frac{(Z_3 + 2Z_2 + Z_1) - (Z_8 + 2Z_7 + Z_6)}{8\Delta x} \quad (4)$$

A partir destas estimativas no sentido leste-oeste e norte-sul, a declividade (D) para o ponto Z_0 seria calculada através da seguinte equação:

$$D = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} \quad (5)$$

De acordo com Horn (1981) a estimativa da declividade a partir da janela de vizinhança 3x3 utilizando os oito vizinhos adjacentes para efetuar o cálculo tem como vantagem o fato de possíveis erros altimétricos não contribuírem fortemente com os valores de inclinação.

Nesse sentido Raaflaub e Collins (2003) afirmam que a tendência é que a propagação de erros de declividade gerados a partir de MDT diminua à medida que o número de vizinhos utilizados no algoritmo aumente.

De acordo com Moore, Grayson e Ladson (1991) a declividade sempre foi um atributo topográfico importante e amplamente utilizado. Liu e Bian (2008) afirmam que a declividade, além de descrever de forma eficiente o relevo e a estrutura da superfície terrestre, é também amplamente utilizada como parâmetro vital em modelos hidrológicos, análise e monitoramento de deslizamentos de terra, estudos de erosão dos solos e planejamento do uso da terra.

A declividade é utilizada na metodologia para levantamento de capacidade do uso da terra proposta por Marques (1971), que classifica o relevo de acordo com suas classes de declividade: suave (0 a 2,5%), moderado (2,5% a 12%), forte (12% a 50%) e muito forte (acima de 50%).

Lepsch *et al.* (1991) utilizam a declividade como um dos parâmetros para o levantamento do meio físico e classificação de terras quanto à capacidade de uso e classificam o relevo em sete faixas de declividade: A (0 a 2%), B (2% a 5%), C (5% a 10%), D (10% a 15%), E (15% a 45%), F (45% a 70%) e G (acima de 70%).

Ross (1990) propôs metodologia para classificação do relevo de acordo com o seu índice de dissecação, a partir da morfologia e morfometria do relevo. O autor utiliza cinco graus de dissecação: muito fraco (declividades inferiores a 5%), fraco (5% a 10% de declividade), médio (10% a 20% de declividade), forte (20% a 30% de declividade) e muito forte (declividades acima de 30%).

A metodologia de análise de fragilidade de ambientes naturais e antropizados proposta por Ross (1994) classifica o relevo de acordo com cinco classes de fragilidade: muito fraca (declividade inferior a 6%), fraca (6% a 12% de declividade), média (12% a 20% de declividade), forte (20% a 30% de declividade) e muito forte (declividades acima de 30%). Para o autor a declividade tem importância maior do que as demais variáveis (solo, cobertura vegetal e clima) para a geração das cartas de fragilidade ambiental.

O Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2013) classifica o relevo em seis faixas de declividade: plano (0 a 3%), suave ondulado (3% a 8%), ondulado (8% a 20%), forte ondulado (20% a 45%), montanhoso (45% a 75%) e escarpado (acima de 75%).

Pereira e Lombardi Neto (2004) propõem uma metodologia para avaliação da aptidão agrícola das terras e classificam o relevo de acordo com seis faixas de declividade: plano (0 a 3%), suave ondulado (3% a 8%), moderadamente ondulado

(8% a 13%), ondulado (13% a 20%), forte ondulado (20% a 45%), montanhoso e escarpado (acima de 45%).

Zuquette e Pejon (1996) elaboraram uma carta de zoneamento geotécnico da região de Franca-SP e utilizaram cinco classes de declividade: 0% a 2%, 2% a 5%, 5% a 10%, 10% a 20% e acima de 20%.

Em mapeamento geotécnico na escala 1:5000 para fins de estudo de processos erosivos em Ouro Preto-MG, Fontes e Pejon (1999¹⁴) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004) adotaram sete classes de declividade: 0 a 5%, 5% a 10%, 10% a 20%, 20% a 30%, 30% a 45%, 45% a 75% e 75% a 100%.

Castro e Valério Filho (1997) geraram um MDT na escala 1:2500 afim de obter a declividade para aplicar na Equação Universal de Perda de Solos e classificaram o relevo de acordo com sete intervalos de declividade: 0 a 3%, 3% a 6%, 6% a 12%, 12% a 20%, 20% a 40%, 40% a 60% e acima de 60%.

Bonucelli (1999¹⁵) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004) em estudo geotécnico para caracterização de movimentos de massa em Ouro Preto-MG adotaram oito classes de declividade: 0 a 5%, 5% a 10%, 10% a 20%, 20% a 30%, 30% a 45%, 45% a 75%, 75% a 100% e acima de 100%.

Pradhan e Kim (2016) adotaram o SMCE (*Spatial multi-criteria evaluation*) para fazer avaliação de suscetibilidade à escorregamentos e utilizaram a declividade (obtida com auxílio de MDT construído a partir de LIDAR) discretizada em quatro classes: 0% a 15%, 15% a 25%, 25% a 35%, e acima de 45%.

Segundo Pradhan e Kim (2016) a relevância da declividade para estudos envolvendo estabilidade de vertentes reside no fato de que a mesma afeta a velocidade do fluxo em superfície e subsuperfície e, portanto, a quantidade de água no solo, a formação do solo e o potencial de erosão e conseqüentemente, quanto maior a declividade, maior o risco de ocorrência de deslizamento de terra.

O SMCE foi empregado também por Martins (2011) para geração de mapas de suscetibilidade à deslizamentos na região de Bobonaro, no Timor-Leste, porém, o

¹⁴ FONTES, S. B.; PEJON, O. J. Mapeamento geotécnico com ênfase em erosões no município de Ouro Preto – escala 1:5000. In: **7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, São Pedro, 1999.

¹⁵ BONUCCELLI, T. **Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos da área urbana de Ouro Preto/MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Área de Geotecnia). USP/São Carlos, 1999.

autor adotou outros intervalos de declividade: 0 a 12%, 12% a 25%, 25% a 40% e 40% a 80%.

Embora existam metodologias que utilizam a declividade discretizada, conforme exposto anteriormente, há outras que adotam os valores absolutos da declividade, como é o caso do Fator de Segurança (FS) aplicado aos cálculos de geotecnia e de suscetibilidade a deslizamentos.

O Fator de Segurança (FS) indica o grau de estabilidade de uma vertente e ainda a superfície de ruptura crítica, quando este for mínimo. Trata-se de um valor adimensional que resulta da razão entre as forças resistentes ao movimento e as solicitantes do mesmo. Por esta definição clássica, observa-se que, quando as forças forem de igual valor, tem-se um Fator de Segurança unitário, representando a situação limite de equilíbrio, onde se igualam as forças resistentes e as solicitantes do movimento. (TABALIPA E FIORI, 2008, p. 391).

A equação do FS pode ser adaptada de acordo com os parâmetros disponíveis, como peso das árvores, tensão das raízes, transmissividade do solo, força exercida pelo vento, entre outros, no entanto, a declividade sempre está inserida na equação matemática para o cálculo do FS (FIORI, 2013).

Fiori e Carmignani (2009) adotaram a seguinte equação matemática para o cálculo do Fator de Segurança:

$$FS = \frac{C_s - \left[\left(\gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \tan \varphi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_v} \quad (6)$$

Onde C_s refere-se à coesão do solo, γ_{nat} refere-se ao peso específico natural, h_w refere-se à altura da zona do solo saturado perpendicular à vertente, h refere-se à profundidade do solo perpendicular à vertente, γ_a refere-se ao peso específico da água, σ_a refere-se à resistência exercida pelas raízes, φ refere-se ao ângulo de atrito interno do solo e σ_v refere-se à pressão exercida pelo vento sobre uma cobertura vegetal e i refere-se à inclinação da vertente (declividade).

O Fator de Segurança pode ser aplicado diretamente em *softwares* de SIG sobre MDTs (TABALIPA; FIORI, 2008; SILVEIRA *et al.*, 2013a), ou a partir de metodologias e *softwares* derivados como o SINMAP - *Stability Index Mapping* (PACK; TARBOTON; GOODWIN, 1998; SILVA; SILVEIRA; FIORI, 2012; MICHEL; KOBAYAMA; GOERL, 2014), SHALSTAB - *Shallow Landslide Stability Method* (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; MICHEL; KOBAYAMA; GOERL, 2014; VIEIRA; RAMOS, 2015; PRADHAN; KIM, 2016) e TRIGRS - *The Transient Rainfall Infiltration*

and Grid-Based Regional Slope-Stability Model (IVERSON, 2000; BAUM; SAVAGE; GODT, 2002; SALCIARINI *et al.*, 2006; LISTO; VIEIRA, 2015).

3.4 – QUALIDADE

Conforme Felicísimo (1994) e Darnell, Tate e Brunson (2008) o fato de MDTs serem aproximações da realidade faz com que sejam sempre propensos a graus de erro e incerteza.

Wise (2000) afirma que qualquer MDT deve ter a sua qualidade avaliada antes do uso com a finalidade de verificar se o mesmo atende as expectativas para o trabalho a ser executado.

Conforme Wise (2000) e Hobi e Ginzler (2012) a avaliação da acurácia do MDT é crucial, pois dependendo do erro o utilizador pode chegar a conclusões inverossímeis.

Constantino e Angelini (2013) afirmam que “muitas aplicações” dependem de MDTs precisos, portanto, a avaliação da acurácia dos modelos se faz necessária.

De acordo com Zhu *et al.* (2005), verificar a acurácia de um MDT é essencial antes de sua utilização, especialmente para aplicações que necessitam de modelos com alto grau de acurácia, como as engenharias.

Pike (2002) afirma que mesmo métodos considerados avançados como LIDAR não garantem a qualidade para o MDT e que todos os MDTs obtidos por esses processos têm erros, alguns deles graves.

Segundo Florinsky (1998), os erros oriundos de MDTs podem afetar negativamente a acurácia e a imparcialidade no momento de obtenção de atributos topográficos e na modelagem de processos.

Erdogan (2010) afirma que, a partir do momento em que os MDTs passaram a ser utilizados em diversas áreas, as estimativas de erros nos modelos tornaram-se extremamente importantes.

“Pequenos erros de elevação em MDTs podem afetar muito” os atributos derivados, o que pode acarretar em impactos negativos sobre a utilização de MDTs em SIGs, onde tais atributos são frequentemente utilizados (DARNELL; TATE; BRUNSDON, 2008).

Warren *et al.* (2004¹⁶) *apud* Darnell, Tate e Brunston (2008) afirmam que erros de declividade em MDTs podem ter influências “significativas” sobre modelos de previsão de erosão dos solos.

Gao (1997) e Gong *et al.* (2000) afirmam que os MDTs devem ter qualidade suficiente a fim de garantir uma descrição adequada da superfície terrestre com acurácia pré-estabelecida para cumprir um objetivo específico.

Nesse sentido, Fell *et al.* (2008) afirmam que os modelos utilizados em estudos de suscetibilidade a deslizamentos devem ter a qualidade adequada e que a utilização de modelos de suscetibilidade a deslizamento em “escalas pequenas” é considerada questionável até mesmo para planejamento regional.

A qualidade desejada em um MDT depende da aplicação para o qual ele será utilizado, contudo, um MDT criado para uma determinada aplicação é geralmente utilizado para outros propósitos (WILSON; GALLANT, 2000).

Por esse motivo, de acordo com Chrisman (2006), a abordagem de qualidade deve evoluir para uma definição baseada em “adequação ao uso” (*fitness to use*), pois um mesmo MDT pode ser adequado para um determinado objetivo, contudo, totalmente inadequado para outros. O autor afirma que o produtor do MDT, muitas vezes, não consegue avaliar todas as possíveis aplicações que o produto terá e que o potencial utilizador deve avaliar a qualidade de acordo com o uso específico a que se destina.

Gong *et al.* (2000) afirmam que a finalidade do MDT é o que define o grau de acurácia necessário do modelo.

Ebner, Reinhardt e Hobler (1988) afirmam que é necessário proceder uma validação adequada para verificar se o MDT representa o terreno com a precisão necessária para o trabalho.

A acurácia de um MDT é muito importante, especialmente em aplicações que necessitam de alto grau de precisão (SHI; WANG; TIAN, 2014).

Desmet (1997¹⁷) *apud* Chaplot *et al.* (2006) define a acurácia de um MDT como sendo um compromisso entre a “precisão” e a “realidade das formas” obtidas junto ao modelo.

¹⁶ WARREN, S. D.; HOHMANN, M. G.; AUERSWALD, K.; MITASOVA, H. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. **Catena**, v. 58, n. 3, p. 215-233, 2004.

¹⁷ DESMET, P. J. J. Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs. **Earth surface processes and landforms**, v. 22, n. 6, p. 563-580, 1997.

De acordo com Chaplot *et al.* (2006), a precisão é normalmente avaliada a partir de índices sem dimensão espacial, como o Erro Médio Quadrático (EMQ), enquanto a “realidade das formas” é avaliada pela análise estatística de outros parâmetros, como declividade.

Goodchild, Buttenfield e Wood (1994¹⁸) *apud* Weng (2002) afirmam que a estimativa de erros em MDTs é quase impossível, pois o valor verdadeiro de qualquer atributo ou fenômeno geográfico representado é raramente determinável. Contudo, levando-se em consideração que os valores de referência são assumidos como sendo a verdade em relação ao que ocorre no terreno, infere-se que há sim a possibilidade de efetuar a estimativa de erros em MDTs.

O erro é a diferença entre o valor estimado pelo MDT e o valor correspondente no terreno (ERDOGAN, 2010).

Weng (2002) acredita que o termo a ser utilizado para averiguar a qualidade de um MDT deveria ser incerteza, no lugar de erro.

De acordo com Liu e Bian (2008), MDTs possuem erros inerentes inevitáveis que resultam em incertezas com relação ao modelo.

Para Fisher e Tate (2006), erro refere-se a problemas formais com medições e estimações, enquanto incerteza refere-se a “outras questões menos tangíveis”.

Esta pesquisa acompanha as definições de erro e incerteza propostas por Hunter e Goodchild (1997) e Darnell, Tate e Brunsdon (2008) que consideram erro a divergência entre os valores obtidos junto ao MDT e os valores de referência, e incerteza a falta de conhecimento sobre a confiabilidade da representação do MDT com relação aos valores de referência.

Weng (2002) afirma que quando é feita a mensuração da qualidade do MDT, as incertezas se tornam erros. Sendo assim, a aplicação de MDTs necessita que a qualidade seja avaliada com a finalidade de dirimir qualquer incerteza e conhecer os erros implícitos no modelo para verificar se os mesmos estão adequados para a finalidade na qual serão aplicados.

¹⁸ GOODCHILD, M. F.; BUTTENFIELD, B. P.; WOOD, J. Introduction to visualizing data quality. In: HEARSHAW, H. M.; UNWIN, D. J. (Eds.). **Visualization in geographic information systems**. John Wiley and Sons, New York, 1994.

3.5 – PARÂMETROS, LEGISLAÇÃO E NORMAS DE VALIDAÇÃO

A avaliação da qualidade de produtos gerados a partir de levantamento topográfico altimétrico, em território brasileiro, deve ser feita com base na NBR 13133 – Execução de Levantamento Topográfico (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1994), válida desde 30/06/1994.

A NBR 13133 (ABNT, 1994) tem como objetivo fixar condições exigíveis para a execução de levantamentos topográficos, regulamentar os trabalhos de levantamento topográfico e garantir a qualidade dos produtos gerados.

A qualidade do levantamento na NBR 13133 está relacionada à escala e à densidade mínima de pontos a serem adquiridos em campo para representação da superfície do terreno, de acordo com a declividade do local, conforme Tabela 1. Embora a Norma estipule as densidades de acordo com a declividade do terreno, a mesma não menciona como deve ser feito o cálculo da declividade.

Tabela 1 – NBR 13133 – Levantamentos topográficos altimétricos

Escala	Eqüidistância das curvas de nível	Densidade mínima de pontos a serem medidos por hectare		
		Terreno com declividade acima de 20%	Terreno com declividade entre 10% e 20%	Terreno com declividade de até 10%
1:5000	5m	4	3	2
1:2000	2m	10	7	5
1:1000	1m	32	25	18
1:500	1m	45	30	20

Fonte: NBR 13133 (ABNT, 1994), organizado pelo autor (2015).

A NBR 13133 (ABNT, 1994) afirma que os produtos gerados a partir de levantamento topográfico altimétrico devem ser inspecionados para fins de aceitação ou rejeição, estabelecendo os seguintes parâmetros:

8.4.1 O padrão de exatidão altimétrica é definido a partir do desvio-padrão admissível estabelecido para altimetria do levantamento topográfico, ou seja, 1,645 vez este desvio-padrão, para 90% dos pontos testados.

8.4.2 O desvio padrão admissível para discrepância entre as altitudes ou cotas de ponto, medidas na planta por interpolação das curvas de nível, e as altitudes ou cotas determinadas no terreno para estes mesmo pontos, deve ser de um terço do valor da equidistância das curvas de nível.

8.4.3 O desvio-padrão correspondente das discrepâncias encontradas nas comparações das altitudes ou cotas medidas nas plantas por interpolação das curvas-de-nível com as homólogas obtidas no terreno não pode ser superior ao desvio-padrão admissível prescrito em 8.4.2.

8.4.4 O critério em função do definido em 8.4.1 a 8.4.3 deve ser estabelecido a partir do ponto de vista de que 90% das altitudes ou cotas dos pontos testados não podem ter discrepância superiores ao padrão de exatidão altimétrica (metade da equidistância das curvas de nível), sendo o desvio-padrão das comparações, igual ou menor que o desvio-padrão admissível estabelecido, ou seja, um terço do valor da equidistância das curvas de nível. (ABNT, 1994, p. 26).

A NBR 13133 (ABNT, 1994) não faz menção à MDTs, contudo a referida norma está em processo de revisão pela ABNT e o Projeto de Revisão ABNT NBR 13133 (ABNT, 2015) contempla MDTs, portanto, entende-se que a avaliação de tais produtos gerados a partir de levantamento topográfico altimétrico deva ser feita com base nos parâmetros estabelecidos pela NBR 13133, mesmo antes da publicação da nova versão revisada. É provável que o termo não tenha sido empregado pela NBR 13133 de 1994 pelo fato de aplicações envolvendo MDTs não serem comuns no Brasil na época de sua redação.

5.1.7 Envolvendo a altimetria, deve ser considerada a equidistância das curvas de nível e a densidade de pontos cotados para a **modelagem do terreno (modelo digital de terreno)** segundo o grau de detalhamento suscitado pela finalidade do levantamento ou pelas condições ambientais. (ABNT, 2015, p. 15, grifo nosso)

5.6.1 A representação topográfica do relevo, dependendo da finalidade do levantamento e do relevo, pode ser por curvas de nível complementadas com pontos cotados, por curvas de nível, por pontos cotados ou **modelo digital de terreno**. (ABNT, 2015, p. 22, grifo nosso)

Os critérios de acurácia altimétrica do Projeto de Revisão ABNT NBR 13133 (ABNT, 2015) são similares aos da NBR 13133 (ABNT, 1994), com exceção ao exposto no item 7.2.4, o qual inclui redação que não constava na norma de 1994: “Nos 10% dos pontos restantes, apenas um ponto pode exceder o deslocamento de 3 vezes o desvio-padrão admissível.” (ABNT, 2015, p. 25).

O Projeto de Revisão ABNT NBR 13133 (ABNT, 2015) afirma que deve ser considerada a densidade de pontos para a modelagem do terreno (MDT) segundo o grau de detalhamento suscitado pela finalidade do levantamento ou pelas condições ambientais, contudo, ao contrário da NBR 13133 (ABNT, 1994), não estipula mais densidade mínima de pontos a serem adquiridos em campo para representação da superfície do terreno.

Ainda que o Projeto de Revisão ABNT NBR 13133 (ABNT, 2015) traga explícito em seu texto o MDT como forma de representação topográfica do relevo e, informe que deva ser levado em consideração a densidade de pontos para a geração de MDTs, a validação da qualidade continua sendo somente baseada em equidistância entre curvas de nível.

Embora a NBR 13133 (ABNT, 1994) e o Projeto de Revisão ABNT NBR 13133 (ABNT, 2015) tratem especificamente de levantamentos topográficos, nota-se que os parâmetros de ambas é semelhante aos Padrões de Exatidão Cartográfica (PEC), constantes no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 1984), o qual estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional.

De acordo com o PEC, o erro altimétrico admitido para cartas classe A é de 1/2 do valor da equidistância entre as curvas de nível, para cartas classe B é de 3/5 da equidistância entre as curvas de nível e para a classe C é de 3/4 da equidistância entre as curvas de nível (Figura 12).

	Planimetria		Altimetria	
	Padrão de Exatidão Cartográfica	Erro-Padrão	Padrão de Exatidão Cartográfica	Erro-Padrão
Classe A	0,5 mm na escala da carta	0,3 mm na escala da carta	1/2 da equidistância entre as curvas de nível	1/3 da equidistância entre as curvas de nível
Classe B	0,8 mm na escala da carta	0,5 mm na escala da carta	3/5 da equidistância entre as curvas de nível	2/5 da equidistância entre as curvas de nível
Classe C	1,0 mm na escala da carta	0,6 mm na escala da carta	3/4 da equidistância entre as curvas de nível	1/2 da equidistância entre as curvas de nível

Figura 12 – Classificação das Cartas de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica
Fonte: Brasil (1984), organizado pelo autor (2014).

O Decreto estabelece que 90% dos pontos isolados de altitude, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido.

De acordo com o PEC, Art. 8º, parágrafo 2:

§1º Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§2º A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão - PEC = 1,6449 EP.

§3º O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§4º Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático. (BRASIL, 1984, p. 4).

Com relação às normas, há também no Brasil a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais – ET-ADGV (DSG, 2011), da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. A ET-ADGV busca regular e padronizar a aquisição da geometria dos dados geoespaciais vetoriais e atributos correlacionados.

O documento em questão afirma que o PEC (BRASIL, 1984) visava assegurar a exatidão cartográfica do produto analógico e que, a evolução tecnológica fez com que fosse necessário estabelecer novos padrões de qualidade para produtos cartográficos.

A ET-ADGV apresenta os valores referentes ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). A exemplo do PEC (BRASIL, 1984), o documento estabelece que 90% dos pontos coletados no produto cartográfico devem apresentar erros iguais ou inferiores ao previsto no PEC-PCD e que o Erro Padrão deve também ser igual ou inferior ao proposto para a escala.

Com a finalidade de buscar adequar os padrões de exatidão cartográfica para produtos gerados a partir da cartografia digital, o PEC-PCD cria uma classe A superior às estabelecidas pelo PEC (BRASIL, 1984), baseada nos estudos de Merchant (1982¹⁹), ASPRS (1989²⁰) e Ariza Lopez (2002²¹). Esta classe se aplica também aos modelos de elevação (MDT, MDE e MDS) e aos pontos cotados. Conforme a Norma o PEC-PCD deve ser de 0,27 vezes a equidistância do produto cartográfico e o Erro Padrão corresponde a 1/6 vezes a equidistância do produto cartográfico. As classes B, C e D do PEC-PCD correspondem, respectivamente, às classes A, B e C do PEC Altimétrico.

Deve-se enfatizar que o PEC-PCD para MDT, MDE, MDS e pontos cotados fez a adaptação exposta anteriormente, no entanto, ao apresentar os valores, não os associou à equidistância das curvas de nível, mas sim às distâncias absolutas

¹⁹ MERCHANT, D.C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. **AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING**. USA – Denver/CO, 1982. p. 222- 231.

²⁰ ASPRS. Interim Accuracy Standards for Large-Scale Maps. 1989. Disponível em: < <http://goo.gl/7ysQSn> >.

²¹ ARIZA LOPEZ, F. J. **Calidad en la producción cartográfica**. Universidad de Jaén, Ed. Ra-Ma, Madrid, 2002.

(Figura 13), diferentemente de quando apresenta os valores para o PEC-PCD Altimétrico, o qual continua associado à equidistância das curvas de nível e onde há a manutenção das classes A, B e C do PEC e a criação de uma classe inferior (D) para o PEC-PCD (Figura 14).

PEC - PCD Altimetria Pontos Cotados - MDS - MDE - MDT	1:1.000		1:2.000		1:5.000	
	Padrão de Exatidão Cartográfica (m)	Erro-Padrão (m)	Padrão de Exatidão Cartográfica (m)	Erro-Padrão (m)	Padrão de Exatidão Cartográfica (m)	Erro-Padrão (m)
Classe A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34
Classe B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66
Classe C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80
Classe D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00

Figura 13 – PEC-PCD Altimetria – Pontos Cotados, MDS, MDE e MDT – escalas de detalhe
Fonte: DSG (2011), organizado pelo autor (2015).

PEC-PCD - Altimetria - Curvas de Nível	Padrão de Exatidão Cartográfica	Erro-Padrão
Classe A	1/2 da equidistância entre as curvas de nível	1/3 da equidistância entre as curvas de nível
Classe B	3/5 da equidistância entre as curvas de nível	2/5 da equidistância entre as curvas de nível
Classe C	3/4 da equidistância entre as curvas de nível	1/2 da equidistância entre as curvas de nível
Classe D	1 vez o valor da equidistância entre as curvas de nível	3/5 da equidistância entre as curvas de nível

Figura 14 – PEC-PCD Altimetria – Curvas de Nível
Fonte: DSG (2011), organizado pelo autor (2015).

Outras duas experiências para avaliação da acurácia em meio digital merecem destaque: o *National Standard for Spatial Data Accuracy* – NSSDA (FGDC, 1998) e a ISO 19157 (International Organization for Standardization – ISO, 2013).

O NSSDA cumpre, nos Estados Unidos da América, um papel equivalente ao que o Decreto nº 89.817/84 (PEC) cumpre no Brasil, contudo se difere deste por ter sucedido ao *National Map Accuracy Standards* - NMAS (U.S. BUREAU OF THE BUDGET, 1941) a partir de 1998, o qual abordava apenas padrões de acurácia de produtos baseados na cartografia analógica.

O NMAS tinha como foco a validação de mapas em papel e não de dados digitais, assim o NSSDA ajudou a superar esse obstáculo, fornecendo método para verificar a qualidade de dados geográficos tanto na forma digital, quanto na impressa (MINNESOTA PLANNING, 1999).

Com relação à acurácia vertical, o NMAS (U.S. BUREAU OF THE BUDGET, 1941) previa que 90% dos pontos deveriam ter erros menores do que metade da equidistância das curvas de nível.

O NSSDA avalia a acurácia utilizando o Erro Médio Quadrático, admite uma exatidão de no mínimo 95% e, define como necessários para o teste no mínimo 20 pontos bem definidos, os quais não podem ter sido utilizados para a geração das bases cartográficas ou modelos digitais de representação do terreno. A justificativa para esse tamanho amostral é a de que quando 20 pontos são testados, o nível de confiança de 95% permite que um desses pontos supere o limite indicado nas especificações da acurácia do produto (FGDC, 1998; MINNESOTA PLANNING, 1999).

O projeto para a ISO 19157 (ISO, 2013), assim como o NSSDA, estabelece padrões de acurácia utilizando o Erro Médio Quadrático. Enquanto o NSSDA admite exatidão de no mínimo 95%, a ISO 19157 (ISO, 2013) não estabelece exatidão mínima, mas sim padrões para níveis de significância de 50%, 68,3%, 90%, 95%, 99% e 99,8%.

O PEC (BRASIL, 1984), a NBR 13133 (ABNT, 1994) e o PEC-PCD (DSG, 2011) não estabelecem as metodologias para avaliação da acurácia, mas referem-se aos padrões de exatidão altimétricas como indicadores estatísticos de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, correspondente a 1,6449 vezes o Erro Padrão (exposto nas normas como sinônimo de Erro Médio Quadrático).

Contudo, foi publicada em fevereiro de 2016, a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais – ET-CQDG (DSG, 2016), cujo objetivo é “fornecer uma forma padronizada para avaliar a qualidade dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais integrantes do Sistema Cartográfico Nacional (SCN) do Brasil”.

O ET-CQDG (DSG, 2016) estabelece que o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais – PAP-PCD deve ser calculado utilizando o Erro Médio Quadrático (EMQ), de maneira similar ao NSSDA (FGDC, 1998) e à ISO 19157 (International Organization for Standardization – ISO, 2013), contudo, ao contrário destes, não estipula quantidade mínima de pontos que devem ser utilizados para a validação.

3.6 – APLICAÇÕES ENVOLVENDO VALIDAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO

Wise (2000), Weng (2002) e Erdogan (2010) afirmam que a forma mais comum de verificar a qualidade de um MDT consiste na validação-cruzada, que deve ser feita a partir do cálculo do resíduo entre o modelo e amostras não utilizadas na geração do MDT e que tradicionalmente é aplicado o Erro Médio Quadrático (EMQ).

Darnell, Tate e Brunson (2008) afirmam que os fornecedores de MDT como *United States Geological Survey* (USGS) geralmente fornecem ao usuário uma medida da acurácia vertical na forma de Erro Médio Quadrático e que validações utilizando o EMQ têm a vantagem de serem rápidas para calcular, simples de explicitar e são padrões reconhecidos mundialmente.

Conforme Miliarensis e Paraschou (2005) o EMQ é utilizado para avaliar a qualidade de MDTs e engloba a análise tanto de erros sistemáticos quanto de erros aleatórios.

Há trabalhos na literatura nacional que validam produtos cartográficos junto ao PEC utilizando diretamente o Erro Médio Quadrático, conforme pode ser observado em Pinheiro e Kux (2003), Costa *et al.* (2010), Miceli *et al.* (2010), Rodrigues, Debiasi e Souza (2010), Cruz *et al.* (2011), Souza (2016).

Contudo há outros trabalhos que não aplicam o EMQ²² e utilizam outros testes estatísticos para validação junto ao PEC, avaliando a tendência através da distribuição *t Student* e a acurácia baseada na distribuição de Qui-quadrado, conforme pode ser observado em Galo e Camargo (1994), Dalmolin e Leal (2001), Camargo *et al.* (2007), Barbosa *et al.* (2008), Silva e Nazareno (2009), Vieira e Genro (2011) e Rodrigues, Kux e Albuquerque (2015).

A opção da avaliação da qualidade de produtos cartográficos a partir destes testes é baseada na metodologia proposta por Merchant (1982²³) que conforme Vieira e Genro (2011), visa a otimização de custos utilizando a Teoria das Pequenas

²² A Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais – ET-CQDG (DSG, 2016) que estabelece que o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD) deve ser calculado diretamente através do Erro Médio Quadrático (EMQ) foi publicada somente em fevereiro de 2016.

²³ MERCHANT, D.C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. **AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING**. USA – Denver/CO, 1982. p. 222- 231.

Amostras – n amostrais menores do que 30 - (Spiegel, 1994²⁴), estabelecendo um mínimo de 20 pontos amostrais para o controle de qualidade cartográfica.

Nesse sentido, Dalmolin e Leal (2001) afirmam que a análise da acurácia através da distribuição de t de *Student* “é particularmente válida para amostras menores que 30, consideradas pequenas”. Congalton e Green (2009²⁵) *apud* Vieira e Genro (2013) afirmam que para um n amostral menor do que 30, a avaliação da acurácia deve utilizar a distribuição de t de *Student*.

Weibel e Heller (1993) afirmam que além dos testes estatísticos expostos anteriormente, há outras técnicas que podem ser utilizadas para avaliação da qualidade de MDTs, como a comparação de dois MDTs da mesma área, através da análise estatística dos resíduos, ou análise dos semivariogramas ou da análise dos histogramas de frequência.

Casella e Padova (2013) afirmam que um segundo MDT pode ser utilizado como parâmetro para validação. Day e Muller (1988) utilizaram a comparação de dois MDTs gerados na mesma área para averiguar acurácia verificando o histograma de erros entre os dois. Erdogan (2010) afirma que assim é possível analisar a distribuição espacial dos erros, verificando além da localização, a magnitude dos mesmos.

Chaplot *et al.* (2006) afirma que a acurácia de um MDT deve ser avaliada também por outros parâmetros como declividade, pois muitas análises irão depender mais desses parâmetros do que da própria altimetria. Nesse sentido, Oksanen e Sarjakoski (2005) afirmam que um aumento do erro vertical do MDT acarreta um acréscimo de incertezas com relação aos atributos derivados.

²⁴ SPIEGEL, M.R. **Estatística: 383 Problemas Resolvidos, 416 Problemas Suplementares.** Tradução e revisão técnica: Pedro Consentino. 3ª edição. São Paulo: *Pearson Education* do Brasil, 1994.

²⁵ Congalton, R. G.; Green, K., Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. **Positional Accuracy.** 2. ed. Boca Raton, Florida, Estados Unidos, 2009.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa adota o método hipotético-dedutivo proposto por Popper (1975), o qual afirma que a pesquisa científica deve partir de um problema, ao qual se oferece uma solução provisória, que passa a ser criticada com a finalidade de eliminar os erros.

Jung (2003) afirma que o método hipotético-dedutivo tem como objetivo questionar os conhecimentos existentes. Conforme Marconi e Lakatos (2003), o método proposto por Popper parte de conhecimentos prévios e teorias existentes; identificando lacunas, contradições, ou problemas; propondo conjecturas, soluções, ou hipóteses; as quais devem ser testadas a fim de serem refutadas (rejeição) ou corroboradas (não rejeição).

Segundo Marconi e Lakatos (2003), o termo “corroboração” é o correto ao contrário do termo “confirmação” da hipótese proposto pelo método indutivo, pois conforme Popper (1975) *apud* Marconi e Lakatos (2003), a corroboração da hipótese “não excede o nível da provisoriedade: é válida, porquanto superou todos os testes, porém, não definitivamente confirmada, pois poderá surgir um fato que a invalide, como tem acontecido com muitas leis e teorias na história da ciência.”

Buscando adotar o método proposto por Popper (1975), esta pesquisa iniciou com a revisão de literatura com vistas à identificação e delimitação do problema. Verificou-se uma lacuna no que diz respeito à mensuração da influência do n amostral e das características do terreno nos MDTs, bem como uma escassez de estudos acerca da propagação de erros em MDTs em escalas de detalhe (maiores que 1:5000).

Assim, foi formulada a hipótese principal (H1), bem com sua antítese (H0), descritas na seção introdutória desta tese. Para o teste da hipótese foram adotados os métodos comparativo e estatístico.

Para Mombeig (1945), a utilização do método comparativo permite assinalar que existem casos análogos, mas nunca casos perfeitamente idênticos. Segundo Lijphart (1971), o método comparativo é um método científico básico utilizado para descobrir relação entre variáveis. O autor complementa afirmando que o método comparativo pode se beneficiar de outros métodos científicos, citando métodos experimentais e métodos estatísticos.

Marconi e Lakatos (2003) afirmam que o método estatístico deve ser considerado mais do que um método descritivo, ou seja, um método de experimentação e prova, um método de análise.

O método comparativo será aplicado na medida em que MDTs com mesmo n amostral, porém com diferentes arranjos amostrais, serão gerados em uma mesma área com a finalidade de terem seus resultados comparados entre si e também com os pontos de validação. O método será aplicado também na comparação entre MDTs gerados com mesma densidade amostral em áreas com ICRs distintos. A análise dos resultados do método comparativo terá o auxílio do método estatístico, conforme será exposto mais adiante.

Cabe destacar que não configura entre os objetivos desta pesquisa avaliar a influência de outros parâmetros além do n amostral e das características do terreno na geração e na qualidade de MDTs.

De acordo com Li (1992), para avaliar a influência de determinado parâmetro na construção e qualidade de MDTs é necessário isolar os demais mantendo-os inalterados. Entre os exemplos que o autor cita está a avaliação da influência das características do terreno, que necessita a manutenção de todos os demais parâmetros inalterados (densidade amostral, equipamento utilizado para levantamento amostral, método utilizado para construção do MDT, resolução espacial, algoritmo utilizado para obtenção dos atributos derivados).

Assim, nesta pesquisa, os demais parâmetros (interpolador, resolução espacial, modelo matemático utilizado para obtenção dos atributos topográficos) serão isolados, à medida em que serão padronizados e permanecerão inalterados para todos os produtos e subprodutos gerados nesta pesquisa.

Contudo, tal afirmação não implica na minimização dos efeitos dos demais parâmetros na qualidade dos MDTs, pelo contrário, reconhece-se tais efeitos, conforme discutido anteriormente na seção introdutória desta tese, onde foi exposto que a influência desses parâmetros já vem sendo discutida amplamente pela comunidade científica.

A fim de iniciar os procedimentos visando o teste de hipótese, definiu-se que seriam feitos levantamentos topográficos altimétricos, empregando-se o nivelamento trigonométrico e método de irradiação, com o apoio de estação total, em três áreas com ICRs distintos: ICR Ondulado, ICR Fortemente Ondulado e ICR Escarpado e que as análises teriam como ênfase as escalas de 1:1000, 1:2000 e 1:5000.

A opção pelo ICR proposto por Sampaio (2008) e Sampaio e Augustin (2014) se deve ao fato de tal metodologia diminuir o problema inerente à subjetividade nos mapeamentos de classes de relevo, o que dificultaria a replicação do experimento, pois diferentes pesquisadores, bem como um mesmo pesquisador utilizando bases diferentes, não conseguiriam obter resultados análogos para as classes de relevo.

Além de Sampaio (2008) e Sampaio e Augustin (2014), as incongruências referentes aos níveis de subjetividade metodológica no mapeamento geomorfológico são discutidas também por outros autores, tais como Young (1971), Sopchaki (2012) e Kawata (2014).

A busca pelas três áreas de estudo levou em consideração locais que fossem desprovidos de vegetação arbórea com a finalidade de evitar áreas onde houvesse dificuldade para efetuar as visadas com estação total. Foram eleitas três áreas no município de Cajati-SP, conforme exposto anteriormente na seção de caracterização das áreas.

O trabalho de campo foi realizado entre os dias 18 e 26 de abril de 2015. Optou-se por utilizar uma Estação Total Robótica Automática Servo Motorizada, modelo Leica TS12P, cuja precisão na medição de ângulos é de 3", sendo de 1" a precisão definida pelo compensador quádruplo dos eixos; a precisão para medição de distâncias é de 1mm + 1,5 p.p.m. Demais especificações técnicas estão disponíveis em Leica (2015). A opção por esse tipo de equipamento foi feita devido à necessidade que havia de se coletar uma grande massa de pontos em campo.

Na área de ICR Ondulado foram efetuadas 14353 leituras em uma área de aproximadamente 1/4 de hectare, uma densidade aproximada de 5,7 pontos/m²; na área de ICR Fortemente Ondulado foram efetuadas 24139 leituras em uma área de aproximadamente 1/4 de hectare, uma densidade aproximada de 9,6 pontos/m²; e, na área de ICR Escarpado foram efetuadas 5598 leituras em uma área de aproximadamente 1/8 de hectare, uma densidade aproximada de 4,5 pontos/m². A Figura 14 demonstra a distribuição dos pontos nas três áreas. Todos os pontos levantados em campo privilegiaram a máxima densidade possível e a identificação de todas as feições relevantes para caracterização do relevo.

De posse da nuvem de pontos amostrais, foram separados em cada área 20 pontos para a validação dos MDTs, os quais deveriam ser bem distribuídos no terreno e não poderiam estar inseridos entre os pontos utilizados para a geração dos

modelos (Figura 15), conforme estabelecido por Merchant (1982), Galo e Camargo (1994) e FGDC (1998).

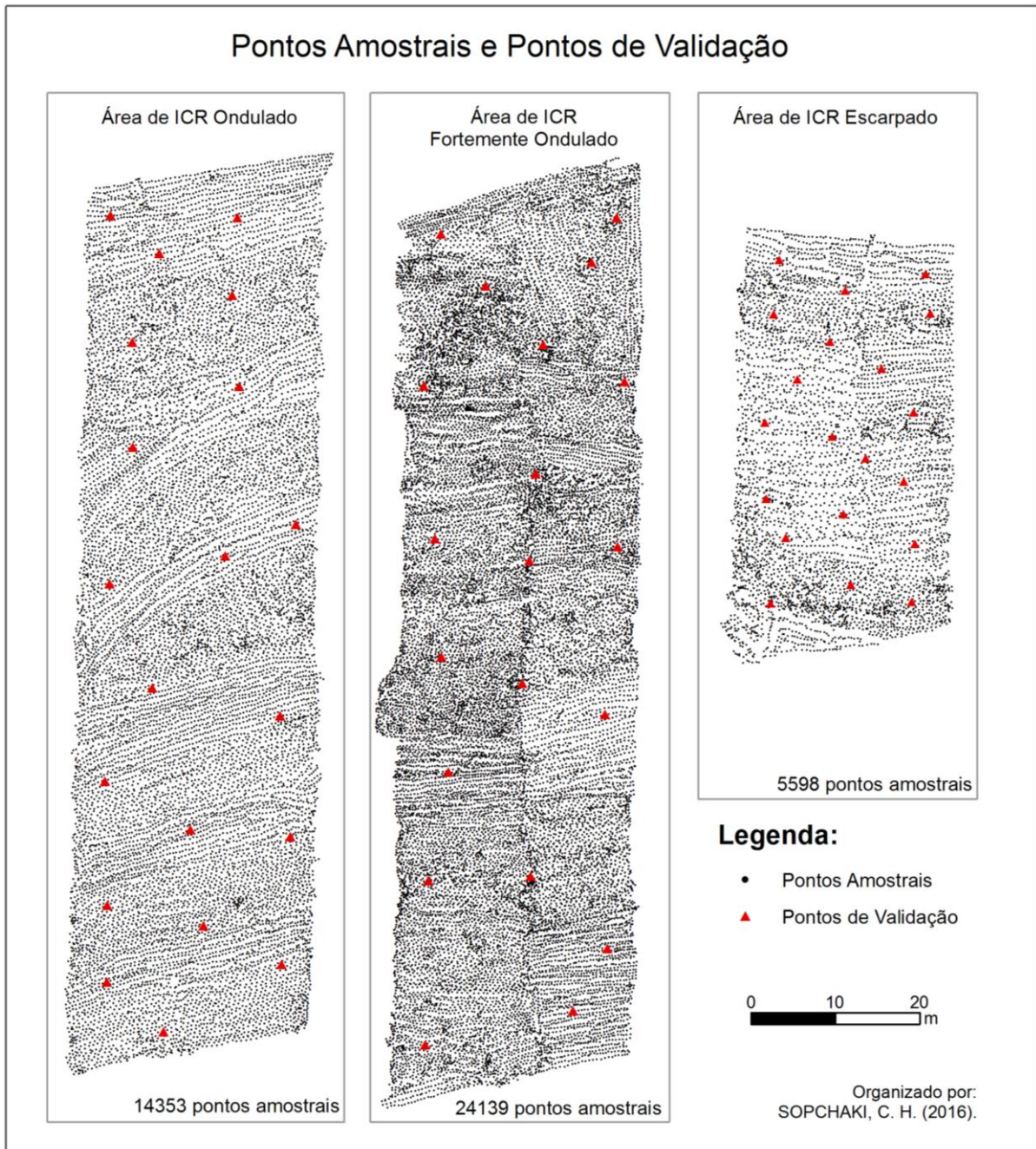


Figura 15 – Pontos Amostrais – Áreas de ICR Ondulado, ICR Fortemente Ondulado e ICR Escarpado
Fonte: organizado pelo autor (2016).

Em seguida foram separados os pontos para geração dos MDTs, que seriam gerados em pares, com mesmo n amostral, porém com diferentes arranjos amostrais.

Cabe destacar que esta pesquisa adotou cotas arbitradas que não sofreram nenhum processo de ajuste em gabinete, pois as avaliações inerentes à qualidade dos MDTs aqui efetuadas não têm como objetivo verificar a acurácia com relação às altitudes ortométrica, geométrica ou altura geoidal, mas sim uma relação entre os MDTs e os pontos amostrais separados para validação. Da mesma forma, as avaliações relacionais/comparativas que serão efetuadas entre pares de MDTs tem como objetivo somente verificar as discrepâncias entre os dois modelos e não divergências com relação às altitudes ortométricas, geométricas ou altura geoidal.

Os primeiros MDTs para cada área foram construídos a partir de um número de amostras proporcional à maior densidade de pontos estabelecida pela NBR 13133 (ABNT, 1994), ou seja, 45 pontos por hectare, que são definidos pela norma para a maior escala (1:500) e para terrenos com a maior declividade prevista (maior do que 20%).

Levando-se em consideração que as áreas amostradas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado equivalem a aproximadamente 1/4 de hectare e a área de ICR Escarpado equivale a aproximadamente 1/8 de hectare, os primeiros pares de MDTs foram gerados com 11 pontos amostrais para as áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado e com seis pontos amostrais para a área de ICR Escarpado.

Em seguida foram gerados pares de MDTs com n amostrais proporcionais a 4, 8, 16 e 32 vezes a maior densidade de pontos estabelecida pela NBR 13133 (ABNT, 1994) – 45 pontos por hectare, ou seja 45 (180 pontos/ha), 90 (360 pontos/ha), 180 (720 pontos/ha) e 360 (1440 pontos/ha) pontos para as áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado e 22 (180 pontos/ha), 45 (360 pontos/ha), 90 (720 pontos/ha) e 180 (1440 pontos/ha) pontos para a área de ICR Escarpado.

Como a área de ICR Escarpado foi a que contou com a menor densidade de pontos amostrais obtidos em campo (5598 pontos em uma área de aproximadamente 1/8 de hectare) e, com a finalidade de se utilizar toda a nuvem de pontos para análise, foram gerados os últimos dois pares de MDTs para esta área a partir de 2700 pontos amostrais cada modelo (21600 pontos/ha). Objetivando utilizá-los também na averiguação da influência do terreno, foram gerados pares de MDTs com o número de pontos proporcional a este para as áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado, ou seja, 5400 pontos amostrais (21600 pontos/ha).

Além destes, foi gerado ainda mais um par de MDTs para cada área de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado com n amostral proporcional a 640 vezes a maior

densidade de pontos estabelecida pela NBR 13133 (ABNT, 1994), o que equivale a 28800 pontos por hectare, ou 7200 pontos para uma área de 1/4 de hectare. Como a área de ICR Fortemente Ondulado possuía a maior densidade de pontos amostrais, para esta área foi gerado mais um par de MDTs, com 10800 pontos cada um (43200 pontos/ha), o que equivale a 960 vezes a maior densidade de pontos estabelecida pela NBR 13133 (ABNT, 1994).

A extração dos pontos para geração de cada MDT foi efetuada de forma aleatória, a partir da ferramenta 'Random Selection' disponível no *software* QGIS 2.12.3. A síntese com os n amostrais utilizados para a geração de MDTs em cada área pode ser observada na Tabela 2 e os arranjos amostrais utilizados para a geração dos MDTs podem ser visualizados na Figura 16.

Tabela 2 – N amostral dos MDTs gerados e relação com densidade amostral estipulada pela NBR 13133

Quantidade de vezes a maior densidade estabelecida pela NBR 13133 (ABNT, 1994)	n amostral para área de 1 hectare	densidade amostral aproximada (pontos/m ²)	Pares de MDTs gerados (n amostral para cada MDT)		
			Área de ICR Ondulado (1/4 de hectare)	Área de ICR Fortemente Ondulado (1/4 de hectare)	Área de ICR Escarpado (1/8 de hectare)
1	45	0,0045	11	11	6
4	180	0,018	45	45	22
8	360	0,036	90	90	45
16	720	0,072	180	180	90
32	1440	0,144	360	360	180
320	14400	1,44	3600	3600	1800
480	21600	2,16	5400	5400	2700
640	28800	2,88	7200	7200	-
960	43200	4,32	-	10800	-

Fonte: Organizado pelo autor (2015).

Em seguida foram gerados os 48 MDTs com resolução espacial de 1m. Como não era objetivo desta pesquisa discutir a influência da resolução espacial na geração e qualidade dos modelos, padronizou-se a resolução espacial de 1m para todos os MDTs, conforme proposto por Li (1992).

Os MDTs foram construídos no *software* ESRI ArcGis 10.2.2 com o apoio da ferramenta 'Geostatistical Analyst' utilizando o interpolador Inverso da Potência das Distâncias (*Inverse Distance Weighted* – IDW) com expoente '2', conhecido também por Inverso do Quadrado das Distâncias (IDW²).

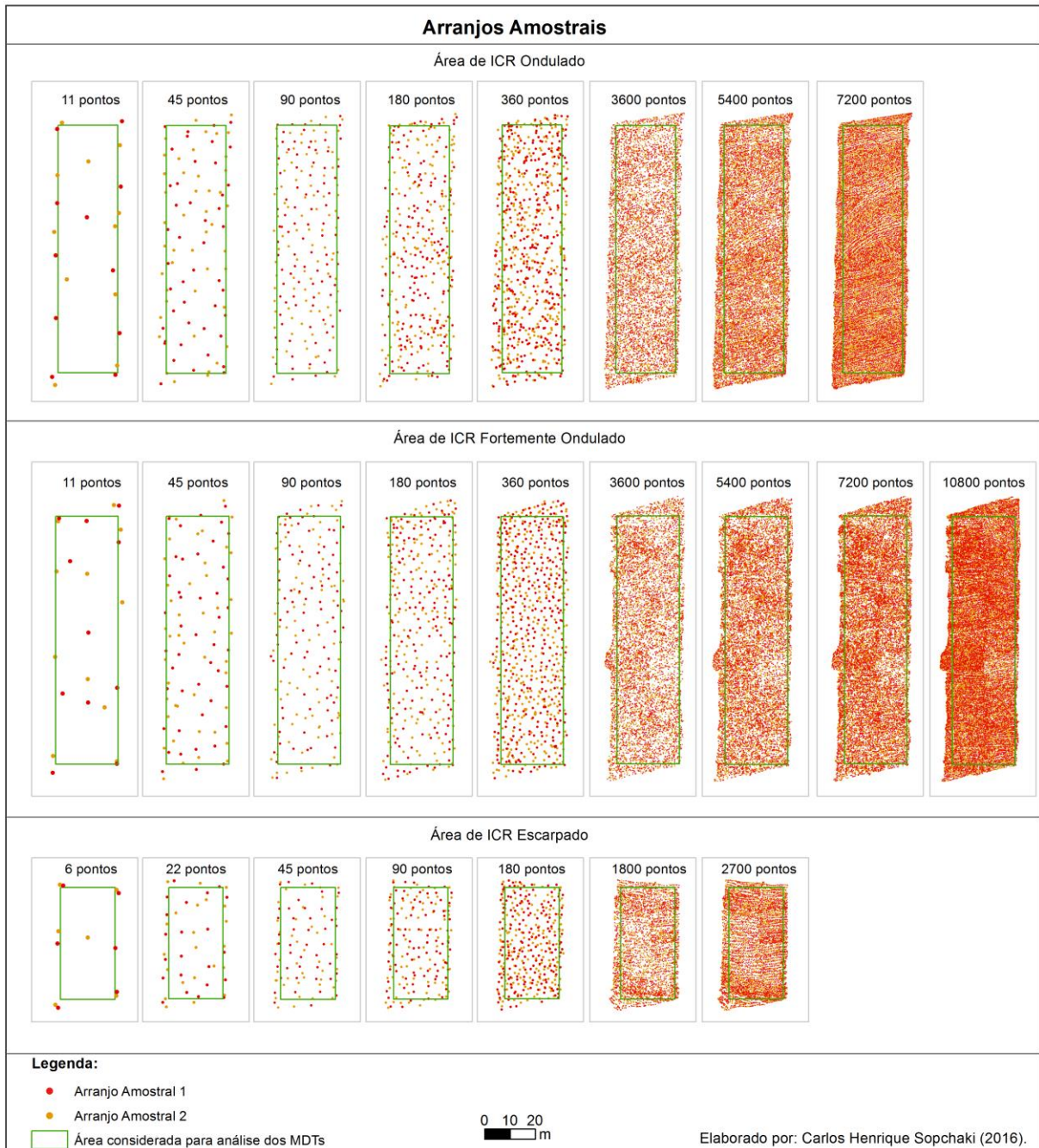


Figura 16 – Arranjos amostrais nas áreas de ICR Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado
Fonte: Organizado pelo autor (2016).

O IDW é um interpolador local, exato, de transição abrupta e determinístico. O IDW estima os valores dos pontos não amostrados a partir do cálculo de média ponderada entre o ponto de interesse e as amostras vizinhas (Li e Heap, 2008). A fórmula e o cálculo do IDW estão explicitados na Figura 17.

Andriotti (2003) chama a atenção para o fato de que ao se utilizar o IDW a decisão pelo ponderador a ser aplicado (expoente pelo qual a distância entre as amostras será elevada) é pessoal e arbitrária. De acordo com Landim (2000), “a

influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó da grade ao ser estimado”. Conforme QGIS (2015), “aumentando o coeficiente, o valor do ponto desconhecido será mais próximo ao valor dos pontos vizinhos observados”.

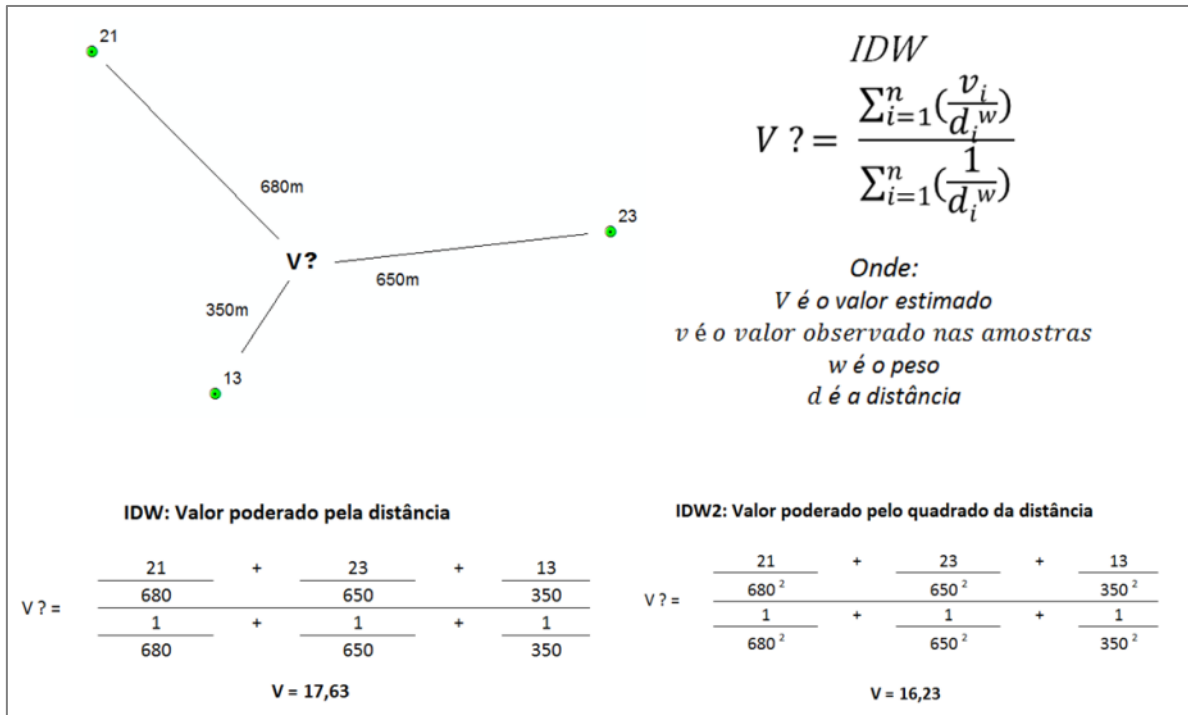


Figura 17 – Fórmula e exemplo de cálculo do IDW
 Fonte: Sampaio (2015).

Landim (2000) afirma que expoentes baixos destacam anomalias locais e expoentes mais altos suavizam anomalias locais podendo até resultar em estimativas poligonais. Segundo o autor, este método pode criar artefatos indevidos, porém estimula a usá-lo quando as amostras estão distribuídas de maneira mais uniforme e com boa densidade. Andriotti (2003) considera que, mesmo levando em consideração a subjetividade na adoção do peso do ponderador e de problemas com artefatos, dentre os métodos determinísticos é o que gera resultados mais fidedignos.

Novamente cabe destacar que a escolha do interpolador ou mesmo do expoente utilizado no IDW irá influenciar os resultados e a qualidade dos MDTs, contudo, como não configura objetivo desta pesquisa avaliar tal influência, o interpolador foi isolado e foi adotado o IDW² para todos os 48 MDTs gerados na

pesquisa, a fim de verificar a influência do n amostral e das características do terreno na qualidade dos MDTs, conforme proposto por Li (1992).

Embora cada MDT tenha sido gerado para toda extensão coberta pelos seus pontos amostrais, com a finalidade de evitar possíveis “efeitos de borda” gerados por áreas sub-amostradas nas extremidades, a análise dos modelos se restringiu a uma porção central, conforme pode ser observado na Figura 16, exposta anteriormente. A fim de viabilizar esta análise, os MDTs necessitaram passar por um recorte para uma área coincidente com o tamanho do polígono de análise, o que foi executado a partir da ferramenta ‘Extract by Mask’ da extensão ‘Spatial Analyst’ disponível no *software* ESRI ArcGis 10.2.2.

Para proceder a validação dos MDTs junto aos pontos de controle, foi necessário obter as alturas dos pontos (z) dos MDTs nos locais coincidentes com os pontos de validação. Tal procedimento foi efetuado a partir da ferramenta ‘Extract Values to Points’ da extensão ‘Spatial Analyst’ do *software* ESRI ArcGis 10.2.2.

De posse da tabela contendo as alturas (z) nos pontos de validação e dos seus valores correspondentes nos MDTs foi efetuada a validação dos modelos junto aos 20 pontos de controle, objetivando verificar o enquadramento dos modelos nas escalas 1:1000, 1:2000 e 1:5000 junto à NBR 131333 (ABNT, 1994), ao PEC (BRASIL, 1984) nas classes A, B e C e ao PEC-PCD (DSG, 2011) nas classes A, B, C e D.

Conforme exposto anteriormente na subseção referente a parâmetros, legislação e normas de validação, a NBR 131333 e o PEC associam os valores de padrão de exatidão cartográfica e erro padrão altimétricos à equidistância entre as curvas de nível, enquanto o PEC-PCD para MDT, MDE, MDS e pontos cotados faz a associação à distâncias absolutas.

Como os MDTs não possuem curvas de nível adotou-se, para avaliação da adequação dos modelos junto à NBR 131333 e ao PEC, os valores de referência das equidistâncias entre curvas de nível propostas pela NBR 131333, ou seja, 5m para a escala 1:5000; 2m para a escala 1:2000; e 1m para a escala 1:1000.

As validações foram efetuadas a partir da análise de tendência por t de *Student*, e da precisão por Qui-Quadrado (χ^2), conforme proposto por Merchant (1982), bem como a validação a partir do Erro Médio Quadrático (EMQ), conforme metodologia proposta por FGDC (1998), MINNESOTA PLANNING (1999) e DSG

(2016). Foi calculado também o valor da acurácia junto à NSSDA (FGDC, 1998) e junto ao PEC (BRASIL, 1984) a partir do EMQ.

A análise da precisão através de Qui-quadrado, proposta por Merchant (1982) objetiva verificar se o desvio padrão das discrepâncias é estatisticamente menor ou igual ao desvio padrão de referência, através do seguinte teste de hipótese:

$$H_0: \sigma^2 \leq \sigma_{REF}^2 \quad (7)$$

$$H_1: \sigma^2 > \sigma_{REF}^2 \quad (8)$$

Onde: σ^2 equivale ao quadrado do desvio-padrão das discrepâncias das amostras, σ_{REF}^2 equivale ao quadrado do erro-padrão de referência para a classe e escala objeto de verificação, conforme estabelecido para cada norma.

O Desvio Padrão equivale à raiz quadrada positiva da variância, conforme a equação a seguir:

$$S_y = \sqrt{S_y^2} \quad (9)$$

Onde S_y^2 equivale à variância, a qual é calculada a partir da seguinte equação:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta z_i - \Delta \bar{z})^2}{n-1} \quad (10)$$

Onde Δz_i refere-se à discrepância calculada em cada ponto e $\Delta \bar{z}$ refere-se à médias das discrepâncias, obtidos, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$\Delta z_i = z_{ref\ i} - z_{test\ i} \quad (11)$$

$$\Delta \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i}{n} \quad (12)$$

Onde: $z_{ref\ i}$ refere-se à cota altimétrica tida como referência para o teste (pontos controle), $z_{test\ i}$ refere-se às cotas altimétricas do MDT.

O Qui-quadrado amostral é calculado através da seguinte equação:

$$x_{calc}^2 = \frac{\sigma^2}{\sigma_{REF}^2} (n - 1) \quad (13)$$

Onde: n equivale ao tamanho da amostra validada.

Se $x_{calc}^2 \leq x_{tab}^2$, então aceita-se H_0 . Se $x_{calc}^2 > x_{tab}^2$, então rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 , onde x_{tab}^2 refere-se ao qui-quadrado estatístico, de acordo com a

propabilidade (90% para o PEC) e o grau de liberdade (dado por $n - 1$). O Qui-quadrado estatístico pode ser obtido em tabelas de Qui-quadrado ou diretamente em *softwares* de planilha eletrônica.

A análise de tendência através da distribuição de t de *Student*, proposta por Merchant (1982) objetiva verificar se a média dos resíduos é estatisticamente nula, através do seguinte teste de hipótese:

$$H_0: \Delta\bar{z} = 0 \quad (14)$$

$$H_1: \Delta\bar{z} \neq 0 \quad (15)$$

Onde: $\Delta\bar{z}$ equivale à média das discrepâncias das amostras.

O t de *Student* amostral é calculado através da seguinte equação:

$$t_{calc} = \frac{\Delta\bar{z}}{\sigma} \sqrt{n} \quad (16)$$

Onde: σ equivale ao desvio padrão das discrepâncias das amostras e n equivale ao tamanho da amostra validada.

Se $-t_{tab} \leq t_{calc} \leq +t_{tab}$, então aceita-se H_0 . Caso contrário, rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 . t_{tab} refere-se ao t de *Student* estatístico, de acordo com a propabilidade (90% para o PEC) e o grau de liberdade (dado por $n - 1$). O t de *Student* estatístico pode ser obtido em tabelas de t de *Student* ou diretamente em *softwares* de planilha eletrônica.

O Erro Médio Quadrático é calculado a partir da seguinte equação:

$$EMQ_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta z_i)^2}{n}} \quad (17)$$

O cálculo da acurácia, a partir do EMQ de acordo com a NSSDA (FGDC, 1998), para propabilidade de 95% é dado por:

$$NSSDA_z = 1,9600 \times EMQ \quad (18)$$

O cálculo da acurácia, a partir do EMQ, com probabilidade de 90%, para fins de enquadramento junto à NBR 13133 (ABNT, 1994), PEC (BRASIL, 1984) e PEC-PCD (DSG, 2011) é dado por:

$$Acurácia_z = 1,6449 \times EMQ \quad (19)$$

Além da verificação do enquadramento dos MDTs junto à NBR 13133 (ABNT, 1994), ao PEC (BRASIL, 1984) ao PEC-PCD (DSG, 2011), e do cálculo da acurácia para 95% de probabilidade (FGDC, 1998) e para 90% de probabilidade

(BRASIL, 1984; ABNT, 1994; DSG, 2011) foram efetuadas também análises estatísticas para verificação da similaridade entre os pares de MDTs gerados na mesma área, com diferentes arranjos e mesmo n amostral.

A primeira análise refere-se à álgebra de mapas efetuada com o apoio do *software* ESRI ArcGis 10.2.2 a partir da ferramenta ‘Raster Calculator’ da extensão ‘Spatial Analyst’. Foi efetuada a subtração de um MDT pelo outro a fim de verificar as divergências altimétricas apresentadas entre os dois modelos.

As divergências altimétricas obtidas a partir da álgebra de mapas entre os MDTs foram apresentadas de duas maneiras:

1 - em valores relativos, demonstrando cotas negativas e positivas geradas a partir da subtração entre os dois modelos, o que demonstra locais onde um modelo apresenta cotas altimétricas mais baixas ou mais elevadas em relação ao outro;

2 - em valores absolutos (com a utilização do operador ‘Abs’) discretizados em três classes:

- < 0,27m (equivalente à classe A do PEC-PCD para as escalas de 1:1000 e 1:2000);
- Entre 0,27m e 0,54m (equivalente à classe A do PEC-PCD para a escala de 1:5000);
- Acima de 0,54m.

Foram calculados também o Coeficiente de Correlação Linear e o Índice de Exatidão Global entre os MDTs. Ambos foram gerados com o apoio do *software* QGIS 2.12.3, a partir da extensão de comandos do *software* GRASS GIS 6.4.3. O Coeficiente de Correlação Linear foi obtido com o uso da ferramenta ‘R.Covar’ e o Índice de Exatidão Global a partir da ferramenta ‘R.Kappa’.

O Coeficiente de Correlação Linear mede a possível relação linear existente entre duas variáveis aleatórias (CHARNET *et al.*, 1999). Conforme Andriotti (2003) “se a representação gráfica das duas variáveis em um sistema cartesiano resulta em pontos alinhados, ajustando-se a uma reta, tem-se uma relação linear”, assim os valores do coeficiente variam entre -1 e +1, onde valores próximos a -1 representam forte correlação linear negativa, valores próximos a +1 representam forte correlação linear positiva e valor igual a zero representa ausência de correlação.

De acordo com Landim (2003), o Coeficiente de Correlação Linear (r) é calculado a partir da seguinte equação:

$$r = \frac{\frac{\sum(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{n-1}}{\left[\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} * \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n-1} \right]^{1/2}} \quad (20)$$

Onde n refere-se ao número de pares de valores para x_i e y_i , e \bar{x} e \bar{y} são os valores médios para x_i e y_i .

O Índice de Exatidão Global é um subproduto da matriz de confusão. Campbell (2002) afirma que a matriz de confusão permite identificar além do erro global da classificação, o erro para cada categoria, bem como inferir como se deram as confusões entre as categorias.

De acordo com Story e Cognalton (1986), a matriz de confusão refere-se a um conjunto de números ordenados matricialmente, onde as linhas correspondem aos dados de referência, e as colunas correspondem aos resultados obtidos na classificação que está sob análise. Os autores afirmam que na diagonal principal estão expostos os pontos concordantes entre as classificações.

Hangouët (2006) afirma que a matriz de confusão é chamada também de matriz de erro de classificação e que, o Índice de Exatidão Global é calculado a partir da razão entre os pontos concordantes (diagonal principal da matriz de confusão) e o total de pontos da classificação.

O Índice de Exatidão Global para os MDTs foi calculado a partir dos modelos discretizados em classes a cada 0,27m (e.g.: 0m - 0,27m; 0,27m - 0,54m), valor que equivale ao EMQ para o PEC-PCD (DSG, 2011) na Classe A para as escalas 1:1000 e 1:2000.

Foram efetuadas também operações de regressão linear com a utilização do *software* Microsoft Excel em dois momentos:

1 – buscando verificar quais as densidades necessárias (em pontos/ha) para que diferentes MDTs gerados na mesma área (com mesmo n amostral e diferentes arranjos amostrais, considerando pontos bem distribuídos), sejam enquadrados junto ao PEC-PCD Classe A (escalas 1:1000, 1:2000 e 1:5000) e que a divergência entre ambos esteja dentro dos limites de aceitação da norma.

2 – A fim de se obter equações para determinar qual a densidade necessária (em pontos/ha) para que se alcance um certo grau de acurácia

absoluta (em metros) para 90% e 95% de confiança, de acordo com a classe de ICR (Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado).

Conforme Ribeiro Júnior (2004), a regressão linear descreve a existência de relação funcional entre duas variáveis, com base em n pares de observações, permitindo estimar valores de uma variável dependente a partir de valores de uma variável independente.

De acordo com Peternelli (2013), a regressão linear permite obter uma equação que tenta explicar a relação da variação entre duas variáveis. Conforme o autor, a equação pode ser obtida a partir de um gráfico de dispersão, que demonstra como se comportam os valores da variável dependente em função da variável independente. Tal comportamento pode apresentar padrões mais próximos a curvas lineares, quadráticas, logarítmicas, exponenciais, entre outras. A equação que descreve a curva que mais se aproxima dos padrões de distribuição das variáveis é admitida como a equação que descreve a relação entre as variáveis.

Com a finalidade de averiguar se o modelo é adequado para explicar a variável, é calculado o coeficiente de determinação (R^2), que conforme Ribeiro Júnior (2004), mede quanto da variação de Y é explicado pela variável X , por meio da equação de regressão estimada. De acordo com o autor, quanto mais próximo de '1' estiver o valor de R^2 , "melhor será a qualidade do ajuste do modelo de regressão aos pontos do diagrama de dispersão, ou seja, menor será a influência atribuída à causas aleatórias medidas pelo resíduo".

Em seguida, a partir dos MDTs, foram geradas as declividades em porcentagem utilizando a ferramenta 'Slope' da extensão 'Spatial Analyst' do software ESRI ArcGis 10.2.2, o qual adota o algoritmo proposto por Horn (1981), descrito anteriormente na subseção sobre atributos derivados.

Embora a aplicação de diferentes algoritmos para obtenção de atributos derivados gerem resultados divergentes, esta discussão não é o foco desta pesquisa, portanto, a influência do algoritmo foi isolada a partir da manutenção do mesmo para todas as análises, conforme proposto por Li (1992).

A declividade referente a cada MDT foi apresentada em seis classes discretas de acordo com a classificação proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para avaliação de aptidão agrícola (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004): plano (0 a 3%), suave ondulado (3% a 8%),

moderadamente ondulado (8% a 13%), ondulado (13% a 20%), forte ondulado (20% a 45%), montanhoso e escarpado (acima de 45%).

Utilizando a ferramenta 'Raster Calculator' da extensão 'Spatial Analyst', do *software* ESRI ArcGis 10.2.2 foi efetuada uma operação de álgebra de mapas (subtração) com o auxílio do operador 'Abs' visando apresentar as áreas discordantes e concordantes entre as declividades de cada MDT, de acordo com a discretização proposta por Pereira e Lombardi Neto (2004).

Foi calculado também o Coeficiente de Correlação Linear entre as declividades de cada MDT, bem como o Índice de Exatidão Global. Este foi calculado a partir das declividades discretizadas em classes a cada um ponto percentual (e.g.: 0 a 1%; 1% a 2%; 2% a 3%...).

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme exposto anteriormente, foram gerados e analisados oito pares de MDTs para a área de ICR Ondulado, nove pares de MDTs para a área de ICR Fortemente Ondulado e sete pares de MDTs para a área de ICR Escarpado. Contudo, à fim de evitar informações exaustivas a partir de leituras de dados extraídos de tabelas e figuras, optou-se por apresentar neste capítulo os resultados analíticos referentes à somente um par de MDTs, como forma de exemplificar a metodologia de apresentação dos dados, os quais serão objetos de análise posterior.

Os resultados referentes aos dois MDTs gerados a partir de 45 pontos amostrais/ha para a área de ICR Ondulado (Figura 18) demonstram que os MDTs não apresentam problemas de tendência, conforme pode ser observado pelos valores de t de Student (1,43 e -1,22)²⁶. Nenhum dos MDTs se enquadrou na escala 1:1000 em nenhuma das normas, em quaisquer das classes. Na escala 1:2000, ambos não se enquadram em nenhuma das classes do PEC-PCD, sendo aceitos apenas na Classe C do PEC. Na escala 1:5000, ambos foram aceitos junto à NBR 13133, nas três classes do PEC e junto à Classe D do PEC-PCD.

Observam-se divergências nos enquadramentos feitos a partir do EMQ e do Qui-quadrado (x^2), pois ambos os modelos apresentam resultados demonstrando a aceitação pelo x^2 e rejeição pelo EMQ: na escala 1:2000 - NBR 13133 e PEC Classes A e B; e na escala 1:5000 - PEC-PCD Classes B e C.

Os valores da acurácia para enquadramento junto ao NSSDA (FGDC, 1998) e junto ao PEC (BRASIL, 1984) foram, respectivamente, 1,63m e 1,37m para o MDT1 e; 1,65m e 1,38m para o MDT2.

A partir da análise visual dos dois MDTs discretizados em classes de 1m infere-se que, embora representem a mesma área e tenham sido gerados com o mesmo n amostral, há pouca similaridade entre os dois modelos, fato que se comprova a partir da análise das divergências altimétricas e enquadramento das divergências junto ao PEC-PCD. As divergências altimétricas entre os dois MDTs variam de -2,51m a 1,19m e o enquadramento junto ao PEC-PCD demonstra que

²⁶ Os valores de t de Student dos demais MDTs não serão discutidos, pois nenhum dos MDTs apresentou problemas de tendência. Os pontos utilizados para validação foram obtidos com a mesma equipe em campo, utilizando o mesmo equipamento e empregando metodologia similar aos pontos obtidos para geração dos MDTs, portanto não há tendência de deslocamento entre eles.

somente 21,89% da área do modelo estaria enquadrado junto à Classe A do PEC-PCD para as escalas 1:1000 e 1:2000 e que 42,46% (menos da metade) estaria enquadrada na mesma classe para a escala 1:5000.

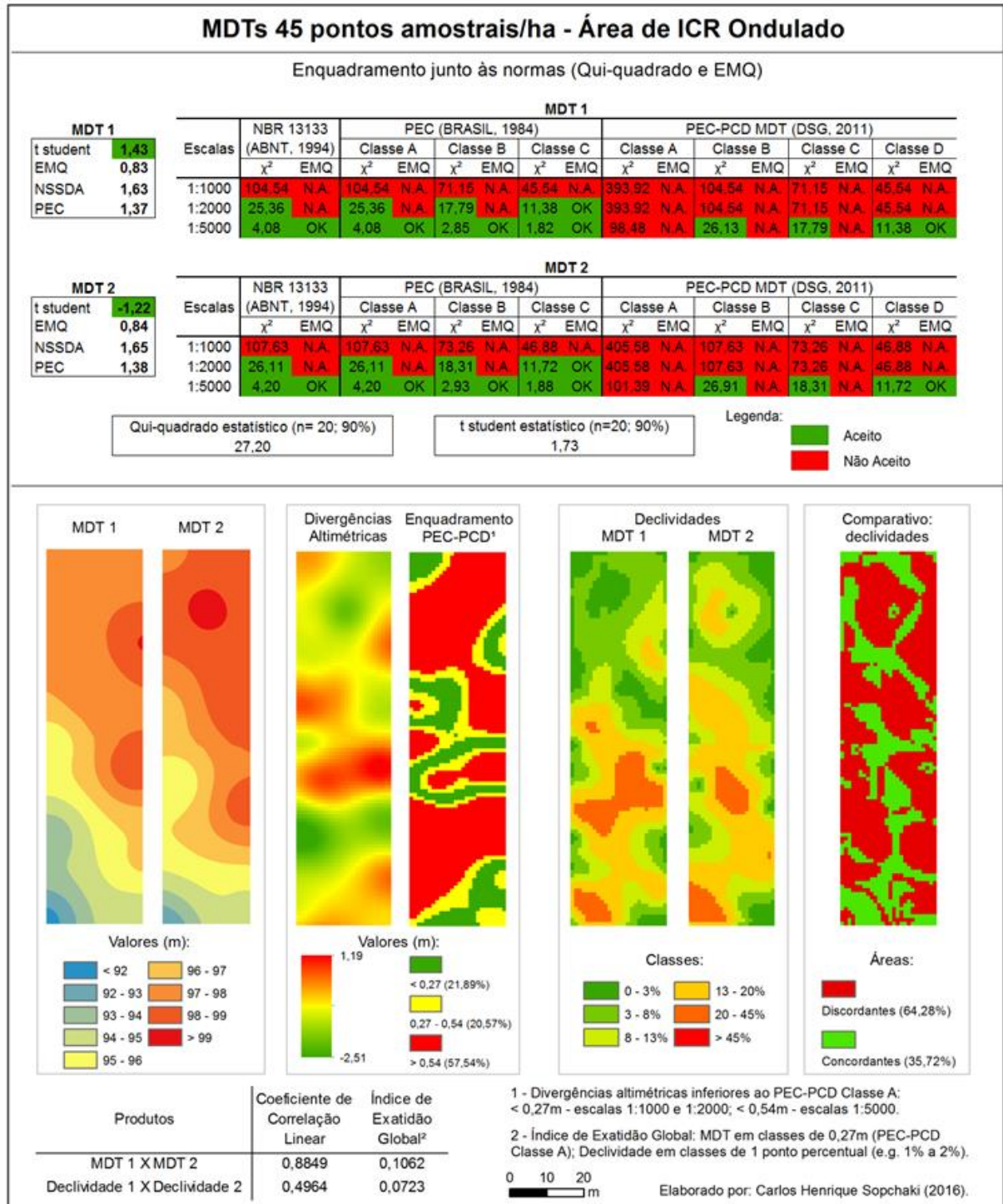


Figura 18 – MDTs 45 pontos amostrais/ha – Área de ICR Ondulado
 Fonte: Organizado pelo autor (2016).

O coeficiente de correlação linear entre os MDTs foi de 0,8849 e o Índice de Exatidão Global, considerando os MDTs discretizados em classes a cada 0,27m

(equivalente ao EMQ da Classe A do PEC-PCD para as escalas 1:1000 e 1:2000) foi de 0,1062.

Ao se gerar os mapeamentos de declividade discretizados, conforme proposta de Pereira e Lombardi Neto (2004), percebe-se que somente 35,72% da área apresenta concordância entre os dois MDTs. A concordância apresentada pelo Índice de Exatidão Global para a declividade, considerada em classes discretizadas a cada um ponto percentual foi de 7,23% (Índice de Exatidão Global: 0,0723) e o coeficiente de correlação linear para as declividades foi de 0,4964.

Os resultados inerentes aos demais modelos poderão ser consultados sob a forma analítica nos Apêndices, bem como serão apresentados sob a forma sintética na Tabela 3, exposta a seguir.

A Tabela 3 apresenta todos os resultados obtidos de cada MDT:

- Enquadramento junto à NBR 13133 (ABNT, 1994), a partir de EMQ e Qui-quadrado (x^2);
- Enquadramento junto ao PEC (BRASIL, 1984), a partir de EMQ e x^2 ;
- Enquadramento junto ao PEC-PCD (DSG, 2011), a partir de EMQ e x^2 ;
- Valor da acurácia para grau de confiança de 95%;
- Valor da acurácia para grau de confiança de 90%;
- Intervalo das divergências altimétricas entre os pares de MDTs;
- Enquadramento das divergências altimétricas junto ao PEC-PCD Classe A (Escala 1:1000 e 1:2000; e escala 1:5000);
- Comparativo de declividades, demonstrando áreas concordantes e discordantes entre as declividades geradas entre os pares de MDTs (discretizadas conforme proposta de Pereira e Lombardi Neto, 2004);
- Coeficiente de Correlação Linear entre os pares de MDTs;
- Coeficiente de Correlação Linear entre os pares de Declividades;
- Índice de Exatidão Global entre os pares de MDTs (discretizados em classes de 0,27m, referente ao PEC-PCD Classe A, escalas 1:1000 e 1:2000);
- Índice de Exatidão Global entre os pares de Declividades (discretizadas em classes de um ponto percentual).

A discussão dos resultados que se dará a seguir terá como base os dados apresentados pela Tabela 3, bem como as informações analíticas referente a cada par de MDTs disponíveis nos Apêndices.

Tabela 3 – Síntese dos Resultados dos MDTs

		Síntese dos Resultados dos MDTs																																															
		Área de ICR Ondulado												Área de ICR Fortemente Ondulado												Área de ICR Escarpado																							
		45 pto/s/ha		180 pto/s/ha		360 pto/s/ha		720 pto/s/ha		1440 pto/s/ha		14400 pto/s/ha		21600 pto/s/ha		28800 pto/s/ha		45 pto/s/ha		180 pto/s/ha		360 pto/s/ha		720 pto/s/ha		1440 pto/s/ha		14400 pto/s/ha		21600 pto/s/ha		45 pto/s/ha		180 pto/s/ha		360 pto/s/ha		720 pto/s/ha		1440 pto/s/ha		14400 pto/s/ha							
		M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2		
PEC	Classe A e NBR13133	1:1000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:2000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:5000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
	Classe B	1:1000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:2000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:5000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
	Classe C	1:1000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:2000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:5000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
PEC-PCD	Classe A	1:1000 e 1:2000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:5000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
	Classe B	1:1000 e 1:2000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:5000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
	Classe C	1:1000 e 1:2000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:5000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
	Classe D	1:1000 e 1:2000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
		1:5000	[Grid of colored cells representing MDT results]																																														
Acurácia (em metros) ¹	95%	1,63	1,65	0,66	0,68	0,31	0,69	0,44	0,30	0,23	0,26	0,12	0,12	0,14	0,13	0,13	0,13	1,48	1,54	0,72	0,72	0,42	0,47	0,36	0,26	0,26	0,26	0,19	0,16	0,17	0,21	0,17	0,19	0,17	0,17	1,77	1,44	0,82	1,02	0,85	0,76	0,48	0,66	0,36	0,37	0,18	0,21	0,20	0,19
	90%	1,37	1,38	0,55	0,57	0,26	0,58	0,37	0,25	0,19	0,22	0,10	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11	1,24	1,29	0,60	0,60	0,35	0,40	0,30	0,22	0,22	0,22	0,16	0,13	0,14	0,18	0,15	0,16	0,14	0,14	1,48	1,21	0,69	0,85	0,71	0,64	0,40	0,55	0,30	0,31	0,15	0,18	0,17	0,16
Intervalo das divergências altimétricas	Mínimo	-2,51 m	-1,10 m	-1,08 m	-1,01 m	-0,45 m	-0,26 m	-0,16 m	-0,28 m	-1,73 m	-0,99 m	-1,08 m	-0,57 m	-0,62 m	-0,29 m	-0,23 m	-0,36 m	-0,22 m	-1,26 m	-1,67 m	-1,11 m	-0,57 m	-0,56 m	-0,46 m	-0,18 m																								
	Máximo	1,19 m	1,34 m	0,68 m	1,12 m	0,61 m	0,25 m	0,20 m	0,27 m	1,84 m	1,11 m	1,09 m	0,83 m	0,53 m	0,33 m	0,17 m	0,16 m	0,19 m	0,89 m	1,01 m	1,01 m	1,14 m	0,93 m	0,55 m	0,35 m																								
Divergências Altimétricas - Enquadramento PEC-PCD ²	< 0,27 m	21,89%	62,54%	83,64%	80,43%	87,71%	100,00%	100,00%	99,87%	22,40%	48,91%	62,86%	77,31%	79,84%	99,64%	100,00%	99,92%	100,00%	37,33%	37,32%	54,25%	60,24%	88,28%	99,30%	99,51%																								
	0,27 m - 0,54 m	20,57%	29,08%	12,79%	13,59%	12,19%	0,00%	0,00%	0,13%	24,11%	34,57%	26,57%	18,92%	19,37%	0,36%	0,00%	0,08%	0,00%	26,25%	31,74%	34,11%	32,33%	10,59%	0,61%	0,49%																								
	> 0,54 m	57,54%	8,38%	3,56%	5,98%	0,10%	0,00%	0,00%	0,00%	53,49%	16,52%	10,57%	3,77%	0,79%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	36,01%	30,94%	11,64%	7,43%	1,13%	0,09%	0,00%																								
Comprativo Declividades (Áreas) ³	Discordantes	64,28%	72,31%	64,32%	64,14%	58,46%	29,68%	23,76%	24,91%	63,37%	70,48%	69,10%	60,78%	56,20%	30,61%	24,04%	21,77%	15,84%	41,68%	58,87%	51,82%	36,49%	19,97%	9,81%	6,45%																								
	Concordantes	35,72%	27,69%	35,68%	35,86%	41,54%	70,32%	76,24%	75,09%	36,63%	29,52%	33,10%	39,22%	43,80%	69,39%	75,96%	78,23%	84,16%	58,32%	41,13%	48,18%	63,51%	80,03%	90,19%	93,55%																								
Coeficiente de Correlação Linear	MDTs	0,8849	0,9648	0,9797	0,9806	0,9852	0,9932	0,9973	0,9922	0,9815	0,9925	0,9944	0,9966	0,9966	0,9988	0,9990	0,9990	0,9992	0,9832	0,9877	0,9914	0,9942	0,9958	0,9977	0,9981																								
	Declividades	0,4964	0,3635	0,4194	0,4477	0,5971	0,9071	0,9351	0,9407	0,4044	0,0918	0,2415	0,4142	0,5403	0,8260	0,8913	0,9095	0,9520	0,7993	0,1405	0,0673	0,3368	0,4589	0,7743	0,8836																								
Índice de Exatidão Global ⁴	MDTs	0,1062	0,3650	0,5861	0,5496	0,5693	0,7884	0,9079	0,7810	0,1106	0,3307	0,4111	0,5031	0,4956	0,8319	0,8583	0,8362	0,8828	0,1984	0,1968	0,2864	0,3322	0,4869	0,7378	0,7551																								
	Declividades	0,0723	0,0569	0,0661	0,0627	0,0727	0,1839	0,2281	0,2087	0,0364	0,0383	0,0373	0,0538	0,0601	0,1125	0,1555	0,1715	0,2247	0,0359	0,0186	0,0208	0,0293	0,0407	0,0859	0,1061																								

1 - Acurácia em valores absolutos para níveis de significância de 95% e 90%
 2 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: <0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; <0,54m - escala 1:5000
 3 - Declividades discretizadas conforme Pereira e Lombardi Neto (2004): 0 a 3%; 3% a 8%; 8% a 13%; 13% a 20%; 20% a 45%; acima de 45%.
 4 - Índices de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividades em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%)

Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

5.1 – CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA ENQUADRAMENTO JUNTO ÀS NORMAS

Os parâmetros estabelecidos pela NBR 13133 (ABNT, 1994) e pelo Projeto de Revisão ABNT NBR 13133 (ABNT, 2015), conforme exposto anteriormente na subseção sobre parâmetros, legislação e normas de validação, são semelhantes aos Padrões de Exatidão Cartográfica - PEC (BRASIL, 1984).

O PEC não contempla procedimentos para avaliação de produtos da cartografia digital, pois, na data da sua publicação, poucas eram as experiências registradas nesta área (DALMOLIN; LEAL, 2001).

Neste sentido, questiona-se como verificar a acurácia altimétrica de produtos digitais utilizando uma relação de medida estabelecida com a equidistância entre as curvas de nível, posto que produtos cartográficos digitais não necessariamente possuem tais curvas.

Leal (2007) faz recomendações a serem implantadas na avaliação da qualidade dos produtos cartográficos brasileiros, entre elas a de atualizar o Decreto nº 89.817/84, que trata do PEC, e recomenda também incluir componentes da qualidade para produtos cartográficos digitais.

Da mesma forma, Santos *et al.* (2010) corroboram com a assertiva de que o PEC não contempla produtos cartográficos gerados por processos digitais e apontam para a necessidade de criação de um procedimento sistemático para avaliação de tais produtos.

Paralelamente à evolução da cartografia digital para a analógica e do avanço das técnicas na cartografia e na representação cartográfica, houve também um avanço nas técnicas de levantamento de campo.

Portanto, questiona-se também quais os benefícios de manter o texto da NBR 13133 nos mesmos patamares de um Decreto de meados da década de 1980 por não contemplar as evoluções técnico-científicas conquistadas nas décadas recentes.

Por outro lado, o PEC-PCD (DSG, 2011) buscou adequar os padrões de exatidão cartográfica para produtos gerados a partir da cartografia digital, estabelecendo padrões para MDS, MDE, MDT e Pontos Cotados e criando uma classe A superior à estabelecida pelo PEC (as classes B, C e D do PEC-PCD correspondem, respectivamente, às classes A, B e C do PEC Altimétrico).

O fato do PEC-PCD (DSG, 2011) não ter feito associação à curvas de nível no que diz respeito ao padrão de exatidão para Pontos Cotados, MDS, MDT e MDE, demonstra uma evolução, posto que, conforme exposto anteriormente, em meio digital, não há necessariamente curvas de nível nos modelos de representação do terreno. Outro ponto positivo refere-se à questão da Classe A, superior às classes propostas pelo PEC (Brasil, 1984), pois, o avanço técnico-científico propicia levantamentos e MDTs mais acurados em relação aos gerados em meio analógico, em meados da década de 1980.

Contudo, conforme exposto anteriormente (Figura 12), os padrões de exatidão cartográfica estabelecidos pelo PEC-PCD são similares nas escalas 1:1000 e 1:2000, porém, é necessário levar em consideração que essas escalas não são semelhantes e que deveria haver um acréscimo nos padrões de exatidão cartográfica da escala 1:1000 em relação à escala 1:2000, assim como ocorre entre as demais escalas (e.g. diferenças nos padrões de exatidão cartográfica entre as escalas 1:5000 e 1:10000).

Com relação ao enquadramento dos MDTs junto às normas, destaca-se inicialmente o fato do PEC (BRASIL, 1984), da NBR 13133 (ABNT, 1994) e do PEC-PCD (DSG, 2011) não estabelecerem de forma clara as metodologias que devem ser utilizadas para avaliação da acurácia²⁷. Assim, a opção por determinado teste estatístico pode gerar resultados divergentes.

Os resultados demonstraram (Tabela 3) que ocorreram 55 vezes a adequação de um MDT em determinada classe das três normas por Qui-quadrado (x^2) e a não adequação quando feito o enquadramento através do EMQ.

Tal situação ocorreu, por exemplo, nos MDTs de 11 pontos da área de ICR Ondulado na escala 1:2000 do PEC, classes A e B e 1:5000 do PEC-PCD, classes B e C; bem como nos MDTs de 180 pontos da área de ICR Escarpado, no enquadramento junto à Classe A do PEC-PCD, para as escalas de 1:2000 e 1:1000.

Ressalta-se aqui que normas internacionais, como a NSSDA (FGDC, 1998) e a ISO 19157 (ISO, 2013) estabelecem critérios claros para avaliação do grau de acurácia dos produtos cartográficos que, nestes casos, refere-se à avaliação a partir do EMQ.

²⁷ A Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais – ET-CQDG (DSG, 2016) que estabelece que o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD) deve ser calculado diretamente através do Erro Médio Quadrático (EMQ) foi publicada somente em fevereiro de 2016, momento no qual esta Tese estava em processo final de revisão.

O fato das normas brasileiras não terem estabelecido claramente qual o teste estatístico deve ser adotado para avaliação da acurácia fez com que diferentes metodologias fossem aplicadas.

Pinheiro e Kux (2003), Costa *et al.* (2010), Miceli *et al.* (2010), Rodrigues, Debiasi e Souza (2010), Cruz *et al.* (2011) e Souza (2016) utilizaram o EMQ para a avaliação da acurácia junto à normas brasileiras, enquanto que Galo e Camargo (1994), Dalmolin e Leal (2001), Camargo *et al.* (2007), Barbosa *et al.* (2008), Silva e Nazareno (2009), Vieira e Genro (2011) e Rodrigues, Kux e Albuquerque (2015) utilizaram a avaliação através da distribuição de Qui-Quadrado.

Assim, possíveis avaliações de enquadramento de produtos cartográficos junto ao PEC (BRASIL, 1984), à NBR 13133 (ABNT, 1994) e ao PEC-PCD (DSG, 2011) podem ter tido como resultado a adequação (ou não adequação) junto à norma a partir de determinada metodologia e ter resultado divergente aplicando-se outra metodologia de avaliação, o que acaba fragilizando os próprios critérios estabelecidos pelas normas.

A NSSDA (FGDC, 1998) e a ISO 19157 (ISO, 2013), além de estabelecer quais metodologias devem ser adotadas para fins de verificação da qualidade, não instituem classes de qualidade de produtos cartográficos através de valores fixos de desvio-padrão, o que traz o benefício (e a responsabilidade) de deixar a cargo do utilizador do produto cartográfico a associação entre o padrão de acurácia apresentado e o requerido para o seu trabalho (*fitness to use*), em conformidade com o proposto Ebner, Reinhardt e Hobler (1988), Gong *et al.* (2000) e Chrisman (2006), bem como permitem o enquadramento em níveis de acurácia mais elevados (95% para o NSSDA e de até 99,8% para a ISO 19157).

Desta forma, a informação da qualidade de um documento cartográfico estabelecida através de um nível de significância do EMQ torna a informação mais precisa (e.g. 95% dos pontos apresentam erros menores do que 0,50m) e elimina o problema da subjetividade de enquadramento em classes (que transformam um dado quantitativo em qualitativo), como ocorre nas normas brasileiras (conforme exposto anteriormente nas Figuras 12, 13 e 14).

Nesta pesquisa, a fim de se padronizar as análises e evitar incongruências, definiu-se que as discussões que se seguirão levarão em conta o enquadramento junto às normas a partir do EMQ (colunas 'B' da Tabela 3), conforme proposto por FGDC (1998), MINNESOTA PLANNING (1999), ISO (2013) e DSG (2016).

5.2 – ENQUADRAMENTO JUNTO ÀS NORMAS, ACURÁCIA, INFLUÊNCIAS DO TERRENO E DA DENSIDADE AMOSTRAL

Nenhum dos MDTs gerados com densidade amostral de 45 pontos/ha para as três classes de ICR (Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado) se enquadraram nas Classes A, B ou C do PEC-PCD, tanto para as escalas de 1:1000, quanto 1:2000 e 1:5000. Os seis MDTs (três pares – um par de cada área) foram aceitos, no que diz respeito ao PEC-PCD, somente na Classe D, na escala 1:5000. Os modelos também não foram aceitos junto à NBR 13133 e ao PEC Classe A nas escalas 1:1000 e 1:2000.

Ressalta-se que todos os seis MDTs em questão foram gerados com a densidade de pontos amostrais proporcionais à maior densidade mínima estabelecida pela NBR 13133 (ABNT, 1994), a qual, segundo a norma, objetiva gerar levantamentos na escala 1:500 em terrenos com declividade superior a 20% de inclinação.

Contudo, embora tenham sido efetuados com a densidade de pontos que, em tese, atingiria a escala de 1:500, sequer atingiram a escala de 1:2000 no enquadramento junto à NBR 13133, alcançando somente a escala de 1:5000 para esta norma e no que concerne ao PEC-PCD a escala 1:5000 na Classe D.

Os MDTs gerados com densidade amostral de 180 pontos/ha não foram aceitos nas escalas 1:1000 da NBR 13133, 1:1000 do PEC Classe A, 1:1000 e 1:2000 do PEC-PCD Classes A e B e 1:5000 do PEC-PCD Classe A. Além das rejeições junto à essas classes (comuns aos três pares de MDTs – ICR Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado), o par de MDT da área de ICR Escarpado também não foi aceito nas escalas 1:1000 da Classe B do PEC e 1:1000 e 1:2000 da Classe C do PEC-PCD.

Embora estes MDTs tenham sido gerados a partir de densidade amostral quatro vezes superior à maior densidade amostral estabelecida pela NBR 13133, os mesmos não atingiram sequer a escala 1:1000 da referida norma e com relação ao PEC-PCD alcançaram a escala de 1:5000 somente na Classe B.

Os pares de MDTs se enquadraram junto à escala 1:1000 da NBR 13133 somente a partir das densidades de 720 pontos/ha (área de ICR Ondulado), 360 pontos/ha (área de ICR Fortemente Ondulado) e 1440 pontos/ha (área de ICR Escarpado).

Inferese, portanto, que a densidade de pontos para levantamentos topográficos altimétricos estabelecida pela NBR 13133 está subdimensionada para aplicação em MDTs, o que pode acarretar em produtos com qualidades inferiores às esperadas para a escala que se propõem a representar.

Tal fato reforça a importância da necessidade de avaliação da qualidade dos MDTs, conforme já discutido por autores como Wise (2000), Zhu *et al.* (2005), Erdogan (2010), Hobi e Ginzler (2012), Constantino e Angelini (2013), posto que, mesmo que tenham sido gerados utilizando adequadamente a metodologia estabelecida pela NBR 13133, os modelos podem não se enquadrar junto aos critérios de aceitação da norma.

Nas áreas de ICR Ondulado e ICR Fortemente Ondulado, os MDTs alcançaram a Classe A do PEC-PCD nas escalas 1:1000 e 1:2000 a partir da densidade de 1440 pontos/ha, contudo essa densidade não foi suficiente para enquadrar o modelo nessas escalas e classe para os MDTs das áreas de ICR Escarpado.

O par de MDTs subsequente gerado com densidade de pontos superior a 1440 pontos/ha foi produzido com dez vezes o valor desta densidade, ou seja, 14400 pontos/ha e nestes, para a área de ICR Escarpado, os modelos já são aceitos para enquadramento nas escalas 1:1000 e 1:2000 do PEC-PCD, contudo, dentro deste intervalo de densidades (entre 1440 pontos/ha e 14400 pontos/ha) possivelmente existam valores que já seriam aceitos para estas escalas na classe A do PEC-PCD, conforme será explicitado mais adiante a partir das regressões lineares.

Conforme pode ser constatado na Tabela 4, exposta a seguir, e na Tabela 3, exposta anteriormente, não há diferenças significativas entre as áreas de ICR ondulado e fortemente ondulado no que diz respeito às densidades necessárias para enquadramento junto às normas brasileiras (PEC, PEC-PCD e NBR 13133). O enquadramento junto à Classe A do PEC-PCD, escalas 1:1000 e 1:2000, por exemplo, é feito a partir da mesma densidade amostral de 1440 pontos/ha.

As diferenças se mostram acentuadas quando se observa as densidades amostrais da área de ICR Escarpado em relação às outras. Enquanto o enquadramento junto ao PEC-PCD na Classe C, escalas 1:1000 e 1:2000, é feito a partir de 180 pontos/ha para as áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado, para a área de ICR Escarpado são necessários 720 pontos/ha, por exemplo.

Tabela 4 – Densidades amostrais e enquadramento junto às normas brasileiras

Normas, Classes e Escalas			Área de ICR Ondulado		Área de ICR Fortemente Ondulado		Área de ICR Escarpado	
			pontos/m ²	pontos/ha	pontos/m ²	pontos/ha	pontos/m ²	pontos/ha
PEC	Classe A e NBR13133	1:5000	0,0045	45	0,0045	45	0,0045	45
		1:2000	0,018	180	0,018	180	0,018	180
		1:1000	0,072	720	0,036	360	0,144	1440
	Classe B	1:5000	0,0045	45	0,0045	45	0,0045	45
		1:2000	0,018	180	0,018	180	0,018	180
		1:1000	0,018	180	0,018	180	0,072	720
	Classe C	1:5000	0,0045	45	0,0045	45	0,0045	45
		1:2000	0,0045	45	0,0045	45	0,0045	45
		1:1000	0,018	180	0,018	180	0,036	360
PEC-PCD	Classe A	1:5000	0,072	720	0,036	360	0,144	1440
		1:1000 e 1:2000	0,144	1440	0,144	1440	1,44	14400
	Classe B	1:5000	0,018	180	0,018	180	0,018	180
		1:1000 e 1:2000	0,072	720	0,036	360	0,144	1440
	Classe C	1:5000	0,018	180	0,018	180	0,018	180
		1:1000 e 1:2000	0,018	180	0,018	180	0,072	720
	Classe D	1:5000	0,0045	45	0,0045	45	0,0045	45
		1:1000 e 1:2000	0,018	180	0,018	180	0,036	360

Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

O fato de praticamente inexistirem diferenças entre as densidades amostrais mínimas para enquadramento junto às normas brasileiras no que concerne às áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado deve-se, provavelmente, ao fato de tais normas trabalharem com intervalos (classes), pois a análise dos valores de acurácia absoluta para 90% de significância, calculados diretamente a partir do EMQ, conforme proposto por FGDC (1998) e MINNESOTA PLANNING (1999), revela que há divergências em relação à essas duas classes de relevo, embora menores do que quando comparadas à área de ICR Escarpado (Gráfico 1).

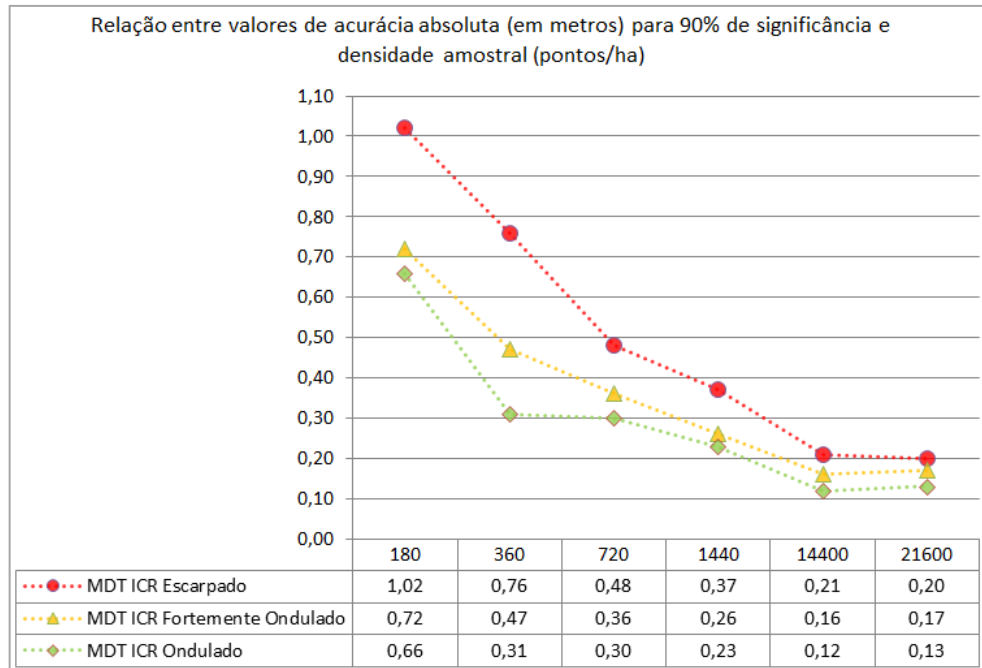


Gráfico 1 – Relação entre valores de acurácia absoluta, densidade amostral e ICR
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

A relação entre valores de acurácia absoluta (Gráfico 1) demonstra que quanto maior o Índice de Concentração de Rugosidade, maior será a densidade de pontos amostrais necessária para que se obtenha graus de acurácia similares.

Tal inferência coincide com o exposto na NBR 131333 (ABNT, 1994), que embora apresente propostas de densidades amostrais que estão subdimensionadas para aplicações em MDTs, prevê que quanto maior a declividade do terreno, maior deva ser a densidade de pontos amostrais.

Outros autores como Li (1992), Li e Gold (2005²⁸) *apud* Hobi e Ginzler (2012) e Erdoğan (2010) afirmaram que a acurácia do MDT depende, entre outros fatores, da rugosidade do terreno. Conforme Li (1992), a precisão dos MDTs está correlacionada com o ângulo de inclinação da superfície do terreno.

Su e Bork (2006) concluíram que a precisão dos MDTs gerados a partir de LIDAR diminui com o aumento da declividade do terreno, de acordo com os autores, o EMQ em vertentes com mais de 10° de inclinação foi o dobro do observado em vertentes com inclinações menores do que 2°.

Conforme Guo *et al.* (2010) os erros presentes em MDTs possuem uma correlação com a topografia dos terrenos mapeados e terrenos mais rugosos resultam em EMQ maiores, independente do método de interpolação utilizado.

²⁸ LI, Z.; GOLD, C. Accuracy of Digital Terrain Models. In LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. **Digital Terrain Modeling**. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005.

A análise dos valores absolutos das divergências altimétricas entre os pares de MDTs (Gráfico 2) demonstra que, nas três áreas, modelos gerados com mesmo n porém diferentes arranjos amostrais, possuem diferença superior a 1m para densidades amostrais iguais ou inferiores a 1440 pontos/ha.

Os dados expostos no Gráfico 2 corroboram com a assertiva de que terrenos mais rugosos necessitam de maior densidade amostral para serem representados com mesmo grau de acurácia de terrenos com menor rugosidade, em conformidade com Li (1992), Li e Gold (2005²⁹) *apud* Hobi e Ginzler (2012), Bork (2006), Erdoğan (2010), Su e Guo *et al.* (2010), pois verifica-se uma tendência das diferenças absolutas entre os MDTs crescerem à medida que aumenta o grau de complexidade do terreno (ICR Ondulado, ICR Fortemente Ondulado, ICR Escarpado).

Assim, dois modelos gerados com mesmo n amostral porém diferentes arranjos amostrais tendem a divergir mais em terrenos com ICR Escarpado do que em terrenos com ICR Ondulado.

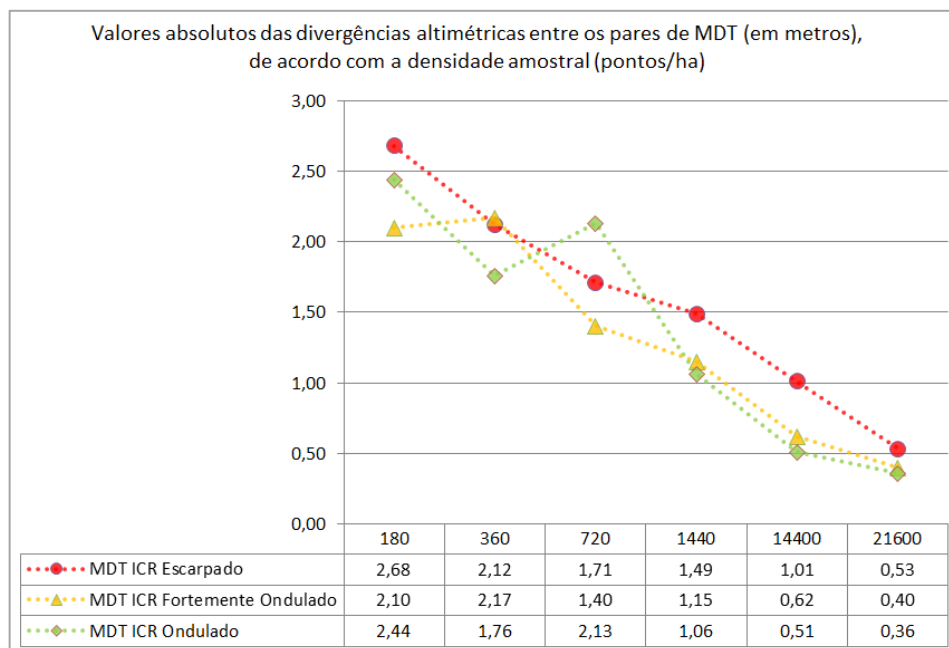


Gráfico 2 – Valores absolutos das divergências altimétricas entre os pares de MDTs
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016)

Os percentuais de divergências altimétricas acima do limiar aceito para a Classe A do PEC-PCD (escalas 1:1000 e 1:2000) demonstram que, embora o par de MDTs seja aceito para enquadramento nesta classe e escalas (área de ICR

²⁹ LI, Z.; GOLD, C. Accuracy of Digital Terrain Models. In LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. **Digital Terrain Modeling**. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005.

Ondulado e Fortemente Ondulado) de acordo com a validação efetuada junto aos pontos de controle (Tabela 3), densidades amostrais iguais ou inferiores a 1440 pontos/ha geram divergências altimétricas superiores ao aceito para essa escala em mais de 10% dos pontos para as três áreas de ICR (Gráfico 3).

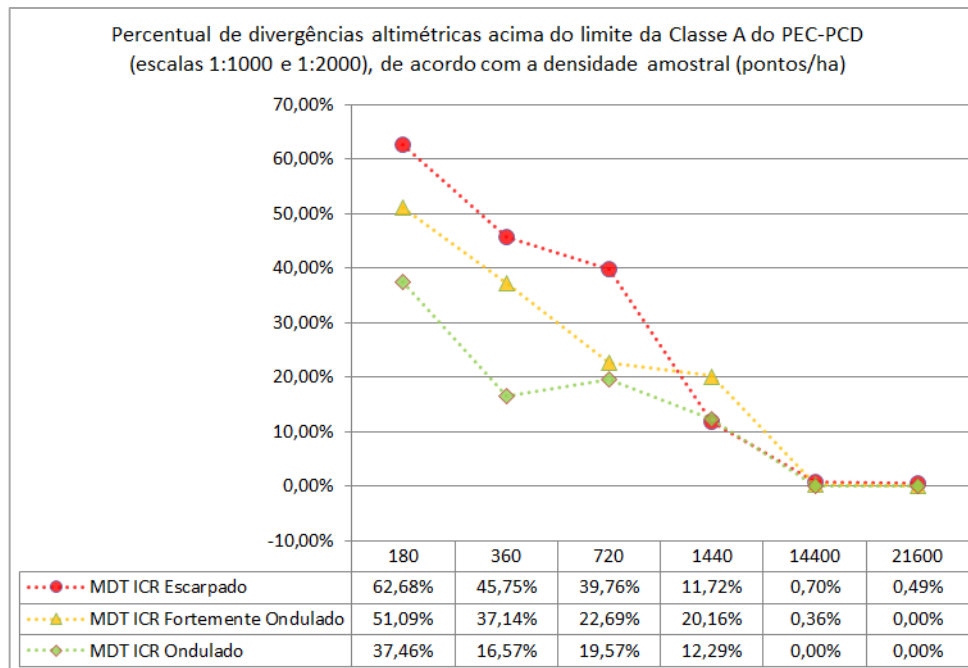


Gráfico 3 – Percentual de divergências altimétricas acima do limite da Classe A do PEC-PCD
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Assim, considerando que diferentes profissionais em campo dificilmente conseguiriam efetuar levantamentos semelhantes (com arranjo amostral similar), conforme exposto por Young (1971), Sampaio (2008), Sopchaki (2012) e Sampaio e Augustin (2014), a densidade amostral de 1440 pontos/ha não é suficiente para garantir que dois modelos gerados na mesma área com a mesma densidade porém diferentes arranjos amostrais tenham percentuais de divergências inferiores aos aceitos pelo PEC-PCD, ou seja, embora ambos tenham sido enquadrados junto à norma, a opção por um ou outro modelo poderia gerar análises com erros acima dos admitidos para a escala.

Foi efetuada a regressão linear entre os percentuais de divergências altimétricas e as densidades amostrais para os pares de MDTs a fim de verificar quais as densidades necessárias para que diferentes MDTs gerados na mesma área (com mesmo n amostral e diferentes arranjos amostrais, considerando pontos bem distribuídos), sejam enquadrados junto ao PEC-PCD Classe A (escalas 1:1000,

1:2000 e 1:5000) e que a divergência entre ambos esteja dentro dos limites de aceitação da norma.

Os gráficos a seguir apresentam as regressões lineares efetuadas para as áreas de ICR Ondulado (Gráfico 4), Fortemente Ondulado (Gráfico 5) e Escarpado (Gráfico 6). Com base nas regressões lineares infere-se que as densidades mínimas necessárias para que MDTs gerados a partir de mesmo n amostral com arranjos amostrais diferentes tenham divergências dentro dos limiares de aceitação para a escala (90% com diferenças inferiores a 0,27m para escalas 1:1000 e 1:2000; 90% com diferenças inferiores a 0,54m para escala 1:5000) são aproximadamente:

- Área de ICR Ondulado:
 - 2940 pontos/ha – escalas 1:1000 e 1:2000;
 - 172 pontos/ha – escala 1:5000.
- Área de ICR Fortemente Ondulado:
 - 4726 pontos/ha – escalas 1:1000 e 1:2000;
 - 395 pontos/ha – escala 1:5000.
- Área de ICR Escarpado:
 - 6350 pontos/ha – escalas 1:1000 e 1:2000;
 - 620 pontos/ha – escala 1:5000.

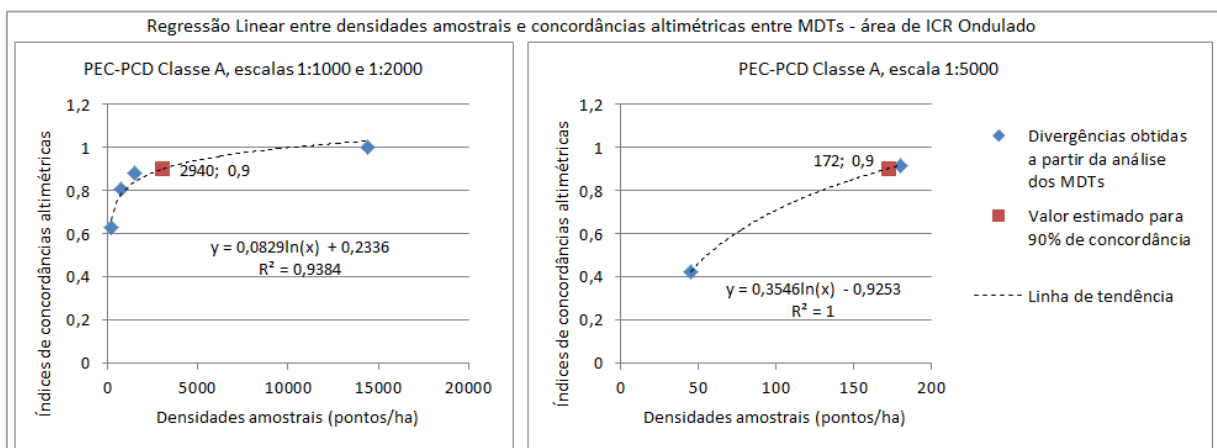


Gráfico 4 – Regressão Linear: densidades amostrais e concordâncias altimétricas – ICR Ondulado
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

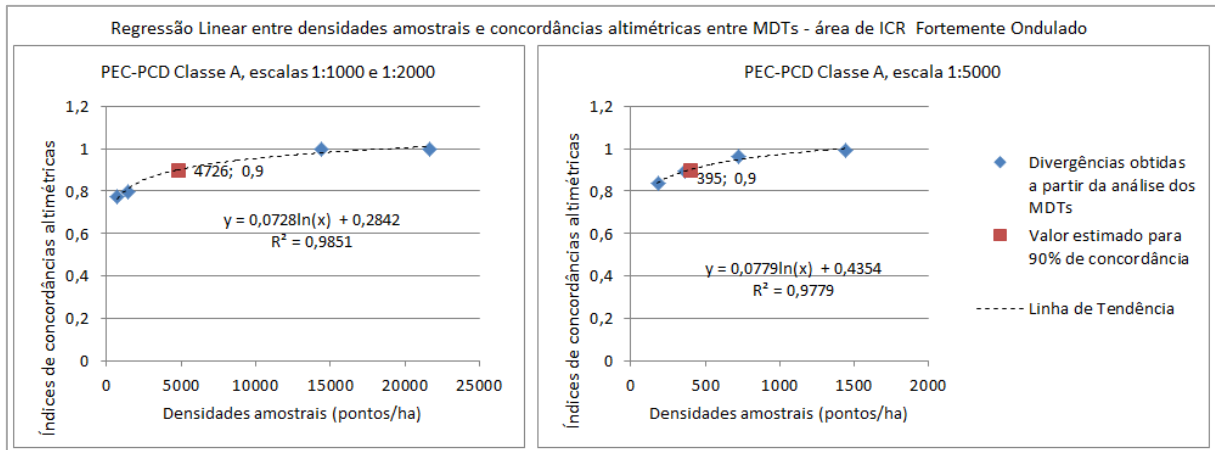


Gráfico 5 – Regressão Linear: densidades amostrais e concordâncias altimétricas – ICR Fortemente Ondulado

Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

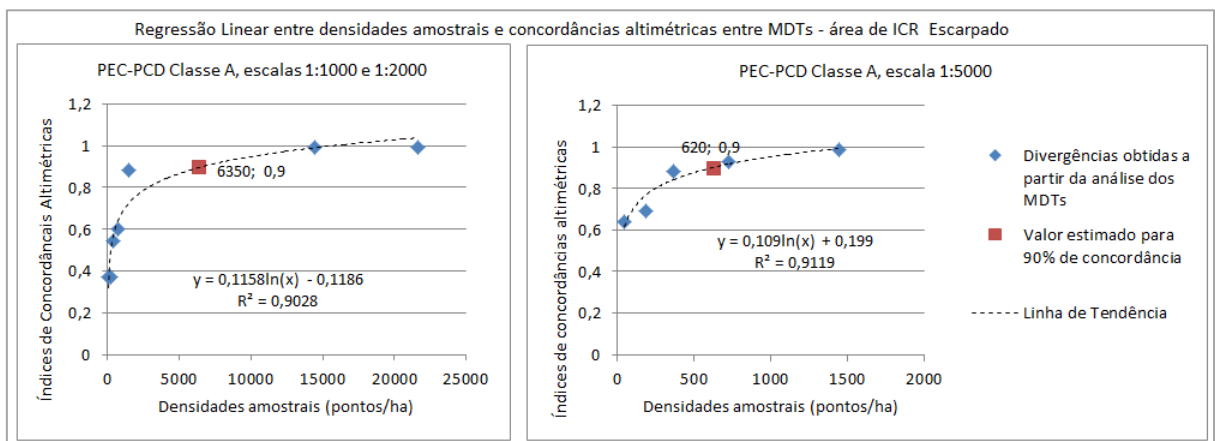


Gráfico 6 – Regressão Linear: densidades amostrais e concordâncias altimétricas – ICR Escarpado

Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Assim, para que os MDTs se enquadrem junto ao PEC-PCD Classe A (escalas 1:1000 e 1:2000) e que as divergências entre pares de MDTs (mesmo n amostral, diferentes arranjos amostrais) esteja dentro dos limiares de aceitação impostos pela norma, a área de ICR Escarpado necessita de uma densidade amostral cerca de 35% maior do que a área de ICR Fortemente Ondulado, que por sua vez, necessita de uma densidade aproximadamente 61% maior do que a área de ICR Ondulado.

Tal constatação está em conformidade com as assertivas de Li (1992), Li e Gold (2005³⁰) *apud* Hobi e Ginzler (2012), Su e Bork (2006), Erdoğan (2010) e Guo *et al.* (2010), que afirmam que o grau de acurácia de um MDT está relacionado com a rugosidade do terreno.

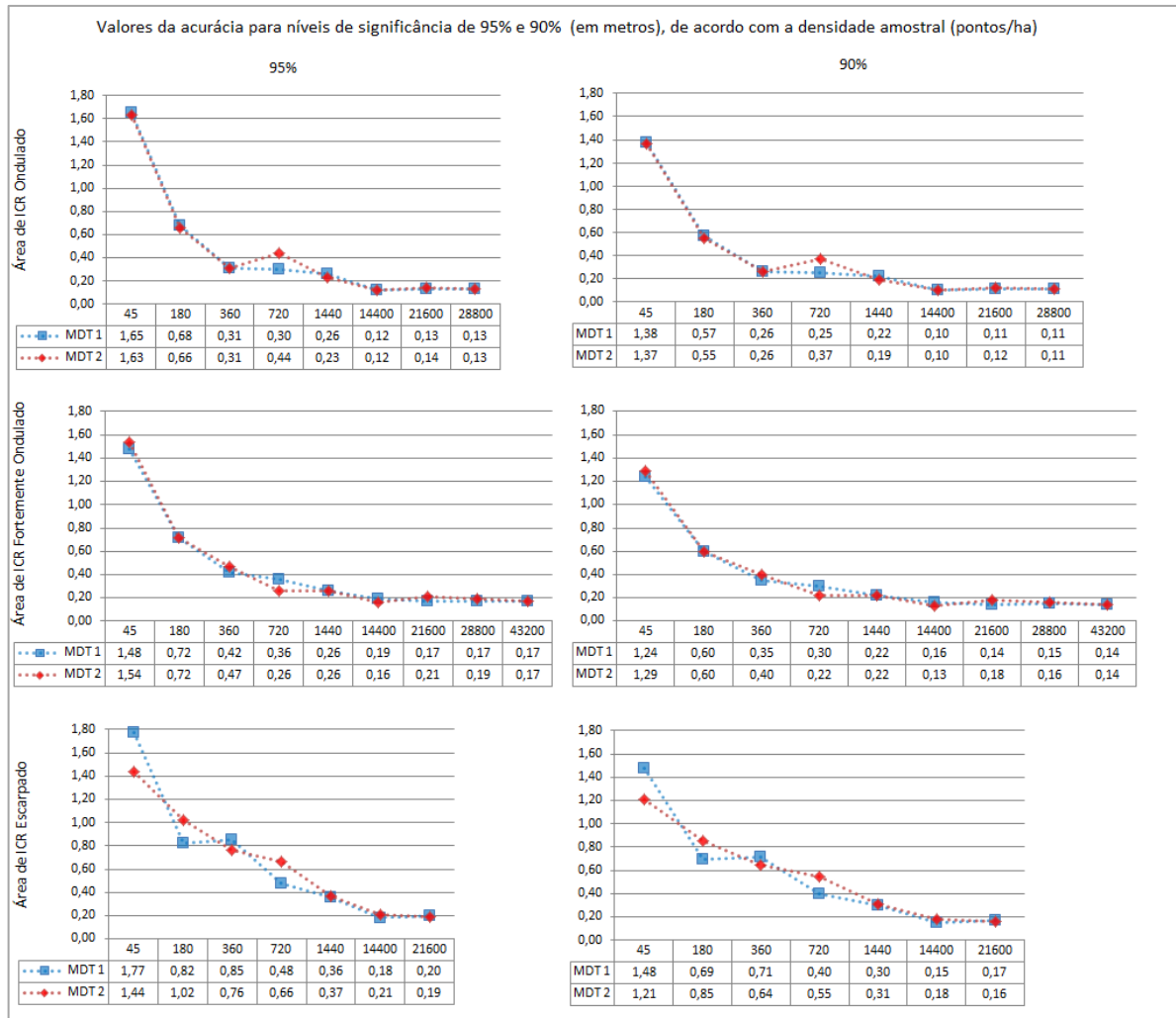
³⁰ LI, Z.; GOLD, C. Accuracy of Digital Terrain Models. In LI, Z., ZHU, Q., GOLD, C. **Digital Terrain Modeling**. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005.

A análise dos valores absolutos de acurácia calculados diretamente a partir do EMQ, conforme proposto por FGDC (1998) e MINNESOTA PLANNING (1999), para 95% de significância (conforme NSSDA) e 90% de significância permite inferir que, independente do ICR do terreno, diferentes MDTs gerados a partir de mesmo n amostral, porém com diferentes arranjos tendem a ter valores de acurácia semelhantes a partir da densidade de 1440 pontos/ha (Gráfico 7).

Infere-se portanto que, a partir da densidade amostral de 1440 pontos/ha, a influência do arranjo amostral sobre a qualidade do MDT passa a ser menor (considerando pontos bem distribuídos sobre o terreno), no entanto cabe destacar o que foi exposto anteriormente, de que as divergências altimétricas entre dois MDTs gerados com esta densidade podem ser superiores às aceitas para a escala.

Verifica-se também que, nas três áreas, não há aumento de acurácia a partir da densidade amostral de 14400 pontos/ha, ou seja, independente da rugosidade do terreno (ICR Ondulado, Fortemente Ondulado, Escarpado), um levantamento com esta densidade teria acurácia altimétrica similar a um levantamento com densidade de 28800 pontos/ha para aquela área, por exemplo.

Levando-se em consideração a otimização de tempo e redução de custos para geração de MDTs, pode-se optar por levantamentos com n amostral máximo de 14400 pontos/ha, pois amostras maiores não trarão ganho de acurácia altimétrica para os MDTs.



Gráficos 7 – Valores da acurácia para níveis de significância de 95% e 90%
 Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Com a finalidade de se obter metodologia para determinar qual a densidade necessária para que se alcance um certo grau de acurácia absoluta para 90% e 95% de confiança, de acordo com a classe de ICR (Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado), foram efetuadas regressões lineares entre as densidades amostrais e os valores de acurácia (Gráficos 8, 9, 10, 11, 12 e 13), a partir das quais foram deduzidas as equações para cálculo da densidade amostral (em pontos/ha) e/ou acurácia (em metros) para cada área.

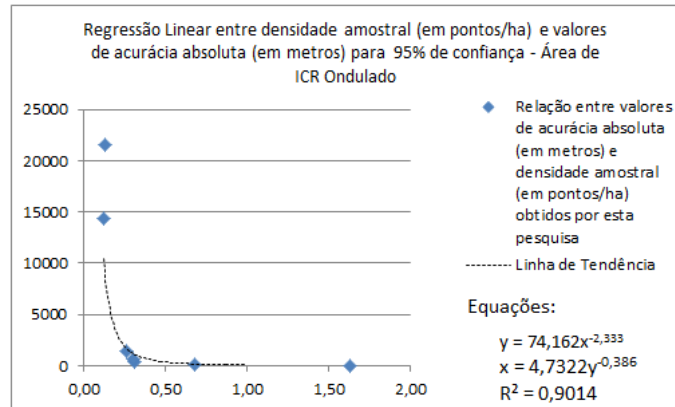


Gráfico 8 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (95%) – ICR Ondulado
 Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

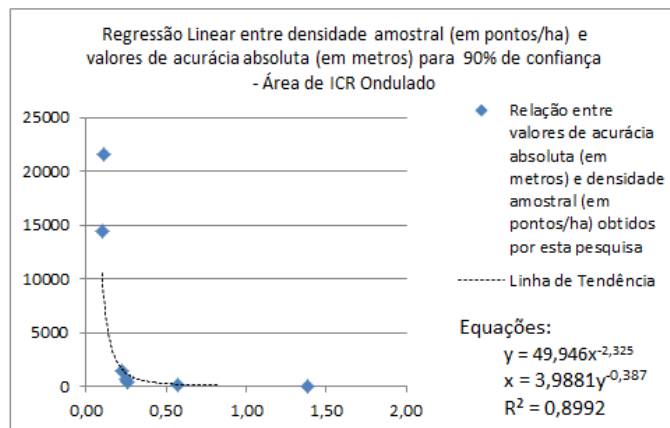


Gráfico 9 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (90%) – ICR Ondulado
 Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

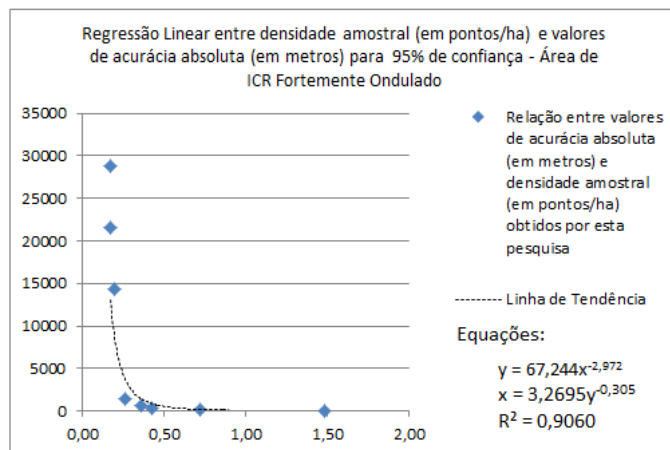


Gráfico 10 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (95%) – ICR Fortemente Ondulado
 Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

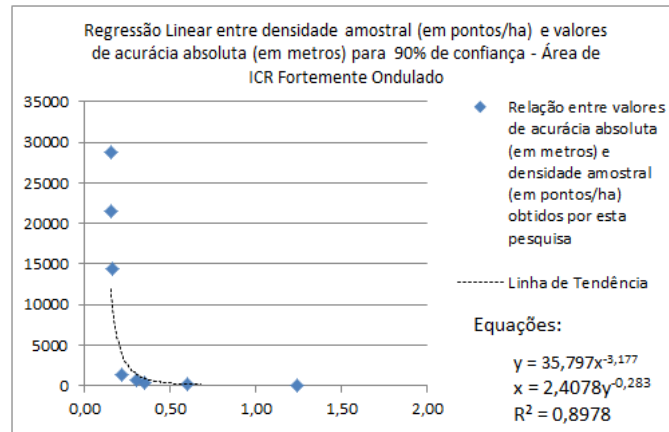


Gráfico 11 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (90%) – ICR Fortemente Ondulado

Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

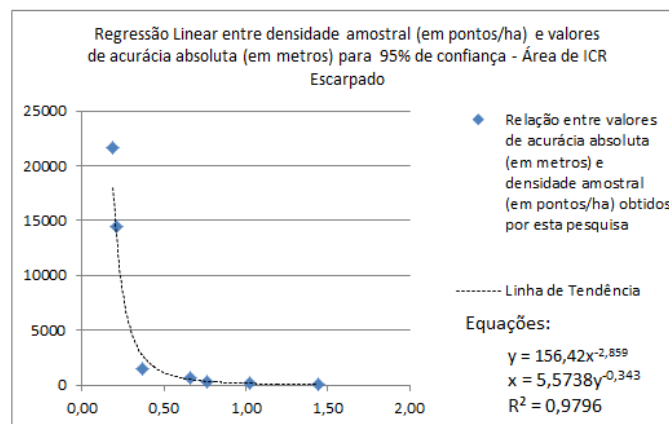


Gráfico 12 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (95%) – ICR Escarpado

Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

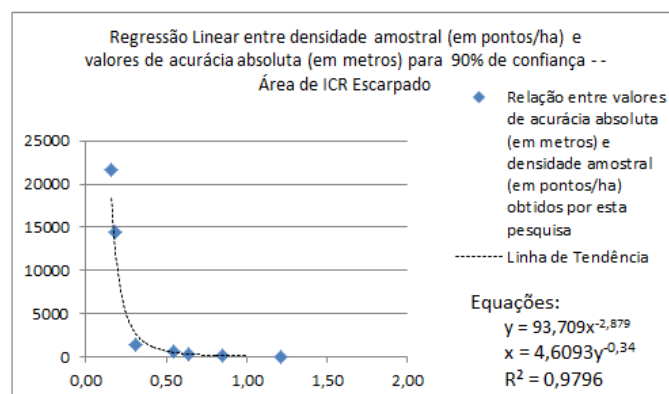


Gráfico 13 – Regressão Linear: densidades amostrais e valores de acurácia (90%) – ICR Escarpado

Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

A Tabela 5 apresenta todas as equações, deduzidas a partir das regressões lineares, para cálculo de densidades amostrais (em pontos/ha) e/ou dos valores de acurácia (em metros) para graus de acurácia de 95% e 90% referente às três áreas (ICR Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado).

Tabela 5 – Equações para cálculo de densidades amostrais e valores de acurácia

	95%			90%		
	densidade amostral (pontos/ha)	valor de acurácia (em metros)	R^2	densidade amostral (pontos/ha)	valor de acurácia (em metros)	R^2
ICR Ondulado	$d_a = 74,162 \times A^{-2,333}$	$A = 4,7322 \times d_a^{-0,386}$	0,9014	$d_a = 49,946 \times A^{-2,325}$	$A = 3,9881 \times d_a^{-0,387}$	0,8992
ICR Fortemente Ondulado	$d_a = 67,244 \times A^{-2,972}$	$A = 3,2695 \times d_a^{-0,305}$	0,9060	$d_a = 35,797 \times A^{-3,177}$	$A = 2,4078 \times d_a^{-0,283}$	0,8978
ICR Escarpado	$d_a = 156,42 \times A^{-2,859}$	$A = 5,5738 \times d_a^{-0,343}$	0,9796	$d_a = 93,709 \times A^{-2,879}$	$A = 4,6093 \times d_a^{-0,34}$	0,9796

Fonte: Elaborado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Assim, se por exemplo, necessita-se de um MDT da área de ICR Escarpado com valor de acurácia igual a 0,25m, para nível de confiança de 90%, o cálculo pode ser efetuado da seguinte maneira:

$$d_a = 93,709 \times A^{-2,879} \quad \therefore \quad d_a = 93,709 \times 0,25^{-2,879} \quad (21)$$

$$\therefore \quad d_a = 93,709 \times 54,12 \quad \therefore \quad d_a = 5071 \text{ pontos/ha}$$

Neste exemplo, a densidade amostral necessária seria de aproximadamente 5071 pontos/ha. Contudo cabe destacar que tais equações devem servir apenas como referência inicial para planejamento, pois a qualidade final dos MDTs deve ser sempre avaliada, conforme exposto por Wise (2000), Zhu *et al.* (2005), Erdogan (2010), Hobi e Ginzler (2012) e Constantino e Angelini (2013).

5.3 – DECLIVIDADE: AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

Embora o percentual das divergências altimétricas entre os MDTs de mesmo n amostral porém diferentes arranjos amostrais seja igual a zero para as três áreas a partir da densidade amostral de 14400 pontos/ha (Gráfico 3, exposto na subseção anterior), as divergências entre as declividades discretizadas - conforme proposta da EMBRAPA para avaliação de aptidão agrícola (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004) - não seguem a mesma tendência (Gráfico 14).

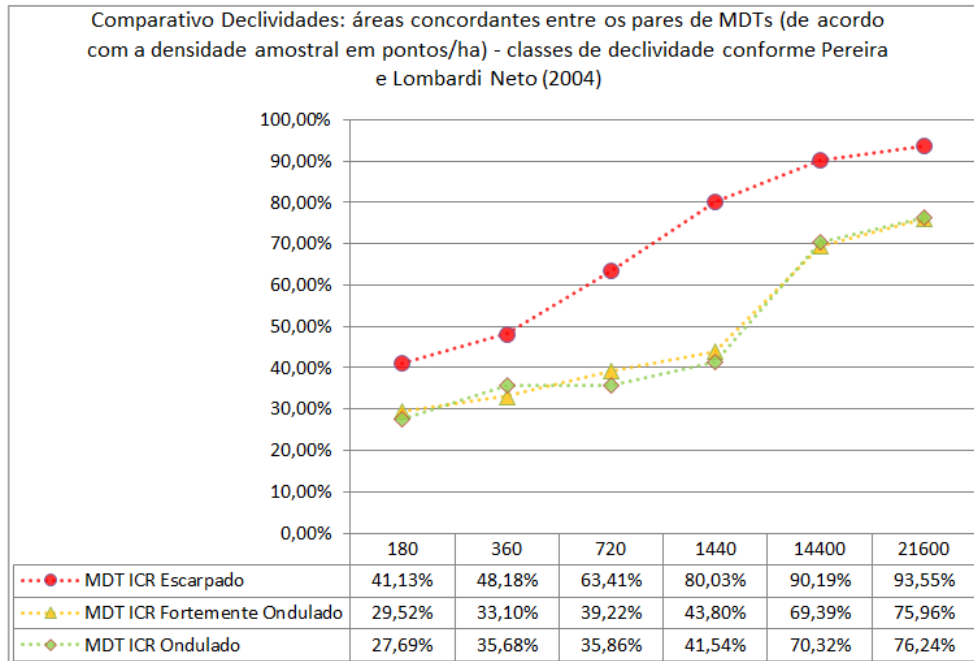


Gráfico 14 – Comparativo Declividades: áreas concordantes entre os pares de MDTs - declividades discretizadas conforme Pereira e Lombardi Neto (2004).
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

As áreas concordantes entre as declividades nos terrenos de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado apresentam tendência de crescimento similar, a partir do aumento da densidade amostral: n amostral de 180 pontos/ha – cerca de 28% de concordância; n amostral de 1440 pontos/ha – cerca de 42% de concordância; n amostral de 21600 pontos/ha – cerca de 76% de concordância.

Nas áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado chama a atenção o grau de discordância mesmo nas densidades amostrais mais elevadas, de 14400 e 21600 pontos/ha: cerca de 30% e 24%, respectivamente, de discordância entre os modelos (Gráfico 14).

Portanto, nestas áreas e com a discretização aplicada (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004) a declividade se mostra extremamente sensível a quaisquer variações altimétricas, pois mesmo MDTs enquadrados na Classe A do PEC-PCD (escalas 1:1000 e 1:2000), com acurácia absoluta próxima a 0,20 m (90% dos pontos com erros menores do que 0,20 m), cujas divergências altimétricas estão todas enquadradas no admitido para a Classe A do PEC-PCD (escalas 1:1000 e 1:2000), gerados a partir de densidades amostrais iguais ou superiores a 14400 pontos/ha, apresentam divergências entre as declividades superiores a 24%.

Ao contrário dos valores apresentados anteriormente no que concerne à altimetria, a área de ICR Escarpado apresenta níveis de concordância entre as

declividades superiores às áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado para todas as densidades amostrais, chegando a atingir, respectivamente, 90,19% e 93,55% de concordância entre os modelos com densidades amostrais de 14400 e 21600 pontos/ha (Gráfico 14).

Tal fato se deve à escolha adotada para discretização da declividade (PEREIRA; LOMBARDI NETO, 2004) associada ao padrão de relevo da área de ICR Escarpado. Pereira e Lombardi Neto (2004) propõem seis classes de declividade, sendo que uma delas é extensa, englobando 25 pontos percentuais (20% a 45% de declividade). A maior parte da área de ICR Escarpado foi mapeada como pertencente a esta classe (Figura 19), portanto a escolha por outra metodologia de discretização da declividade poderia resultar em discordâncias superiores às áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado, assim como poderia resultar em discordâncias maiores inclusive para estas áreas.

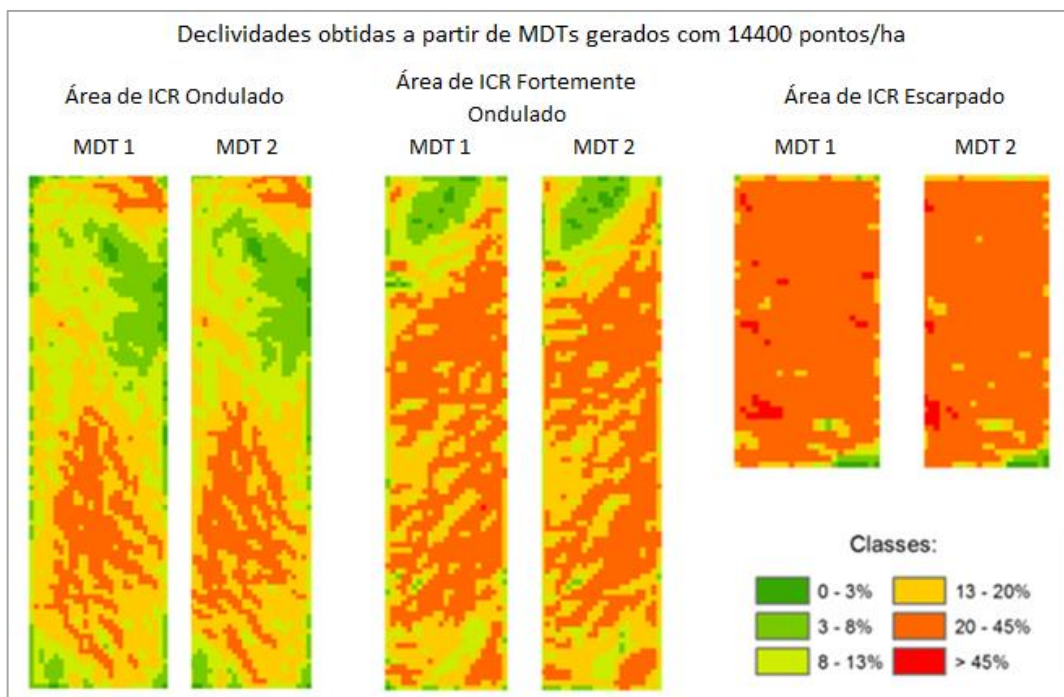


Figura 19 – Declividades obtidas em MDTs gerados com 14400 pontos/ha
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Embora não tenham sido gerados mapeamentos de declividade com outras discretizações, foi calculado o Índice de Exatidão Global entre as declividades com classes a cada ponto percentual (e.g.: 1% a 2%, 2% a 3%) para cada par de MDT. O índice traz resultado similar à álgebra de mapas entre áreas concordantes e discordantes: índice igual a 1 sinaliza 100% de áreas concordantes entre os

mapeamentos, enquanto índice igual a 0,1 sinaliza 10% de concordância entre os mapeamentos, por exemplo.

O Índice de Exatidão Global entre as declividades (Gráfico 15) demonstra que a área de ICR Ondulado tem índices superiores à área de ICR Fortemente Ondulado, que por sua vez, tem índices superiores à área de ICR Escarpado, em conformidade com o que ocorreu com a altimetria nos três ambientes.

A análise do Índice de Exatidão Global entre as declividades (Gráfico 15) demonstra que intervalos de classes menores reduzem os níveis de concordância entre os pares de MDTs. Como exemplo pode-se citar as declividades obtidas a partir dos MDTs gerados com densidade amostral de 21600 pontos, que, discretizadas conforme Pereira e Lombardi Neto (2004), apresentavam concordâncias de 76,24% (ICR Ondulado); 75,96% (ICR Fortemente Ondulado) e 93,55% (ICR Escarpado) (Gráfico 14); e os índices de exatidão de global calculados a partir das declividades discretizadas a cada ponto percentual são, respectivamente, 0,2281; 0,1555 e 0,1061 (Gráfico 15).

Em contraponto aos Índices de Exatidão Global entre as declividades estão os Índices de Exatidão Global entre as altimetrias (MDTs), calculados entre os pares de MDTs, discretizados em intervalos de 0,27 m (equivalente ao PEC-PCD Classe A, Escalas 1:1000 e 1:2000) (Gráfico 16). Enquanto estes apresentam valores de até 0,9079 para MDTs gerados a partir de 21600 pontos amostrais, aqueles chegam ao valor máximo de 0,2281 para a mesma densidade amostral. Isto demonstra, novamente, que a declividade é sensível a quaisquer variações altimétricas e que a qualidade dos MDTs não será necessariamente similar à qualidade dos atributos derivados, neste caso, a declividade.

Assim, embora Horn (1981) afirme que sua metodologia de cálculo de declividade traga como vantagem o fato de possíveis erros altimétricos não contribuírem fortemente com os valores de inclinação por utilizar os oito vizinhos adjacentes para efetuar o cálculo, bem como Raaflaub e Collins (2003) afirmam que a tendência é que a propagação de erros de declividade gerados a partir de MDT diminua à medida que o número de vizinhos utilizados no algoritmo aumente, verifica-se que pequenas divergências altimétricas geram modelos de declividade totalmente divergentes (Índices de Exatidão Global próximos a zero).

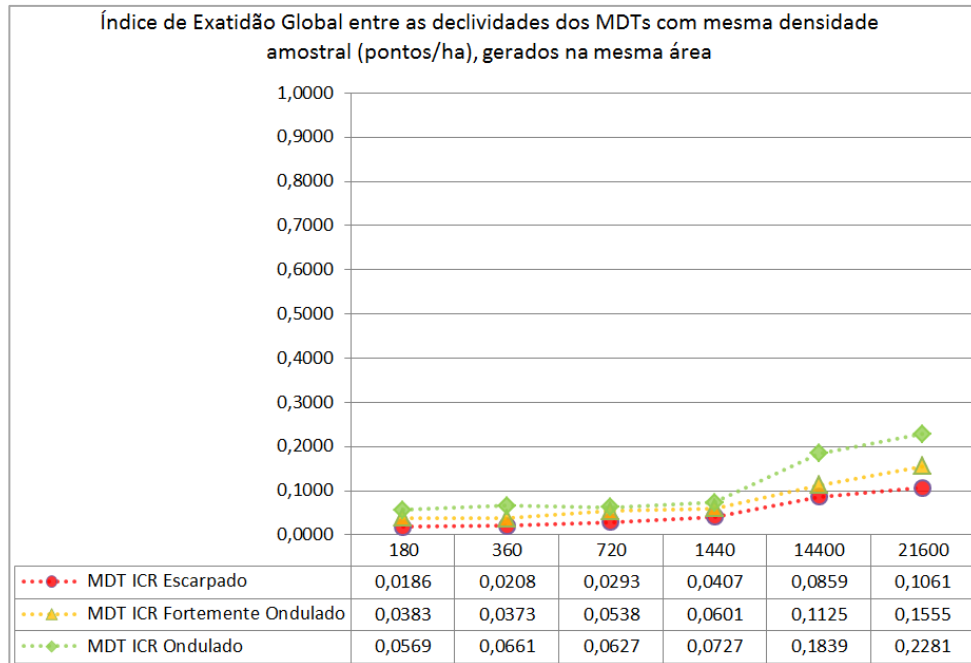


Gráfico 15 – Índice de Exatidão Global entre as declividades
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

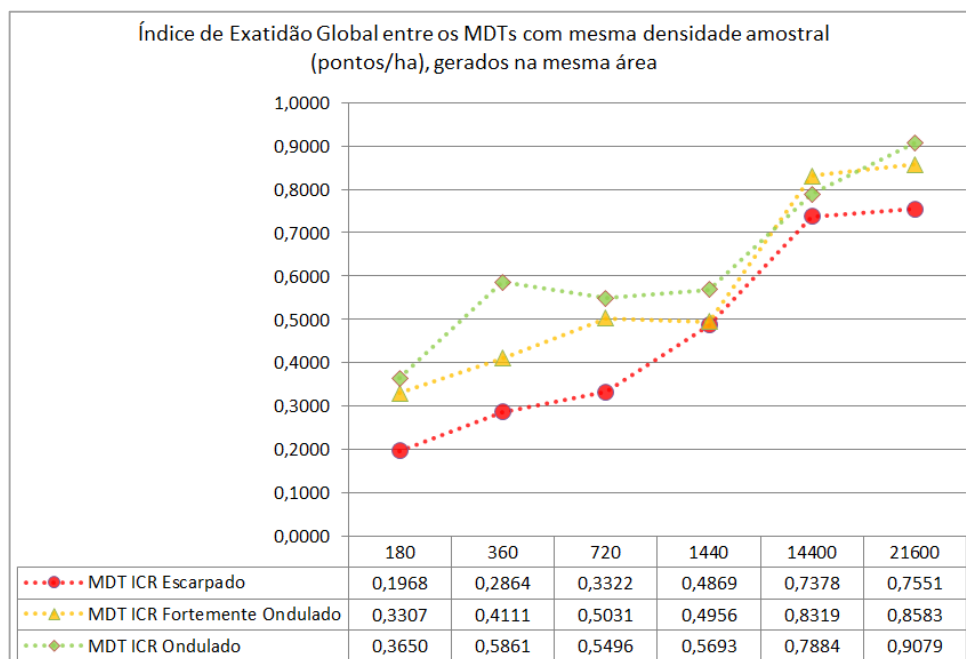


Gráfico 16 – Índice de Exatidão Global entre os MDTs
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Embora densidades superiores à 14400 pontos/ha não tragam ganho de acurácia altimétrica (conforme exposto na subseção anterior), o mesmo não ocorre com a declividade. A análise dos Índices de Exatidão Global da área de ICR Fortemente Ondulado, na qual foram gerados dois pares de MDTs a mais do que a área de ICR Escarpado e um par de MDT a mais do que a área de ICR Ondulado

(Tabela 2, exposta na seção de materiais e métodos), demonstra tendência de crescimento dos Índices de Exatidão Global entre os pares de MDTs (Gráfico 17).

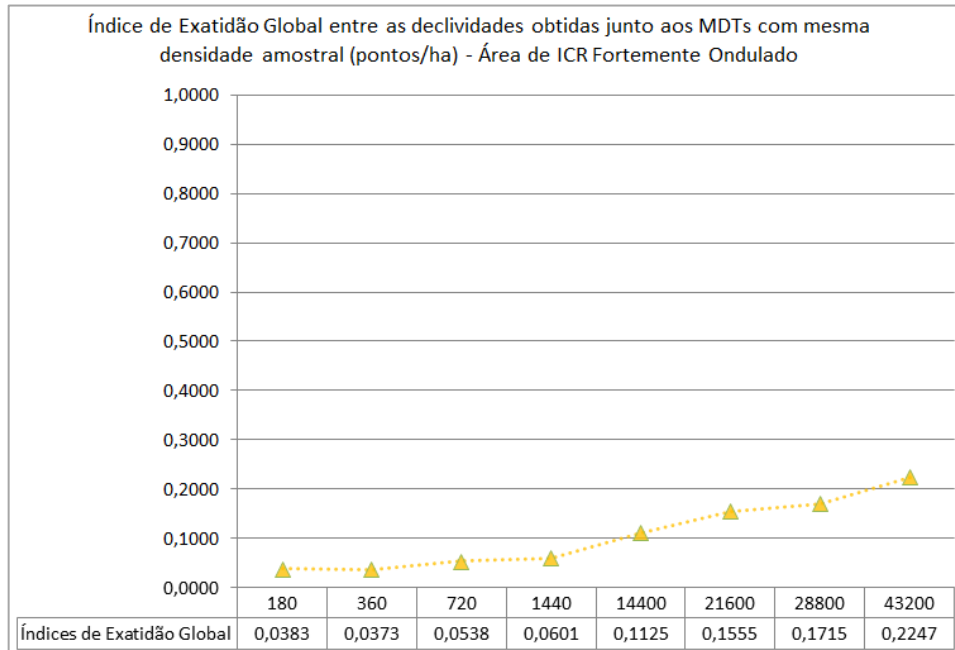


Gráfico 17 – Índice de Exatidão Global entre as declividades – ICR Fortemente Ondulado
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Porém, mesmo densidades compatíveis com levantamentos LIDAR (maiores do que 1 ponto/m²) não foram suficientes para garantir qualidade ao atributo declividade, que, para a área de ICR Fortemente Ondulado atingiu no máximo o Índice de Exatidão Global de 0,2247 para a densidade de 43200 pontos/ha (equivalente a 4,32 pontos/m²) (Gráfico 17).

O que se pode inferir é que a avaliação da qualidade altimétrica dos MDTs não garante a qualidade da declividade gerada a partir desses modelos, por isso é necessário parcimônia na utilização desses produtos derivados, pois os mesmos podem não estar representando adequadamente a realidade de campo conforme se necessita para a aplicação a que se propõe.

Os dados expostos aqui corroboram com Oksanen e Sarjakoski (2005) e Darnell, Tate e Brunsdon (2008), os quais chamam a atenção para o fato de que “pequenos” erros no MDT acarretam num acréscimo de incertezas com relação aos atributos derivados, o que pode gerar impactos negativos sobre a utilização de MDTs em SIGs, onde atributos como declividade são utilizados com frequência.

Chaplot *et al.* (2006) afirma que muitas análises envolvendo MDTs irão depender mais dos atributos derivados do que da própria altimetria e, por isso,

distinguem a precisão dos MDTs da “realidade das formas”, a qual segundo os autores deve ser avaliada por atributos como declividade.

Warren *et al.* (2004³¹) *apud* Darnell, Tate e Brunson (2008) chamam a atenção para o fato de que erros de declividade em MDTs podem ter influências “significativas” sobre a modelagem em SIG.

Considerando a colocação de Ebner, Reinhardt e Hobler (1988), que afirmam que é necessário proceder uma validação adequada para verificar se o MDT representa o terreno com a precisão necessária para o trabalho, e como a avaliação da qualidade altimétrica do MDT pode não garantir a precisão para trabalhos com atributos derivados, como a declividade, faz-se necessário avaliar o quanto a qualidade desses atributos está adequada à precisão necessária para o trabalho.

5.4 – CORRELAÇÃO LINEAR

Ao contrário dos Índices de Exatidão Global, os coeficientes de correlação lineares entre os MDTs gerados na mesma área, com mesma densidade, porém distinto arranjo amostral são sempre altos (maiores do que 0,9600), tendendo a 1, independente do n amostral (Gráfico 18).

³¹ WARREN, S. D.; HOHMANN, M. G.; AUERSWALD, K.; MITASOVA, H. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. **Catena**, v. 58, n. 3, p. 215-233, 2004.

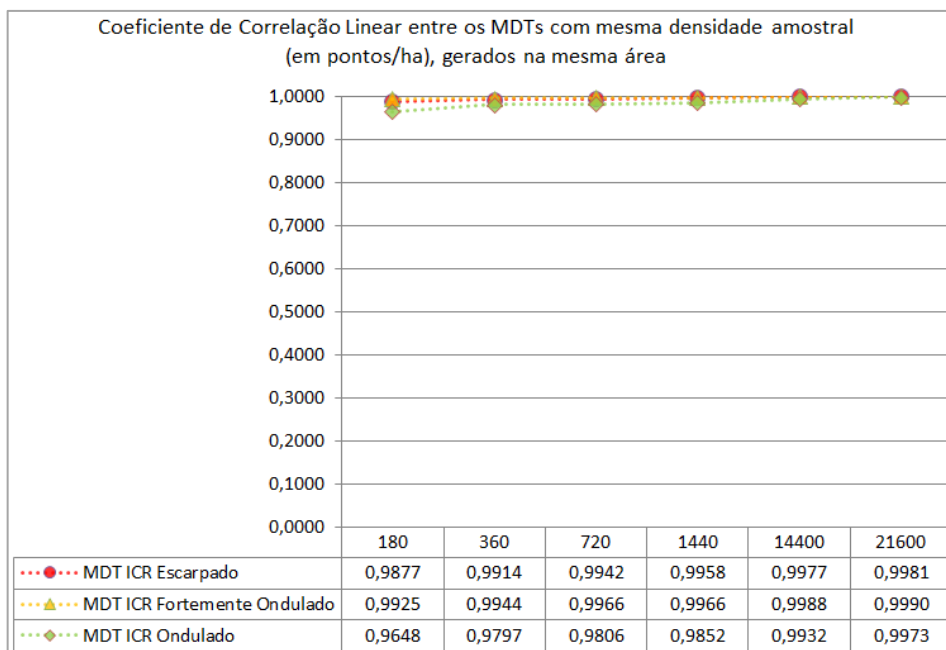


Gráfico 18 – Coeficiente de Correlação Linear entre os MDTs
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Porém, os coeficientes de correlação linear entre as declividades obtidas a partir de MDTs com mesma densidade, mas diferentes arranjos amostrais demonstram uma tendência de crescimento, a partir do aumento da densidade amostral, bem como correlações maiores entre as declividades de áreas de ICR Ondulado, seguida pelas áreas de ICR Fortemente Ondulado e Escarpado (Gráfico 19).

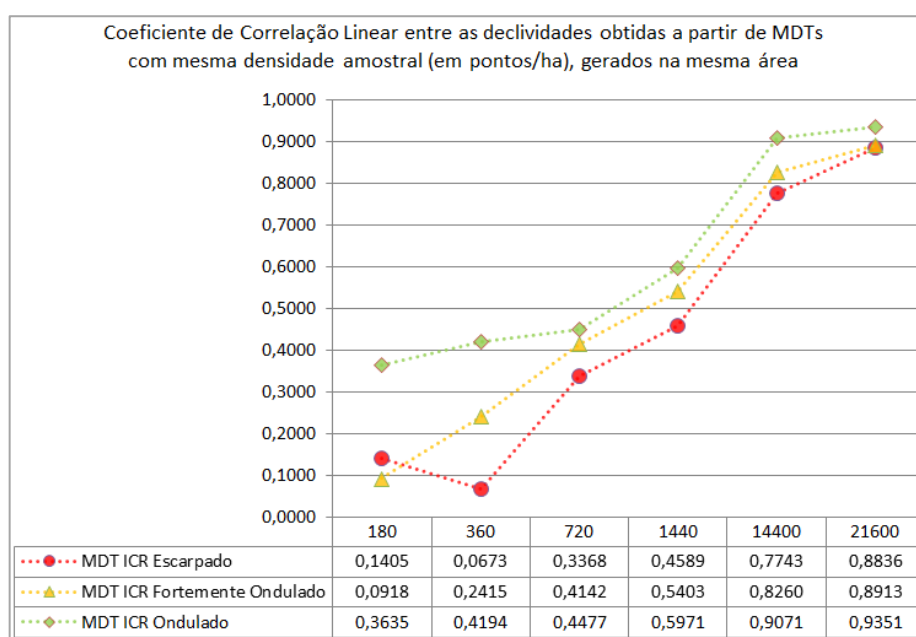


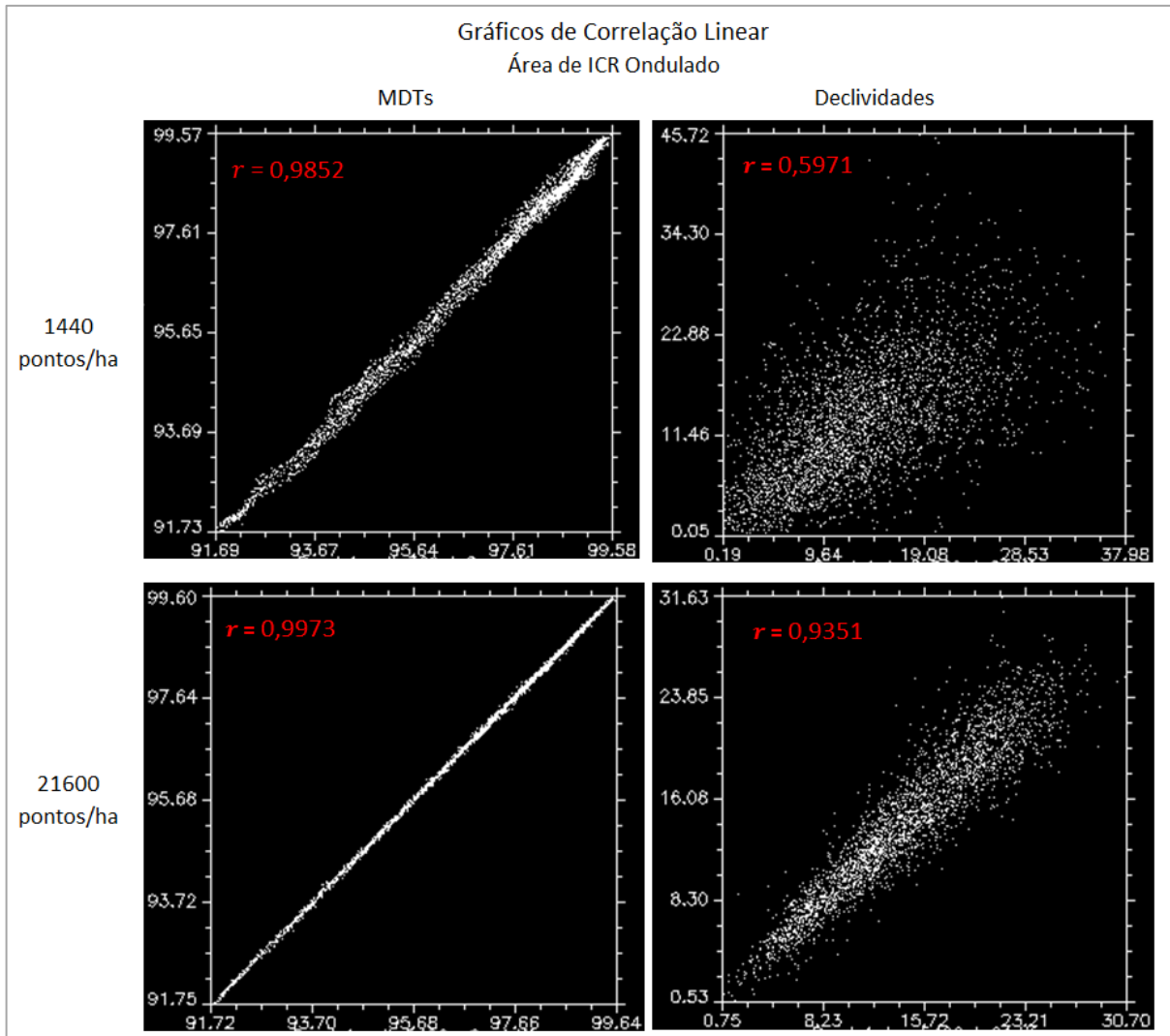
Gráfico 19 – Coeficiente de Correlação Linear entre as declividades
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Contudo, não é possível inferir o nível de exatidão entre dois produtos a partir da análise isolada dos coeficientes de correlação linear. Conforme explicitado por Andriotti (2003), têm-se uma relação linear quando a representação de duas variáveis em um sistema cartesiano resulta em pontos alinhados.

Entretanto, se a relação entre os produtos variar de forma proporcional à uma reta, o coeficiente de correlação linear será alto (tendendo a 1), mesmo que os pontos não se ajustem perfeitamente à reta. Isso explica o fato de ao mesmo tempo, resultados apresentarem Índice de Exatidão Global baixo e coeficiente de correlação linear alto.

A fim de exemplificar, foram gerados os gráficos de correlação linear (Gráficos 20) referentes à área de ICR Ondulado para as declividades e MDTs obtidos a partir das densidades amostrais de 1440 pontos/ha e 21600 pontos/ha. Embora os MDTs tenham coeficientes muito próximos e tendendo a 1 (0,9852 e 0,9973), os Índices de Exatidão Global são discrepantes (0,5693 e 0,9079) (Tabela 6).

A análise dos gráficos referentes aos MDTs permite verificar que a distribuição dos pontos não se ajusta perfeitamente a uma reta (como seria caso o coeficiente fosse igual a 1), mas que os mesmos não estão dispersos e que possuem distribuição proporcional à uma reta imaginária central, ao contrário da declividade para densidade amostral de 1440 pontos/ha, que apresenta distribuição dispersa.



Gráficos 20 – Gráficos de Correlação Linear (área de ICR Ondulado)
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

Tabela 6 – Índices de Exatidão Global e Coeficientes de Correlação Linear para MDTs e Declividades gerados a partir de densidade Amostral de 1440 e 21600 pontos/ha (Área de ICR Ondulado)

		Índice de Exatidão Global	Coeficiente de Correlação Linear
1440 pontos/ha	MDTs	0,5693	0,9852
	Declividades	0,0727	0,5971
21600 pontos/ha	MDTs	0,9079	0,9973
	Declividades	0,2281	0,9351

Fonte: Elaborado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

No caso das declividades obtidas a partir de MDTs gerados com 21600 pontos amostrais/ha, infere-se que embora sejam diferentes (Índice de Exatidão Global de 0,2281), a tendência de representação da declividade entre os dois modelos possui forte correlação (coeficiente de correlação linear de 0,9351), ou seja, os valores divergem, contudo quando um pixel aumenta de valor o pixel correspondente no outro modelo também passa por um acréscimo, e vice-versa.

5.5 - IMPLICAÇÕES À UTILIZAÇÃO

5.5.1 - Altimetria

No que se refere à altimetria, a utilização de MDTs sem a devida avaliação da qualidade pode resultar em análises equivocadas, pois o modelo com variações altimétricas superiores às esperadas para o estudo que se propõe a ser feito (adequação ao uso) pode, por exemplo, gerar resultados de direção de fluxo de água incoerentes com o que acontece no terreno, ou também, problemas na medição de volumes, na geotecnia e, na engenharia civil.

Assim, se duas pesquisas diferentes, trabalhando na escala 1:2000, tivessem tomado a decisão de gerar um MDT em uma área de ICR Fortemente Ondulado a partir de uma densidade amostral de 360 pontos/ha, ou seja, densidade oito vezes maior do que a maior densidade estabelecida pela NBR 13133 (ABNT, 1994), e não tivessem se preocupado com a avaliação da qualidade dos modelos, os resultados poderiam gerar divergências acima dos esperados para a escala (Figura 20).

Aparentemente, a partir da análise visual dos modelos, ambos parecem possuir poucas diferenças, contudo, ao se verificar as divergências altimétricas percebe-se que os mesmos possuem divergências superiores às aceitas para a escala (Figura 20).

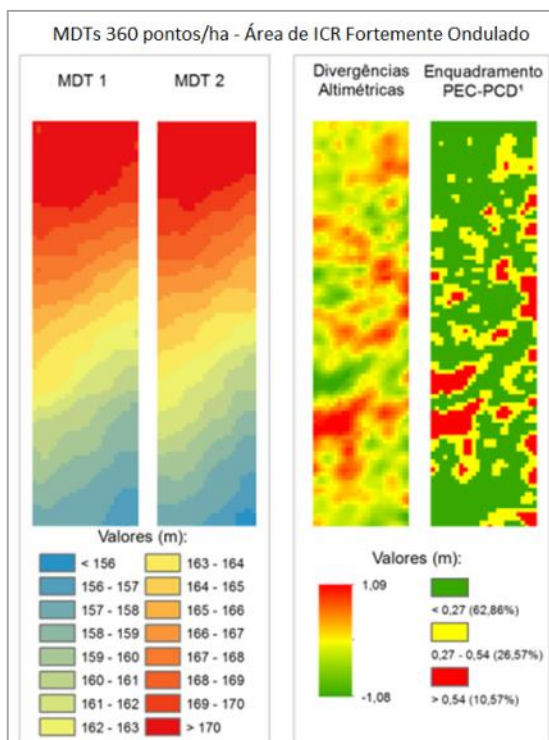


Figura 20 – MDTs 360 pontos/ha – Área de ICR Fortemente Ondulado
Fonte: Elaborado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

No caso específico desses modelos, o coeficiente de correlação linear foi de 0,9944, o que explica a grande semelhança visual entre os mesmos, visto que possuem forte correlação, porém, o Índice de Exatidão Global demonstra a discrepância entre os dois MDTs: 0,4111.

Assim, a sobreposição das curvas de níveis a cada metro geradas a partir dos dois MDTs dos dois MDTs (Figura 21), associada às divergências altimétricas apresentadas anteriormente na Figura 20, bem como nas divergências apresentadas a seguir, em modelo perspectivo (Figura 22) demonstra a diferença entre os modelos e os locais de desvio de fluxo.

Portanto, em conformidade com autores como Wise (2000), Hobi e Ginzler (2012) e Constantino e Angelini (2013), qualquer MDT deve ter a sua qualidade avaliada antes do uso a fim de verificar se o mesmo atende às expectativas para o trabalho a ser executado, pois dependendo do erro, o utilizador pode chegar a conclusões inverossímeis.

Cabe destacar que, neste caso, sem a devida avaliação da qualidade dos MDTs não há como inferir qual deles se aproxima mais da realidade que ocorre no terreno, mas apenas que são diferentes entre si.

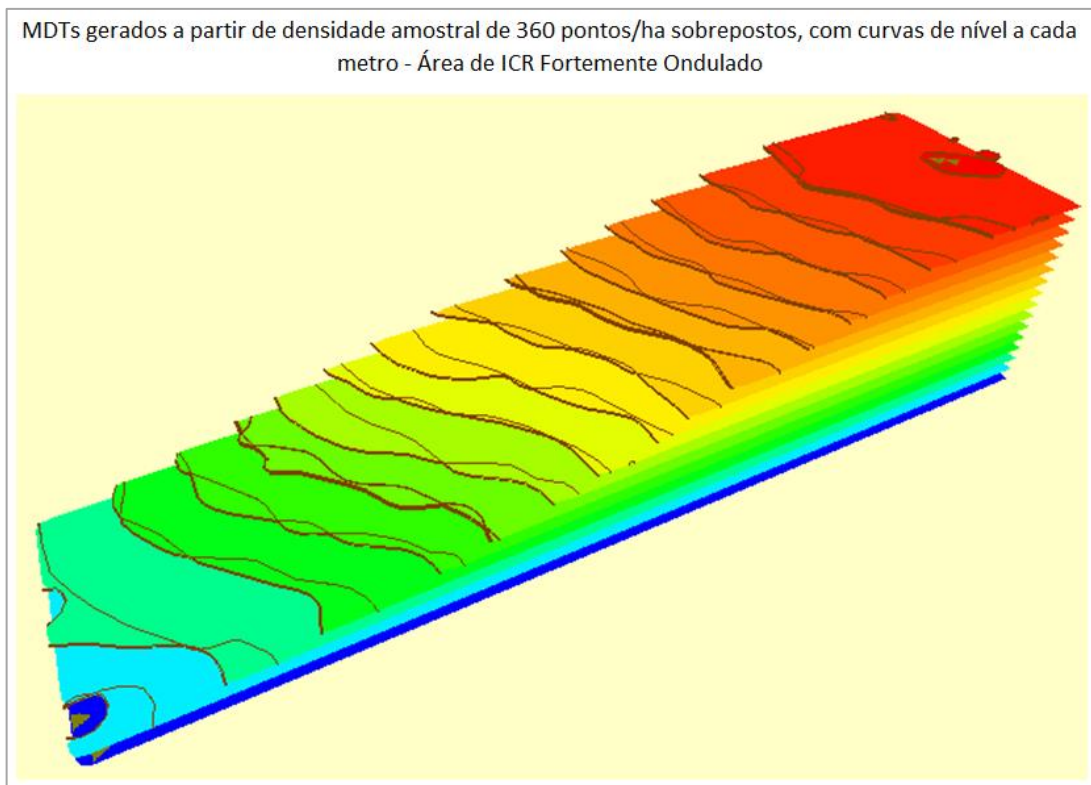


Figura 21 - MDTs gerados a partir de densidade amostral de 360 pontos/ha sobrepostos, com curvas de nível a cada metro - Área de ICR Fortemente Ondulado
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

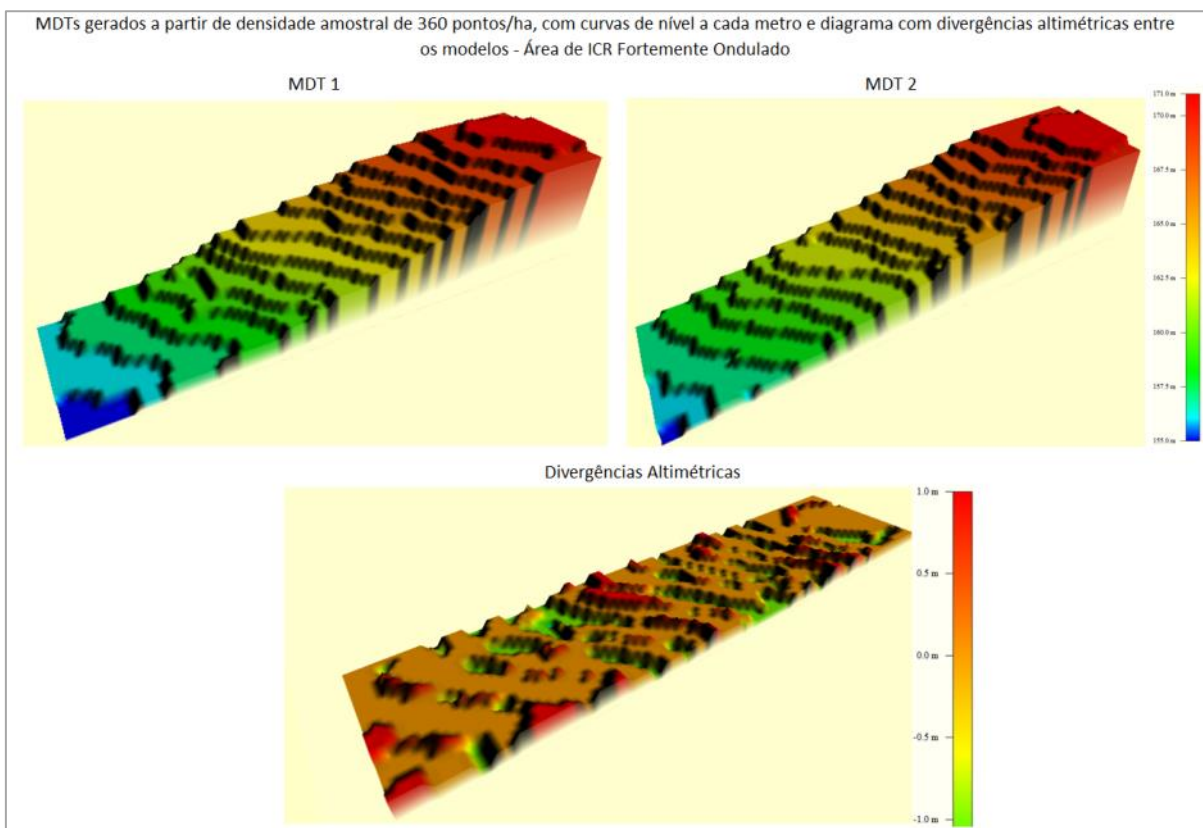


Figura 22 - MDTs (360 pontos/ha), com curvas de nível a cada metro e diagrama com divergências altimétricas entre os modelos - Área de ICR Fortemente Ondulado
Fonte: Organizado por Carlos Henrique Sopchaki (2016).

5.5.2 - Declividade

A obtenção da declividade, conforme exposto anteriormente, se mostrou extremamente sensível à quaisquer divergências na altimetria. Mesmo quando gerada a partir de pares de MDTs cujas discrepâncias estão dentro do admitido para a Classe A do PEC-PCD nas escalas 1:1000 e 1:2000, as divergências entre as declividades se mostraram muito acima do admitido para esta escala.

Nas três áreas, e em especial na área de ICR Escarpado, as divergências de declividade foram menores (embora sempre acima do limiar aceito para a escala) quando comparadas em classes de relevo, conforme metodologia proposta por Pereira e Lombardi Neto (2004) para avaliação da aptidão de terras agrícolas.

Quando comparadas em classes a cada ponto percentual (e.g. 0 a 1%, 1% a 2%...) as divergências foram maiores, atingindo no máximo o Índice de Exatidão Global de 0,2281, para os pares de MDTs gerados a partir de 21600 pontos/ha na área de ICR Ondulado e para os pares de MDTs gerados a partir de 43200 pontos/ha na área de ICR Fortemente Ondulado.

Não foram feitas análises entre os valores absolutos de declividade, posto que, dificilmente dois pixels assumiriam o mesmo valor (e.g. 1,37%) e, por este motivo, sabe-se que as divergências seriam ainda maiores, chegando sempre a resultados muito próximos a “100% de diferença”.

Os resultados demonstraram ainda que o grau de similaridade varia de acordo com a discretização adotada associada às características do relevo.

Assim, os resultados da área de ICR Escarpado para declividade discretizada conforme Pereira e Lombardi Neto (2004) foram satisfatórios, especialmente a partir dos MDTs gerados com densidade amostral de 14400 e 21600 pontos/ha (acima de 90% de concordância entre os dois modelos). Em contraposição, esta mesma área foi a que apresentou os piores resultados na análise da declividade discretizada a cada ponto percentual.

Portanto, a preocupação com a acurácia inerente à declividade obtida a partir de MDTs deve estar associada ao relevo e, em especial, à discretização adotada (se for o caso da metodologia trabalhar em classes discretas).

Há que se deixar claro que o foco da discussão aqui não está nas metodologias, posto que cada uma se propõe a uma finalidade diferente, mas sim sobre a qualidade alcançada na obtenção de declividade a partir de MDTs.

Isto posto, ressalta-se que, ao se buscar a qualidade no que se refere à declividade gerada a partir de MDTs, deve-se levar em consideração as peculiaridades da metodologia de classificação da declividade em classes discretas. As características do relevo irão gerar resultados com maior ou menor qualidade associadas à metodologia utilizada para classificação do relevo, tais como Ross (1990), Lepsch *et al.* (1991), Zuquette e Pejon (1996), Castro e Valério Filho (1997), Bonucelli (1999³²) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004), Fontes e Pejon (1999³³) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004), Martins (2011), EMBRAPA (2013) e Pradhan e Kim (2016).

Contudo, conforme exposto anteriormente, há metodologias que adotam os valores absolutos da declividade, como é o caso do Fator de Segurança (FS) utilizado para cálculos de geotecnia e de suscetibilidade a deslizamentos, que pode ser aplicado diretamente em *softwares* de SIG sobre ou a partir de metodologias e *softwares* derivados como SINMAP - *Stability Index Mapping*, SHALSTAB - *Shallow Landslide Stability Method* e TRIGRS - *The Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*.

Tanto em metodologias que utilizam a declividade discretizada, quanto nas que utilizam o valor absoluto, as divergências de valores são relativas e a qualidade do modelo de declividade e a influência das classes devem ser avaliadas. Divergências no valor da declividade em um pixel podem tanto representar pouca ou nenhuma influência na alteração do resultado da metodologia a ser aplicada, quanto alterações significativas.

Partindo da hipótese de um valor esperado de declividade em determinado pixel ser igual a 29%, contudo o mesmo ser classificado como sendo igual a 32%, os impactos referentes a três pontos percentuais de diferença entre o valor esperado e o valor calculado irão variar de acordo com a metodologia a ser utilizada:

- Adotando-se uma das seguintes propostas metodológicas que utilizam classes discretas de declividade não haveria nenhum impacto, pois o pixel continuaria a ser classificado dentro da mesma

³² BONUCCELLI, T. **Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos da área urbana de Ouro Preto/MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Área de Geotecnia). USP/São Carlos, 1999.

³³ FONTES, S. B.; PEJON, O. J. Mapeamento geotécnico com ênfase em erosões no município de Ouro Preto – escala 1:5000. In: **7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, São Pedro, 1999.

classe de declividade: Marques (1971), Lepsch *et al.* (1991), Zuquette e Pejon (1996), Castro e Valério Filho (1997), Pereira e Lombardi Neto (2004), Martins (2011), EMBRAPA (2013), Pradhan e Kim (2016).

- Ao adotar outras metodologias que aplicam classes discretas de declividade, o resultado poderia gerar impactos negativos, visto que o pixel estaria sendo classificado junto a uma classe a que não pertence, o que neste exemplo hipotético aconteceria em: Ross (1990), Ross (1994), Bonucelli (1999³⁴) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004), Fontes e Pejon (1999³⁵) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004).

Adotando uma segunda hipótese de que o mesmo pixel que tinha o valor esperado de declividade de 29%, porém é classificado como tendo o valor de 20% (erro três vezes maior do que o anterior), as implicações decorrentes da diferença de nove pontos percentuais seriam:

- Nenhuma para as metodologias aplicadas por Marques (1971), Ross (1990), Lepsch *et al.* (1991), Ross (1994), Zuquette e Pejon (1996), Castro e Valério Filho (1997), Bonucelli (1999³⁶) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004), Fontes e Pejon (1999³⁵) *apud* Zuquette e Gandolfi (2004), Pereira e Lombardi Neto (2004) e EMBRAPA (2013), pois o pixel estaria classificado dentro do mesmo intervalo de discretização.

- Classificação do pixel junto à uma classe ao qual não pertence em: Martins (2011) e Pradhan e Kim (2016).

Portanto, nestes dois exemplos hipotéticos, a diferença menor (equivalente a três pontos percentuais) impactaria negativamente mais metodologias do que a

³⁴ BONUCCELLI, T. **Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos da área urbana de Ouro Preto/MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Área de Geotecnia). USP/São Carlos, 1999.

³⁵ FONTES, S. B.; PEJON, O. J. Mapeamento geotécnico com ênfase em erosões no município de Ouro Preto – escala 1:5000. In: **7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, São Pedro, 1999.

³⁶ BONUCCELLI, T. **Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos da área urbana de Ouro Preto/MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Área de Geotecnia). USP/São Carlos, 1999.

diferença maior (equivalente a nove pontos percentuais), a qual traria impacto negativo a somente duas metodologias (dentre as levantadas por este trabalho).

Metodologias que trabalham com o valor absoluto da declividade, como por exemplo as adotadas por Dietrich e Montgomery (1998), Pack, Tarboton e Goodwin (1998), Iverson (2000), Baum, Savage e Godt (2002), Salciarini *et al.* (2006), Tabalipa e Fiori (2008), Silva, Silveira e Fiori (2012), Silveira *et al.* (2013a), Michel, Kobiyama e Goerl (2014), Listo e Vieira (2015), Vieira e Ramos (2015), serão sempre mais impactadas quanto maior for a divergência nos valores de altimetria.

5.6 – ADEQUAÇÃO AO USO

Embora haja na literatura recomendações de que os MDTs devam ter a sua qualidade avaliada a fim de verificar se possuem o grau de acurácia necessário para o trabalho (EBNER, REINHARDT e HOBLER, 1988; GONG *et al.*, 2000; CHRISMAN, 2006), ou seja, avaliar se os mesmos estão adequados ao uso (*fitness to use*), infere-se, a partir do que foi exposto na subseção sobre aplicações envolvendo MDT, que há uma escassez no que diz respeito a processos de avaliação da qualidade em MDTs, ou ausência de informação de tais validações nos artigos científicos.

Além disso, verifica-se que não há parâmetros claros definidos no que concerne à “adequação ao uso” (ou às “adequações ao uso”). Dentre os trabalhos apresentados na subseção sobre aplicações envolvendo MDT alguns informaram somente a resolução espacial e outros apenas a escala dos MDTs utilizados.

Com relação à declividade de vertentes, por exemplo, dentre as pesquisas que informaram a resolução espacial dos MDTs, percebe-se que o atributo foi obtido a partir de MDTs com resolução espacial variando de 5m a 100m. As declividades foram obtidas a partir de MDTs com as seguintes resoluções espaciais:

- 5m: Tomczyk (2011); Michel, Kobiyama e Goerl (2014);
- 20m: Castillo-Rodríguez *et al.* (2010); Trisurat, Shrestha e Kjelgren (2011); Rodriguez-Galiano e Chica-Olmo (2012);
- 25m: Waroux e Lambin (2012); Listo e Vieira (2015);

- 30m: Gaughan *et al.* (2009); Morán-Ordóñez *et al.* (2011); Gao e Liu (2012);
- 75m: Geri, Amici e Rocchini (2011);
- 100m: Conti (2009).

Nos trabalhos que informaram a escala dos MDTs, a declividade foi obtida a partir de modelos com escalas variando entre 1:2000 e 1:2500000:

- 1:2000 - Robaina *et al.* (2011);
- 1:10000 - Vieira e Ramos (2015);
- 1:25000 - Santos, De Paula e Grochocki (2009);
- 1:50000 - Castillo-Rodríguez *et al.* (2010); Couto Junior *et al.* (2011); Vanacôr e Rolim (2012);
- 1:2500000 - Jaimes *et al.* (2010).

Embora cada trabalho exposto anteriormente tenha obtido a declividade para uma determinada finalidade, cabe destacar que, conforme Schoorl e Veldkamp (2005), a declividade apresenta resultados diferentes ao ser gerada em escala distinta, bem como Walsh, Butler e Malanson (1998) e Menezes e Coelho Neto (1999) afirmam que a análise de processos varia de acordo com a escala adotada pelo MDT.

Assim, a influência da alteração da escala e/ou resolução de MDTs na obtenção de atributos topográficos e modelagem de processos atuantes já foi demonstrada por Zhang e Montgomery (1994), Gao (1997), Brasington e Richards (1998), Florinsky e Kuryakova (2000), Armstrong e Martz (2003), Claessens *et al.* (2005), Chaplot (2005), Pain (2005), Sørensen e Seibert (2007), Lee, Tachikawa e Takara (2009), Hasan, Pilesjö e Persson (2012), Goulden *et al.* (2014), Shi, Wang e Tian (2014), Siefert *et al.* (2014), Mukherjee *et al.* (2015).

Ao se isolar, dentre os trabalhos apresentados na subseção sobre aplicações envolvendo MDT, os que apresentam objetivos comuns, verifica-se que permanece a ausência de definição metodológica com relação ao grau de acurácia exigido para utilização do MDT.

Dentre os trabalhos que utilizaram MDTs para avaliar a suscetibilidade à acidentes geológicos, observou-se resoluções espaciais variando de 5m a 25m e escalas de modelos variando entre 1:2000 e 1:50000:

- Resolução espacial de 5m: Silveira *et al.* (2013a); Silveira *et al.* (2013b); Michel, Kobiyama e Goerl (2014);
- Resolução espacial de 25m: Listo e Vieira (2015);
- Escala de 1:2000 - Zaidan e Fernandes (2009); Robaina *et al.* (2011);
- Escala de 1:5000 - Zhou *et al.* (2016);
- Escala de 1:10000 - Quintanilha e Oliveira (2013); Vieira e Ramos (2015);
- Escala de 1:50000 - Vanacôr e Rolim (2012).

Pradhan e Kim (2016) utilizaram MDT gerado a partir de LIDAR para pesquisa envolvendo suscetibilidade a acidentes geológicos, contudo, os autores não mencionaram escala, resolução espacial do MDT, bem como densidade de pontos amostrais e demais parâmetros do LIDAR.

Embora existam pesquisas envolvendo suscetibilidade à acidentes geológicos em escalas menores do que 1:5000, Fell *et al.* (2008) afirmam que os modelos utilizados em estudos para essas finalidades devem ter a qualidade adequada e que a utilização de MDTs em “escalas pequenas” é considerada questionável.

Com base nos trabalhos expostos na subseção sobre aplicações envolvendo MDT é possível inferir que há feições identificadas, a partir de MDTs, nas mais diversas escalas de análise e utilizando também MDTs com distintas resoluções espaciais. A figura 23 apresenta uma síntese com os principais elementos identificados e demonstra a heterogeneidade e falta de padronização na utilização dos MDTs.

Elementos identificados a partir dos MDTs (artigos expostos na subseção 3.2)												
Resolução espacial do MDT	padrões de micro relevo	altimetria	formas de vertentes	orientação de vertentes	comprimento de vertentes	declividade de vertentes	identificação de APP	modelagem fluxo superficial	geração de perfis topográficos	delimitação bacias hidrográficas	delimitação de planaltos e planícies	padrões de relevo e elementos morfoestruturais
5m			X		X	X						X
20m		X	X			X						
25m		X	X	X		X		X				
30m		X	X	X		X			X	X	X	
50m		X										
75m			X	X		X						
90m	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X
100m			X			X		X				
Escala da base cartográfica de origem do MDT												
1:2000		X	X	X		X						
1:10000		X		X		X				X		
1:20000					X	X						
1:25000		X				X						
1:30000					X	X						
1:50000		X				X						
1:250000		X				X						

Figura 23 – Quadro Síntese com os principais elementos identificados a partir dos MDTs nos artigos levantados por esta pesquisa
Fonte: O autor (2016).

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa identificou diversas formas de se reportar aos modelos de representação da superfície do terreno, bem como incongruências no tocante à conceituação e nomenclatura que, no entanto, estão convergindo para a definição de MDE como sendo o modelo que inclui os objetos presentes na superfície e de MDT referindo-se ao modelo que representa o terreno em si (desconsiderando os objetos sobre ele dispostos).

Verificou-se que não há uma padronização no que diz respeito à escala cartográfica das bases de dados, resolução espacial dos MDTs e escala geográfica dos fenômenos a serem inferidos, assim como são poucos os trabalhos que se preocupam com a validação para averiguação da qualidade dos modelos.

Atrelada à essa questão identificou-se também que há carência de parâmetros claros definidos no que concerne às “adequações ao uso” (*fitness to use*), ou seja, há metodologias que não esclarecem qual o nível de qualidade esperado de um MDT e dos atributos derivados para a escala e objetivo que se propõem a trabalhar.

No tocante às normas brasileiras que buscam assegurar qualidade de produtos cartográficos, questiona-se como averiguar a acurácia altimétrica de produtos digitais utilizando uma relação de medida estabelecida a partir da equidistância entre as curvas de nível, como ocorre na NBR 13133 (ABNT, 1994), no Projeto de Revisão ABNT NBR 13133 (ABNT, 2015) e nos Padrões de Exatidão Cartográfica - Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 (Brasil, 1984), posto que não necessariamente haja a presença das curvas de nível em produtos oriundos da cartografia digital.

Faz-se necessário atualizar tais normas, assim como ocorreu em território estadunidense, onde o *National Standard for Spatial Data Accuracy* – NSSDA (FGDC, 1998), que fornece metodologia para verificar a qualidade de dados geográficos tanto na forma digital, quanto na impressa, sucedeu ao *National Map Accuracy Standards* - NMAS (U.S. BUREAU OF THE BUDGET, 1941), o qual abordava apenas padrões de acurácia de produtos baseados na cartografia analógica.

Verificou-se uma evolução nas normas brasileiras a partir da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais – ET-ADGV (DSG,

2011), da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro, que busca regular e padronizar a aquisição da geometria dos dados geoespaciais vetoriais e atributos correlacionados e apresenta os valores referentes ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD).

O PEC-PCD estabelece parâmetros específicos para modelos de elevação (MDT, MDE e MDS) e pontos cotados e ao apresentar os valores, não os associa à equidistância das curvas de nível, mas sim a distâncias absolutas.

O PEC (BRASIL, 1984) e a NBR 13133 (ABNT, 1994) não estabelecem de forma clara as metodologias para avaliação da acurácia, mas referem-se somente a padrões de exatidão altimétrica como indicadores estatísticos de dispersão. Assim, a opção por determinado teste estatístico, conforme demonstrado por esta pesquisa, pode gerar resultados divergentes, resultando na adequação (ou não adequação) junto à norma a partir de determinada metodologia e podendo ter resultado divergente aplicando-se outra metodologia de avaliação.

No que se refere aos produtos cartográficos digitais, foi publicada recentemente (fevereiro de 2016) a Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais - ET-CQDG (DSG, 2016), que estabelece que o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais – PAP-PCD deve ser calculado utilizando o Erro Médio Quadrático (EMQ), de maneira similar ao NSSDA (FGDC, 1998) e à ISO 19157 (International Organization for Standardization – ISO, 2013), contudo, ao contrário destes, não estipula quantidade mínima de pontos que devem ser utilizados para a validação.

A metodologia de avaliação proposta pelo NSSDA (FGDC, 1998) e pela ISO 19157 (ISO, 2013), além de estabelecer claramente padrões de acurácia utilizando o Erro Médio Quadrático, não institui classes de qualidade de produtos cartográficos através de valores fixos de desvio-padrão, o que traz o benefício (e a responsabilidade) de deixar a cargo do utilizador do produto cartográfico a associação entre o padrão de acurácia apresentado e o requerido para o seu trabalho (*fitness to use*).

Assim, a informação da qualidade de um documento cartográfico estabelecida através de um nível de significância do EMQ torna a informação mais precisa (e.g. 95% dos pontos apresentam erros menores do que 0,50m) e elimina o problema da subjetividade de enquadramento em classes (que transformam um dado quantitativo em qualitativo), como ocorre nas normas brasileiras (Classes A, B,

C, D), dando liberdade para explicitar índices de qualidade superiores aos limites inferiores da maior classe disponível nas normas.

Com relação à NBR 13133 (ABNT, 1994), os testes efetuados por esta pesquisa demonstraram que as densidades amostrais para levantamentos topográficos altimétricos estipuladas pela norma estão subdimensionadas para aplicação em MDTs, o que pode gerar produtos com qualidades inferiores às esperadas para a escala que se propõe representar.

Os parâmetros estabelecidos pela Classe A do PEC (BRASIL, 1984) e pela NBR 13133 (ABNT, 1994) somente foram atendidos a partir das seguintes densidade amostrais:

- 720 pontos/ha (escala 1:1000), 180 pontos pontos/ha (escala 1:2000) e 45 pontos/ha (escala 1:5000) para a área de ICR Ondulado;
- 360 pontos/ha (escala 1:1000), 180 pontos pontos/ha (escala 1:2000) e 45 pontos/ha (escala 1:5000) para a área de ICR Fortemente Ondulado;
- 1400 pontos/ha (escala 1:1000), 180 pontos pontos/ha (escala 1:2000) e 45 pontos/ha (escala 1:5000) para a área de ICR Escarpado.

Demonstrou-se que a Classe A do PEC-PCD (DSG, 2011) seria alcançada a partir das seguintes densidades amostrais (valores aproximados):

- Área de ICR Ondulado:
 - 2940 pontos/ha – escalas 1:1000 e 1:2000;
 - 172 pontos/ha – escala 1:5000.
- Área de ICR Fortemente Ondulado:
 - 4726 pontos/ha – escalas 1:1000 e 1:2000;
 - 395 pontos/ha – escala 1:5000.
- Área de ICR Escarpado:
 - 6350 pontos/ha – escalas 1:1000 e 1:2000;
 - 620 pontos/ha – escala 1:5000.

Estas densidades, além de garantir o enquadramento junto ao PEC-PCD, permitem que diferentes modelos gerados para a mesma área, com mesmo n amostral e diferentes arranjos amostrais (considerando pontos bem distribuídos), apresentem divergências abaixo dos limiares de aceitação.

O fato de dois MDTs gerados para a mesma área estarem enquadrados junto a alguma das normas brasileiras não garante que as divergências entre os mesmos estejam dentro dos limites de aceitação pela escala e norma, conforme

demonstrado por esta pesquisa para as densidades amostrais iguais ou inferiores a 1440 pontos/ha.

A influência das características do terreno na geração e qualidade de MDTs foi comprovada, à medida em que demonstrou-se que quanto maior o Índice de Concentração de Rugosidade, maior será a densidade de pontos amostrais necessária para que se obtenha graus de acurácia similares e que as diferenças absolutas entre os pares de MDTs crescem à medida que aumenta o grau de complexidade do terreno (ICR Ondulado, ICR Fortemente Ondulado, ICR Escarpado).

No tocante a valores de acurácia absoluta para níveis de significância de 90% e 95%, chegou-se a equações para cálculo aproximado da densidade amostral necessária para que se atinja um valor desejado de acurácia, bem como qual valor de acurácia aproximado será obtido a partir de uma determinada densidade amostral, para cada uma das três áreas (ICR Ondulado, Fortemente Ondulado e Escarpado), conforme exposto anteriormente na Tabela 5.

Foi demonstrado que MDTs gerados a partir da densidade amostral de 1440 pontos/ha, com diferentes arranjos amostrais, tendem a ter valores de acurácia semelhantes, portanto, a partir desta densidade a influência do arranjo amostral sobre a qualidade do MDT passa a ser menor (considerando pontos bem distribuídos sobre o terreno), contudo isto não implica em afirmar que o modelo está de acordo com os parâmetros estabelecidos por alguma norma, mas que, em termos de acurácia absoluta, dois modelos gerados com o mesmo n amostral, na mesma área, terão provavelmente, valores de acurácia similares.

Ainda no que diz respeito à qualidade altimétrica, concluiu-se que não há aumento de acurácia a partir da densidade amostral de 14400 pontos/ha, ou seja, independente da rugosidade do terreno (ICR Ondulado, Fortemente Ondulado, Escarpado), um levantamento com esta densidade teria acurácia similar a levantamentos com densidades superiores.

Contudo isto não se repetiu com as declividades, pois embora MDTs com densidades superiores a 14400 pontos/ha não impliquem em aumento de acurácia altimétrica, com a declividade ocorreu crescimento dos Índices de Exatidão Global entre os pares de MDTs a partir o aumento das densidades amostrais.

A qualidade altimétrica dos MDTs não foi suficiente para garantir a qualidade no que se refere à declividade. O processo de obtenção da declividade se mostrou

extremamente sensível a pequenas alterações altimétricas, pois mesmo pares de modelos enquadrados junto ao PEC-PCD Classe A (escalas 1:1000 e 1:2000), com graus de acurácia superiores a 0,17m (para 95% de significância) e cujas divergências estão enquadradas dentro do aceito para o PEC-PCD, não foram capazes de gerar declividades com Índices de Exatidão Global superiores a 0,2247.

Os resultados demonstraram ainda que o grau de similaridade entre as declividades obtidas a partir de pares de MDTs (gerados na mesma área, com mesmo n amostral, mas diferentes arranjos amostrais) varia de acordo com a discretização adotada associada às características do relevo. Assim, embora a declividade discretizada a cada ponto percentual tenha acompanhado a altimetria com relação às três classes de ICR (a partir de densidades similares, resultados melhores em relevos com classes de ICR menores), quando a declividade foi discretizada conforme proposta de avaliação de aptidão agrícola da Embrapa, a área de ICR Escarpado teve resultados melhores do que as áreas de ICR Ondulado e Fortemente Ondulado.

Porém, metodologias que adotam os valores absolutos da declividade, como o Fator de Segurança utilizado para cálculos de geotecnia e de suscetibilidade a deslizamentos, serão sempre mais impactadas quanto maior for a divergência nos valores de altimetria.

O que se pode inferir é que a avaliação da qualidade altimétrica dos MDTs não garante a qualidade da declividade gerada a partir desses modelos, por isso é necessária atenção na utilização desses produtos derivados, pois os mesmos podem não estar representando adequadamente a realidade de campo conforme se necessita para a aplicação a que se propõe.

Finalmente, chega-se à conclusão de que a avaliação da qualidade altimétrica dos MDTs, assim como dos atributos derivados, é de extrema importância e não pode ser negligenciada, posto que modelos com a qualidade abaixo do esperado podem gerar resultados, análises e tomadas de decisões equivocadas.

O objetivo desta pesquisa, ou seja, testar a hipótese formulada, foi alcançado. Pode-se afirmar que a hipótese principal (H1) foi corroborada parcialmente.

No tocante às altimetrias, verificou-se que arranjos amostrais distintos com n amostral similar geram resultados com variações altimétricas acima dos limiares admissíveis para a escala até uma densidade limite (e.g. 4726 pontos/ha para o

PEC-PCD Classe A, escalas 1:1000 e 1:2000, na área de ICR Fortemente Ondulado), que quando atingida gera resultados similares, ou seja com variações dentro dos limiares de aceitação para a escala.

No que se refere à declividade foi demonstrado que, independente do n amostral, arranjos amostrais distintos geram resultados com variações acima dos limiares aceitos para a escala. Portanto, para as declividades a hipótese principal (H1) foi corroborada, enquanto a hipótese nula (H0) foi negada.

Dentre as recomendações para trabalhos futuros sugere-se:

- Validar as equações de cálculo de densidade amostral e valor de acurácia em outras áreas com ICR similar;

- Trabalhar com outras tipologias de relevo (Classes de ICR Plano, Suave Ondulado e Fortemente Escarpado);

- Averiguar se as densidades amostrais identificadas por esta pesquisa, aplicando o método de irradiação e nivelamento trigonométrico com apoio de estação total, se repetem para outros métodos de levantamentos, como o LIDAR.

- Verificar a influência da quantidade de pontos de controle no processo de avaliação de qualidade dos MDTs;

- Efetuar estudos mais aprofundados acerca da qualidade envolvendo a declividade:

- Avaliando o quanto variações altimétricas dentro dos limiares de aceitação para a escala afetam a obtenção da declividade;
- Verificando se o aumento da densidade amostral para valores superiores aos analisados por esta pesquisa (28800 pontos/ha para área de ICR Ondulado, 43200 pontos/ha para a área de ICR Fortemente Ondulado e 21600 pontos/ha para a área de ICR Escarpado) pode trazer ganho na qualidade referente à declividade;
- Comparando diferentes metodologias para o cálculo da declividade, utilizando arranjos amostrais distintos com mesmo n amostral, em áreas coincidentes.

- Investigar a influência de variações altimétricas dentro dos limiares de aceitação para a escala na obtenção de outros atributos derivados e, se a garantia da qualidade altimétrica implica na garantia da qualidade desses atributos.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994. 35p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de revisão ABNT NBR 13133**. Rio de Janeiro, 2015. 45p.
- AB'SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ACKERMANN, F. Techniques and Strategies for DEM Generation. In: ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Digital. **Photogrammetry An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. Ed. Cliff Greve, 1996.
- AGUILAR, F. J.; AGÜERA, F.; AGUILAR, M. A.; CARVAJAL, F. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM accuracy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 7, p. 805-816, 2005.
- ANDRADE, I. R.; SOUZA FILHO, E. E. de. Mapeamento de feições morfológicas da planície de inundação do Alto Rio Paraná, através do uso de produtos orbitais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, 2011.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. Editora UNISINOS, 2003.
- ARMSTRONG, R. N.; MARTZ, L. W. Topographic parameterization in continental hydrology: a study in scale. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 18, p. 3763-3781, 2003.
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas. Aplicações na agricultura**. Brasília: Embrapa, 1998.
- ASTRIUM-GEO. Disponível em: <<http://goo.gl/G0hKgc>> Acesso em: 15 ago 2013.
- BADIA, A.; SERRA, P.; MODUGNO, S. Identifying dynamics of fire ignition probabilities in two representative Mediterranean wildland-urban interface areas. **Applied Geography**, Volume 31, Issue 3, July 2011, Pages 930–940
- BARBOSA, R. L.; MENEGUETTE Jr, M.; SILVA, J. F. C.; ARAÚJO GALLIS, R. B.; ITAME, O. Y. Análise estatística da qualidade de um modelo digital do terreno gerado com thin plate spline. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, p. 127-132, 2008.
- BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS: A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis**, USGS, Colorado, 2002.

BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a LASER: comparação com métodos Fotogramétricos. In: **XX Congresso Brasileiro de Cartografia**, Anais, CD ROM, Porto Alegre. 2001.

BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 jun 1984.

BRASINGTON, J.; RICHARDS, K. Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL. **Computers & Geosciences**, v. 24, n. 4, p. 299-314, 1998.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CAMARGO, A. A. B. de. **Avaliação e quantificação da contribuição de uma voçoroca para o assoreamento do Ribeirão das Cruzes, tributário da Represa de Três Irmãos, SP**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

CAMARGO, F. F.; OLIVEIRA, C.; FLORENZANO, T. G.; ALMEIDA, C. Avaliação da acurácia posicional da base cartográfica do município de São José dos Campos (SP) por análises de tendência e precisão. In: **Congresso brasileiro de cartografia**, 2007.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford Press, 2002.

CASAS, A.; BENITO, G.; THORNDYCRAFT, V. R.; RICO, M. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 4, p. 444-456, 2006.

CASELLA, V.; PADOVA, B. On the Standardization of Vertical Accuracy Figures in Dems. **ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 1, n. 3, p. 73-77, 2013.

CASTILLO-RODRÍGUEZ, M.; LÓPEZ-BLANCO, J.; MUÑOZ-SALINAS, E. A geomorphologic GIS-multivariate analysis approach to delineate environmental units, a case study of La Malinche volcano (central México). **Applied Geography**, Volume 30, Issue 4, December 2010, Pages 629–638

CASTRO, A. G.; VALÉRIO FILHO, M. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacia sob diferentes manejos florestais. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 21, n. 3, p. 419-26, 1997.

CAVALCANTI, I. F. A. ; CERQUEIRA, F. A.; ROZANTE, J. R. Caso extremo de precipitação com ocorrência de deslizamento na Serra do Mar. **XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis, 2006.

CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em <<http://goo.gl/74ImuL>> Acesso em: 19 out 2015.

CHAPLOT, V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. **Journal of Hydrology**, v. 312, n. 1, p. 207-222, 2005.

CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUÉDOIS, S.; SILVERA, N.; PHACHOMPHON, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. **Geomorphology**, v. 77, n. 1, p. 126-141, 2006.

CHARNET, R.; FREIRE, C. A. L.; CHARNET, E. M. R.; BONVINO, H. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. Campinas: Unicamp, 1999.

CHRISMAN, C. Development in the Treatment of Spatial Data Quality. In: DEVILLERS, R.; JEANSOULIN, R. **Fundamentals of spatial data quality**. ISTE Publishing Company, 2006.

CLAESSENS, L.; HEUVELINK, G. B. M.; SCHOORL, J. M.; VELDKAMP, A. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 4, p. 461-477, 2005.

COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de laser scanner aerotransportado em área de floresta usando o software livre GRASS. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 4, p. 3653-3660, 2007.

COLLINS, S. H.; MOON, G. C. Algorithms for dense digital terrain models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 47 (1), 71-76, 1981.

CONTI, L. A. Evidências da evolução dos sistemas de paleodrenagens na plataforma continental da região de São Sebastião (litoral norte do estado de São Paulo). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, 2009.

CORRADINI, F. A.; FACHINI, M. G.; STEVAUX, J. C. Controle geomorfológico da distribuição da vegetação ripária do rio Paraná: Parte I – Unidades Geomórficas da planície de inundação. **Revista UnG – Geociências** V.5, N.1, 2006.

CORRÊA, A. C. de B.. Antropogênese e morfogênese sob a ação de eventos climáticos de alta magnitude no Semiárido Pernambucano: o caso da Bacia do Riacho Salgado. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2011.

COSTA, C. A. G.; TEIXEIRA, A. dos S.; ANDRADE, E. M.; MACÍLIO, A.; LUCENA, P.; CASTRO, M. A. H. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 02, p. 222-230, 2010.

CONSTANTINO, D.; ANGELINI, M. G. Production of DTM quality by TLS data. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, p. 80-103, 2013.

COUTO JÚNIOR, A. F.; SOUZA, V. V. D.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; MARTINS, É. D. S.; SANTANA, O. A.; FREITAS, L. F.; GOMES, R. A. T. Integração de parâmetros morfométricos e imagem Aster para a delimitação das fitofisionomias da Serra da Canastra, Parque Nacional da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 1, 2011.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília, 2006. Escala 1:750.000

CRUZ, C. B. M.; BARROS, R. S.; CARDOSO, P. V.; REIS, R. B.; ROSÁRIO, L. S.; BARBOSA, S. S.; RABACO, L. M. L.; LOURENÇO, J; L; Q. Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba: INPE**, v. 2011, p. 5463, 2011.

CUMMINGS, C. A.; TODHUNTER, P. E.; RUNDQUIST, B. C. Using the Hazus-MH flood model to evaluate community relocation as a flood mitigation response to terminal lake flooding: The case of Minnewaukan, North Dakota, USA. **Applied Geography**, Volume 32, Issue 2, March 2012, Pages 889–895

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. da M. Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 7, nº 1, p.21-40, 2001.

DARNELL, A. R.; TATE, N. J.; BRUNSDON, C. Improving user assessment of error implications in digital elevation models. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 32, n. 4, p. 268-277, 2008.

DAY, T.; MULLER, J-P. Quality assessment of digital elevation models produced by automatic stereomatchers from SPOT image pairs. **The Photogrammetric Record**, v. 12, n. 72, p. 797-808, 1988.

DESMET, P. J. J. Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs. **Earth surface processes and landforms**, v. 22, n. 6, p. 563-580, 1997.

DIAS, M. A.; COELHO NETTO, A. L. A influência da topografia na distribuição de gramíneas em um fragmento de floresta atlântica urbana montanhosa—Maciço da Tijuca/RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, 2011.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential**. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report, 1998.

DOYLE, F. J. Digital terrain models: an overview. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.44, n.12, p.1481-1485, 1978.

DSG - DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO. **Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais (ET-ADGV)**. Versão 2.1.3, 2011.

DSG - DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO. **Especificação técnica para controle de qualidade de dados geoespaciais (ET-CQDG)**. 1ª ed., 2016.

EBNER, H.; REINHARDT, W.; HÖBLER, R. Generation, management and utilization of high fidelity digital terrain models. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 27, n. B11, p. 556-565, 1988.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications**. Artech House, 2005.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

ERDOĞAN, S. Modelling the spatial distribution of DEM error with geographically weighted regression: An experimental study. **Computers & Geosciences**, v. 36, n. 1, p. 34-43, 2010.

ESTEIO. Disponível em: <<http://goo.gl/r4uBlp>> Acesso em: 15 ago 2013.

ESRI. **ArcGis 9.2 desktop help**. Disponível em: <<http://goo.gl/nWvQIB>>. Acesso em 08 nov 2015.

ESRI. **How Slope Works**. Disponível em: <<https://goo.gl/8UJPOq>> Acesso em: 19 Mar. 2015.

EVANS, I.S.; HENGL, T.; GORSEVSKI, P. Applications in Geomorphology In: HENGL, T.; REUTER, H. I. **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Elsevier: Amsterdam, 2009.

FELICISIMO, A. M. **Modelos digitais del terreno**. Ediciones Pentalfa, Oviedo, España, 1994.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3, 2008.

FERNANDES, M. do C.; AVELAR, A. S.; MENEZES, L.; COELHO NETTO, A. L. Comparação do uso de superfície real e planimétrica para análises do índice de eficiência de drenagem: um estudo de caso no Maciço da Tijuca-RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1, 2012.

FGDC. **National Standard for Spatial Data Accuracy**. Federal Geographic Data Committee, 1998. Disponível em: <<http://goo.gl/SLX7i6>> Acesso em 20 ago 2014.

FIORI, A. P. **Mecânica dos solos**. Mar 2013. Notas de aula.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de Mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes** – Ed. UFPR – Curitiba, PR, 2009.

FISHER, P. F.; TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. **Progress in physical Geography**, v. 30, n. 4, p. 467-489, 2006.

FITZ, P. R. **Cartografia básica**. Canoas: La Salle, 2000.

FLORINSKY, I. V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 1, p. 47-62, 1998.

FLORINSKY, I. V.; KURYAKOVA, G. A. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations—exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 8, p. 815-832, 2000.

FOX, D. M.; WITZ, E.; BLANC, V.; SOULIÉ, C.; PENALVER-NAVARRO, M.; DERVIEUX, A. A case study of land cover change (1950–2003) and runoff in a Mediterranean catchment. **Applied Geography**, Volume 32, Issue 2, March 2012, Pages 810–821

GALO, M.; CAMARGO, P. de O.; O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In.: **COBRAC - 1994, 1o Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. Tomo II, p. 41-48, Florianópolis - SC, 1994.

GALVANIN, E. S.; DAL POZ, A. P. Sistema lidar e métodos de interpolação de dados. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 30, n. 1, p. 91-102, 2012.

GAO, J. Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 11, n. 2, p. 199-212, 1997.

GAO, J.; LIU, Y. Deforestation in Heilongjiang Province of China, 1896–2000: severity, spatiotemporal patterns and causes. **Applied Geography**, Volume 35, Issues 1–2, November 2012, Pages 345–352

GAUGHAN, A. E.; BINFORD, M. W.; SOUTHWORTH, J. Tourism, forest conversion, and land transformations in the Angkor basin, Cambodia. **Applied Geography**, Volume 29, Issue 2, April 2009, Pages 212–223

GERI, F.; AMICI, V.; ROCCHINI, D. Spatially-based accuracy assessment of forestation prediction in a complex Mediterranean landscape. **Applied Geography**, Volume 31, Issue 3, July 2011, Pages 881–890

GIACOMIN, G.; CARVALHO, M. B.; PAULA SANTOS, A.; GRAÇAS MEDEIROS, N.; FERRAZ, A. S. Análise comparativa entre métodos interpoladores de modelos de superfícies. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 6, n. 66/6, 2014.

GODONE, D.; GARNERO, G. The role of morphometric parameters in Digital Terrain Models interpolation accuracy: a case study. **European Journal of Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 198-214, 2013.

GOMES, M. J. da S. **Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape - SP/PR**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GONG, J.; ZHILIN, L.; ZHU, Q.; SUI, H.G.; ZHOU, Y. Effect of various factors on the accuracy of DEMs: an intensive experimental investigation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 66 (9), 2000.

GOSCIEWSKI, D. The effect of the distribution of measurement points around the node on the accuracy of interpolation of the digital terrain model. **Journal of Geographical Systems**, v. 15, n. 4, p. 513-535, 2013.

GOULDEN, T.; JAMIESON, R.; HOPKINSON, C.; STERLING, S.; SINCLAIR, A.; HEBB, D. Sensitivity of hydrological outputs from SWAT to DEM spatial resolution. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 80, n. 7, p. 639-652, 2014.

GUO, Q.; LI, W.; YU, H.; ALVAREZ, O. Effects of topographic variability and lidar sampling density on several DEM interpolation methods. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 6, p. 701-712, 2010.

HANGOUËT, J-F. Spatial Data Quality Assessment and Documentation. In: DEVILLERS, R.; JEANSOULIN, R. (Eds.) **Fundamentals of spatial data quality**. ISTE: London, 2006.

HASAN, A.; PILESJÖ, P.; PERSSON, A. On generating digital elevation models from lidar data—resolution versus accuracy and topographic wetness index indices in northern peatlands. **Geodesy and Cartography**, v. 38, n. 2, p. 57-69, 2012.

HO, L. T. K.; UMITSU, M. Micro-landform classification and flood hazard assessment of the Thu Bon alluvial plain, central Vietnam via an integrated method utilizing remotely sensed data. **Applied Geography**, Volume 31, Issue 3, July 2011, Pages 1082–1093

HOBİ, M. L.; GINZLER, C. Accuracy assessment of digital surface models based on WorldView-2 and ADS80 stereo remote sensing data. **Sensors**, v. 12, n. 5, p. 6347-6368, 2012.

HORN, B. K.P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, v. 69, n. 1, p. 14-47, 1981.

HUNTER, G. J.; GOODCHILD, M. F. Dealing with error in a spatial database: A simple case study. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 5, p. 529-537, 1995.

HUNTER, G. J.; GOODCHILD, M. F. Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. **Geographical Analysis**, v. 29, n. 1, p. 35-49, 1997.

HUTCHINSON, M. F.; GALLANT, J. C. Representation of terrain. **Geographical information systems**, v. 1, p. 105-124, 1999.

IBARRA, E. M.; A geographical approach to post-flood analysis: The extreme flood event of 12 October 2007 in Calpe (Spain). **Applied Geography**, Volume 32, Issue 2, March 2012, Pages 490–500

INTERMAP. Disponível em: < <http://goo.gl/a7HfVV>> Acesso em: 15 ago 2013.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo 1:500.000**. São Paulo, v. 1 e 2, 1981.

ISO - International Organization for Standardization. **Text for ISO/FDIS 19157 Geographic information — Data quality, as sent to the ISO Central Secretariat for issuing as FDIS**. International Organization for Standardization, 2013.

IVERSON, R. M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, v 36, 2000.

JAIMES, N. B. P.; SENDRA, J. B.; DELGADO, M. G.; PLATA, R. F. Exploring the driving forces behind deforestation in the State Mexico (Mexico) using geographically weighted regression. **Applied Geography**. Volume 30, Issue 3, July 2010, Pages 576-591

JESUS, C. D.; LADWIG, N. I. Geração de Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir de informações topográficas. **Tecnologia e Ambiente**, v. 14, 2013.

JORDAN, G. Digital Terrain Analysis in a GIS Environment. Concepts and Development. In: PECKHAM, R. J.; JORDAN, G. **Digital Terrain Modelling. Development and Applications in a Policy Support Environment**. Berlim: Springer, 2007.

JUNG, C. F. **Metodologia científica: ênfase em pesquisa tecnológica**. 3ª Ed. Rev. e Ampliada, 2003. Disponível em <<http://goo.gl/QiSoto>>. Acesso em: 23 Nov 2015.

KAWATA, L. T. **Análise de imagens baseada em objetos geográficos (GEOBIA) aplicada ao mapeamento da transição entre cinturão orogênico do atlântico e bacia sedimentar do Paraná**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, 2014.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Económica. México, 1948.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, 2000. Disponível em < <http://goo.gl/PLZMUU>>. Acesso em 07 out 2015.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. Ver. E ampl. São Paulo: Ed. UNESP, 2003.

LANG, S. **Análise da paisagem com SIG**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

LEAL, P. R. G. **Controle de qualidade em cartografia: proposta metodológica para avaliação das cartas topográficas do mapeamento sistemático nacional**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

LEE, G.; TACHIKAWA, Y.; TAKARA, K. Interaction between topographic and process parameters due to the spatial resolution of DEMs in distributed rainfall-runoff modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 10, p. 1059-1069, 2009.

LEICA. **Leica Viva TS12 Robotic – Dados Técnicos**. Disponível em: <<http://goo.gl/uWZ1qG>>. Acesso em: 16 Jan 2016.

LEPSCH, I.F.; PRADO, H.; MENK, J.R.F.; SAKAI, E.; RIZZO, L.T.B. **Levantamento de reconhecimento com detalhes dos solos da região do rio Ribeira de Iguape, SP**. Instituto Agrônômico, Secretaria de Agricultura do Governo do Estado de São Paulo, 1999.

LI, Z. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval. **The Photogrammetric Record**, v. 14, n. 79, p. 113-128, 1992.

LI, Z. A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 49, n. 1, p. 2-11, 1994.

LI, J.; HEAP, A. D. **A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists**. Geoscience Australia, Record 2008/23, 137 pp.

LIJPHART, A. Comparative Politics and the Comparative Method. **The American Political Science Review**. Vol. 65, No. 3., p. 682-693, 1971.

LISTO, F. de L. R.; VIEIRA, B. C. Influência de parâmetros geotécnicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis a escorregamentos translacionais rasos utilizando o modelo TRIGRS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 3, 2015.

LIU, X.; BIAN, L. Accuracy assessment of DEM slope algorithms related to spatial autocorrelation of DEM Errors. In: ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. (Ed.). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

LUO, W.; TAYLOR, M. C.; PARKER, S. R. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 7, p. 947-959, 2008.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 3ª ed. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002.

MACEACHREN, A. M.; DAVIDSON, J. V. Sampling and isometric mapping of continuous geographic surfaces. **The American Cartographer**, v. 14, n. 4, p. 299-320, 1987.

MAKAROVIC, B. Progressive sampling for digital terrain models. **ITC Journal**, v. 3, p. 397-416, 1973.

MAPMART. Disponível em: <<http://goo.gl/XwJXzi>> Acesso em: 15 ago 2013.

MARCHIORO, E.; FRENANDE, N.; MACEDO, J.; BHERING, S. B.; GONÇALVES, A. O.; CAIADO, M. A. C.. Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do Córrego Santa Maria. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 1, 2011.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARQUES, J. Q. A. **Manual brasileiro para levantamento da capacidade de uso da terra**: 3ª aproximação. Escritório Técnico Brasil-Estados Unidos (ETA), 1971.

MARTIN, R. D.; BRABYN, L.; POTTER, M. A. Sensitivity of GIS-derived terrain variables at multiple scales for modelling stoat (*Mustela erminea*) activity. **Applied Geography**, Volume 31, Issue 2, April 2011, Pages 770–779

MARTINS, B. O. H. R. S. **Análise de riscos geomorfológicos na região de Bobonaro, Timor-Leste**. Dissertação (Mestrado em Geomática), Universidade do Algarve, Faro, Portugal, 2011.

MATOS, J. **Fundamentos de informação geográfica**. Lisboa: Lidel, 2008.

MENEZES, P. M. L de; COELHO NETO, A. L. Escala: estudo de conceitos e aplicações. In: **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia**, Recife, PE, 1999.

MERBITZ, H.; BUTTSTÄDT, M.; MICHAEL, S.; DOTT, W.; SCHNEIDER, C. GIS-based identification of spatial variables enhancing heat and poor air quality in urban areas. **Applied Geography**, Volume 33, April 2012, Pages 94–106

MERCHANT, D.C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. **AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING**. USA – Denver/CO, 1982.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Comparação da avaliação vertical de modelos digitais de elevação para médias e pequenas escalas em diferentes configurações topográficas. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010.

MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of soils and sediments**, v. 14, n. 7, p. 1266-1277, 2014.

MIKHAIL, E.M.; HELAVA, U.V.; JANCAITIS, J.R.; DOYLE, F.J.; HELMERING, R.J.; ACKERMANN, F.; TURNER, A.K. Panel discussion: the future of DMT. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v.44, n.12, p.1487-1497, 1978.

MILIAREISIS, G. Ch.; PARASCHOU, C. V. E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 7, n. 1, p. 49-59, 2005.

MINNESOTA PLANNING. **Positional Accuracy Handbook. Using the National Standard for Spatial data Accuracy to measure and report geographic data quality**. Minnesota Planning, St. Paul, MN, 1999.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010.

MOMBEIG, P. A geografia no ensino secundário. In: **Boletim geográfico**, v.3, n.26, 1945.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991.

MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; SUÁREZ-SEOANE, S.; CALVO, L.; LUIS, E. Using predictive models as a spatially explicit support tool for managing cultural landscapes. **Applied Geography**, Volume 31, Issue 2, April 2011, Pages 839–848

MOTA, A. de A.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R. F.; GRISON, F.; GIGLIO, J. N.; CARDOSO, A. T.; MICHEL, G. P. Efeito da escala na obtenção de parâmetros morfométricos em pequena bacia experimental. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves, 2013.

MOURA, J. E. de. **Influência dos modelos digitais de terreno na modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH: um estudo de caso**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, 2010.

MUKHERJEE, S.; MUKHERJEE, S.; BHARDWAJ, A.; MUKHOPADHYAY, A.; GARG, R. D.; HAZRA, S. Accuracy of Cartosat-1 DEM and its derived attribute at multiple scale representation. **Journal of Earth System Science**, v. 124, n. 3, p. 487-495, 2015.

OBERSKI, T. Methods of identification and delimitation of concave terrain features based on ISOK-NMT data. **Technical Sciences**, v. 19(1), Jan 2016.

OKSANEN, J.; SARJAKOSKI, T. Error propagation of DEM-based surface derivatives. **Computers & Geosciences**, v. 31, n. 8, p. 1015-1027, 2005.

OLAYA, V. Basic land-surface parameters. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Newnes, 2008.

ORBISAT. **Tecnologia de aerolevamento com radar Orbisar**. Disponível em: <<http://goo.gl/IA0d0o>>. Acesso em: 15 ago 2013.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: **8th congress of the international association of engineering geology, Vancouver, British Columbia, Canada**. 1998.

PAIN, C.F. Size does matter: relationships between image pixel size and landscape process scales. In: ZERGER, A.; ARGENT, R.M. (Eds.) **International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand**. Melbourne, 2005.

PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de; MOREIRA, A. P.; MAFFINI, G. F.; MELLER, A.; DILL, P. R. J. Evolução de processo erosivo acelerado em trecho do Arroio Vacacaí Mirim. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 6, n.2, Abr/Jun 2001.

PEREIRA, L. C.; LOMBARDI NETO, F. Avaliação da aptidão agrícola das terras: proposta metodológica. **Embrapa Meio Ambiente. Documentos**, 2004.

PETERNELLI, L. A. Regressão linear e correlação. **Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Informática–Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Minas Gerais**, 2013. Disponível em: < <http://goo.gl/TiLCJf> >. Acesso em 23 Nov 2015.

PETRIE, G.; KENNIE, T. J. M. **Terrain modelling in surveying and civil engineering**. Whittles, 1990.

PIKE, R. J. A bibliography of terrain modeling (geomorphometry), the quantitative representation of topography. **USGS Open file report**, p. 02-465, 2002.

PINHEIRO, E. S.; KUX, H. J. H. Análise e validação de Modelos Digitais do Terreno num setor de relevo escarpado da Mata Atlântica–RS, Área Teste: CPCN Pró-Mata. **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte–MG**, 2003.

PODOBNIKAR, T. Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality. **IJGIS**, 19/1, 69–89, 2005.

POPPER, K. S. **A lógica da pesquisa científica**. 2.ed. São Paulo: Cultrix, 1975.

PRADHAN, A. M. S.; KIM, Y. T. Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. **CATENA**, v. 140, p. 125-139, 2016.

QGIS. **Documentação do QGIS2.6 – Análise Espacial**. Disponível em: <<http://goo.gl/gCUof5>>. Acesso em 08 nov 2015.

QUINTANILHA, G. J.; OLIVEIRA, V. de P. S. Modelo digital de terreno: subsídio para o zoneamento de áreas sujeitas a inundações e planejamento público da Baixada Campista/Norte Fluminense–Rio de Janeiro. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago**, v. 6, n. 2, p. 93-116, 2013.

RAAFLAUB, L. D.; COLLINS, M. J. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 5, p. 710-732, 2006.

REES, W. G. The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions. **International journal of remote sensing**, v. 21, n. 1, p. 7-20, 2000.

RIBEIRO JÚNIOR, J. I. **Análises estatísticas no Excel: guia prático**. Viçosa: UFV, 2004.

ROBAINA, L. E. de S.; PEDROSA, A. D. S.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E. Análise geográfica de áreas de risco de movimento de massa na região metropolitana de Porto, Portugal. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, 2011.

RODRIGUES, T. C. S.; KUX, H. J. H.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Processo de ortorretificação para correção geométrica em imagens WorldView-II. **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, 2015.

RODRIGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUZA, R. F. Avaliação da adequação dos produtos ASTER GDEM no auxílio ao mapeamento sistemático brasileiro. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife-PE**, p. 27-30, 2010.

RODRIGUEZ, F.; BOCHER, E.; CHANCIBAULT, K. Terrain representation impact on periurban catchment morphological properties. **Journal of Hydrology**, v. 485, p. 54-67, 2013.

RODRIGUEZ-GALIANO, V.; CHICA-OLMO, M. Land cover change analysis of a Mediterranean area in Spain using different sources of data: Multi-seasonal Landsat images, land surface temperature, digital terrain models and texture. **Applied Geography**, Volume 35, Issues 1–2, November 2012, Pages 208–218.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. Editora Contexto, 1990.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, 1994.

SALCIARINI, D.; GODT, J. W.; SAVAGE, W. Z.; CONVERSINI, P.; BAUM, R. L.; MICHAEL, J. A. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. **Landslides**, v. 3, n. 3, p. 181-194, 2006.

SAMPAIO, T. V. M. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem – uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente – ES**. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFMG. Belo Horizonte, 2008.

SAMPAIO, T. V. M. **Geoestatística e qualidade da informação em SIG**. Set 2015. Notas de Aula.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014.

SANTOS, L. J. C.; DE PAULA, E. V.; GROCHOCKI, M. A. F. Mapeamento geomorfológico como subsídio à identificação e à estimativa dos solos na área de drenagem da baía de Antonina (PR). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, 2009.

SANTOS, S. D. R.; HUINCA, S. C. M.; MELO, L. F. D. S.; DA SILVA, M. T. Q. S.; DELAZARI, L. S. Considerações sobre a utilização do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nos dias atuais. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife-PE, 2010.

SCHIMALESKY, V. **Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a LASER em uma região coberta por vegetação: um estudo de caso**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2007.

SCHOORL, J.M.; VELDKAMP, A. Multiscale soil–landscape process modelling. In: GRUNWALD, S. (Ed.), **Environmental Soil–Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics**. CRC Press, Boca Raton, 2005.

SCHUT, G. H. Review of interpolation methods for digital terrain models. **Canadian surveyor**, v. 30, n. 5, p. 389-412, 1976.

SHI, W.; WANG, B.; TIAN, Y. Accuracy analysis of digital elevation model relating to spatial resolution and terrain slope by bilinear interpolation. **Mathematical Geosciences**, v. 46, n. 4, p. 445-481, 2014.

SIEFERT, C.; SCHULTZ, G.; MARANGON, F.; LANGE, D. Análise do efeito de escala da base cartográfica na obtenção de atributos topográficos em bacia hidrográfica de 1ª ordem. **Revista Geonorte**, v. 10, n. 1, p. 20-25, 2014.

SILVA, L. A.; NAZARENO, N. R. X. Análise do padrão de exatidão cartográfica da imagem do google earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, v. 14, p. 1723-1730, 2009.

SILVA, J. P.; SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P. Aplicação de dois métodos físico-matemáticos para avaliação do índice de estabilidade das vertentes da Bacia do Rio Ribeirão / Paranaguá-PR. **Revista Geonorte**, Edição Especial, V.2, N.4, p.1291 - 1302, 2012.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; SIRTOLI, A. E.; SILVA, C. R. Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, 2012.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; FELIPE, R. da S.; KEPEL FILHO, J. L.; FOLADOR, R. M.; COSTA, L. C. Análise do Fator de Segurança da estabilidade das vertentes na bacia do rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 3, 2013a.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J. R.; DE MIO, G.; SILVEIRA, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí, Paraná. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 3, 2013b.

SOPCHAKI, C. H. **Análise comparativa de metodologias para o mapeamento de formas de vertente: estudo de caso nas Bacias do Rio Marumbi e do Arroio do Corvo - PR**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Curitiba, 2012.

SOUZA, J. O. P. Análise da precisão altimétrica dos modelos digitais de elevação para área semiárida do nordeste brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 30, p. 056-064, 2016.

SØRENSEN, R.; SEIBERT, J. Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. **Journal of Hydrology**, v. 347, n. 1, p. 79-89, 2007.

SPATIAL ENERGY. Disponível em: <<http://goo.gl/qwZQpR>> Acesso em: 15 ago 2013.

STEINKE, V. A.; SANO, E. E. Semi-automatic identification, GIS-based morphometry of geomorphic features of Federal District of Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 1, 2011.

STEWART, B. P.; NELSON, T. A.; WULDER, M. A.; NIELSEN, S. E.; STENHOUSE, G. Impact of disturbance characteristics and age on grizzly bear habitat selection. **Applied Geography**, Volume 34, May 2012, Pages 614–625

STORY, M.; CONGALTON, R. Accuracy assessment: a user's perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Bethesda, v. 52, n. 3, p. 397-399, 1986.

SU, J.; BORK, E. Influence of vegetation, slope, and lidar sampling angle on DEM accuracy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 11, p. 1265-1274, 2006.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do Rio Ligeiro (PR). **Geociências (São Paulo)**, v. 27, n. 3, p. 387-399, 2008.

TAN, Q.; XU, X. Comparative Analysis of Spatial Interpolation Methods: an Experimental Study. **Sensors & Transducers**, v. 165, n. 2, p. 155, 2014.

TAROLLI, P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: opportunities and challenges. **Geomorphology**, v. 216, p. 295-312, 2014.

TOMCZYK, A. M. A GIS assessment and modelling of environmental sensitivity of recreational trails: the case of Gorce National Park, Poland. **Applied Geography**, Volume 31, Issue 1, January 2011, Pages 339–351

TONUS, BP de A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

TRISURAT, Y.; SHRESTHA, R. P.; KJELGREN, R. Plant species vulnerability to climate change in Peninsular Thailand. **Applied Geography**, Volume 31, Issue 3, July 2011, Pages 1106–1114

TROPMAIR, H.; FERREIRA, M. E. M. C. Cobertura vegetal, poluição aérea e deslizamentos na Serra do Mar. **Geografia**, v. 12, n. 23, p. 117-129, 1987.

UAGODA, R.; AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Contribuição a geomorfologia cárstica em rochas quartzíticas: médio vale do Rio Preto, RJ/MG. **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**, 2006.

U.S. BUREAU OF THE BUDGET. **United States National Map Accuracy Standards**. U.S. BUREAU OF THE BUDGET, 1941. Disponível em: <<http://goo.gl/nbxgzR>> Acesso em: 19 set 2014.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais**. - São José dos Campos: INPE, 2008.

VANACÔR, R. N.; ROLIM, S. B. A. Mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1, 2012.

VIEIRA, H. B. G.; GENRO, R. S. Inferência estatística para validação de documentos cartográficos obtidos com sensores remotos orbitais ou aerotransportados, em áreas de operação da Petrobras. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba**, p. 2339, 2011.

VIEIRA, H. B. G.; GENRO, R. S. Estimativa da acurácia posicional de documentos cartográficos na Petrobras a partir do erro máximo provável inferido do erro médio quadrático e da respectiva variância propagada. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, 2013.

VIEIRA, B. C.; RAMOS, H. Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, v. 29, p. 161-174, 2015.

WALSH, S. J.; BUTLER, D. R.; MALANSON, G. P. An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. **Geomorphology**, v. 21, n. 3, p. 183-205, 1998.

WAROUX, Y. le P. de; LAMBIN, E. F. Monitoring degradation in arid and semi-arid forests and woodlands: The case of the argan woodlands (Morocco). **Applied Geography**, Volume 32, Issue 2, March 2012, Pages 777–786

WATSON, D. **Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data**. Elsevier, 1992.

WEIBEL, R.; HELLER, M. **Digital terrain modelling**. Oxford University Press, 1993.

WENG, Q. Quantifying uncertainty of digital elevation models derived from topographic maps. In: **Advances in spatial data handling**. Springer Berlin Heidelberg, 2002.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Ed.). **Terrain analysis: principles and applications**. Wiley, 2000.

WISE, S. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. **Hydrological processes**, v. 14, n. 11-12, p. 1909-1929, 2000.

WISE, S. Digital terrain model. In: THOMAS, D. S. G.; GOUDIE, A. **The dictionary of physical geography**. Oxford: Blackwell Publishing, 2000.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. **Deslizamentos em encostas na Serra do Mar-Brasil**. Solos e Rochas, v. 12, p. 27-36, 1989.

YANG, X.; HODLER, T. Visual and statistical comparisons of surface modeling techniques for point-based environmental data. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 27, n. 2, p. 165-176, 2000.

YOUNG, A. Slope profile analysis: the system of best units. In: BRUNDSSEN, D. **Slopes form and process**. London: Institute of British Geographers, 1971.

Z Aidan, R. T.; FERNANDES, N. F. Zoneamento de susceptibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego do Independência-Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, 2009.

ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water resources research**, v. 30, n. 4, p. 1019-1028, 1994.

ZHILIN, L. I. Multi-scale digital terrain modelling and analysis. In: **Advances in digital terrain analysis**. Springer: Berlin, 2008.

ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. **Advances in digital terrain analysis**. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2008.

ZHOU, G.; YAN, H.; CHEN, K.; ZHANG, R. Spatial analysis for susceptibility of second-time karst sinkholes: A case study of Jili Village in Guangxi, china. **Computers & Geosciences**, 2016.

ZHU, A-X.; BURT, J. E.; SMITH, M.; WANG, R.; GAO, J. The Impact of Neighbourhood Size on Terrain Derivatives and Digital Soil Mapping. In: In: ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. (Ed.). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Springer Berlin Heidelberg, 2008.

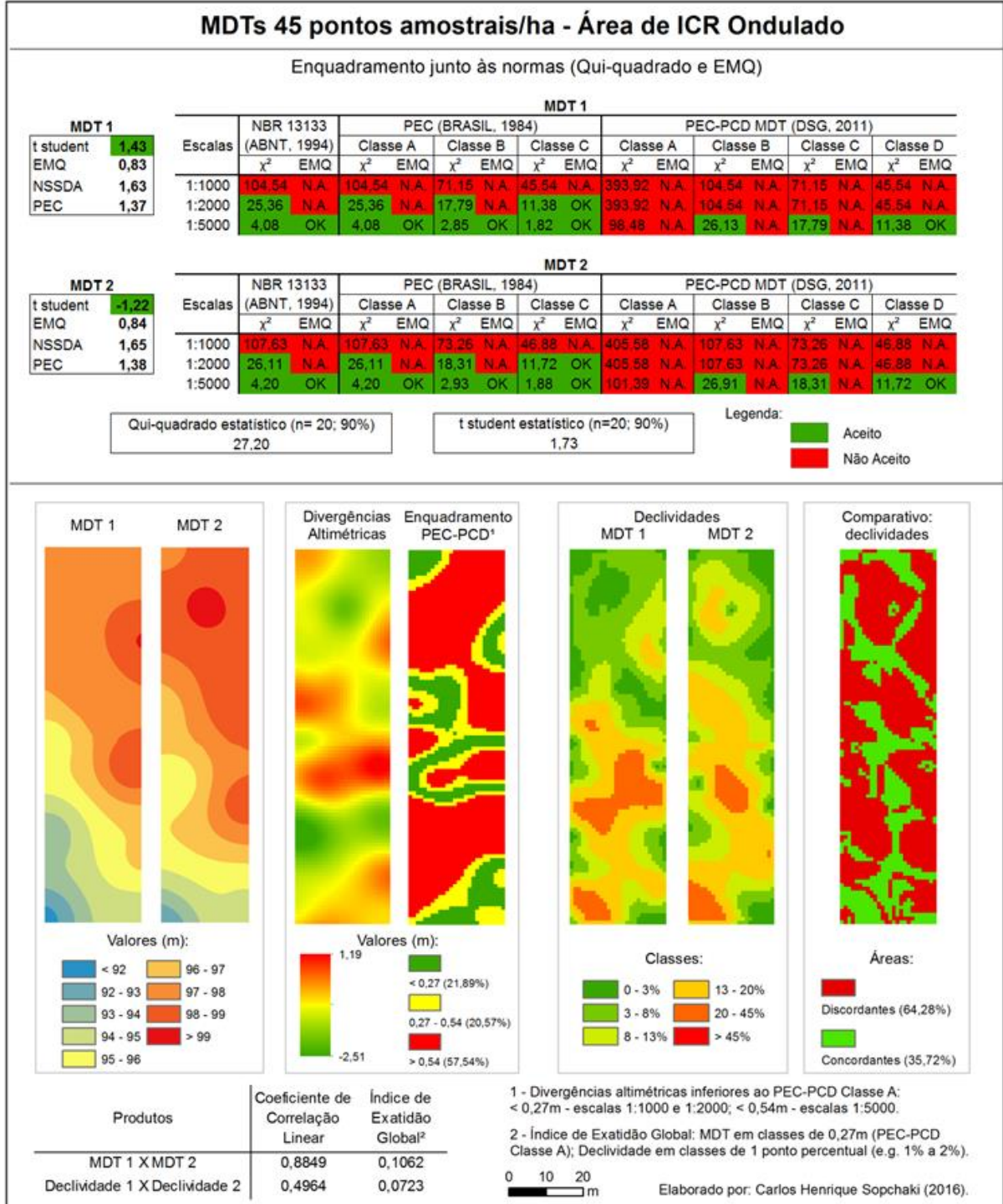
ZHU, C.; SHI, W.; LI, Q.; WANG, G.; CHEUNG, T. C. K.; DAI, E.; SHEA, G. Y. K. Estimation of average DEM accuracy under linear interpolation considering random error at the nodes of TIN model. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 24, 2005.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica**. São Paulo: Oficina de textos, 2004.

ZUQUETTE, L. V.; PEJON, O. J. Carta de zoneamento geotécnico geral da região de Franca (SP), utilizando os critérios de landforms. **II Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica**. ABGE, São Carlos, SP. 1996.

APÊNDICES

I – ÁREA DE ICR ONDULADO



Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%) **27,20**

t student estatístico (n=20; 90%) **1,73**

Legenda: ■ Aceito ■ Não Aceito

MDT 1

MDT 2

Divergências Altimétricas

Enquadramento PEC-PCD¹

Declividades MDT 1

Declividades MDT 2

Comparativo: declividades

Valores (m):

< 92	96 - 97
92 - 93	97 - 98
93 - 94	98 - 99
94 - 95	> 99
95 - 96	

Valores (m):

< 0,27 (21,89%)	> 0,54 (57,54%)
0,27 - 0,54 (20,57%)	

Classes:

0 - 3%	13 - 20%
3 - 8%	20 - 45%
8 - 13%	> 45%

Áreas:

■ Discordantes (64,28%)
■ Concordantes (35,72%)

Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,8849	0,1062
Declividade 1 X Declividade 2	0,4964	0,0723

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.

2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 180 pontos amostrais/ha - Área de ICR Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

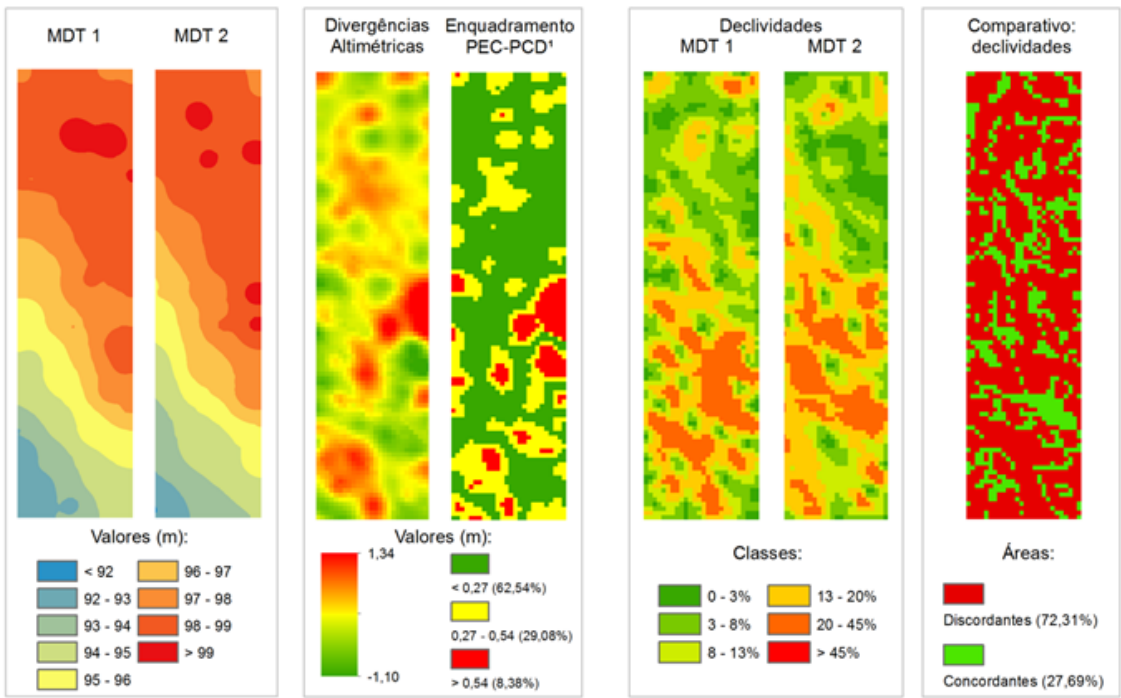
MDT 1		MDT 1																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)			PEC-PCD MDT (DSG, 2011)										
			χ²	EMQ	Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D							
t student	-0,06	1:1000	19,62	N.A.	19,62	N.A.	13,36	OK	8,55	OK	73,95	N.A.	19,62	N.A.	13,36	OK	8,55	OK
EMQ	0,34	1:2000	4,76	OK	4,76	OK	3,34	OK	2,14	OK	73,95	N.A.	19,62	N.A.	13,36	OK	8,55	OK
NSSDA	0,66	1:5000	0,77	OK	0,77	OK	0,53	OK	0,34	OK	18,49	N.A.	4,91	OK	3,34	OK	2,14	OK
PEC	0,55																	

MDT 2		MDT 2																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)			PEC-PCD MDT (DSG, 2011)										
			χ²	EMQ	Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D							
t student	1,15	1:1000	19,94	N.A.	19,94	N.A.	13,57	OK	8,69	OK	75,15	N.A.	19,94	N.A.	13,57	OK	8,69	OK
EMQ	0,35	1:2000	4,84	OK	4,84	OK	3,39	OK	2,17	OK	75,15	N.A.	19,94	N.A.	13,57	OK	8,69	OK
NSSDA	0,68	1:5000	0,78	OK	0,78	OK	0,54	OK	0,35	OK	18,79	N.A.	4,99	OK	3,39	OK	2,17	OK
PEC	0,57																	

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9648	0,3650
Declividade 1 X Declividade 2	0,3635	0,0569

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.

2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

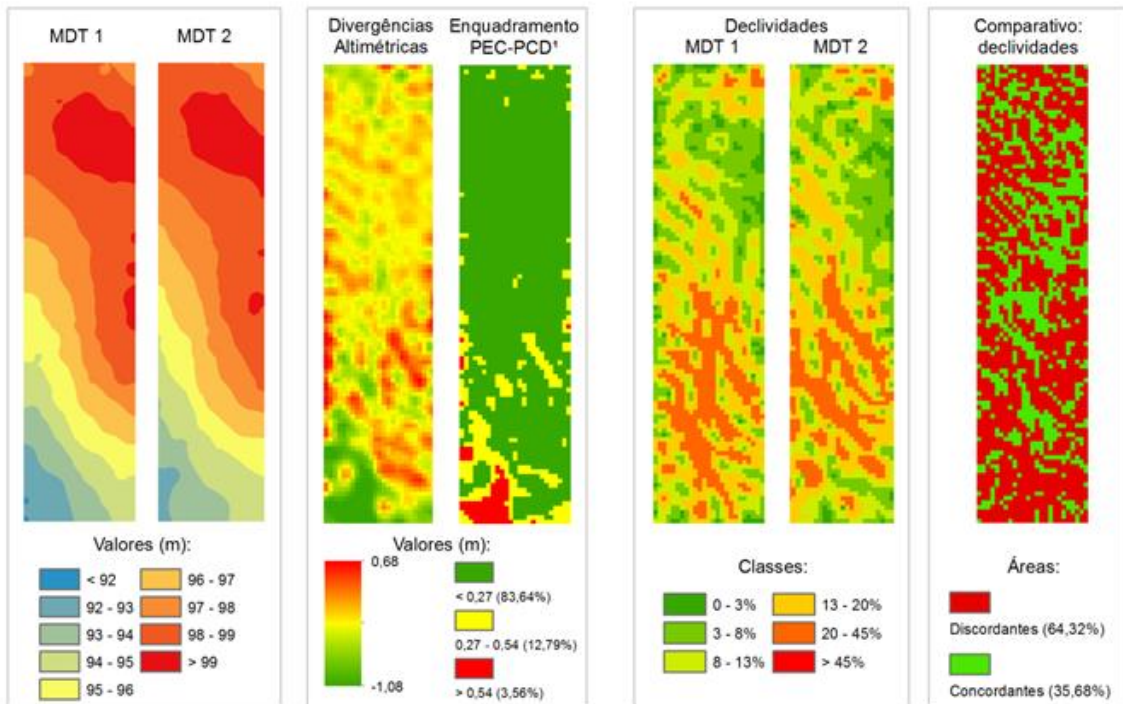
MDTs 360 pontos amostrais/ha - Área de ICR Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

MDT 1		MDT 1															
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	0,63																
EMQ	0,16																
NSSDA	0,31																
PEC	0,26																
1:1000		4,28	OK	4,28	OK	2,92	OK	1,87	OK	16,15	OK	4,28	OK	2,92	OK	1,87	OK
1:2000		1,04	OK	1,04	OK	0,73	OK	0,47	OK	16,15	OK	4,28	OK	2,92	OK	1,87	OK
1:5000		0,17	OK	0,17	OK	0,12	OK	0,07	OK	4,04	OK	1,07	OK	0,73	OK	0,47	OK

MDT 2		MDT 2															
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	-1,25																
EMQ	0,35																
NSSDA	0,69																
PEC	0,58																
1:1000		20,02	N.A.	20,02	N.A.	13,62	OK	8,72	OK	75,42	N.A.	20,02	N.A.	13,62	OK	8,72	OK
1:2000		4,86	OK	4,86	OK	3,41	OK	2,18	OK	75,42	N.A.	20,02	N.A.	13,62	OK	8,72	OK
1:5000		0,78	OK	0,78	OK	0,54	OK	0,35	OK	18,86	N.A.	5,00	OK	3,41	OK	2,18	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)	t student estatístico (n=20; 90%)	Legenda:
27,20	1,73	■ Aceito
		■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9797	0,5861
Declividade 1 X Declividade 2	0,4194	0,0661

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.

2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 720 pontos amostrais/ha - Área de ICR Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

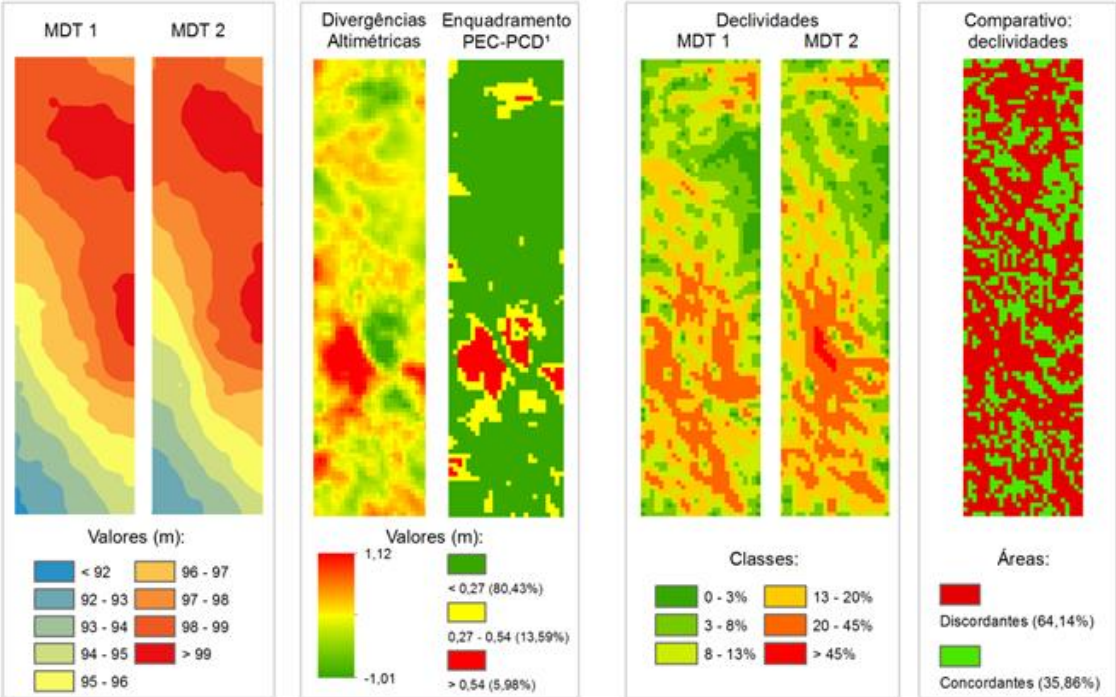
MDT 1		MDT 1															
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	-0,80																
EMQ	0,23																
NSSDA	0,44																
PEC	0,37																
1:1000		8,60	OK	8,60	OK	5,86	OK	3,75	OK	32,42	N.A.	8,60	OK	5,86	OK	3,75	OK
1:2000		2,09	OK	2,09	OK	1,46	OK	0,94	OK	32,42	N.A.	8,60	OK	5,86	OK	3,75	OK
1:5000		0,34	OK	0,34	OK	0,23	OK	0,15	OK	8,11	OK	2,15	OK	1,46	OK	0,94	OK

MDT 2		MDT 2															
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	-0,13																
EMQ	0,16																
NSSDA	0,30																
PEC	0,25																
1:1000		4,21	OK	4,21	OK	2,86	OK	1,83	OK	15,85	OK	4,21	OK	2,86	OK	1,83	OK
1:2000		1,02	OK	1,02	OK	0,72	OK	0,46	OK	15,85	OK	4,21	OK	2,86	OK	1,83	OK
1:5000		0,16	OK	0,16	OK	0,11	OK	0,07	OK	3,96	OK	1,05	OK	0,72	OK	0,46	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9806	0,5496
Declividade 1 X Declividade 2	0,4477	0,0627

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 1440 pontos amostrais/ha - Área de ICR Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

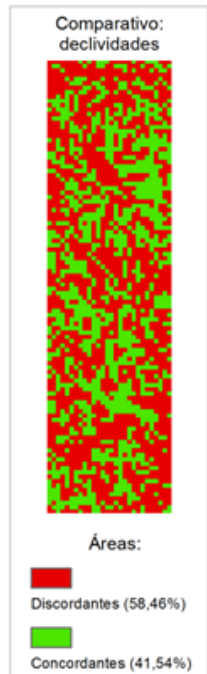
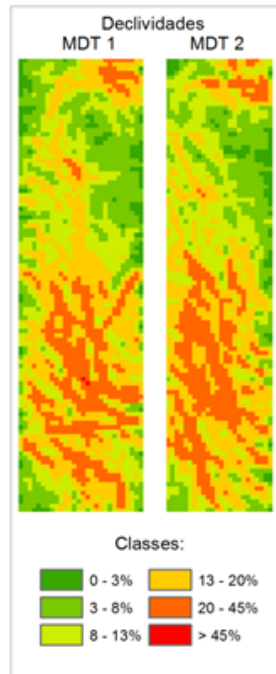
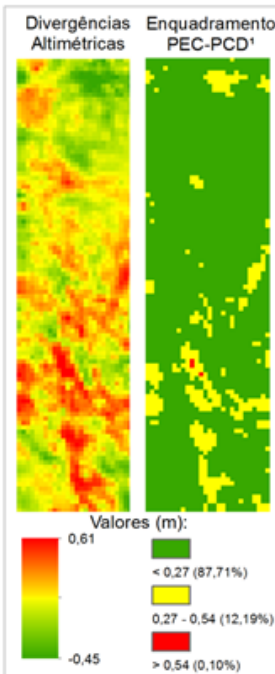
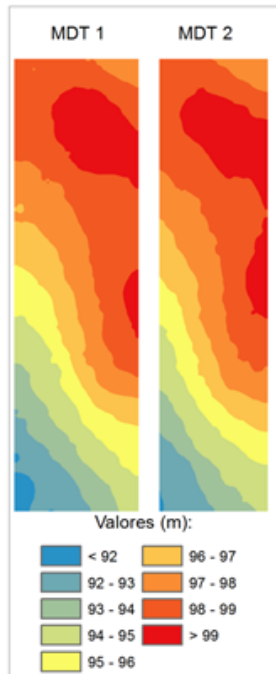
MDT 1		MDT 1																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
t student	0,76	Escalas			Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
EMQ	0,12		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
NSSDA	0,23	1:1000	2,37	OK	2,37	OK	1,61	OK	1,03	OK	8,94	OK	2,37	OK	1,61	OK	1,03	OK
PEC	0,19	1:2000	0,58	OK	0,58	OK	0,40	OK	0,26	OK	8,94	OK	2,37	OK	1,61	OK	1,03	OK
		1:5000	0,09	OK	0,09	OK	0,06	OK	0,04	OK	2,23	OK	0,59	OK	0,40	OK	0,26	OK

MDT 2		MDT 2																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
t student	0,01	Escalas			Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
EMQ	0,13		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
NSSDA	0,26	1:1000	3,15	OK	3,15	OK	2,14	OK	1,37	OK	11,87	OK	3,15	OK	2,14	OK	1,37	OK
PEC	0,22	1:2000	0,76	OK	0,76	OK	0,54	OK	0,34	OK	11,87	OK	3,15	OK	2,14	OK	1,37	OK
		1:5000	0,12	OK	0,12	OK	0,09	OK	0,05	OK	2,97	OK	0,79	OK	0,54	OK	0,34	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda: ■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9852	0,5693
Declividade 1 X Declividade 2	0,5971	0,0727

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
0 10 20 m Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 14400 pontos amostrais/ha - Área de ICR Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

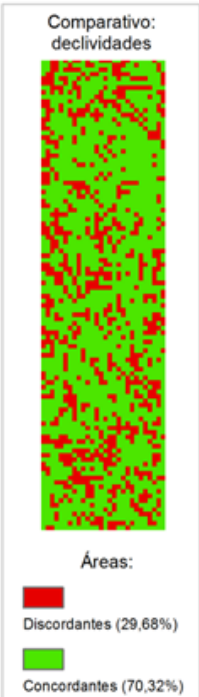
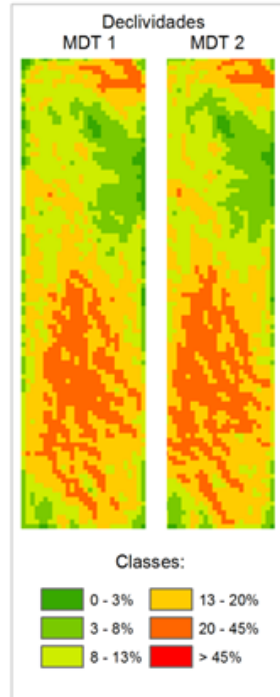
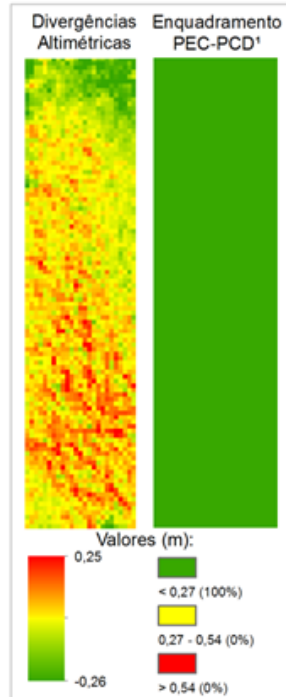
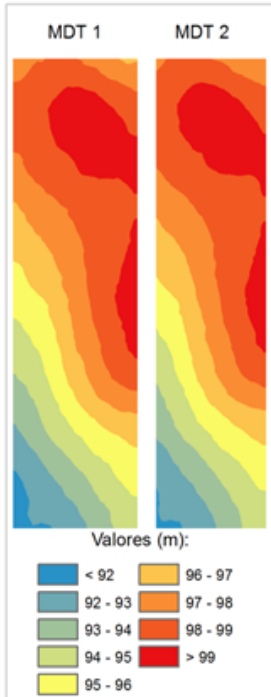
MDT 1		MDT 1													
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)					
t student	-0,26			Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C	
EMQ	0,06	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
NSSDA	0,12	1:1000	0,66 OK	0,66 OK	0,45 OK	0,29 OK	2,47 OK	0,66 OK	0,45 OK	0,29 OK	0,66 OK	0,45 OK	0,29 OK	0,66 OK	0,45 OK
PEC	0,10	1:2000	0,16 OK	0,16 OK	0,11 OK	0,07 OK	2,47 OK	0,66 OK	0,45 OK	0,29 OK	0,66 OK	0,45 OK	0,29 OK	0,66 OK	0,45 OK
		1:5000	0,03 OK	0,03 OK	0,02 OK	0,01 OK	0,62 OK	0,16 OK	0,11 OK	0,07 OK	0,62 OK	0,16 OK	0,11 OK	0,07 OK	0,07 OK

MDT 2		MDT 2													
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)					
t student	1,38			Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C	
EMQ	0,06	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
NSSDA	0,12	1:1000	0,52 OK	0,52 OK	0,36 OK	0,23 OK	1,97 OK	0,52 OK	0,36 OK	0,23 OK	0,52 OK	0,36 OK	0,23 OK	0,52 OK	0,36 OK
PEC	0,10	1:2000	0,13 OK	0,13 OK	0,09 OK	0,06 OK	1,97 OK	0,52 OK	0,36 OK	0,23 OK	0,52 OK	0,36 OK	0,23 OK	0,52 OK	0,36 OK
		1:5000	0,02 OK	0,02 OK	0,01 OK	0,01 OK	0,49 OK	0,13 OK	0,09 OK	0,06 OK	0,49 OK	0,13 OK	0,09 OK	0,06 OK	0,06 OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9932	0,7884
Declividade 1 X Declividade 2	0,9071	0,1839

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m
 Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 21600 pontos amostrais/ha - Área de ICR Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

MDT 1

t student	0,32
EMQ	0,07
NSSDA	0,14
PEC	0,12

Escalas	MDT 1															
	NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
	χ^2	EMQ	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
1:1000	0,91	OK	0,91	OK	0,62	OK	0,40	OK	3,44	OK	0,91	OK	0,62	OK	0,40	OK
1:2000	0,22	OK	0,22	OK	0,16	OK	0,10	OK	3,44	OK	0,91	OK	0,62	OK	0,40	OK
1:5000	0,04	OK	0,04	OK	0,02	OK	0,02	OK	0,86	OK	0,23	OK	0,16	OK	0,10	OK

MDT 2

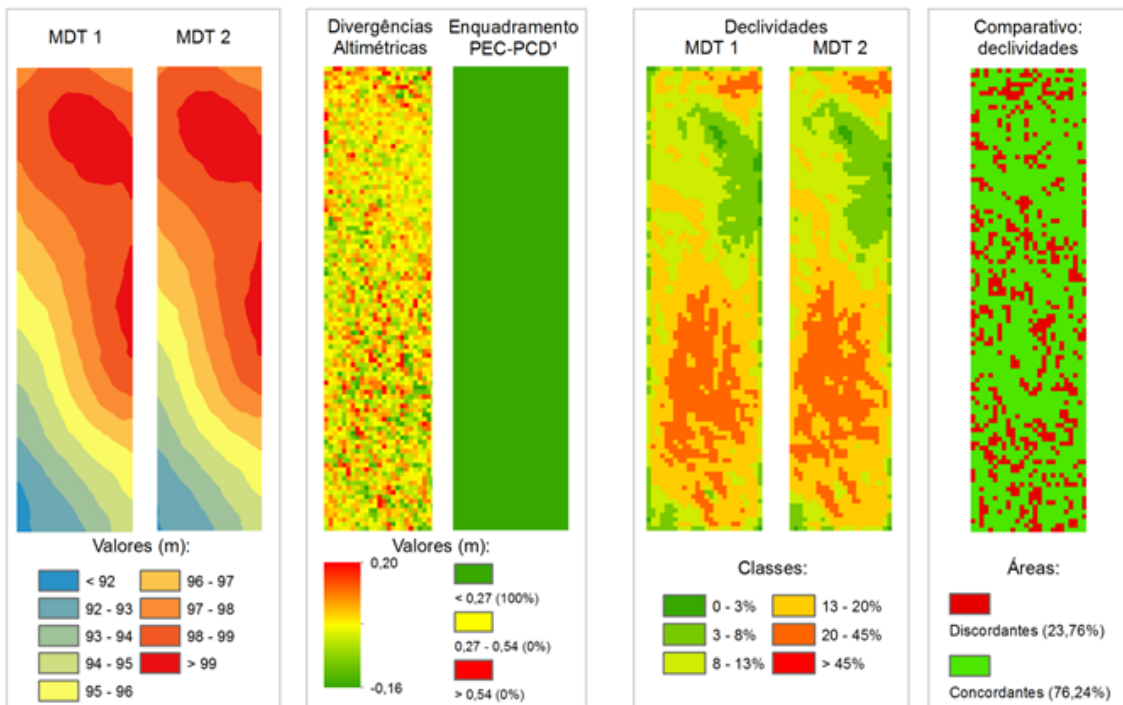
t student	0,54
EMQ	0,07
NSSDA	0,13
PEC	0,11

Escalas	MDT 2															
	NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
	χ^2	EMQ	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
1:1000	0,81	OK	0,81	OK	0,55	OK	0,35	OK	3,05	OK	0,81	OK	0,55	OK	0,35	OK
1:2000	0,20	OK	0,20	OK	0,14	OK	0,09	OK	3,05	OK	0,81	OK	0,55	OK	0,35	OK
1:5000	0,03	OK	0,03	OK	0,02	OK	0,01	OK	0,76	OK	0,20	OK	0,14	OK	0,09	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9973	0,9079
Declividade 1 X Declividade 2	0,9351	0,2281

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 28800 pontos amostrais/ha - Área de ICR Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

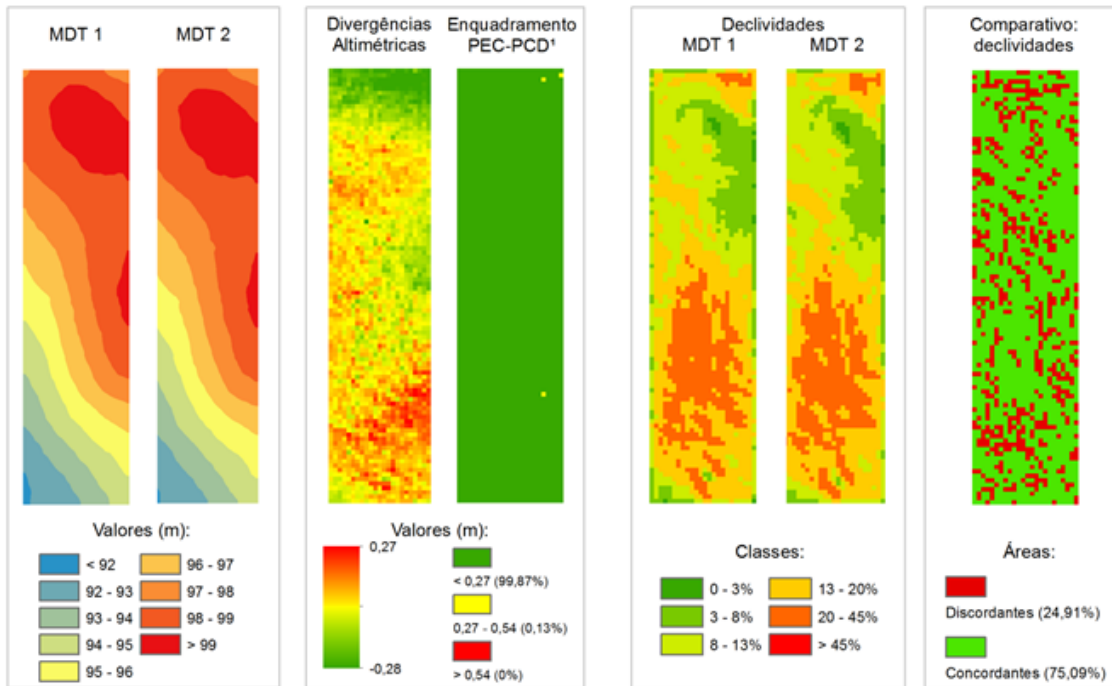
MDT 1		MDT 1																	
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)									
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ		
t student	-0,02																		
EMQ	0,07																		
NSSDA	0,13																		
PEC	0,11																		
		Escalas	1:1000	0,82	OK	0,82	OK	0,56	OK	0,36	OK	3,09	OK	0,82	OK	0,56	OK	0,36	OK
			1:2000	0,20	OK	0,20	OK	0,14	OK	0,09	OK	3,09	OK	0,82	OK	0,56	OK	0,36	OK
			1:5000	0,03	OK	0,03	OK	0,02	OK	0,01	OK	0,77	OK	0,21	OK	0,14	OK	0,09	OK

MDT 2		MDT 2																	
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)									
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ		
t student	0,20																		
EMQ	0,06																		
NSSDA	0,13																		
PEC	0,11																		
		Escalas	1:1000	0,73	OK	0,73	OK	0,49	OK	0,32	OK	2,73	OK	0,73	OK	0,49	OK	0,32	OK
			1:2000	0,18	OK	0,18	OK	0,12	OK	0,08	OK	2,73	OK	0,73	OK	0,49	OK	0,32	OK
			1:5000	0,03	OK	0,03	OK	0,02	OK	0,01	OK	0,68	OK	0,18	OK	0,12	OK	0,08	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



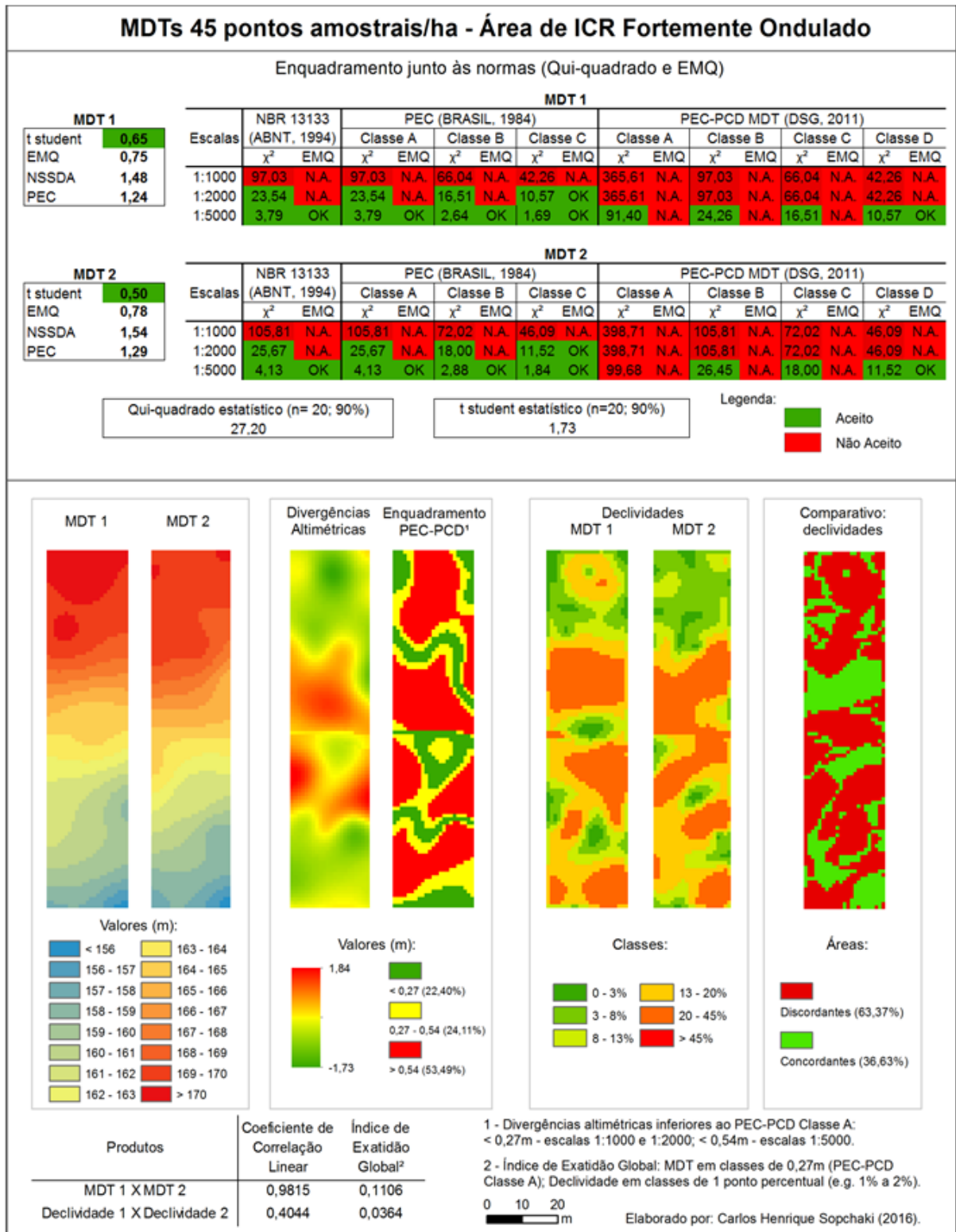
Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9922	0,7810
Declividade 1 X Declividade 2	0,9407	0,2087

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20
 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

II – ÁREA DE ICR FORTEMENTE ONDULADO



MDTs 180 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

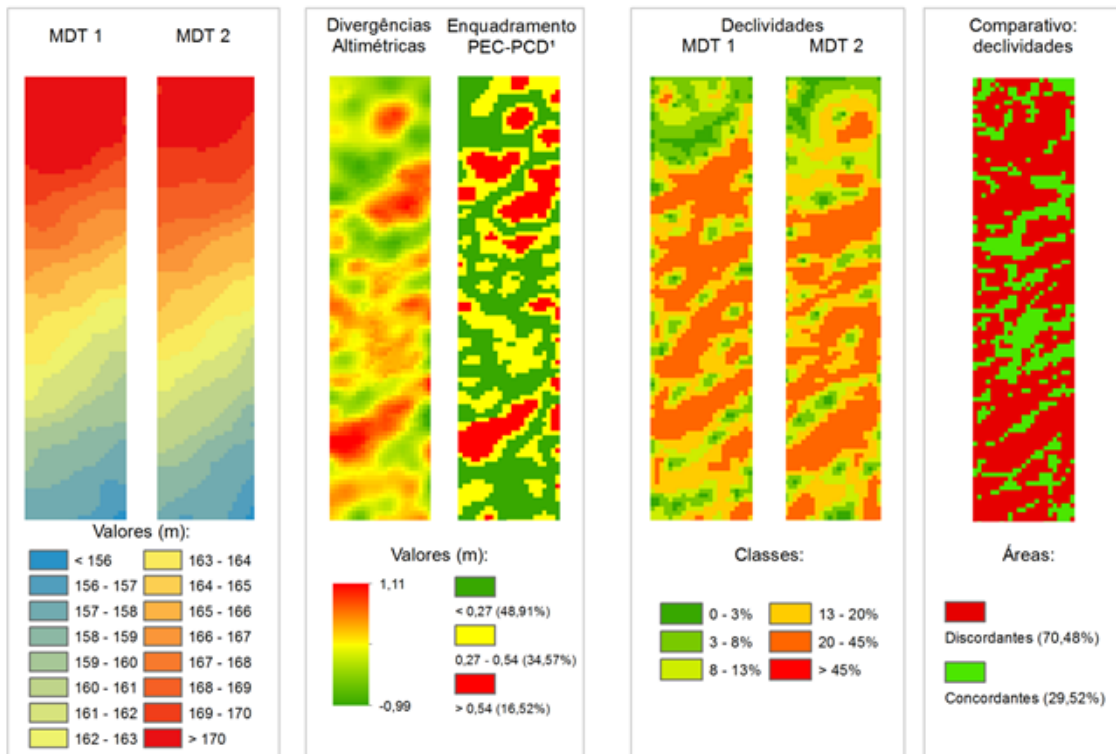
MDT 1		MDT 1																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
			χ^2	EMQ	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
t student	0,55	1:1000	22,90	N.A.	22,90	N.A.	15,58	OK	9,97	OK	86,28	N.A.	22,90	N.A.	15,58	OK	9,97	OK
EMQ	0,36	1:2000	5,55	OK	5,55	OK	3,90	OK	2,49	OK	86,28	N.A.	22,90	N.A.	15,58	OK	9,97	OK
NSSDA	0,72	1:5000	0,89	OK	0,89	OK	0,62	OK	0,40	OK	21,57	N.A.	5,72	OK	3,90	OK	2,49	OK
PEC	0,60																	

MDT 2		MDT 2																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
			χ^2	EMQ	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
t student	0,94	1:1000	22,42	N.A.	22,42	N.A.	15,26	OK	9,77	OK	84,49	N.A.	22,42	N.A.	15,26	OK	9,77	OK
EMQ	0,37	1:2000	5,44	OK	5,44	OK	3,82	OK	2,44	OK	84,49	N.A.	22,42	N.A.	15,26	OK	9,77	OK
NSSDA	0,72	1:5000	0,88	OK	0,88	OK	0,61	OK	0,39	OK	21,12	N.A.	5,61	OK	3,82	OK	2,44	OK
PEC	0,60																	

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9925	0,3307
Declividade 1 X Declividade 2	0,0918	0,0383

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20
m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 360 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

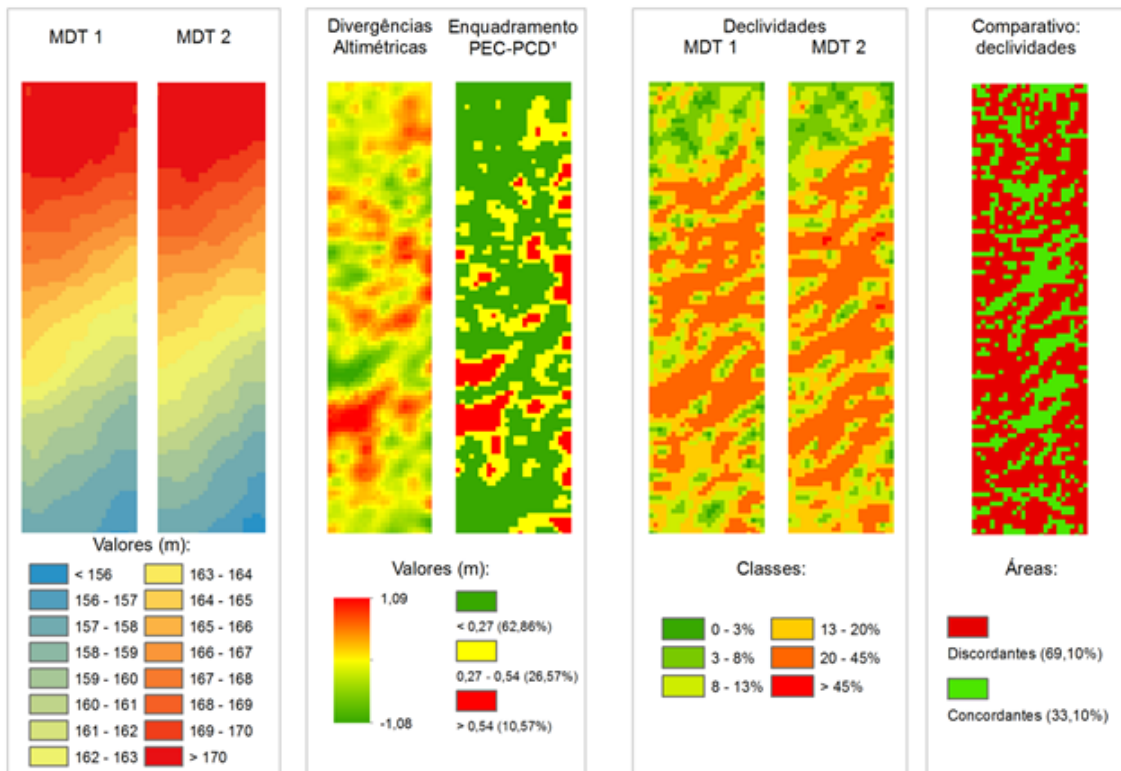
MDT 1		MDT 1																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	0,79	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ			
EMQ	0,21	1:1000	7,79	OK	7,79	OK	5,30	OK	3,39	OK	29,34	N.A.	7,79	OK	5,30	OK	3,39	OK
NSSDA	0,42	1:2000	1,89	OK	1,89	OK	1,32	OK	0,85	OK	29,34	N.A.	7,79	OK	5,30	OK	3,39	OK
PEC	0,35	1:5000	0,30	OK	0,30	OK	0,21	OK	0,14	OK	7,34	OK	1,95	OK	1,32	OK	0,85	OK

MDT 2		MDT 2																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	-0,71	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ			
EMQ	0,24	1:1000	9,89	OK	9,89	OK	6,73	OK	4,31	OK	37,25	N.A.	9,89	OK	6,73	OK	4,31	OK
NSSDA	0,47	1:2000	2,40	OK	2,40	OK	1,68	OK	1,08	OK	37,25	N.A.	9,89	OK	6,73	OK	4,31	OK
PEC	0,40	1:5000	0,39	OK	0,39	OK	0,27	OK	0,17	OK	9,31	OK	2,47	OK	1,68	OK	1,08	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda: ■ Aceito ■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9944	0,4111
Declividade 1 X Declividade 2	0,2415	0,0373

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.

2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 720 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

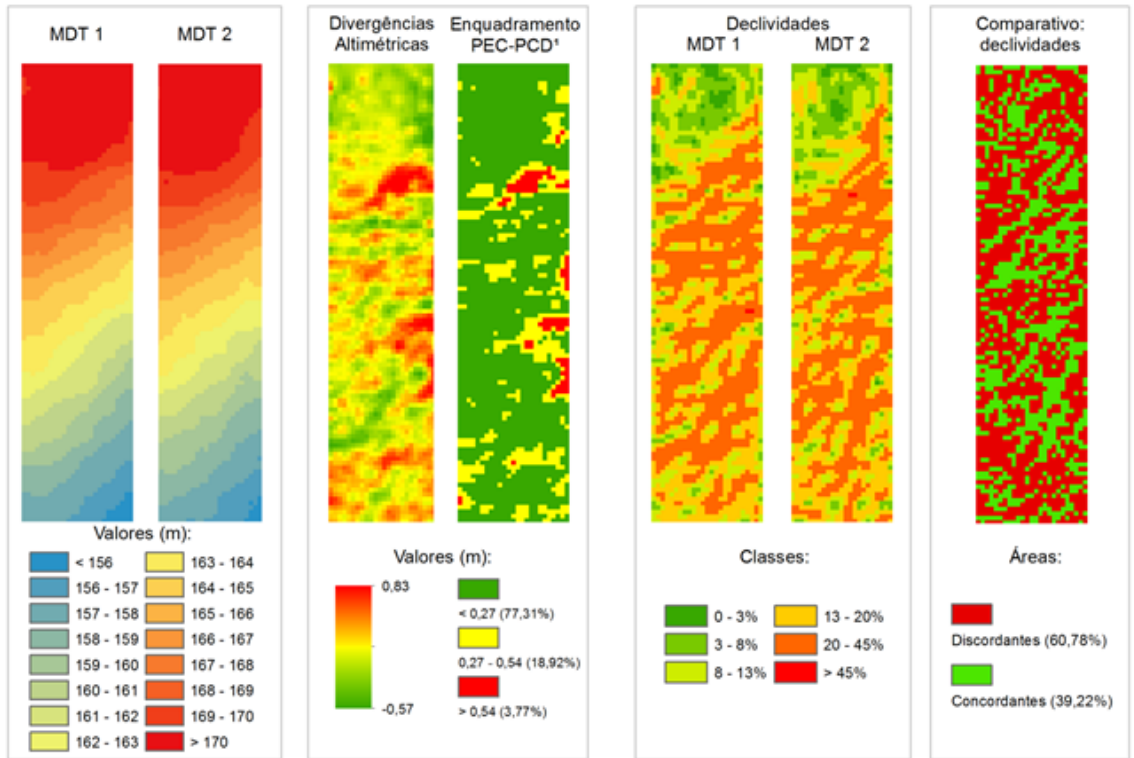
MDT 1		MDT 1																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	0,96	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ			
EMQ	0,18	1:1000	5,54	OK	5,54	OK	3,77	OK	2,41	OK	20,87	N.A.	5,54	OK	3,77	OK	2,41	OK
NSSDA	0,36	1:2000	1,34	OK	1,34	OK	0,94	OK	0,60	OK	20,87	N.A.	5,54	OK	3,77	OK	2,41	OK
PEC	0,30	1:5000	0,22	OK	0,22	OK	0,15	OK	0,10	OK	5,22	OK	1,38	OK	0,94	OK	0,60	OK

MDT 2		MDT 2																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	0,38	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ	χ ²	EMQ			
EMQ	0,13	1:1000	3,13	OK	3,13	OK	2,13	OK	1,37	OK	11,81	OK	3,13	OK	2,13	OK	1,37	OK
NSSDA	0,26	1:2000	0,76	OK	0,76	OK	0,53	OK	0,34	OK	11,81	OK	3,13	OK	2,13	OK	1,37	OK
PEC	0,22	1:5000	0,12	OK	0,12	OK	0,09	OK	0,05	OK	2,95	OK	0,78	OK	0,53	OK	0,34	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9966	0,5031
Declividade 1 X Declividade 2	0,4142	0,0538

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m
 Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 1440 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

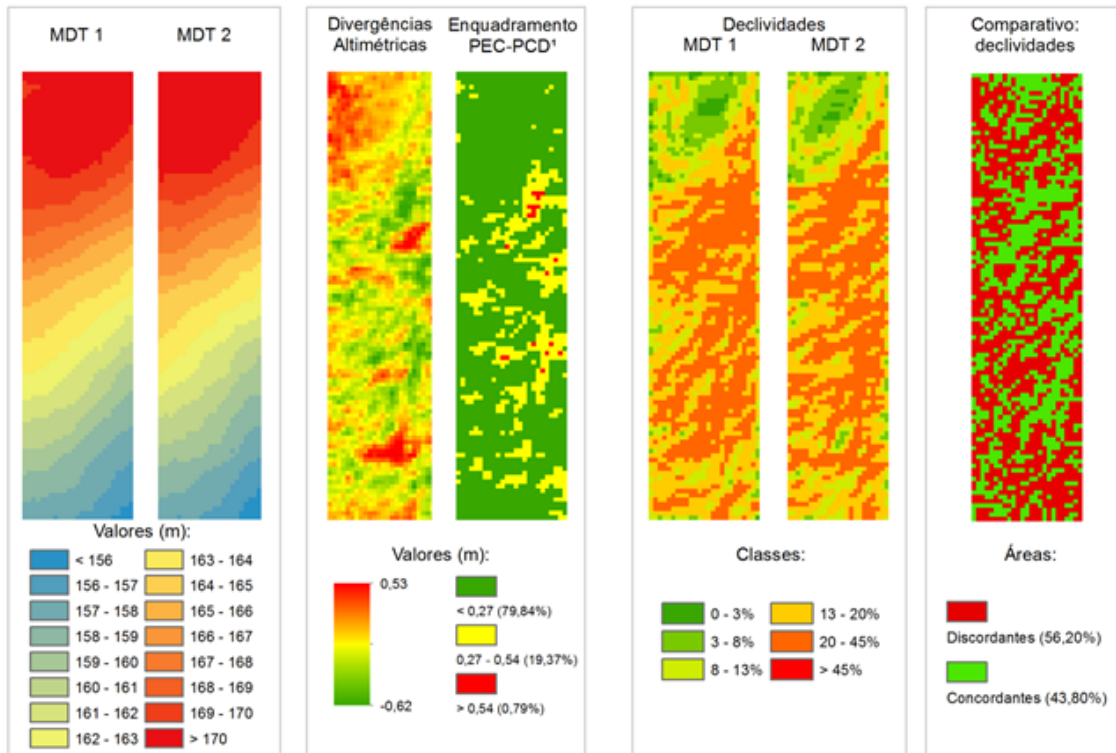
MDT 1		MDT 1																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)				PEC-PCD MDT (DSG, 2011)										
t student	-0,04	Escala	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
EMQ	0,13		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ		
NSSDA	0,26	1:1000	3,02	OK	3,02	OK	2,05	OK	1,31	OK	11,37	OK	3,02	OK	2,05	OK	1,31	OK
PEC	0,22	1:2000	0,73	OK	0,73	OK	0,51	OK	0,33	OK	11,37	OK	3,02	OK	2,05	OK	1,31	OK
		1:5000	0,12	OK	0,12	OK	0,08	OK	0,05	OK	2,84	OK	0,75	OK	0,51	OK	0,33	OK

MDT 2		MDT 2																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)				PEC-PCD MDT (DSG, 2011)										
t student	0,75	Escala	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
EMQ	0,14		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ		
NSSDA	0,26	1:1000	3,09	OK	3,09	OK	2,11	OK	1,35	OK	11,66	OK	3,09	OK	2,11	OK	1,35	OK
PEC	0,22	1:2000	0,75	OK	0,75	OK	0,53	OK	0,34	OK	11,66	OK	3,09	OK	2,11	OK	1,35	OK
		1:5000	0,12	OK	0,12	OK	0,08	OK	0,05	OK	2,91	OK	0,77	OK	0,53	OK	0,34	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9966	0,4956
Declividade 1 X Declividade 2	0,5403	0,0601

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m
 Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

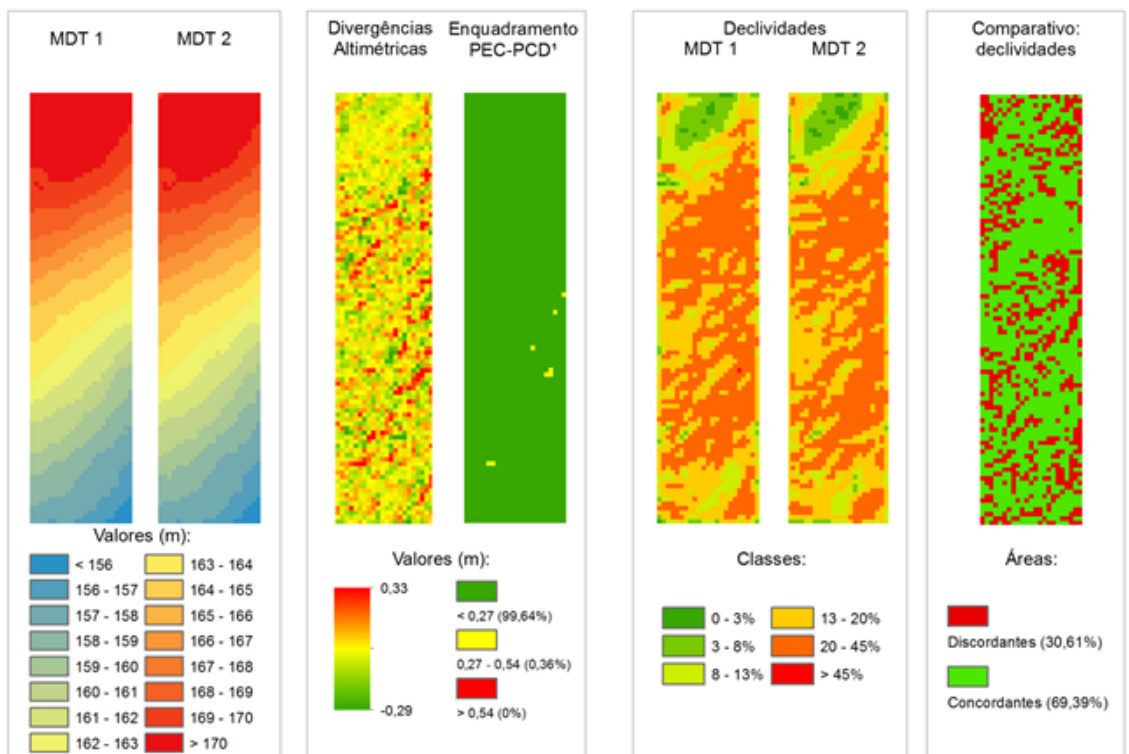
MDTs 14400 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

MDT 1		MDT 1																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	
t student	0,78																	
EMQ	0,10																	
NSSDA	0,19																	
PEC	0,16																	
		1:1000	1,64 OK	1,64 OK	1,12 OK	0,71 OK	6,18 OK	1,64 OK	1,12 OK	0,71 OK	6,18 OK	1,64 OK	1,12 OK	0,71 OK	6,18 OK	1,64 OK	1,12 OK	0,71 OK
		1:2000	0,40 OK	0,40 OK	0,28 OK	0,18 OK	6,18 OK	1,64 OK	1,12 OK	0,71 OK	6,18 OK	1,64 OK	1,12 OK	0,71 OK	6,18 OK	1,64 OK	1,12 OK	0,71 OK
		1:5000	0,06 OK	0,06 OK	0,04 OK	0,03 OK	1,55 OK	0,41 OK	0,28 OK	0,18 OK	1,55 OK	0,41 OK	0,28 OK	0,18 OK	1,55 OK	0,41 OK	0,28 OK	0,18 OK

MDT 2		MDT 2																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	
t student	-0,57																	
EMQ	0,08																	
NSSDA	0,16																	
PEC	0,13																	
		1:1000	1,11 OK	1,11 OK	0,76 OK	0,49 OK	4,20 OK	1,11 OK	0,76 OK	0,49 OK	4,20 OK	1,11 OK	0,76 OK	0,49 OK	4,20 OK	1,11 OK	0,76 OK	0,49 OK
		1:2000	0,27 OK	0,27 OK	0,19 OK	0,12 OK	4,20 OK	1,11 OK	0,76 OK	0,49 OK	4,20 OK	1,11 OK	0,76 OK	0,49 OK	4,20 OK	1,11 OK	0,76 OK	0,49 OK
		1:5000	0,04 OK	0,04 OK	0,03 OK	0,02 OK	1,05 OK	0,28 OK	0,19 OK	1,05 OK	0,28 OK	0,19 OK	0,12 OK	0,02 OK	1,05 OK	0,28 OK	0,19 OK	0,12 OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%) 27,20	t student estatístico (n=20; 90%) 1,73	Legenda: Aceito Não Aceito
--	---	--



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global
MDT 1 X MDT 2	0,9988	0,8319
Declividade 1 X Declividade 2	0,8260	0,1125

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20
 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 21600 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

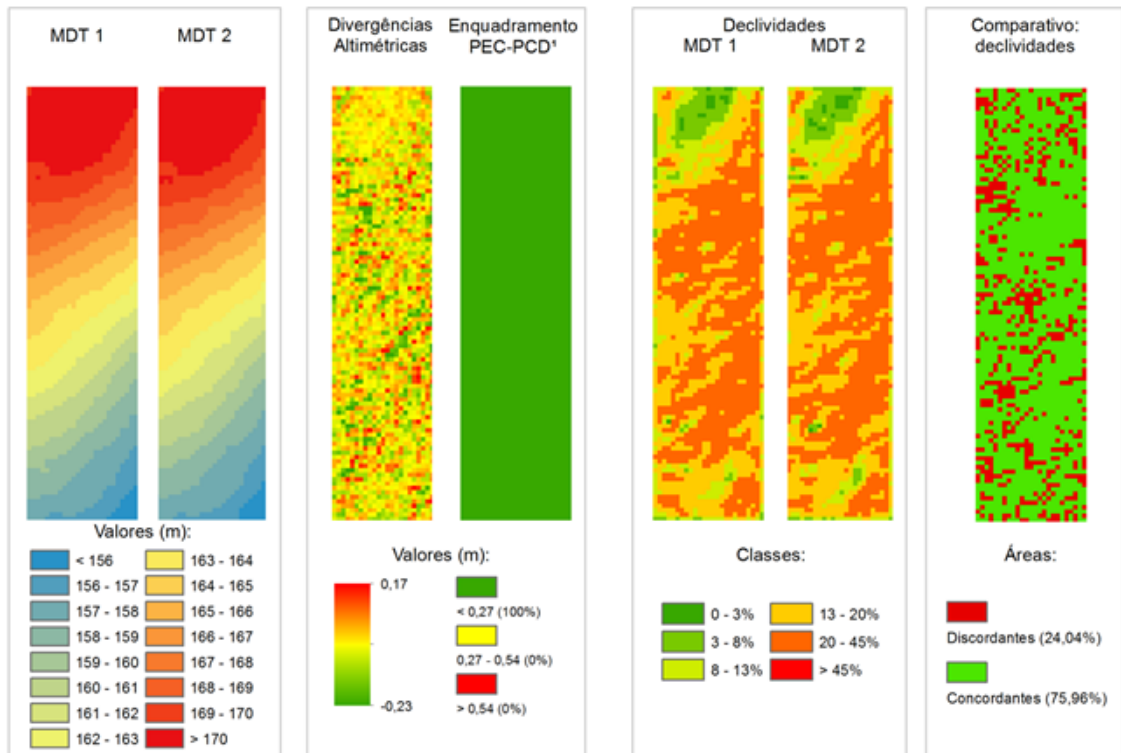
MDT 1		MDT 1									
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)				PEC-PCD MDT (DSG, 2011)			
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	0,67										
EMQ	0,09										
NSSDA	0,17										
PEC	0,14										
		1:1000	1,25 OK	1,25 OK	0,85 OK	0,54 OK	4,70 OK	1,25 OK	0,85 OK	0,54 OK	0,54 OK
		1:2000	0,30 OK	0,30 OK	0,21 OK	0,14 OK	4,70 OK	1,25 OK	0,85 OK	0,54 OK	0,54 OK
		1:5000	0,05 OK	0,05 OK	0,03 OK	0,02 OK	1,17 OK	0,31 OK	0,21 OK	0,14 OK	0,14 OK

MDT 2		MDT 2									
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)				PEC-PCD MDT (DSG, 2011)			
		Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	0,68										
EMQ	0,11										
NSSDA	0,21										
PEC	0,18										
		1:1000	1,97 OK	1,97 OK	1,34 OK	0,86 OK	7,42 OK	1,97 OK	1,34 OK	0,86 OK	0,86 OK
		1:2000	0,48 OK	0,48 OK	0,33 OK	0,21 OK	7,42 OK	1,97 OK	1,34 OK	0,86 OK	0,86 OK
		1:5000	0,08 OK	0,08 OK	0,05 OK	0,03 OK	1,85 OK	0,49 OK	0,33 OK	0,21 OK	0,21 OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global
MDT 1 X MDT 2	0,9990	0,8583
Declividade 1 X Declividade 2	0,8913	0,1555

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m
 Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 28800 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

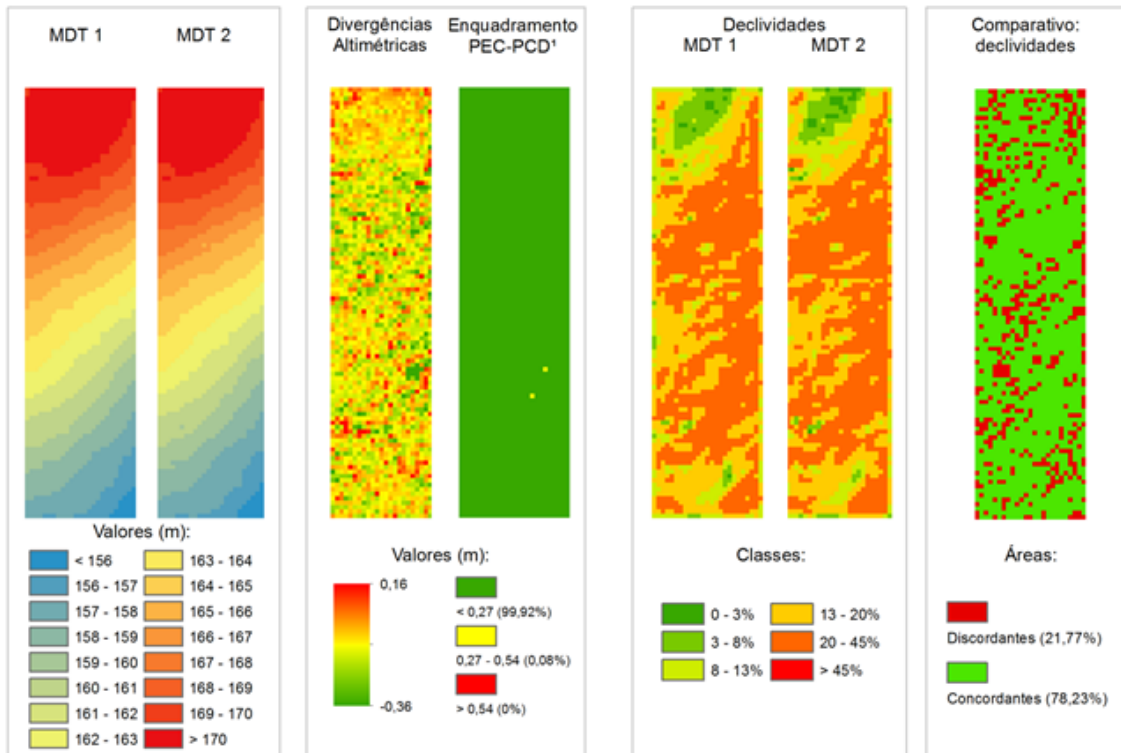
MDT 1		MDT 1																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	-0,96		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ		
EMQ	0,09	1:1000	1,31	OK	1,31	OK	0,89	OK	0,57	OK	4,92	OK	1,31	OK	0,89	OK	0,57	OK
NSSDA	0,17	1:2000	0,32	OK	0,32	OK	0,22	OK	0,14	OK	4,92	OK	1,31	OK	0,89	OK	0,57	OK
PEC	0,15	1:5000	0,05	OK	0,05	OK	0,04	OK	0,02	OK	1,23	OK	0,33	OK	0,22	OK	0,14	OK

MDT 2		MDT 2																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	0,50		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
EMQ	0,09	1:1000	1,54	OK	1,54	OK	1,05	OK	0,67	OK	5,81	OK	1,54	OK	1,05	OK	0,67	OK
NSSDA	0,19	1:2000	0,37	OK	0,37	OK	0,26	OK	0,17	OK	5,81	OK	1,54	OK	1,05	OK	0,67	OK
PEC	0,16	1:5000	0,06	OK	0,06	OK	0,04	OK	0,03	OK	1,45	OK	0,39	OK	0,26	OK	0,17	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9990	0,8362
Declividade 1 X Declividade 2	0,9095	0,1715

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 43200 pontos amostrais/ha - Área de ICR Fortemente Ondulado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

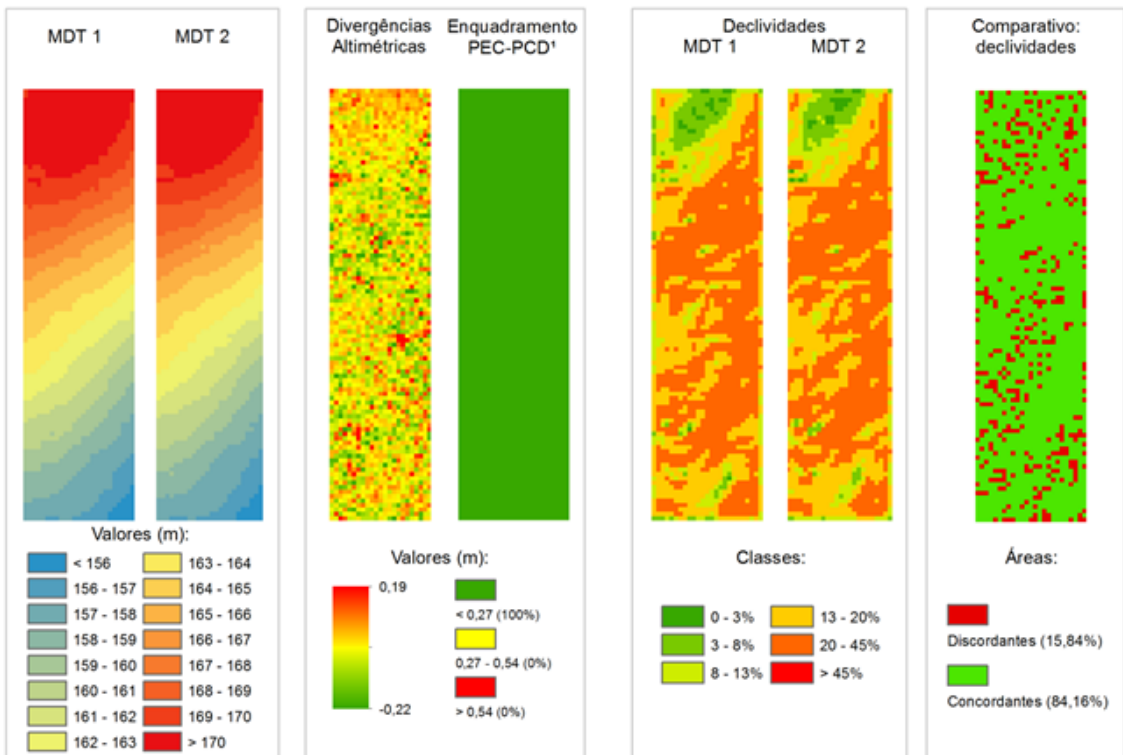
MDT 1		MDT 1																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
		Escalas	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
t student	0,40		χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ		
EMQ	0,08	1:1000	1,24	OK	1,24	OK	0,85	OK	0,54	OK	4,69	OK	1,24	OK	0,85	OK	0,54	OK
NSSDA	0,17	1:2000	0,30	OK	0,30	OK	0,21	OK	0,14	OK	4,69	OK	1,24	OK	0,85	OK	0,54	OK
PEC	0,14	1:5000	0,05	OK	0,05	OK	0,03	OK	0,02	OK	1,17	OK	0,31	OK	0,21	OK	0,14	OK

MDT 2		MDT 2																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
		Escalas	Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
t student	0,42		χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ		
EMQ	0,09	1:1000	1,27	OK	1,27	OK	0,87	OK	0,55	OK	4,79	OK	1,27	OK	0,87	OK	0,55	OK
NSSDA	0,17	1:2000	0,31	OK	0,31	OK	0,22	OK	0,14	OK	4,79	OK	1,27	OK	0,87	OK	0,55	OK
PEC	0,14	1:5000	0,05	OK	0,05	OK	0,03	OK	0,02	OK	1,20	OK	0,32	OK	0,22	OK	0,14	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

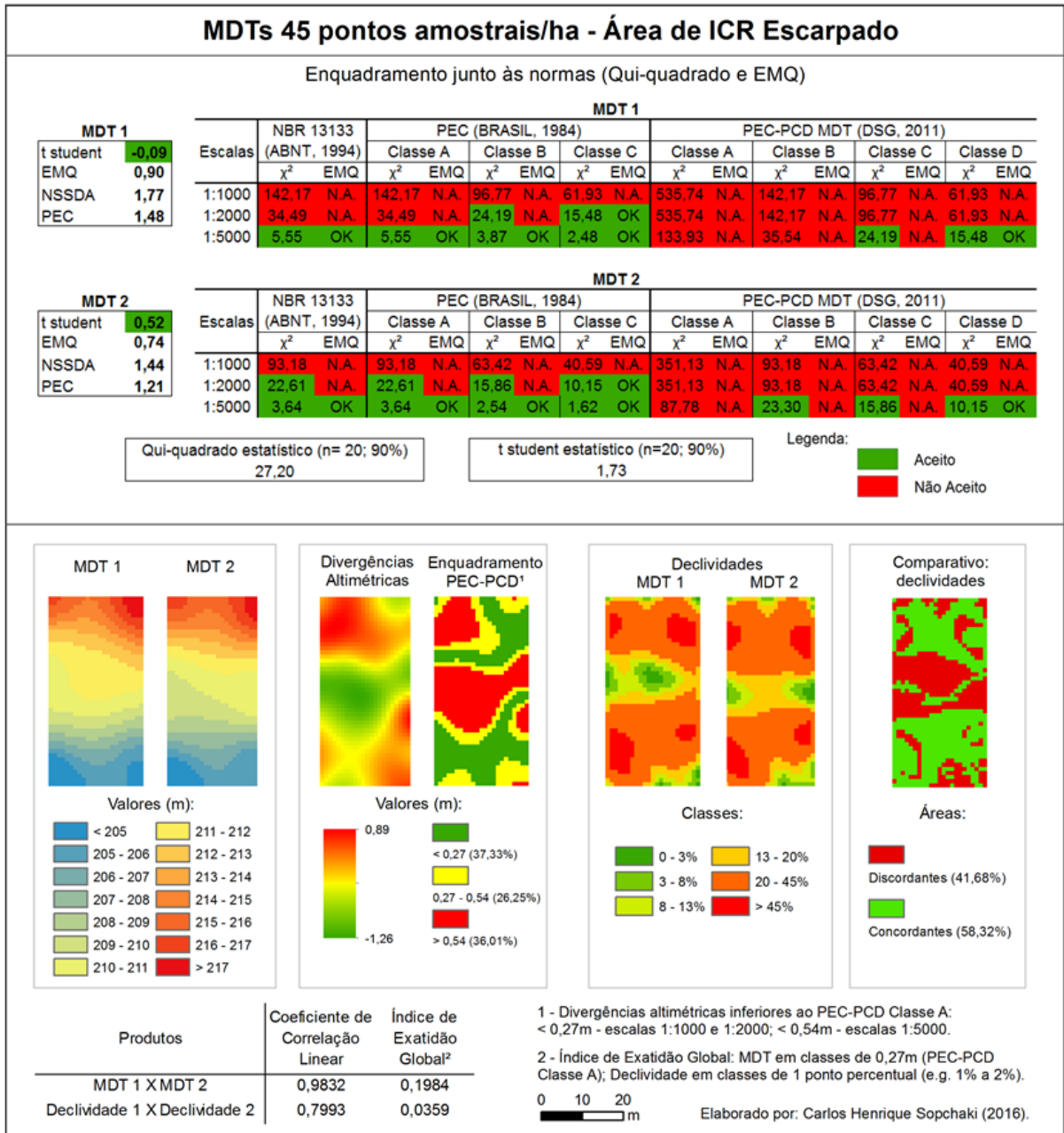
Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9992	0,8828
Declividade 1 X Declividade 2	0,9520	0,2247

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

III – ÁREA DE ICR ESCARPADO



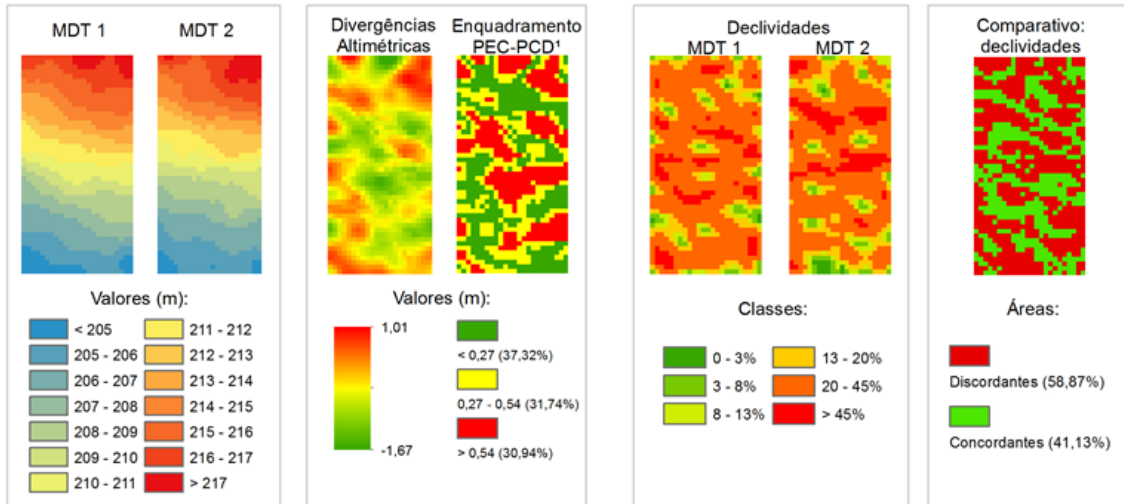
MDTs 180 pontos amostrais/ha - Área de ICR Escarpado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

MDT 1		MDT 1																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	0,73	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ			
EMQ	0,42	1:1000	29,73	N.A.	29,73	N.A.	20,23	N.A.	12,95	OK	112,02	N.A.	29,73	N.A.	20,23	N.A.	12,95	OK
NSSDA	0,82	1:2000	7,21	OK	7,21	OK	5,06	OK	3,24	OK	112,02	N.A.	29,73	N.A.	20,23	N.A.	12,95	OK
PEC	0,69	1:5000	1,16	OK	1,16	OK	0,81	OK	0,52	OK	28,01	N.A.	7,43	OK	5,06	OK	3,24	OK

MDT 2		MDT 2																
		Escalas	NBR 13133 (ABNT, 1994)	PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
t student	1,00	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ	χ²	EMQ			
EMQ	0,52	1:1000	44,85	N.A.	44,85	N.A.	30,52	N.A.	19,54	N.A.	168,99	N.A.	44,85	N.A.	30,52	N.A.	19,54	N.A.
NSSDA	1,02	1:2000	10,88	OK	10,88	OK	7,63	OK	4,88	OK	168,99	N.A.	44,85	N.A.	30,52	N.A.	19,54	N.A.
PEC	0,85	1:5000	1,75	OK	1,75	OK	1,22	OK	0,78	OK	42,25	N.A.	11,21	OK	7,63	OK	4,88	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%) 27,20	t student estatístico (n=20; 90%) 1,73	Legenda:
		■ Aceito ■ Não Aceito



Produtos	Coeficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²	
MDT 1 X MDT 2	0,9877	0,1968	1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000. 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%). 0 10 20 m
Declividade 1 X Declividade 2	0,1405	0,0186	

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 360 pontos amostrais/ha - Área de ICR Escarpado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

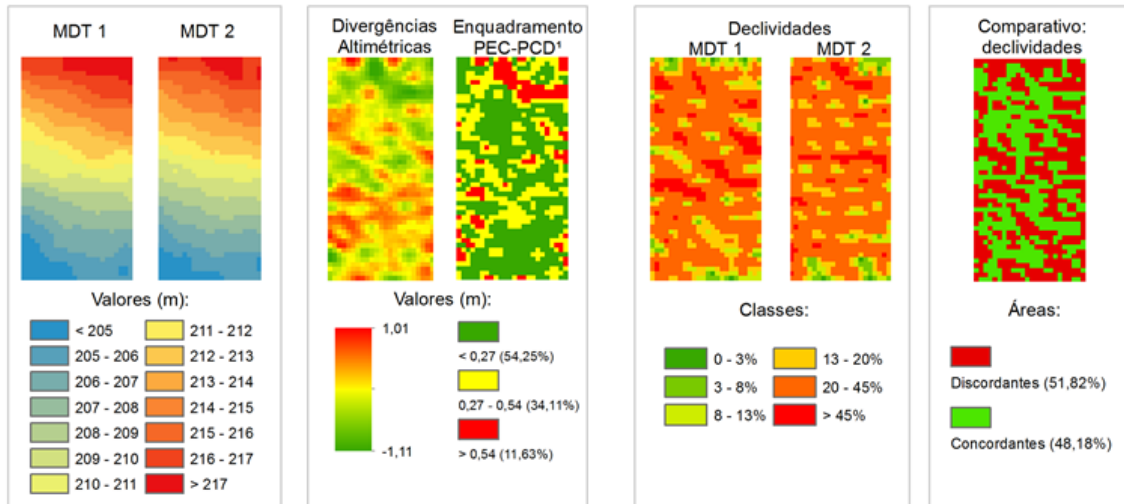
MDT 1		MDT 1															
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	1,04																
EMQ	0,44																
NSSDA	0,85																
PEC	0,71																
Escalas																	
1:1000		31,46	N.A.	31,46	N.A.	21,41	N.A.	13,71	OK	118,56	N.A.	31,46	N.A.	21,41	N.A.	13,71	OK
1:2000		7,63	OK	7,63	OK	5,35	OK	3,43	OK	118,56	N.A.	31,46	N.A.	21,41	N.A.	13,71	OK
1:5000		1,23	OK	1,23	OK	0,86	OK	0,55	OK	29,64	N.A.	7,87	OK	5,35	OK	3,43	OK

MDT 2		MDT 2															
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)							
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	0,11																
EMQ	0,39																
NSSDA	0,76																
PEC	0,64																
Escalas																	
1:1000		26,39	N.A.	26,39	N.A.	17,96	N.A.	11,49	OK	99,43	N.A.	26,39	N.A.	17,96	N.A.	11,49	OK
1:2000		6,40	OK	6,40	OK	4,49	OK	2,87	OK	99,43	N.A.	26,39	N.A.	17,96	N.A.	11,49	OK
1:5000		1,03	OK	1,03	OK	0,72	OK	0,46	OK	24,86	N.A.	6,60	OK	4,49	OK	2,87	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9914	0,2864
Declividade 1 X Declividade 2	0,0673	0,0208

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m
 Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 720 pontos amostrais/ha - Área de ICR Escarpado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

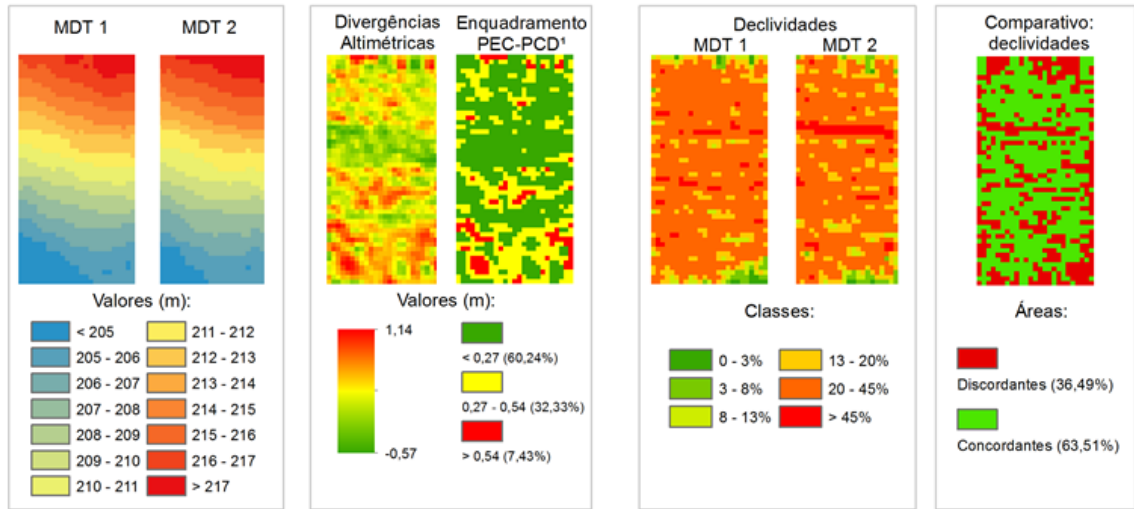
MDT 1		MDT 1													
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)					
Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	0,62														
EMQ	0,24														
NSSDA	0,48														
PEC	0,40														
1:1000		10,27	OK	10,27	OK	6,99	OK	4,47	OK	38,70	N.A.	10,27	OK	6,99	OK
1:2000		2,49	OK	2,49	OK	1,75	OK	1,12	OK	38,70	N.A.	10,27	OK	6,99	OK
1:5000		0,40	OK	0,40	OK	0,28	OK	0,18	OK	9,68	OK	2,57	OK	1,75	OK

MDT 2		MDT 2													
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)					
Escalas		Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D	
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ
t student	-0,05														
EMQ	0,34														
NSSDA	0,66														
PEC	0,55														
1:1000		19,96	N.A.	19,96	N.A.	13,59	OK	8,69	OK	75,21	N.A.	19,96	N.A.	13,59	OK
1:2000		4,84	OK	4,84	OK	3,40	OK	2,17	OK	75,21	N.A.	19,96	N.A.	13,59	OK
1:5000		0,78	OK	0,78	OK	0,54	OK	0,35	OK	18,80	N.A.	4,99	OK	3,40	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda: ■ Aceito ■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9942	0,3322
Declividade 1 X Declividade 2	0,3368	0,0293

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.

2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 1440 pontos amostrais/ha - Área de ICR Escarpado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

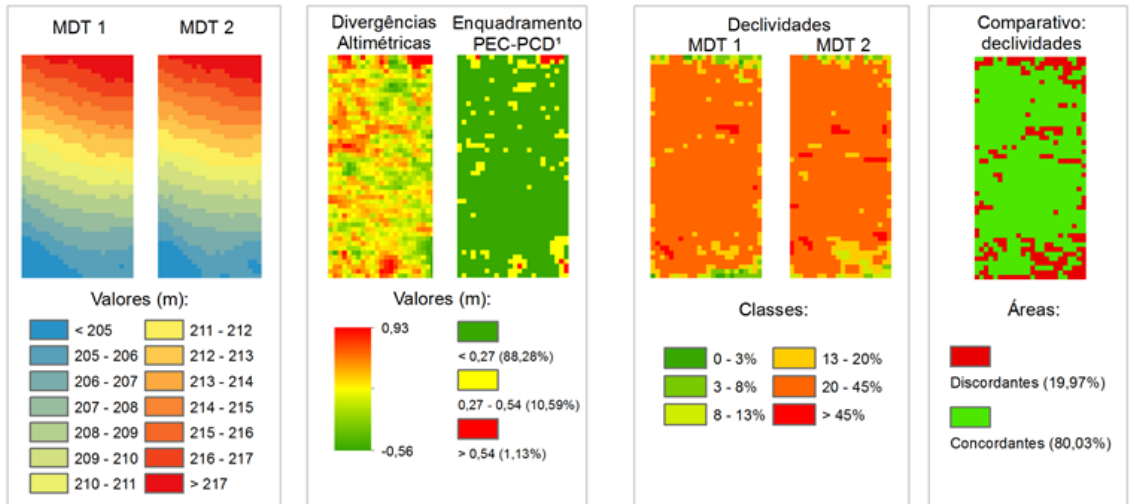
MDT 1		MDT 1																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	
t student	-0,21																	
EMQ	0,19																	
NSSDA	0,36																	
PEC	0,30																	
Escalas		1:1000	5,98 OK	5,98 OK	4,07 OK	2,60 OK	22,53 N.A.	5,98 OK	4,07 OK	2,60 OK	22,53 N.A.	5,98 OK	4,07 OK	2,60 OK	22,53 N.A.	5,98 OK	4,07 OK	2,60 OK
		1:2000	1,45 OK	1,45 OK	1,02 OK	0,65 OK	22,53 N.A.	5,98 OK	4,07 OK	2,60 OK	22,53 N.A.	5,98 OK	4,07 OK	2,60 OK	22,53 N.A.	5,98 OK	4,07 OK	2,60 OK
		1:5000	0,23 OK	0,23 OK	0,16 OK	0,10 OK	5,63 OK	1,49 OK	1,02 OK	0,65 OK	5,63 OK	1,49 OK	1,02 OK	0,65 OK	5,63 OK	1,49 OK	1,02 OK	0,65 OK

MDT 2		MDT 2																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D		
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	
t student	-1,50																	
EMQ	0,19																	
NSSDA	0,37																	
PEC	0,31																	
Escalas		1:1000	5,71 OK	5,71 OK	3,89 OK	2,49 OK	21,53 N.A.	5,71 OK	3,89 OK	2,49 OK	21,53 N.A.	5,71 OK	3,89 OK	2,49 OK	21,53 N.A.	5,71 OK	3,89 OK	2,49 OK
		1:2000	1,39 OK	1,39 OK	0,97 OK	0,62 OK	21,53 N.A.	5,71 OK	3,89 OK	2,49 OK	21,53 N.A.	5,71 OK	3,89 OK	2,49 OK	21,53 N.A.	5,71 OK	3,89 OK	2,49 OK
		1:5000	0,22 OK	0,22 OK	0,16 OK	0,10 OK	5,38 OK	1,43 OK	0,97 OK	0,62 OK	5,38 OK	1,43 OK	0,97 OK	0,62 OK	5,38 OK	1,43 OK	0,97 OK	0,62 OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda: ■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coeficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9958	0,4869
Declividade 1 X Declividade 2	0,4589	0,0407

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 14400 pontos amostrais/ha - Área de ICR Escarpado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

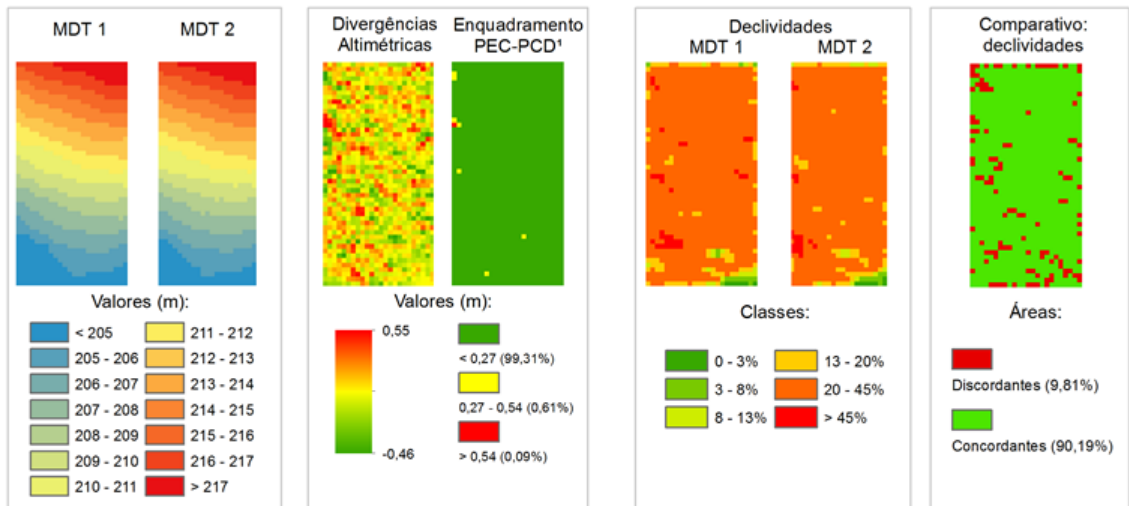
MDT 1		MDT 1																	
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)									
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ		
t student	-0,25																		
EMQ	0,09																		
NSSDA	0,18																		
PEC	0,15																		
		Escalas																	
		1:1000		1,52	OK	1,52	OK	1,03	OK	0,66	OK	5,72	OK	1,52	OK	1,03	OK	0,66	OK
		1:2000		0,37	OK	0,37	OK	0,26	OK	0,17	OK	5,72	OK	1,52	OK	1,03	OK	0,66	OK
		1:5000		0,06	OK	0,06	OK	0,04	OK	0,03	OK	1,43	OK	0,38	OK	0,26	OK	0,17	OK

MDT 2		MDT 2																	
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)									
				Classe A		Classe B		Classe C		Classe A		Classe B		Classe C		Classe D			
		χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ	χ^2	EMQ		
t student	-1,06																		
EMQ	0,11																		
NSSDA	0,21																		
PEC	0,18																		
		Escalas																	
		1:1000		1,91	OK	1,91	OK	1,30	OK	0,83	OK	7,19	OK	1,91	OK	1,30	OK	0,83	OK
		1:2000		0,46	OK	0,46	OK	0,32	OK	0,21	OK	7,19	OK	1,91	OK	1,30	OK	0,83	OK
		1:5000		0,07	OK	0,07	OK	0,05	OK	0,03	OK	1,80	OK	0,48	OK	0,32	OK	0,21	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda:
■ Aceito
■ Não Aceito



Produtos	Coeficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9977	0,7378
Declividade 1 X Declividade 2	0,7743	0,0859

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.

2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).

0 10 20
 m

Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).

MDTs 21600 pontos amostrais/ha - Área de ICR Escarpado

Enquadramento junto às normas (Qui-quadrado e EMQ)

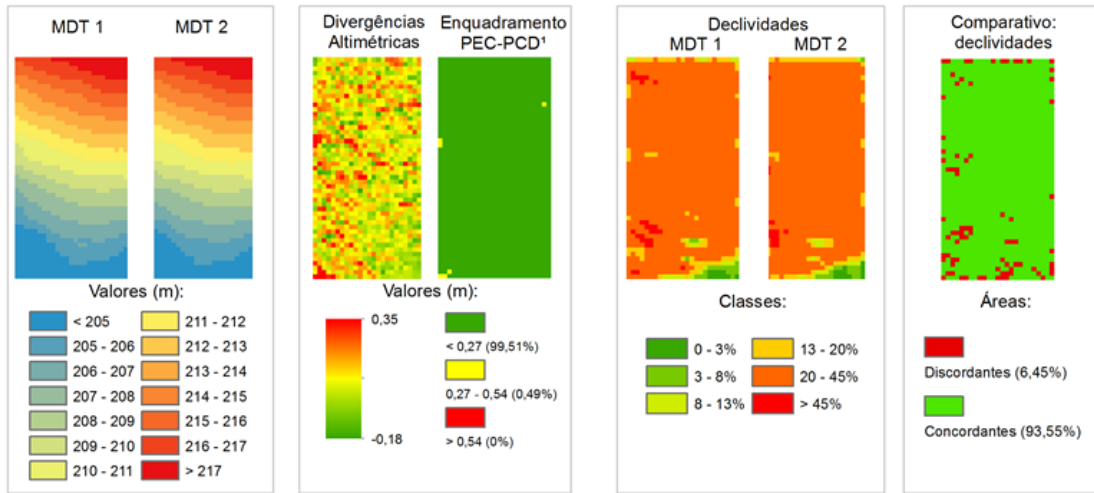
MDT 1		MDT 1																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
t student	-0,46	Escala	χ²	EMQ	Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	χ²	EMQ					
EMQ	0,10		1:1000	1,76	OK	1,76	OK	1,20	OK	0,77	OK	6,64	OK	1,76	OK	1,20	OK	0,77
NSSDA	0,20	1:2000	0,43	OK	0,43	OK	0,30	OK	0,19	OK	6,64	OK	1,76	OK	1,20	OK	0,77	OK
PEC	0,17	1:5000	0,07	OK	0,07	OK	0,05	OK	0,03	OK	1,66	OK	0,44	OK	0,30	OK	0,19	OK

MDT 2		MDT 2																
		NBR 13133 (ABNT, 1994)		PEC (BRASIL, 1984)						PEC-PCD MDT (DSG, 2011)								
t student	-0,95	Escala	χ²	EMQ	Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	χ²	EMQ					
EMQ	0,10		1:1000	1,58	OK	1,58	OK	1,08	OK	0,69	OK	5,97	OK	1,58	OK	1,08	OK	0,69
NSSDA	0,19	1:2000	0,38	OK	0,38	OK	0,27	OK	0,17	OK	5,97	OK	1,58	OK	1,08	OK	0,69	OK
PEC	0,16	1:5000	0,06	OK	0,06	OK	0,04	OK	0,03	OK	1,49	OK	0,40	OK	0,27	OK	0,17	OK

Qui-quadrado estatístico (n= 20; 90%)
27,20

t student estatístico (n=20; 90%)
1,73

Legenda: ■ Aceito ■ Não Aceito



Produtos	Coefficiente de Correlação Linear	Índice de Exatidão Global ²
MDT 1 X MDT 2	0,9981	0,7551
Declividade 1 X Declividade 2	0,8836	0,1061

1 - Divergências altimétricas inferiores ao PEC-PCD Classe A: < 0,27m - escalas 1:1000 e 1:2000; < 0,54m - escalas 1:5000.
 2 - Índice de Exatidão Global: MDT em classes de 0,27m (PEC-PCD Classe A); Declividade em classes de 1 ponto percentual (e.g. 1% a 2%).
 0 10 20 m
 Elaborado por: Carlos Henrique Sopchaki (2016).