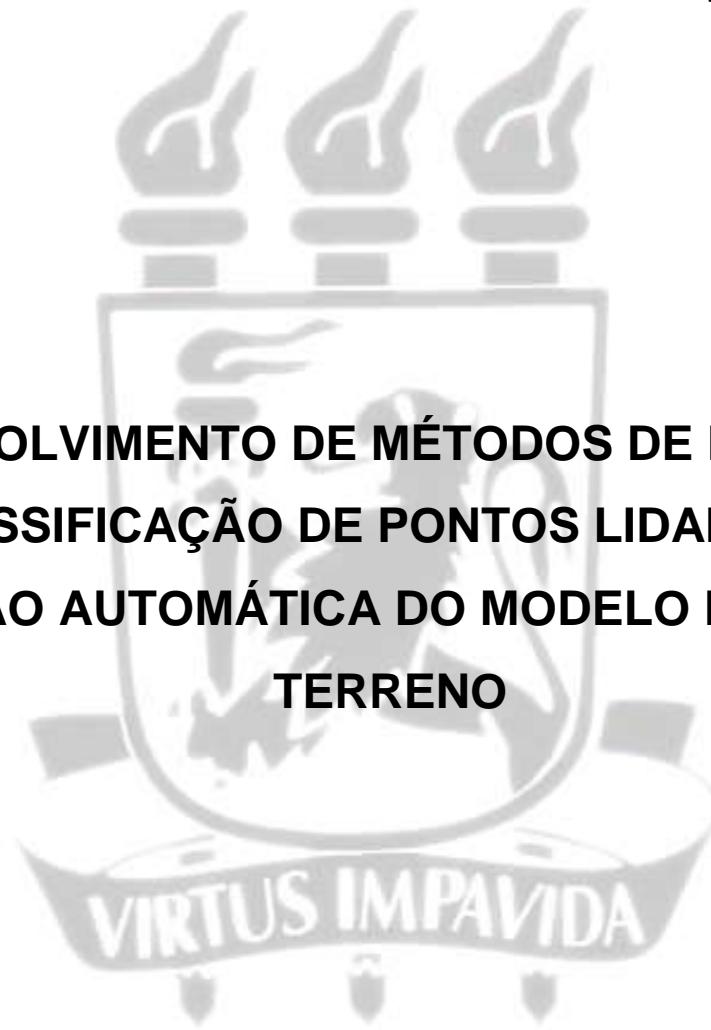


UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

MARCIO GEOVANI TAVARES DE ASSUNÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM
E CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS LIDAR PARA A
GERAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO DIGITAL DO
TERRENO**



Recife, 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

MARCIO GEOVANI TAVARES DE ASSUNÇÃO

Tecnólogo em Processamento de Dados, Centro Universitário de Maringá –
CESUMAR, 2009

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM E
CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS LIDAR PARA A GERAÇÃO
AUTOMÁTICA DO MODELO DIGITAL DO TERRENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Sensoriamento Remoto, defendida e aprovada em 12/09/2008.

Orientador: **Prof. Dr. Admilson da P. Pachêco**

Co-orientador: **Prof. Dr. Jorge A. S. Centeno**

Recife, 2010

A851d

Assunção, Marcio Geovani Tavares de

Desenvolvimento de métodos de filtragem e classificação de pontos LIDAR para a geração automática do modelo digital do terreno / Marcio Geovani Tavares de Assunção. – Recife: O Autor, 2010.

xi, 66f.; il., gráfs., tabs., mapas.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2010.

Orientador: Prof^a. Dr. Admilson da P. Pachêco
Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Cartográfica. 2. LIDAR. 3. Modelo Digital do Terreno (MDT). 4. Filtragem e Classificação. I. Título.

UFPE

**526.1
BCTG/2010-232**

CDD

(22.ed.)

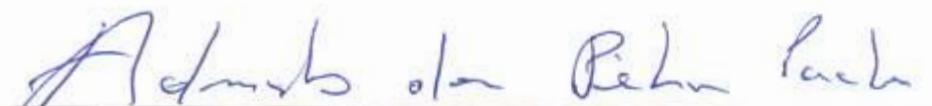
**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM E
CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS LIDAR PARA A
GERAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO DIGITAL DO
TERRENO**

POR

MÁRCIO GEOVANI TAVARES DE ASSUNÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 12.09.08.

Banca Examinadora:



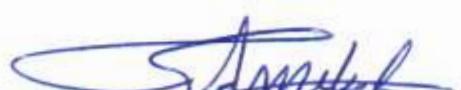
Prof. Dr. ADMILSON DA PENHA PACHECO (Orientador)

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. TARCÍSIO FERREIRA SILVA

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA

Departamento de Geomática - Universidade Federal do Paraná

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Tereza, a quem devo mais esta conquista da minha jornada de eterno estudante. Ela me “empurrou” para caminhos que nem ela própria conhece ou entende o contexto em si, mas sobretudo, sabe que só pode levar-me a uma vida melhor. Acredito que nenhum dos esforços que fiz para a realização dessa pesquisa foi menor que os inúmeros que a vi fazer para que a nossa vida em família fosse mais farta que o essencial, que nunca faltou a mim ou aos meus irmãos Douglas e Rogério. Ela se esforçava para participar da reunião de pais e mestres na escola e, embora nem sempre conseguisse, essas suas tentativas de presença constante enchiam-me de orgulho – e é assim até hoje.

Mãe, essa dissertação de Mestrado é acima de tudo, uma conquista sua! Eu só consegui realizá-la devido ao compromisso que assumi intrinsecamente com você: Um compromisso fundamentado na sua fé, esperança e sobretudo, no seu Amor!

Amo-te tanto quanto lhe sou grato!

AGRADECIMENTOS

Aquela força espiritual que alguns chamam de Força Divina, Jeová, Maomé, Divino Espírito Santo e tantos outros nomes ... enfim, Deus, pela proteção em cada caminho percorrido e pelas condições de superação tão exigidas para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Tereza e João (em memória), pelo berço, apoio e incentivo de ontem e sempre.

Ao meu padrasto “Neguito”,

Aos amigos “Minêro”, Yony, Neto, Edupeará e Ângela, pela paciência, presença e tudo mais.

Ao meu mentor, Prof. Dr. Mosar Faria Botelho, principal colaborador deste trabalho e uma referência de cooperação com o próximo, com quem aprendi que não se faz pesquisa científica sem superação de limites.

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE e Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná - UFPR, onde fui muito bem recebido e fiz amigos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao Professor Dr. Jorge Antonio Silva Centeno, pesquisador experiente que se dispôs a nortear meu trabalho e assim o fez com a seriedade e presteza daqueles que se dispõem a ensinar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco, que acreditou em mim quando eu mesmo não acreditava e sobretudo, mostrou-se o que é ser um pesquisador e me fez crescer enquanto profissional e ser humano! Obrigado, Professor!

ÍNDICE

RESUMO E PALAVRAS-CHAVE.....	VIII
ABSTRACT AND KEY-WORDS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 OBJETIVO GERAL.....	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4 CONTEÚDO.....	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 MODELOS DIGITAIS DE REPRESENTAÇÃO DE SUPERFÍCIES	4
2.2 MODELO DIGITAL DO TERRENO (MDT)	5
2.3 O SISTEMA DE VARREDURA A LASER LIDAR	7
2.3.1 Modelagem Digital do Terreno a partir de Dados LIDAR.....	8
2.3.1.1 Interpolação pelo Método Krigger	9
2.3.1.2 Filtragem e Classificação de Pontos LIDAR: Principais Linhas de Pesquisa	10
2.4 AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS OBTIDOS A PARTIR DE DADOS LIDAR	13
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1 ÁREAS DE ESTUDOS	14
3.2 DADOS LIDAR UTILIZADOS	16
3.3 PROGRAMAS UTILIZADOS	17
3.4 METODOLOGIA.....	17
3.4.1 Construção do Gradeamento	17
3.4.2 Construção de Janelas de Busca por Mínimos Locais	18
3.4.3 Parâmetros Utilizados	20
3.4.4 Métodos de Classificação Implementados.....	21
3.4.4.1 Método do Bloco Mínimo.....	21
3.4.4.2 Método da Declividade.....	22
3.4.4.3 Método Integrado (Bloco Mínimo – Declividade).....	23
3.4.4.4 Método Morfológico.....	25
3.4.5 Avaliação da Metodologia	26
3.4.5.1 Subtração entre MDT Gerado – MDT de Verificação.....	26
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1 COMPORTAMENTO CLASSIFICATÓRIO DOS FILTROS IMPLEMENTADOS.....	27
4.1.1 Aplicação do Método do Bloco Mínimo	27
4.1.1.1 Análise Quantitativa (diferença entre os produtos gerados e os de referência)	32
4.1.2 Aplicação do Método da Declividade	36
4.1.2.1 Analise Comparativa	39
4.1.3 Aplicação do Método Integrado.....	42
4.1.3.1 Análise Comparativa	45
4.1.4 Aplicação do Método Morfológico	47
4.1.4.1 Análise Comparativa	50
4.2 APONTAMENTO DE DISCREPÂNCIAS	52
4.3 MÉTODOS IMPLEMENTADOS E SUAS ESPECIFICIDADES.....	56
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

RESUMO E PALAVRAS-CHAVE

ASSUNÇÃO, Marcio Geovani Tavares de. “**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS DE FILTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS LIDAR PARA A GERAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO DIGITAL DO TERRENO**” Recife, 2010 66 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

A utilização de dados LIDAR para a obtenção de representações fiéis a respeito da superfície terrestre vem, nos últimos anos, consagrando-se como uma das alternativas mais viáveis e recorridas para se adquirir o MDS (Modelo Digital de Superfície) e principalmente do MDT (Modelo Digital do Terreno). Essa aceitação se justifica em especial pelo alto grau de automação na aquisição e processamento de dados, mas também se destaca a notável resolução altimétrica e planimétrica que os dados LIDAR oferecem. A obtenção automática do MDT a partir desses dados ocorre por meio de um processo conhecido por classificação, que consiste na remoção virtual dos pontos de um MDS que, em princípio, não pertencem à superfície do terreno propriamente dita, mas sim às informações que se encontram sobre o solo, tais como edificações e elementos da própria natureza. Esse tema se trata de uma questão atual e ainda não concluída pelos principais centros de pesquisa nessa área do conhecimento em nível mundial. Nesse sentido, o presente trabalho, considerando aspectos visuais e numéricos, apresenta um estudo comparativo entre quatro métodos de filtragem e classificação automática de pontos que constituem o MDS oriundo dos dados LIDAR, a fim de se obter o respectivo MDT de quatro regiões distintas do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná – UFPR em Curitiba, Paraná – Brasil. Os métodos implementados e variações propostas são pertinentes às principais linhas de pesquisa à respeito do assunto. A partir da análise dos resultados apresentados, discutidos e pontuados os principais problemas encontrados, é possível afirmar que a filtragem e classificação de dados LIDAR para geração automática do MDT é um fato bem sucedido, uma vez que os produtos gerados apresentam notável coerência visual e indicadores numéricos considerados satisfatórios.

Palavras-chave: LIDAR, Modelo Digital do Terreno (MDT), Filtragem e Classificação

ABSTRACT AND KEY-WORDS

The application of LIDAR data in the acquirement of true representation concerning earth's surface has been effectively renowned, in the last years, as one of the most practicable and requested choice to obtain the Digital Surface Model and mainly the Digital Terrain Model. This approval is particularly justified by the high level of automation in the data acquisition and processing, but also by the notable altimetric and planimetric resolution presented by LIDAR data. Regarding to automatic acquirement of DTM from these data, this is possible due to a process known as classification consisting in the virtual remotion of DSM points which are not related to the terrain specifically but to the elements found overground, like buildings and natural terrain features. This approach is about a recent subject which is not concluded by the mainly research centers in this field of knowledge in the world. Therein, visual and numerical aspects considered, this work presents a comparative study between four filtering methods and automatic classification of points which compose the Digital Surface Model (DSM) derived from LIDAR data, in the intent of getting the respective Digital Terrain Model (DTM) from four different regions of the Paraná Federal University Polytechnical Center – UFPR in Curitiba, Paraná State, Brazil. The methods employed and the modifications proposed are related to the mainly research lines about the subject. From the analysis of the presented results, after discussing and punctuating the problems found, it's possible to affirm that the efficiency of the adopted methods for the automatic creation of DTM is a well-succeeded fact, once the generated products present a notable visual coherence and numerical indicators considered satisfying.

Keywords: LIDAR, Digital Terrain Model (DTM), Filtering and Classification

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – R1 (REGIÃO DE ESTUDOS N.º 1)	14
FIGURA 2 – R2 (REGIÃO DE ESTUDOS N.º 2)	15
FIGURA 3 – R3 (REGIÃO DE ESTUDOS N.º 3)	15
FIGURA 4 – R4 (REGIÃO DE ESTUDOS N.º 4)	16
FIGURA 5 - JANELA FIXA: BUSCA POR MÍNIMOS LOCAIS CÉLULA POR CÉLULA	19
FIGURA 6 - JANELA MÓVEL: BUSCA POR MÍNIMOS LOCAIS DE FORMA DINÂMICA	19
FIGURA 7 - ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO	22
FIGURA 8 - ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO DA DECLIVIDADE	23
FIGURA 9 - ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO INTEGRADO	24
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO MORFOLÓGICO	25
FIGURA 11 – CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO (JANELA FIXA)	28
FIGURA 12 – CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO (JANELA MÓVEL)	28
FIGURA 13 – R1: MDS E MDT – CENA TRIDIMENSIONAL	30
FIGURA 14 – R2: MDS E MDT – CENA TRIDIMENSIONAL	30
FIGURA 15 – R3: MDS E MDT – CENA TRIDIMENSIONAL	31
FIGURA 16 R4: MDS E MDT – CENA TRIDIMENSIONAL	31
FIGURA 17 - R1: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	34
FIGURA 18 - R2: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	34
FIGURA 19 - R3: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	35
FIGURA 20 - R4: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	36
FIGURA 21 - CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DA DECLIVIDADE	37
FIGURA 22 – MDT'S OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO DA DECLIVIDADE	38
FIGURA 23 - R1: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DA DECLIVIDADE (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	39

FIGURA 24 - R2: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DA DECLIVIDADE (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL).....	40
FIGURA 25 - R3: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DA DECLIVIDADE (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL).....	41
FIGURA 26 - R4: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO DA DECLIVIDADE (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL).....	41
FIGURA 27 - CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO INTEGRADO	43
FIGURA 28 – MDT’S OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO INTEGRADO	44
FIGURA 29 – R1: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO INTEGRADO	45
FIGURA 30 – R2: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO INTEGRADO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	46
FIGURA 31 – R3: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO INTEGRADO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	46
FIGURA 32 – R4: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO INTEGRADO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	47
FIGURA 33 – CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO MORFOLÓGICO	48
FIGURA 34 – MDT’S OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO MORFOLÓGICO	49
FIGURA 35 - R1: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO MORFOLÓGICO	50
FIGURA 36 - R2: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO MORFOLÓGICO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	51
FIGURA 37 - R3: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO MORFOLÓGICO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	51
FIGURA 38 - R4: SUBTRAÇÃO DO MDT TERRASCAN 2.0 PELO MDT/GERADO PELO MÉTODO MORFOLÓGICO (DIFERENÇA TRIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL)	52
FIGURA 39 - APONTAMENTO DE DEFICIÊNCIA NO COMPORTAMENTO CLASSIFICATÓRIO EM REGIÕES DE RELEVO ACIDENTADO	53
FIGURA 40 - APONTAMENTO DE DEFICIÊNCIA NO COMPORTAMENTO CLASSIFICATÓRIO EM FUNÇÃO DA LIMITAÇÃO DOS PARÂMETROS ESTABELECIDOS	54
FIGURA 41 - APONTAMENTO DE DEFICIÊNCIA NO COMPORTAMENTO CLASSIFICATÓRIO EM REGIÕES DE VEGETAÇÃO DENSA	54
FIGURA 42 - APONTAMENTO DE DEFICIÊNCIA NO COMPORTAMENTO CLASSIFICATÓRIO EM REGIÕES URBANAS DE BAIXA INCIDÊNCIA DE PONTOS LIDAR NA SUPERFÍCIE DO SOLO	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS PARA CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS PELO MÉTODO DO BLOCO MÍNIMO	28
TABELA 2 - RESÍDUOS DA DIFERENÇA ENTRE GRADES (MDT/TERRASCAN - MDT/BLOCO MÍNIMO) EM METROS	33
TABELA 3 - PARÂMETROS PARA CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS PELO MÉTODO DA DECLIVIDADE	36
TABELA 4 – RESÍDUOS DA DIFERENÇA ENTRE GRADES (MDT-TERRASCAN – MDT-DECLIVIDADE) EM METROS:	39
TABELA 5 – PARÂMETROS PARA CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS PELO MÉTODO INTEGRADO	42
TABELA 6 – RESÍDUOS DA DIFERENÇA ENTRE GRADES (MDT-TERRASCAN – MDT-INTEGRADO) EM METROS	45
TABELA 7 – PARÂMETROS PARA CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS PELO MÉTODO MORFOLÓGICO	48
TABELA 8 - RESÍDUOS DA DIFERENÇA ENTRE GRADES (MDT-TERRASCAN – MDT-MORFOLÓGICO) EM METROS:	50
TABELA 9 - MÉTODOS E SUGESTÕES DE APLICABILIDADE.....	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALS	- <i>Airborne Laser Scanner</i>
CNPQ	- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
LASER	- <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LAGE	- Laboratório de Geodésia Espacial
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LIDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDS	- Modelo Digital da Superfície
MDT	- Modelo Digital do Terreno
SAD 69/96	- <i>South American Datum 69/96</i>
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SMI	- Sistema de Medição Inercial
TIN	- <i>Triangular Irregular Network</i>
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UFPE	- Universidade Federal de Pernambuco
UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WGS 84	- <i>World Geodetic System, 1984</i>

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A representação em meio digital da superfície da terra, com propósitos de otimizar a execução de projetos de engenharia e aplicações de geoprocessamento e afins, é de fundamental importância para que se possa estimar a variabilidade dos atributos ou fenômenos geográficos que caracterizam o terreno de uma região de interesse.

Os produtos cartográficos que correspondem a essas representações virtuais são denominados modelos digitais de representação e, em se tratando da superfície do solo em específico, são conhecidos na literatura como MDT (Modelo Digital do Terreno).

Esses modelos podem ser adquiridos a partir de técnicas inerentes à Cartografia, Fotogrametria e o Sensoriamento Remoto, áreas do conhecimento das Ciências Geodésicas que, com os recentes avanços tecnológicos, tem se beneficiado com os novos meios para se levantar informações a respeito das superfícies.

Porem, adquirir de forma prática e eficiente um MDT que represente fielmente as nuances de uma região terrestre, não constitui tarefa simples e tem sido uma das motivações mais presentes nos principais centros de pesquisas especializadas na modelagem digital do terreno, em nível mundial, cujas investigações até o presente momento não proporcionaram uma solução ideal definitiva. Nos últimos anos, porém, se constatou uma representativa evolução com o advento da tecnologia da varredura a *laser* aerotransportado, o ALS (*Airborne Laser Scanner*), que vem se consagrando como alternativa viável para a aquisição automática do MDT.

O ALS, também conhecido como LIDAR (*Light Detection and Ranging*) vem, a pouco mais de 20 anos, sendo recorrido em uma variedade de aplicações relativas à representação de superfícies, cujos estudos recentes realizados por VOSSELMAN

(1999), HAALA et al. (1998), KRAUS e PFEIFER (1998), constatam a eficácia da utilização de dados *laser* para a geração automática do MDT em mapeamentos de grande escala e alta acurácia. Afirmações essas também defendidas por MEANS et al. (2000) e BERG e FERGUNSSON (2001).

Segundo ZANDONÁ (2006), a precisão vertical do *laser* em áreas abertas, dependendo do tipo de equipamento e altura de vôo, pode ser menor ou igual a 15 cm, exatidão essa também defendida anteriormente por PEREIRA e JANSSEN (1999).

Ao longo dos últimos cinco anos, os resultados obtidos a partir das linhas de pesquisas que utilizam os dados *laser* para modelagem do terreno, em especial para geração automática do MDT, vêm evolutivamente constatando a potencialidade de encontrar nessa tecnologia, uma resposta conclusiva e acessível quanto a essa questão, conforme comprovam estudos realizados por VOSSELMAN (2000); SITHOLE (2001); SITHOLE e VOSSELMAN (2003).

Entretanto, há desafios a serem vencidos na utilização desses dados para a geração do MDT, dentre os quais se destaca a classificação de informações em regiões que apresentam uma menor incidência de pontos *laser* sob o terreno, tais como áreas de vegetação densa e espaços urbanos com grande concentração de edificações e demais elementos executados pelo homem que impedem ou dificultam a incidência de pontos *laser* no solo.

É sabido ainda que em áreas de vegetação densa existe uma incerteza quanto à origem do ponto refletido (terreno ou vegetação), onde em algumas situações a acurácia do MDT é fortemente influenciada pela habilidade de filtrar e classificar os dados em terreno e não-terreno, de modo que a superfície resultante possa ser descrita apenas pelas reflexões obtidas diretamente do solo propriamente dito. (HAUGERUD e HARDING, 2001).

Nesse contexto e na tentativa de contribuir para os avanços da área do conhecimento das Ciências Geodésicas, a presente pesquisa se propõe a investigar e discutir alguns métodos de filtragem e classificação de dados LIDAR recorridos na geração automática do MDT.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é a comparação entre métodos de filtragem e a classificação de dados LIDAR para a geração automática do Modelo Digital do Terreno (MDT).

1.3 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- a) avaliar a viabilidade na geração automática de modelos digitais do terreno, a partir de dados LIDAR;
- b) avaliar o desempenho visual e numérico de cada um dos métodos comparados, em função das especificidades de cada região de estudo;
- c) propor variações de classificação de pontos LIDAR, para que os atuais métodos tornem-se mais eficientes.

1.4 Conteúdo

No capítulo II é apresentada a fundamentação teórica abordada na pesquisa. O capítulo III contém os materiais utilizados, a descrição das áreas de estudo e descrição da metodologia utilizada. No capítulo IV são apresentados os resultados obtidos e levantadas as discussões pertinentes à comparação dos métodos implementados e propostos e, por fim, o capítulo V é destinado às considerações finais e recomendações pertinentes a trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo estão descritos essencialmente alguns dos princípios básicos inerentes à modelagem digital do terreno, bem como breves conceitos sobre a utilização de dados LIDAR para a geração automática do MDT e noções a respeito da tecnologia *laser scanner*. Recomenda-se aos interessados que o aprofundamento desses conceitos seja feito mediante consulta direta às fontes citadas no texto e nas referencias bibliográficas.

2.1 Modelos Digitais de Representação de Superfícies

Segundo COELHO et al. (2002), os modelos digitais de superfícies são representações em meio digital da configuração espacial de altitude numa área.

MAUNE (2001 apud BRANDALIZE, 2004), e MOURA (2006), classifica os modelos digitais em: Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS), cujas especificidades compreendem a:

- MDE: Grade de valores de elevação (z) regularmente espaçada (em x e y), referenciada a um *datum* (horizontal e vertical) e a um sistema de coordenadas, que representa a superfície nua do terreno (exclui a vegetação e as feições artificiais).
- MDT: Similar ao MDE, incorpora valores de elevação (z) de feições topográficas importantes e irregularmente espaçadas (divisores de água, fundos de vale, estradas, pontos cotados) a fim de caracterizar melhor a superfície nua do terreno.
- MDS: similar ao MDE e MDT, incorpora valores de elevações (z) das feições naturais e artificiais que se encontram acima da superfície nua do terreno, como edificações, árvores e torres de energia.

De acordo com ALEXANDRINI Jr. (2005), tais representações são definidas por meio de um grande número de pontos plano-altimétricos que, normalmente,

estão relacionados na forma de uma grade regular ou numa estrutura *Triangular Irregular Network* (TIN). Esses pontos dão origem a superfícies que, de acordo com a composição dos elementos ou feições integrantes, geram um modelo digital específico.

Para HAALA et al. (1999) e BURROUGH et al. (1989), o fato do sistema LIDAR fornecer, além da cota do terreno, a cota de outros objetos acima dele (edificações, vegetação e afins), é imprescindível estabelecer a diferença conceitual entre Modelo Digital do Terreno (MDT), que vem a ser representações que armazenam apenas as altitudes dos pontos na superfície do terreno propriamente dito e o MDS, que por sua vez inclui objetos tais como árvores e edificações.

Conceitualmente há uma similaridade entre a concepção do modelo digital do terreno (MDT) adotada por HAALA et al. (1999) e BURROUGH et al. (1989), e a indicação do modelo digital de elevação (MDE) defendido por MAUNE (2001).

De acordo com BURROUGH (1991), o termo MDE é mais adequado ao se referir a modelos que contenham apenas dados de elevação, pois a palavra “terreno” implica em atributos da paisagem como tipos de uso e ocupação do solo, por exemplo.

Assim, no presente estudo, o MDE descreve em meio digital as elevações de qualquer ponto de determinada área e o MDT diz respeito aos apontamentos relativos à superfície do terreno em si. Embora na prática possa ser encontrada na literatura a mesma terminologia para referir-se tanto a um como a outro.

2.2 Modelo Digital do Terreno (MDT)

Em uma conceituação mais específica, o Modelo Digital de Terreno (MDT), pontuado na literatura internacional como *Digital Terrain Model (DTM)* é caracteriza o comportamento de fenômenos incidentes nas regiões da superfície terrestre e, embora sua representação mais comum seja associada à altimetria, um MDT pode compreender ainda grandezas como unidades geológicas ou teor de minerais (BURROUGH, 1986, p. 17).

Os dados dos MDT's têm sido utilizados, entre outros, em aplicações de geoprocessamento desenvolvidas no ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), bem como em projetos de planejamento urbano (CENTENO et. al., 2000) e também na simulação de fenômenos hidrológicos (KRABIL, 1984).

Esses modelos são obtidos a partir de uma amostragem do fenômeno dentro da região de interesse, onde as amostras são processadas de forma a criar modelos digitais que vão representar a variabilidade do fenômeno nessa região.

Em aplicações de geoprocessamento a utilização do modelo digital do terreno para fins de análises possibilita o estudo de um determinado fenômeno sem a necessidade de se trabalhar diretamente na região geográfica escolhida, sendo tais análises de cunho qualitativo ou quantitativo, de relevante importância para fins de simulações e tomadas de decisão.

Em princípio, a modelagem digital do terreno compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno a ser estudado, a criação do modelo digital em si e a definição de uma série de processamentos de análises sobre os modelos com a finalidade de se extrair informações úteis a uma aplicação de geoprocessamento. O modelo propriamente dito é formado por estruturas de dados convenientes para processamentos digitais eficientes e pela definição de funções de ajustes.

Conforme BURROUGH (1986), a representação mais comum de um MDT está associada à altimetria, embora possa representar outras grandezas que variam continuamente no espaço como unidades geológicas ou teor de minerais, por exemplo.

No tocante à cartografia tridimensional, o MDT é de fundamental relevância nos projetos que necessitem do cálculo de volumes, como num projeto de estradas, apoio aos projetos de drenagens e de base para projetos realizados em programas de Sistemas de informações geográficos (SIG's) como, por exemplo, estimativas de distância na alocação de pontos de ônibus onde a estimativa da variação do terreno tem grande importância na geração de mapas de declividade e afins.

O MDT pode ainda ser representado por grades regulares ou irregulares,

similares às matrizes utilizadas para a representação de imagens digitais.

2.3 O Sistema de Varredura a *laser* LIDAR

Em linhas gerais o sistema de varredura a *laser* aerotransportado, o *airborn laser scanner* se baseia essencialmente na emissão de pulsos *laser* em direção à superfície terrestre e o registro de sua reflexão. O pulso, ao atingir as superfícies é refletido e uma parte dele retorna ao sistema, onde é medido. O dado mais relevante é o tempo decorrido entre a emissão do feixe e o registro do retorno, que permite calcular a distância entre o sensor e o objeto.

Em se tratando de uma nomenclatura padrão, ainda não há uma denominação universal para o sistema *laser* na literatura (DALMOLIN, 2004). No presente trabalho o apontamento LIDAR (*Light Detection and Ranging*) será adotado por ser assim facilmente reconhecido na literatura especializada, muito embora essa tecnologia possa ser identificada também como LADAR (*Laser Detection And Ranging*), *Laserscanning* ou ainda, simplesmente *Laser Scanner*, como defendem alguns autores.

Quanto à sua composição, o sistema de varredura a *laser* aerotransportado é composto por três componentes principais: Um GPS (*Global Positioning System*), um SMI (Sistema de Medição Inercial) e o LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). DALMOLIN (2004)

O ALS, em específico, utiliza o método DGPS (*Differential Global Positioning System*) que permite determinações precisas de coordenadas tridimensionais, navegação e informações sobre o tempo, para estudos científicos e de engenharia. SHIMALESKY (2007).

Neste, um receptor GPS é posicionado em uma estação de referência que possua coordenadas conhecidas e um segundo receptor é posicionado no ponto onde se deseja determinar as coordenadas, no caso uma estação móvel e, desse modo, ambas operam simultaneamente.

A unidade de medição *LASER* se destina à geração e emissão dos pulsos *laser*, sendo que, para direcioná-los, um sistema de varredura óptico-mecânico (unidimensional ou bidirecional) é utilizado. Desse modo, para o cálculo da posição do feixe incidente na superfície do terreno são necessárias duas unidades de apoio, incumbidas da utilização de dados do varredor laser.

O sistema de medição inercial (SMI) corresponde ao sistema de apoio encarregado de calcular a inclinação do sensor nas três direções.

Na fase de pós-processamento, as medidas de distância com seus respectivos ângulos, os dados de GPS e dados de navegação inercial são combinados para determinar a posição dos pontos varridos na superfície terrestre, onde, segundo WHER E LOHR (1999), esses dados devem estar sincronizados para garantir a qualidade dos resultados da varredura.

Além da posição do ponto onde o feixe incide na superfície, o sistema possibilita também que se possa medir a intensidade do sinal de retorno do pulso *laser*. É importante mencionar que o raio associado a um pulso *laser* disparado desde um avião sofre uma pequena divergência e por esse motivo, a área associada ao pulso depende da altura do vôo.

O tamanho dos objetos em relação à projeção do feixe, bem como o material que compõe a superfície, determina a intensidade do pulso que retorna ao sensor e, desse modo, um feixe pode não atingir um único objeto, podendo ser refletido por diferentes pontos localizados em diferentes distâncias do sensor. Nesses casos o ponto mais próximo ocasionará um pulso que retorna mais rapidamente e o ponto mais distante, um retorno mais demorado, característica essa de significativa relevância quando se leva em consideração a diferença de penetração que pode existir em um único pulso (BEHAN, 2000), o que permite a distinção de elevações.

2.3.1 Modelagem Digital do Terreno a partir de Dados LIDAR

Segundo BURROUGH, et al. (1989), o produto de uma varredura a *laser* aerotransportado contempla, além das informações do terreno, as informações das

elevações que o compõe, uma vez que pulso incide ainda nas feições naturais como a vegetação arbustiva e de grande porte, bem como os elementos não naturais como edificações, fios e demais objetos dentro da área estudada.

Assim, a obtenção de um MDT a partir da subtração dos pontos LIDAR que constituem o MDS requer sobre esse, a classificação de pontos para distinguir quais pontos pertencem ou não à superfície do terreno propriamente dita e, a partir disso, excluir virtualmente os pontos caracterizados como não pertencentes ao terreno. LOHMANN et al., (2000) atribuem o termo “filtragem” ao processo de identificação de pontos no terreno e pontos elevados acima do mesmo, enquanto o termo “classificação” é adotado por BRIESE e PFEIFER (2001).

Em virtude da eliminação de pontos que caracteriza a classificação exposta no parágrafo anterior, ocorre uma significativa redução dos dados obtidos, cujas lacunas são preenchidas pela interpolação de novos dados. (SHIMALESKY, 2007).

CENTENO et al. (2005), apontam que na modelagem digital de superfícies a partir de dados laser, a interpolação pode ser feita aplicando interpoladores como, por exemplo, vizinho natural, inverso de uma distância, *kriging*, curvatura mínima, regressão poligonal e etc., dos quais, segundo BOTELHO (2007), a interpolação por *Krigagem* conserva melhor as características do relevo, por manter a continuidade do terreno.

2.3.1.1 Interpolação pelo Método *Kriger*

A interpolação por *krigagem* é um processo de combinação dos pontos amostrados, diferenciando-se de outros métodos de interpolação pela maneira como os pesos são atribuídos a diferentes amostras. Os pesos, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado são obtidos por meio da estimação de uma matriz de covariância espacial (Camargo, 1997).

Segundo Ribeiro Júnior (1995), o estimador de *krigagem* é o melhor estimador linear não enviesado de variância mínima. Para Olea (1991), *krigagem* é um nome

genérico dado a um conjunto de técnicas de regressão generalizada que minimiza a variância da estimativa, definida a partir de um modelo de covariância.

A estimação por autocorrelação é uma variação da ponderação por distância, que utiliza uma função de comportamento, denominada por Peucker (1980) como comportamento típico de declive. Esta função é conhecida como autocorrelação, covariância ou variograma e as técnicas de estimativa são chamadas de interpolação por autocorrelação, colocação ou *krigagem*, respectivamente.

Para FELGUEIRAS (1988), a *krigagem* é um método estatístico que utiliza as informações dos pontos vizinhos (variáveis regionalizadas), considerando além dos valores amostrados, a sua posição espacial relativa. Apesar deste processo inicialmente ter sido desenvolvido para estimativas de reservas em mineração, pode-se utilizar a *krigagem* para estimar o valor de z de um ponto de posição planimétrica conhecida, a partir de um conjunto de n pontos vizinhos, cujo valor de z é conhecido

2.3.1.2 Filtragem e Classificação de Pontos LIDAR: Principais Linhas de Pesquisa

Conforme dito anteriormente, a geração automática ou semi-automática do MDT é assunto atual e motivador de investigações nos principais centros de pesquisa na área do conhecimento das Ciências Geodésicas e ciências afins, e a cada novo estudo realizado a partir da utilização de dados LIDAR, reafirma-se a potencialidade dessa tecnologia na aquisição de produtos cada vez mais fieis e coerentes com a realidade do campo.

Autores como KRAUS e PFEIFER (1998) e REUTEBUCH et al. (2003), investigaram a qualidade do MDT gerado a partir de dados LIDAR para regiões de floresta na Áustria e nos Estados Unidos, assim como ZANDONÁ (2006) e SHIMALESKY (2007), realizaram estudos semelhantes em regiões do Brasil, reafirmando a qualidade altimétrica do MDT oriundo desses dados.

Atualmente há uma gama de opções de processos para filtragem e classificação de pontos LIDAR a fim de se obter de forma automática ou semi-

automática o MDT. Os principais, segundo SITHOLE e VOSELMAN (2003), são apresentados a seguir.

VOSELMAN et al. (2000), desenvolveram um filtro considerando que, em uma nuvem de informações *laser*, um ponto p_1 pertence ao terreno se, para qualquer ponto p_1 , pertencente ao terreno, a diferença de altura entre esses pontos é menor que a diferença máxima permitida, calculada em função da distância entre esses pontos. Esse método foi nomeado como método da superfície (*Surface based*).

SITHOLE (2001), SITHOLE e VOSELMAN (2003), propuseram a filtragem e classificação partindo do princípio onde, dada uma das diferenças de altura entre dois pontos, a probabilidade de um ponto mais alto não pertencer ao terreno, aumenta com a diminuição da distância linear entre eles. Essa proposta metodológica intitulada pelos autores como *slope base* (método da declividade) será implementada no presente trabalho.

Dentre as principais linhas de pesquisas focadas nesse assunto, destaca-se também a filtragem e classificação por segmentação (*segmentation*), onde os pontos de um *cluster* não devem pertencer a um determinado segmento do terreno, se a altura desses estiver acima da altura dos segmentos vizinhos. THUY e TOKUNAGA (2002) utilizaram a transformada *Wavelet* e segmentaram os dados de uma nuvem de pontos *laser*, a fim de verificar que a imagem segmentada foi utilizada para detecção de edificações e outros objetos não pertencer ao terreno.

O método de filtragem conhecido internacionalmente como *block-minimum* considera uma zona de *buffer* acima de um plano horizontal, onde se espera que residam os pontos pertencentes ao terreno. Com o objetivo de permitir o uso de métodos de processamento de imagens de forma mais rápida para a geração do MDT, WACK e WIMMER (2002), propuseram um algoritmo no qual os dados vetoriais do LIDAR fossem primeiramente rasterizados.

BROVELLI et al. (2002), propuseram a aquisição do MDT, considerando no processo de filtragem, a detecção de contornos, classificação e interpolação de dados LIDAR.

No Brasil, COELHO et al. (2007), valendo-se dos princípios classificatórios

propostos por BROVELLI et al. (2002), citados no parágrafo anterior, propuseram a aquisição do MDT a partir do tratamento de dados LIDAR pela filtragem no software livre de código aberto, o *Grass (Geographic Resources Analysis Support System)*, cuja ferramenta, ainda segundo COELHO et al. (2007), constituiu uma interessante alternativa para a geração do MDT.

JACOBSEN e LOHMAN (2003), citado por SHIMALESKY (2007), descrevem um método que se baseia na segmentação dos dados altimétricos do *laser*, formando regiões que podem ser analisadas segundo sua altura e, a partir desse pressuposto, separar os pontos localizados na superfície do terreno de outros pontos localizados no topo das árvores.

Destaca-se também o método da pré-filtragem utilizado pelo software comercial *TerraScan*. (SHIMALESKY, 2007), uma ferramenta para processamento de pontos com coordenadas tridimensionais desenvolvido pela *Terrasolid Limited*. O funcionamento deste método é descrito a seguir:

Inicialmente são pesquisados os pontos mais baixos para a formação de uma TIN (*Triangular Irregular Network*). Os triângulos, nesse modelo inicial, apresentam seus lados normalmente abaixo da superfície do terreno, uma vez que seus vértices estão apoiados nos pontos mais baixos do levantamento. Ocorre que alguns desses “pontos baixos” são mais baixos que os demais pontos da vizinhança (pontos com algum tipo de erro) e, assim, devem ser excluídos.

Num segundo momento do processo de filtragem sobre a TIN constituída, o *TerraScan* começa a modelar a representação da “nova” superfície, acrescendo de forma iterativa novos pontos. Cada novo ponto adicionado faz com que o modelo seguinte esteja mais próximo da superfície do terreno propriamente dito e assim sucessivamente.

Segundo BOTELHO (2007), no *TerraScan* são utilizados parâmetros que controlam a inclusão de novos pontos, entre os quais estão o índice de declividade do terreno e seu raio de abrangência. A combinação desses dois parâmetros permite extrair de forma automática os pontos tridimensionais que irão compor o MDT.

Por fim, quando o produto gerado não representa de forma coerente a

superfície desejada, o *TerraScan* possibilita ainda uma etapa final de edição manual.

2.4 Avaliação de Modelos Digitais Obtidos a Partir de Dados LIDAR

A avaliação de um MDT gerado a partir de dados LIDAR pode ser feita pela comparação entre o modelo obtido pela aplicação de métodos de filtragem e classificação propostos, e outro MDT de verificação cuja qualidade visual e numérica seja tida como referência. Para tanto, existem opções como calcular a discrepância e/ou a razão das grades, conforme afirma SHIMALESKY (2007).

Recentemente, YU et al. (2005), analisando regiões de floresta comparam os resultados de um MDT gerado a partir de pontos LIDAR com informações de topografia. O estudo revela que as maiores diferenças são identificadas quando se utiliza o primeiro retorno do pulso e menos quando se utiliza o segundo retorno.

Na América do Norte, mais especificamente em florestas localizadas em Washington - EUA, REUTEBUCH et al. (2001) comparam a altimetria obtida por *laser scanner* com resultados de processos fotogramétricos apontando que o LIDAR pode oferecer maior acurácia em áreas de floresta cuja interpretação visual é difícil.

No Brasil, com intuito de avaliar a informação altimétrica de dados *laser*, SHIMALESKY (2007), realizou um estudo em mata nativa na região de Curitiba/PR – Brasil, comparando um MDT adquirido a partir de dados LIDAR e levantamentos topográficos. O resultado mostra que em áreas de baixa densidade de pontos a distribuição irregular pode introduzir erros significativos no MDT.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as regiões de estudos e aplicação dos experimentos de verificação, bem como discorre a respeito dos dados LIDAR a serem utilizados. Aponta ainda para as ferramentas (*softwares*) de apoio aos trabalhos e, por fim, disserta o processo metodológico adotado para o desenvolvimento completo da presente pesquisa.

3.1 Áreas de Estudos

Como área de aplicação dos estudos propostos, foram definidas 4 (quatro) regiões distintas do Campus III (Centro Politécnico) da Universidade Federal do Paraná - UFPR - Curitiba - PR, escolhidas pontualmente por apresentarem comportamentos distintos no que diz respeito à relevos notoriamente accidentados, variação de feições de edificações, densidade da vegetação em área urbana e heterogeneidade altimétrica, a saber:

a) **R1 (Região de estudos n.º 1):** Compreende à área do Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE) da UFPR, ilustrada na figura 1 a seguir, e foi escolhida por apresentar baixa variedade de feições e relevo pouco accidentado a serem identificados pelo *laser*.



Figura 1 – R1 (Região de estudos n.º 1)

b) **R2 (Região de estudos n.º 2):** Corresponde às mediações das quadras esportivas do campus, ilustrada na figura 2 a seguir, onde, diferentemente da primeira, o relevo oferece acentuados declives e aclives, além de apresentar variadas feições, cujo comportamento pode ser melhor observado na aplicação dos métodos propostos.



Figura 2 – R2 (Região de estudos n.º 2)

c) **R3 (Região de estudos n.º 3):** A terceira área de estudos diz respeito a um bosque nas proximidades dos blocos do curso de engenharia florestal no Centro Politécnico, ilustrada na figura 3 a seguir, região esta constituída por densa vegetação arbórea de grande porte.



Figura 3 – R3 (Região de estudos n.º 3)

d) **R4 (Região de estudos n.º 4):** A quarta e última área de estudos abrange as quadras residenciais do bairro Jardim Das Américas, (Figura 4), mais especificamente ao lado do Centro Politécnico da UFPR e foi escolhida por apresentar feições naturais heterogêneas e quantidade significativa de edificações de porte variável e afins.



Figura 4 – R4 (Região de estudos n.º 4)

3.2 Dados LIDAR Utilizados

Os conjuntos de pontos LIDAR utilizados neste trabalho foram cedidos pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR), que detém as informações e foi responsável pelos levantamentos de campo. O sistema utilizado para esses levantamentos foi o OPTECH / INS GPS APPLANIX, modelo ALTM-2050. O sistema de referência de coordenadas para o rastreamento foi o WGS¹84 (*World Geodetic System, 1984*) e posteriormente transportado para o SAD 69/96. O levantamento foi realizado com um vôo a uma altura de 1000 metros, sendo a densidade média de coleta de 1 ponto a cada 0,44m² e uma precisão altimétrica de 0.20m. A largura da faixa foi de 350 metros com 6 faixas disponíveis. Os dados são apresentados em coordenadas E, N, H e valor de intensidade.

Ressalta-se que os dados utilizados estão em formato *raster* e foram pré-processados pelo próprio LACTEC.

¹ Elipsóide de referência de origem geocêntrica.

3.3 Programas Utilizados

- *SURFFER* 8.0 da *Golden Software*: Interpolador utilizado no processo de geração das grades para avaliação quantitativa e gerador das ilustrações em perspectiva bidimensionais e tridimensionais.
- *TERRASCAN* 2.0 da *Terrasolid Limited*: Software para processamento de dados *laser*, utilizado para, neste contexto, gerar os MDT de referência para comparação visual e numérica com os produtos gerados.
- Compilador C++ *BUILDER*, da *Borland Enterprise*: Plataforma de implementação dos algoritmos.

3.4 Metodologia

Os processos metodológicos desta pesquisa consistem em classificar pontos de nuvens de dados *laser* como pertencentes ou não-pertencentes à superfície do terreno, nas quatro regiões de estudos descritas anteriormente em 3.1 – Áreas de estudo. Para tanto, foi confeccionada uma grade regular com as coordenadas E, N e H dos pontos de cada nuvem de informações que compõe os respectivos MDS e sobre essas grades plano-retangulares, proceder de forma automática, com os processos classificatórios propostos (implementação de métodos de filtragem e classificação) e consequente obtenção MDT esperado.

Posteriormente, os produtos gerados com a aplicação de cada método (filtro) são comparados com o MDT correspondente obtido pelo software *TerraScan* 2.0. e por fim, o desempenho classificatório constatado em cada situação, bem como os apontamentos visuais e numéricos inerentes a filtragem e classificação dos pontos LIDAR são apresentados e também levantadas as discussões a respeito das vantagens e deficiências de cada método implementado.

3.4.1 Construção do Gradeamento

No intuito de permitir o uso de métodos de processamento de imagens mais

dinâmicos para a geração do MDT, são adotados neste trabalho, os princípios do algoritmo proposto por WACK e WILMMER (2002), em que os dados vetoriais do LIDAR são primeiramente rasterizados, possibilitando, assim, a definição de grades regulares. Cada grade é preenchida pelo cálculo da posição linha/coluna de cada ponto do conjunto de medições LIDAR, a partir de suas coordenadas plano-retangulares (E, N, H), conforme notação a seguir:

$$\text{lin} = (\text{Nmax-N})/\text{resolução} \quad (1)$$

$$\text{col} = (\text{E-Emin})/\text{resolução}$$

Onde:

lin = Linha do gradeamento

col = Coluna do gradeamento

NMax = Coodenada Norte

Emin = Coordenada Leste

Resolução = resolução espacial da grade

A resolução dessas grades deve considerar atenção especial quanto às definições grosseiras, uma vez que, caso isso ocorra, mais de um ponto pode corresponder a uma mesma célula da grade ou então, quando um determinado elemento for muito pequeno, a ocorrência de células sem dados também pode ocorrer.

Nos casos em que as células são maiores que o espaçamento entre pontos da varredura laser, pelo menos um ponto é registrado em cada célula e esse, teoricamente, pertence ao terreno.

3.4.2 Construção de Janelas de Busca por Mínimos Locais

A análise a fim de buscar os pontos (células da grade) que serão classificados como pertencentes ou não ao terreno é efetuada considerando a vizinhança de cada célula da grade.

A definição da vizinhança a ser considerada nesta análise tem consequências marcantes no produto da filtragem. Desse modo, num primeiro momento foram definidas duas alternativas para o processo de filtragem no acerca do quesito vizinhança: O conceito de Janela fixa e o conceito de Janela móvel.

O conceito de janela fixa consiste em dividir a grade de estudo em regiões de tamanho constante e de forma regular (figura 5). Nessa, todos os pontos dentro de uma região são analisados simultaneamente e cada ponto pode pertencer a apenas uma célula.

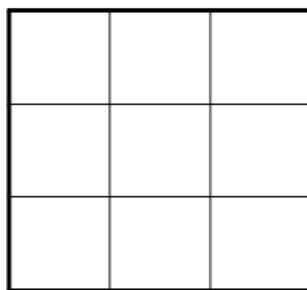


Figura 5 - Janela Fixa: Busca por mínimos locais célula por célula

Em se tratando do conceito de janela é móvel e sua aplicação, tem-se que para cada célula em questão é definida uma região de interesse – vizinhança - em torno da mesma. Assim, a região de análise varia para cada célula em função da posição da célula na grade, ou seja, a janela se descola ao longo da área de estudo como ilustra a figura 6 a seguir:

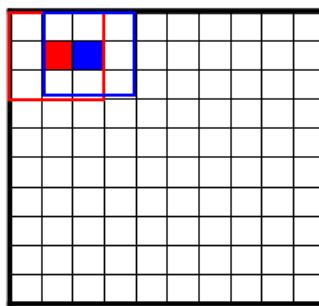


Figura 6 - Janela Móvel: Busca por mínimos locais de forma dinâmica

Seja a busca por pontos que pertencem ao terreno feita a partir de uma janela fixa ou móvel, alguns cuidados são de fundamental importância ao se definir seu tamanho (dimensões).

No caso de uma grade com resolução grosseira – grade exageradamente

grande - , mais de um ponto pode corresponder à mesma célula. Quanto o elemento da grade é muito pequeno, podem ocorrer células sem dados.

A definição dessa vizinhança, a qual chamaremos de janela, repete sobremaneira nos critérios de decisão relacionados aos demais parâmetros que determinam qual valor será atribuído ao conjunto de pontos abrangido por cada célula de uma região de análise.

3.4.3 Parâmetros Utilizados

Tanto para formação das grades regulares quanto para a determinação das dimensões de janelas de pesquisa, a atribuição de variáveis de tolerâncias é necessária e peculiar a cada modelo de filtragem e classificação proposto. Essas variáveis compreendem às exigências condicionais que caracterizam a “essência” classificatória o algoritmo matemático inerente a cada método.

Entretanto, existem algumas variáveis que estão presentes em quaisquer que seja o método em descrição, a saber:

(i) = ponto em análise;

(J) = janela de varredura, também pontuada como região de análise; e

(H) = Altura

A variável (i) representa o ponto *laser* em análise para classificação.

A variável (J) representa, em metros quadrados, o tamanho (dimensões) da janela virtual pré-estabelecida para pesquisar os pontos de interesse nos dados (nuvens de pontos LIDAR) em forma de grade regular.

A variável (H) é o limite altimétrico condicional que determina se um ponto em análise (i) apresenta os atributos requeridos para ser classificado como pertencente ou não ao terreno.

3.4.4 Métodos de Classificação Implementados

São descritos nessa secção quatro processos distintos de filtragem e classificação de pontos LIDAR para geração do MDT.

Os métodos abordados foram adotados almejando as melhores representações possíveis referentes às áreas de estudos, a partir das principais linhas de estudo atualmente em desenvolvimento nos Estados Unidos e Europa que correspondem a: Método do Bloco Mínimo; Método da Declividade, Método Integrado e Método Morfológico.

Os métodos do Bloco Mínimo e da Declividade que integram importantes linhas de pesquisa na geração automática do MDT são, no presente trabalho, implementados na forma original proposta pelos seus autores e também com proposições sugeridas, cujas características serão descritas posteriormente

O processo classificatório apontado como “Método Integrado” é uma alternativa de filtragem e classificação proposta na presente pesquisa, e contempla estruturalmente as condições de pertinência que definem se um ponto pertence ou não ao terreno, a partir da junção dos métodos, bloco mínimo e o método da declividade.

O método morfológico introduz no processamento de dados LIDAR, conceitos de morfologia matemática. Nesse, a filtragem dos dados *laser* se estabelece por processos relativos à dilatação e erosão de um MDS.

Os algoritmos pertinentes as quatro opções propostas foram implementados em linguagem de programação C++, obedecendo a ordem em que são apresentados a seguir.

3.4.4.1 Método do Bloco Mínimo

O método, conhecido na literatura internacional como *Block-Minimun*, é originário dos fundamentos do mínimo flexível proposto por VON HANSEN e

VÖTGLE (1999). Esse método considera uma zona de *buffer* (figura 7) acima de um plano horizontal para cada vizinhança, onde espera-se que residam os pontos pertencentes ao terreno.

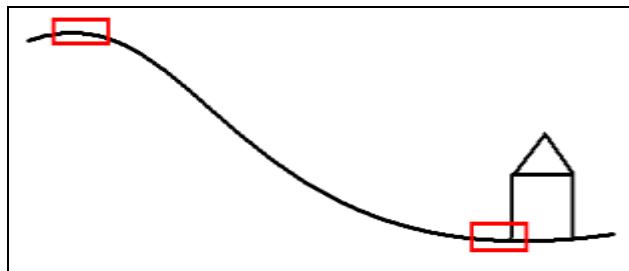


Figura 7 - Ilustração do Método do Bloco Mínimo

Em se tratando de vizinhanças maiores que o espaçamento entre pontos da varredura, pelo menos um ponto é registrado na vizinhança e esse ponto teoricamente pertence ao terreno. Os demais podem ser outros pontos do terreno se a altura desses for próxima a do mínimo encontrado, ou então, pontos de outros objetos mais elevados se essas alturas forem consideravelmente superiores ao ponto mínimo. Isto permite propor a seguinte lei de classificação:

SE $H(i) - H_{min} < \text{Tolerância}$ **ENTÃO** i pertence ao terreno
SENÃO i não pertence ao terreno (2)

3.4.4.2 Método da Declividade

Segundo Vosselman et al. (2000), dadas as diferenças de altura entre dois pontos, a probabilidade do ponto mais alto não pertencer ao terreno aumenta com a diminuição da distância linear entre eles.

Esse método propõe a classificação de pontos LIDAR considerando a declividade existente entre um ponto em questão (destacado em azul na figura 8) e o ponto com altimetria mínima referenciada dentro da vizinhança. Para que isso seja possível, são utilizadas as variáveis Altura (H) e Distância (Dist), e também o estabelecimento dos parâmetros janela de varredura(J) e tolerância angular de declividade (TolDecliv).

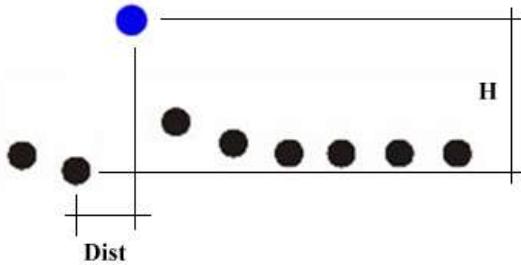


Figura 8 - Ilustração do Método da Declividade

Os pontos analisados são comparados entre si e aqueles cuja declividade estiver dentro do limite de tolerância (TolDecliv), cujo valor angular é previamente estabelecido, são classificados como pertencentes ao terreno. Caso contrário, ou seja, a declividade encontrada for maior que o limite de tolerância definido, esse ponto é apontando como não pertencente à superfície do terreno e assim, removido da nuvem de pontos LIDAR.

SE Declv(i) \leq TolDecliv **ENTÃO** i pertence ao terreno (3)

SENÃO i não pertence ao terreno
Onde

P = posição;

i = Ponto em análise;

$$\text{Decliv}(i) = \{[H(i) - H_{\min}]/\text{Dist}\} * 100$$

$$\text{Dist} = P(H_{\min}) - P(H(i))$$

Esse algoritmo visa proporcionar uma classificação mais eficiente em áreas que apresentem brusca descontinuidade de relevo, cujos aclives/declives implicam na incidência irregular de pontos *laser* sobre a superfície do solo e, desse modo, pode refletir significativamente nos processos de filtragem e na classificação de pontos.

3.4.4.3 Método Integrado (Bloco Mínimo – Declividade)

O princípio conceitual desse método proposto contempla a junção adequada dos conceitos base de dois dos métodos de filtragem e classificação de pontos

LIDAR tidos como alternativas evolutivamente eficientes no uso de dados *laser* para a geração automática do MDT. Esses métodos são o da Declividade (SITHOLE, 2001; SITHOLE e VOSSELMAN, 2003) e o método do Bloco Mínimo (WACK e WIMMER, 2002), ambos também descritos e implementados no presente trabalho.

Ao unificar esses dois métodos obtém-se um novo modelo matemático, em princípio, capaz de classificar pontos de um MDS em que, ao mesmo tempo sejam tratadas as deficiências relacionadas à variação de relevos presentes na classificação por mínimos locais (Bloco Mínimo) e paralelamente considera a declividade entre pontos vizinhos contemplados no modelo da declividade. A ilustração desse método é representada pela figura 9 a seguir:

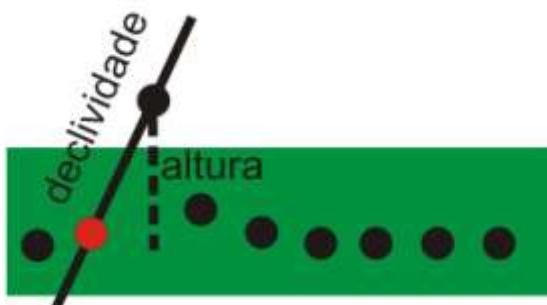


Figura 9 - Ilustração do Método Integrado

Para que o proposto no parágrafo acima seja alcançado, são utilizadas as variáveis Altura (H) e Distância (Dist), além do estabelecimento dos parâmetros de janela de varredura(J) e tolerância angular de declividade (TolDecliv).

Assim, os pontos analisados passam a ser classificados tanto em função de uma tolerância angular pré-definida, como também em função de um limite altimétrico pré-estabelecido, o que permite a seguinte equação:

SE [Decl(i) \leq TolAngular] e [H(i) – Hmin $<$ TolAltim] **ENTÃO** i pertence ao terreno
(4)

SENÃO i não pertence ao terreno
Onde

$$\text{Decliv}(i) = \{[H(i) - H_{\min}]/\text{Dist}\} * 100$$

$$\text{Dist} = P(H_{\min}) \rightarrow P(H_i)$$

A partir desse pressuposto, os pontos que compõem o MDS e extrapolam

tanto a tolerância angular (declividade) quanto à tolerância altimétrica estabelecidas são apontados como não-pertencentes ao terreno e, portanto, excluídos da nuvem de pontos em análise. O preenchimento dessas posições em aberto dá-se a partir do processo de interpolação, onde para cada ponto eliminado, o valor assumido apresenta a altimetria mínina encontrada na grade referencial.

3.4.4.4 Método Morfológico

Este filtro propõe um processo de classificação aplicando-se no MDS oriundo de dados LIDAR, operações binárias de dilatação e erosão de imagens pertinentes à morfologia matemática.

Grosso modo, entende-se por erosão morfológica o “encolhimento” de uma imagem enquanto que, conceitualmente, a dilatação morfológica, também apontada na literatura como diliação morfológica é uma transformação que implica no “engordamento” de imagens.

A partir desses operadores é definido uma grade com mínimos locais (H_{min}) obtida pela erosão aplicada aos valores altimétricos do MDS e, pela dilatação de H_{max} , compõe-se uma nova grade formada pelos valores altimétricos máximos (H_{max}) da grade mínima, conforme ilustrado na figura 10 a seguir:

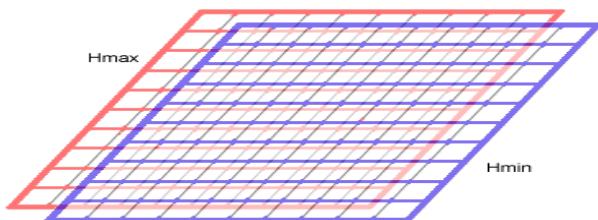


Figura 10 - Ilustração do método morfológico

Nesse contexto, as altitudes encontradas no processo de busca e avaliação feito pela janela móvel (análise por regiões) são comparadas célula a célula da gradeamento regular, com os valores altimétricos contidos no H_{max} . Se a diferença entre altitudes for menor que a tolerância estipulada, então o ponto do perfilamento pertencerá ao terreno. Caso contrário, serão excluídos da listagem, o que permite propor a seguinte lei de classificação:

SE $H(i) - H_{max} < \text{Tolerância}$ **ENTÃO** (i) pertence ao terreno
SENÃO (i) não pertence ao terreno (5)

Onde:

$$H_{min}(x,y) = \min(J);$$

$$H_{max}(x,y) = \max(\min(J))$$

Assim, a análise comparativa entre H_{min} e H_{max} verificando a diferença altimétrica de forma iterativa resulta na exclusão de pontos que em princípio não pertencem ao terreno.

3.4.5 Avaliação da Metodologia

Para mensuração e análise qualitativa e quantitativa dos produtos gerados com a aplicação da metodologia proposta nesta pesquisa, a avaliação deu-se seguindo critérios de observações visuais e a comparação entre MDT's gerados e respectivos MDT's qualificados como produtos de qualidade referencial constatada em outros trabalhos, obtidos a partir do software *TerraScan 2.0*, especificado do tópico 3.3 – Programas utilizados, deste capítulo.

3.4.5.1 Subtração entre MDT Gerado – MDT de Verificação

Para o processo de interpolação destinado às estimativas numéricas consideradas neste trabalho, foi adotado o método de interpolação por *krigagem* e o interpolador recorrido trata-se do software *SURFFER 8.0*, ferramenta que possibilita também geração e visualização em perspectiva bidimensional e tridimensional dos produtos gerados. A interpolação por *Krigagem* foi escolhida e adotada por contemplar a combinação dos pontos amostrados e tratar de forma mais adequada às variáveis relativas à modelagem do terreno.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada etapa da metodologia descrita no capítulo anterior. Os métodos adotados e as variações propostas foram implementadas em linguagem de programação C++ e, posteriormente aplicados em todas as quatro regiões descritas no item 3.1 – Áreas de estudos do Capítulo 3 – Materiais e métodos, obedecendo a ordem em que foram apresentadas.

A forma de avaliação do desempenho dos métodos implementados seguiu – como descrito no tópico 3.4.5 – Avaliação da metodologia, do Capítulo 3 -, critérios de observações visuais e mensuração numérica. Os resultados são expostos e discutidos considerando o desempenho individual de cada filtro/método, quando comparado aos respectivos produtos (MDT's) gerados pelo software *TerraScan 2.0*, adotado neste trabalho, como ferramenta de referência na geração semi-automática do modelo digital do terreno proveniente de dados LIDAR.

4.1 Comportamento Classificatório dos Filtros Implementados

Esta secção apresenta uma discussão geral acerca do comportamento classificatório dos métodos de filtragem e classificação implementados nesta pesquisa e o desempenho de cada um desses diante das diferentes situações peculiares a cada área de aplicação dos experimentos.

4.1.1 Aplicação do Método do Bloco Mínimo

A figura 11 ilustra o resultado da classificação obtido para cada uma das quatro áreas de estudo e aplicação dos testes de verificação. Para esses primeiros resultados é considerada a filtragem e classificação dos pontos do MDS pela janela fixa por mínimos locais.

Os parâmetros adotados que alcançaram os melhores resultados no processo classificatório são apresentados na tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Parâmetros para classificação de pontos pelo método do bloco mínimo

Áreas de Estudos	Grade (em m ²)	Tol. Altimétrica (em metros)
R1: LAGE	13x13	0,80
R2: Quadras Esportivas	30x30	2,90
R3: Bosque	25x25	0,80
R4: Residencial	24x24	0,50

A partir da definição dos parâmetros apresentados na tabela 1 acima, a filtragem e classificação pelo método do bloco mínimo implementado com janela fixa proporcionou os MDT's ilustrados nas figuras 11 a seguir:

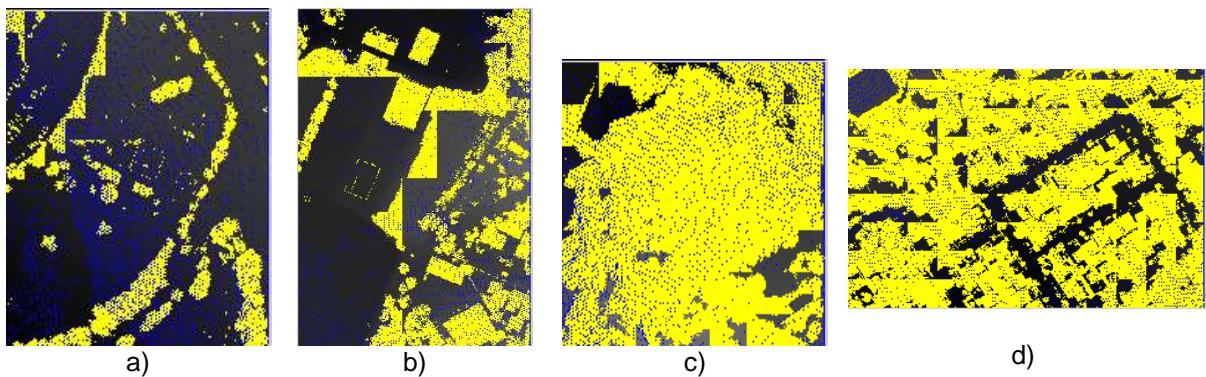


Figura 11 – Classificação pelo método do bloco mínimo (Janela Fixa)

Valendo-se dos mesmos parâmetros estabelecidos e apresentados na tabela 1, considerando agora a janela móvel para o processo de filtragem e classificação de pontos, foram obtidos os produtos ilustrados na figura 12 a seguir:

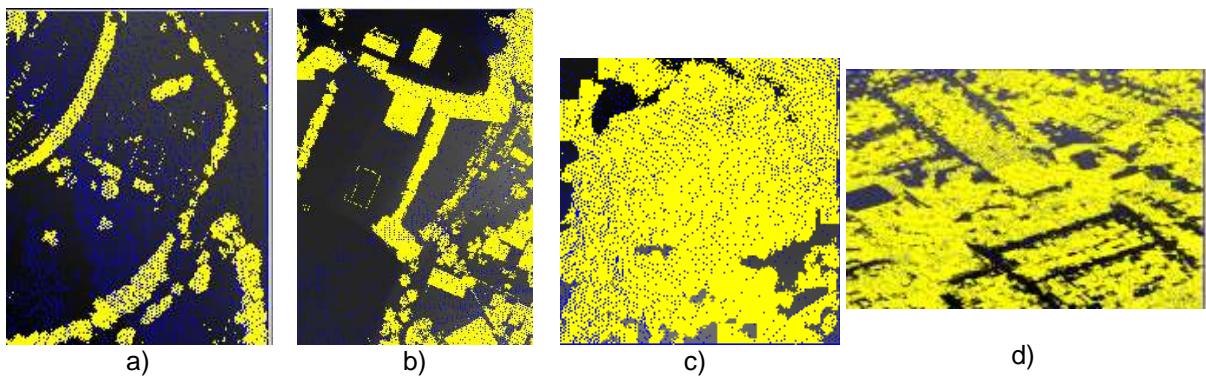


Figura 12 – Classificação pelo método do bloco mínimo (Janela Móvel)

Na ilustração 12 acima, as regiões amarelas referem-se aos pontos LIDAR que durante o processo de filtragem foram classificados como não-pertencentes á

superfície do solo propriamente dita e desse modo, excluídas.

Na mesma ilustração, os pontos em azul representam as áreas de oclusão (regiões não capturadas pela varredura a laser). As demais situações – regiões pretas - referem-se aos elementos que compõem o local, e que por estarem dentro do limite de tolerância estipulado permaneceram na imagem intensidade em questão.

Os experimentos realizados e expostos nos últimos parágrafos indicam que, para cada região de aplicação dos testes, o MDT gerado a partir da análise feita pela janela móvel retratou de forma mais coesa a superfície do terreno local, o que a caracteriza como sendo a opção mais adequada para o processo de filtragem. Comparando as ilustrações 11 e 12 nota-se que esta última contempla de forma mais harmônica às variadas feições dos elementos que compõem a área, e as variações do terreno propriamente dito.

O comportamento “ajustável” da janela móvel promove resultados mais aderentes no processo de filtragem de pontos que vêm a ser classificados como pertencentes ou não-pertencentes ao solo, sem que haja perda de informação que comprometa visual e numericamente os produtos finais.

Tal constatação permite assumir como premissa que a análise e busca por mínimos locais valendo-se da janela móvel é a mais aderente à realidade de campo e, desse modo, será tomada como padrão para a verificação qualitativa e quantitativa dos demais filtros implementados.

As ilustrações 12, 13, 14 e 15 a seguir apresentam em cena tridimensional o MDS e respectivo MDT/Gerado (Janela Móvel) referente à cada região de experimento.

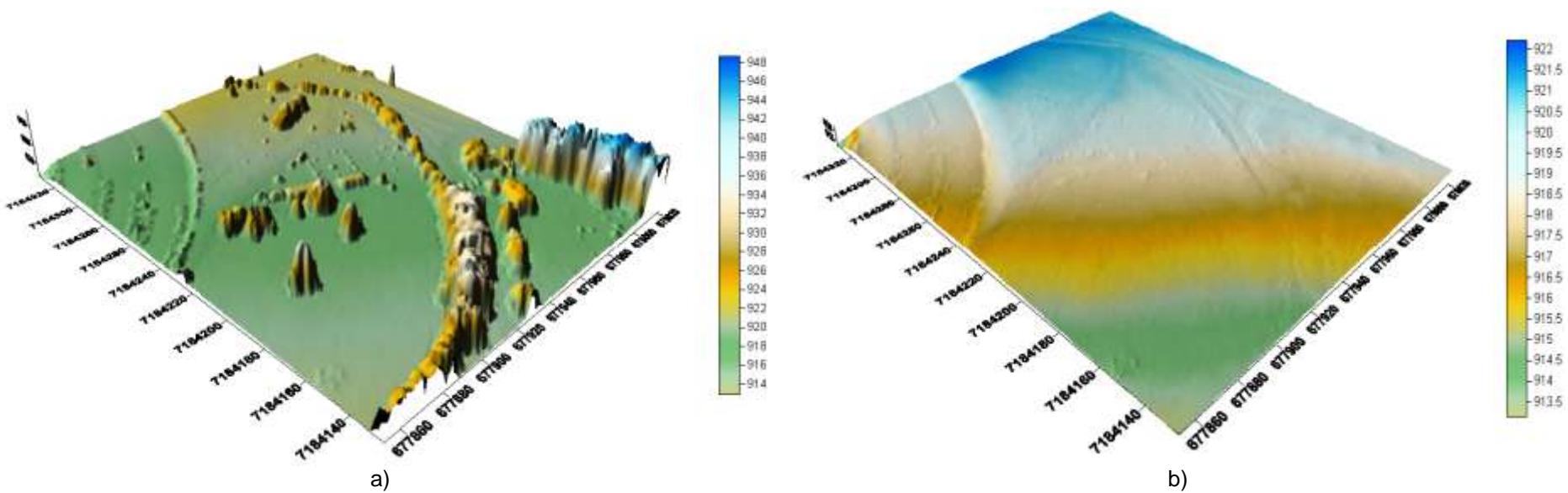


Figura 13 – R1: MDS e MDT – Cena Tridimensional

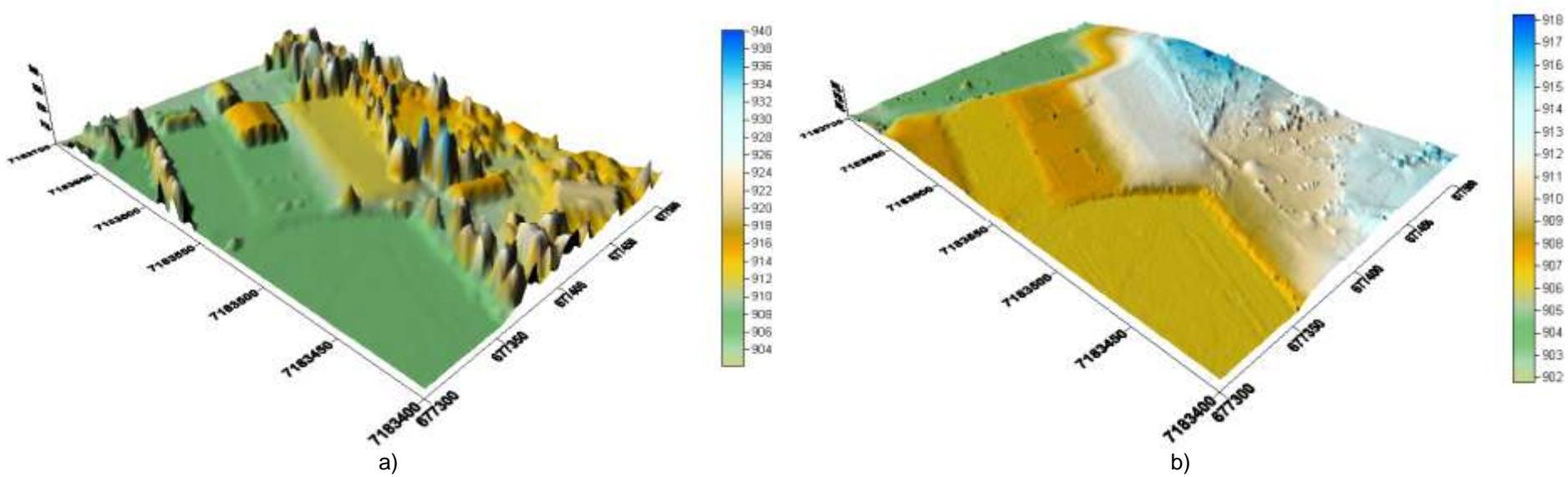


Figura 14 – R2: MDS e MDT – Cena Tridimensional

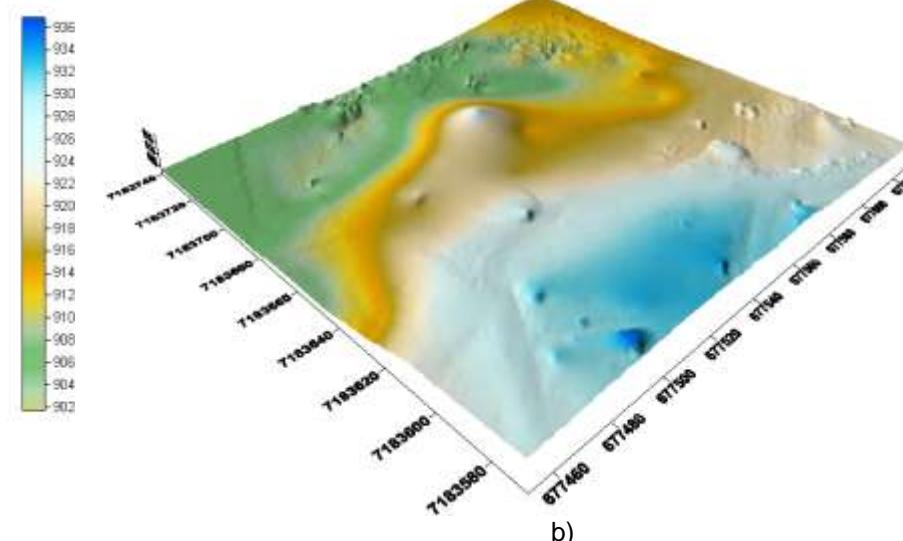
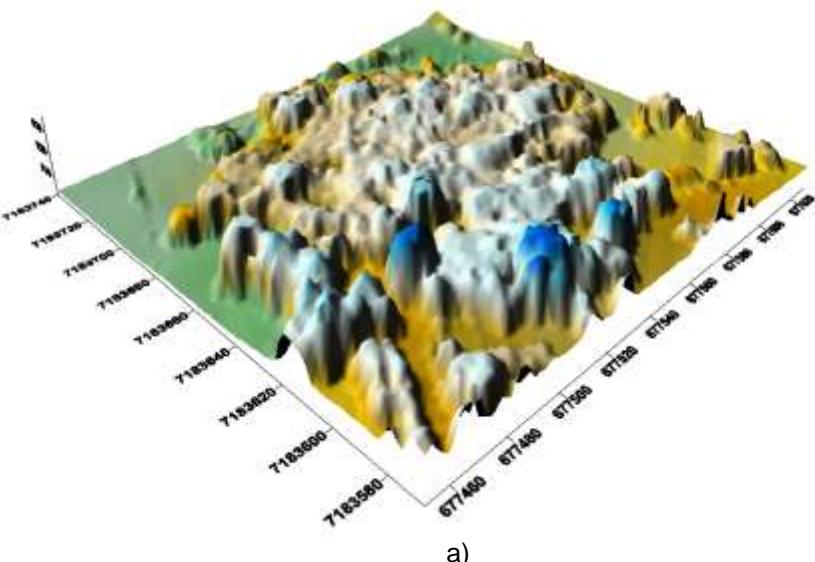


Figura 15 – R3: MDS e MDT – Cena Tridimensional

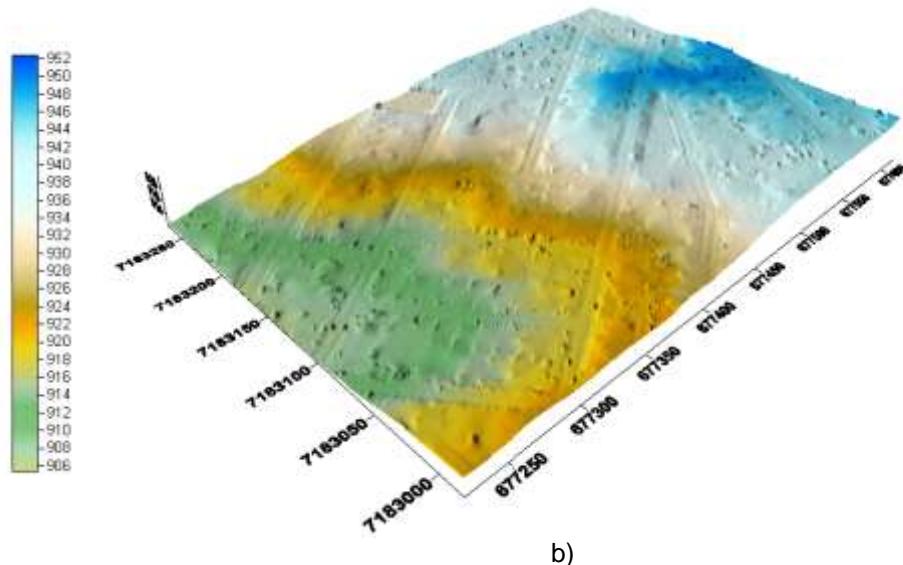
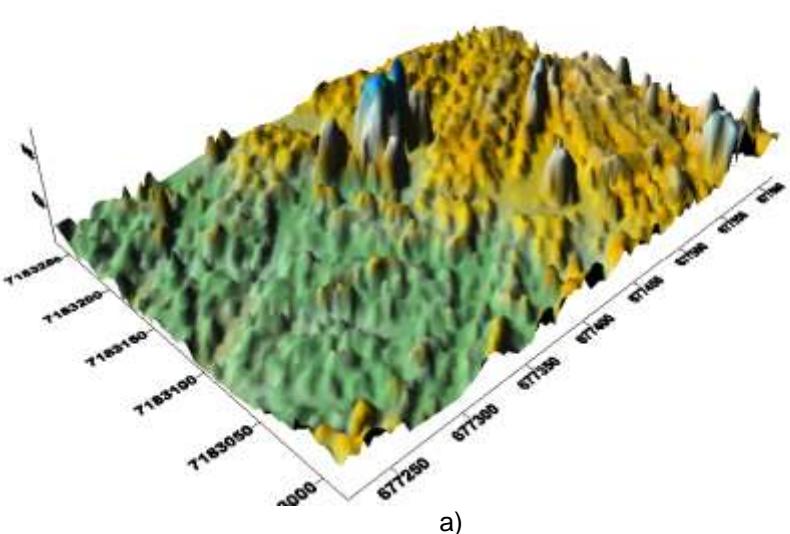


Figura 16 R4: MDS e MDT – Cena Tridimensional

Ao comparar visualmente o MDS e respectivo MDT gerado para cada área de estudos, nota-se que classificação dos pontos *laser* e consequente aquisição dos produtos finais mostram-se visualmente coerentes. Entretanto, para pontuar essas impressões de forma numérica, as próximas secções contemplam uma comparação estatística entre os produtos gerados pelos métodos descritos neste trabalho e o MDT dessas mesmas regiões obtido a partir do software *TerraScan 2.0*, gerados e fornecidos pelo LACTEC da Universidade Federal do Paraná.

4.1.1.1 Análise Quantitativa (diferença entre os produtos gerados e os de referência)

A análise quantitativa, que no contexto apresentado contempla os apontamentos numéricos que caracterizam a validação do desempenho quali-quantitativo das aplicações propostas, deu-se pela subtração entre o melhor MDT gerado para cada região de aplicação dos experimentos e o MDT gerado pelo *TerraScan 2.0*. Essa subtração foi possível a partir da definição de uma grade regular que possibilitou a interpolação pelo método *Krigger* no software *Surffer 8.0*.

As variáveis de estimativas consideradas para mensuração numérica compreendem a: Menor diferença, Maior diferença, Média ponderada e, principalmente, o Desvio padrão.

A variável “Menor diferença” caracteriza a maior proximidade entre o MDT gerado e a superfície de referência. Por sua vez, a variável “Maior diferença” caracteriza o maior distanciamento entre o MDT gerado e a superfície de referência.

É importante mencionar que as discrepâncias apontadas por ambas variáveis representam picos (notória incoerência classificatória) positivos e negativos, cujas especificidades são pormenorizadas e discutidas no item 4.2 (Apontamento de discrepâncias) deste capítulo. Tal opção deve-se em virtude semelhança entre as “causas” de tais picos que, embora digam respeito a objetos distintos, representam situações essencialmente sinônimas.

A variável “Média” indica o comportamento classificatório médio, ou seja,

comportamento ao longo do processo de filtragem e classificação em cada experimento. Por fim, e com maior relevância, a variável “Desvio padrão” aponta o quanto essa superfície se desvia da superfície de referência, notando se os valores observados satisfazem o limite de tolerância do equipamento.

A tabela 2 a seguir apresenta os valores das diferenças resultantes da subtração entre o MDT/Gerado e o MDT/Referência:

Tabela 2 - Resíduos da diferença entre grades (MDT/TERRASCAN - MDT/BLOCO MÍNIMO) em metros

Áreas de Estudos	R1	R2	R3	R4
Pontos Ver.	34197	48472	8778	52633
(<) Diferença	-0.68	-2.31	-0.31	-0.48
(>) Diferença	0.58	2.82	7.12	3.02
Média	-0.02	-0.00	0.12	0.18
Desvio Padrão	0.06	0.23	0.35	0.48

a) **R1:** A tabela 2 aponta que, para a região do LAGE, as diferenças residuais foram ínfimas e as discrepâncias que caracterizam o afastamento entre a superfície gerada e a superfície de referência são consideradas bem abaixo do limiar de tolerância altimétrica do equipamento, que é de 0.20m. A menor diferença corresponde ao valor de -0,68m, sendo esta bastante próxima à superfície de verificação, assim como a maior diferença pontuada em 0,58m também não representa um afastamento demasiadamente incomum tomando como base a tolerância do equipamento. A média de -0,02m e o desvio padrão de 0,06m estão bem abaixo do limite de tolerância de precisão do equipamento (0,20m), o que caracteriza o método do bloco mínimo como adequado para a classificação em regiões de relevo contínuo e composto por feições homogêneas. O números sustentam o desempenho notoriamente satisfatório nessa área de estudo. O efeito visual desses apontamentos podem ser observado na figura 17 a seguir:

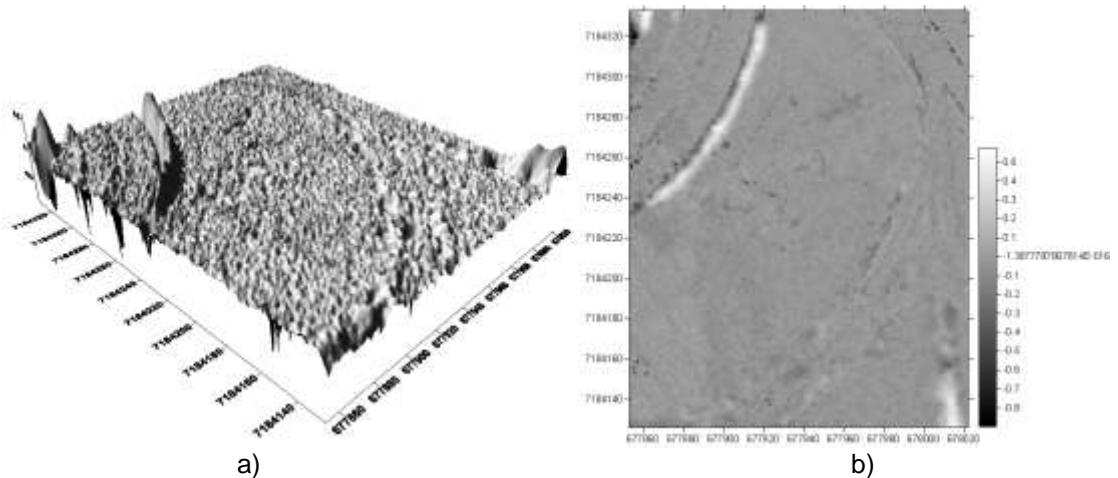


Figura 17 - R1: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo método do Bloco Mínimo (Diferença tridimensional e bidimensional)

b) **R2:** Para essa região onde encontram-se as quadras esportivas do Centro Politécnico, a classificação apresentou de um modo geral, um desempenho também satisfatório, embora os números não sejam tão baixos quanto os encontrados para R1. Houve coerência entre o produto gerado e a observação visual e em campo para a maior parte da área de estudos. Contudo, a menor diferença pontuada em -2.31m e a maior diferença em 2.82m ficaram acima de 2.00m e remetem a um relevante afastamento entre as superfícies comparadas. A média estimada é nula, o que indica o alto grau de similaridade entre as duas grades. O desvio padrão encontrado em 0.22m está acima do limite de tolerância do equipamento, apontando assim, o desempenho limitado do método nessa região. Os picos de variação dos resultados incidem sobre o relevo acidentado presente nessa região e também nos locais com a presença de árvores de folhagem densa e a presença de edificações aglomeradas. Esses picos podem ser observados na figura 18 a seguir:

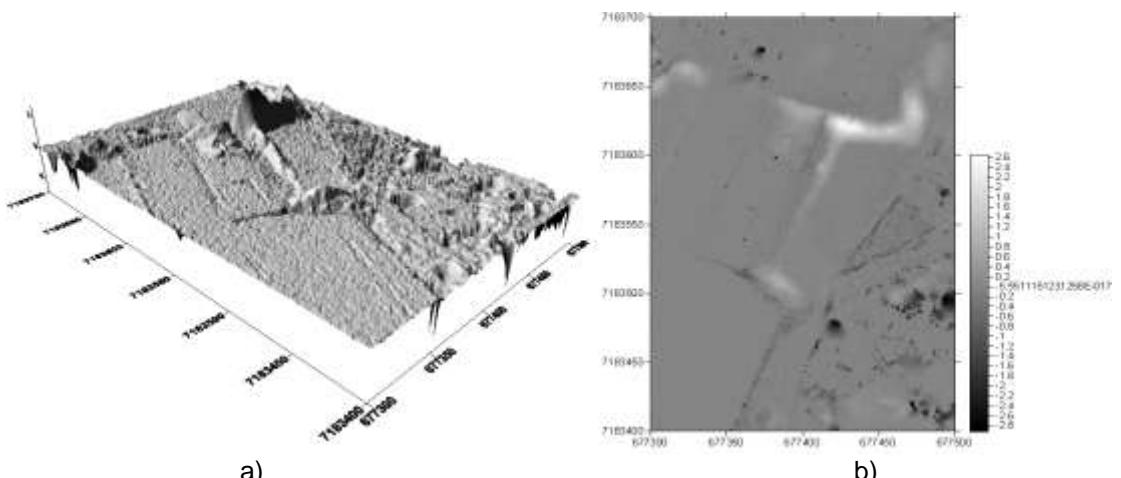


Figura 18 - R2: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo método do Bloco Mínimo (Diferença tridimensional e bidimensional)

c) **R3:** Encontra nessa região, o bosque nas mediações do curso de engenharia florestal do Centro Politécnico. Trata-se de uma área de vegetação densa caracterizada pela pouca incidência de pontos *laser* na superfície do solo. Aqui, as discrepâncias que caracterizam o afastamento da superfície de verificação indicam o baixo desempenho classificatório do método em regiões de floresta, reiterando resultados anteriores a esta pesquisa. A menor diferença de -0.31m e a maior de 7.12m retratam uma maior e mais elevada incidência de picos do que as encontradas nas demais regiões onde os experimentos foram realizados. A média encontrada de 0.12m, ou seja, próxima de zero, porém o desvio padrão de 0.35m é alto e não assegura a viabilidade de uso do método em regiões similares a em questão, conforme nota-se na ilustração 19 a seguir:

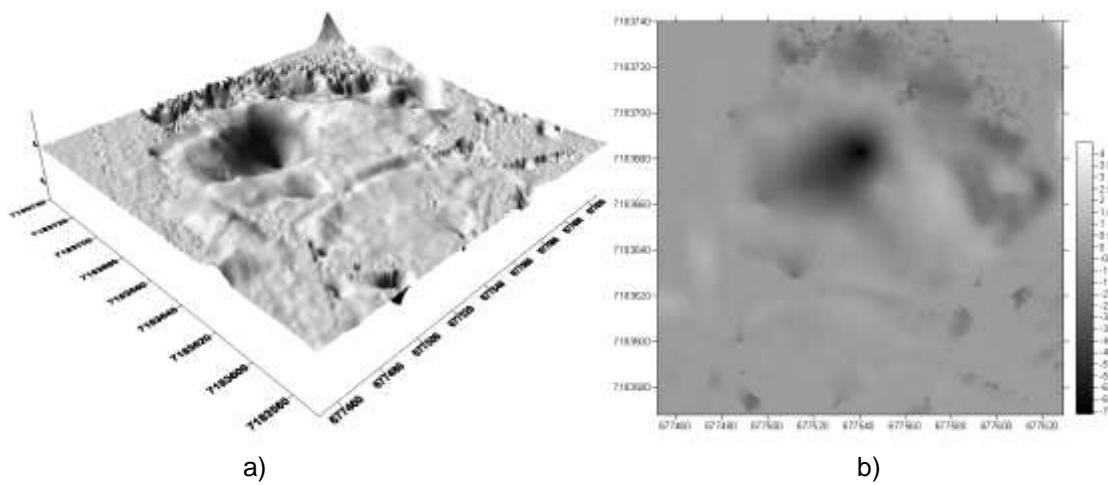


Figura 19 - R3: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo método do Bloco Mínimo (Diferença tridimensional e bidimensional)

d) **R4:** Nessa região há significativa concentração de edificações e a manifestação de árvores e arbustos de porte médio a grande que, assim como na região anterior (R3), impossibilitam que pulsos *laser* atinjam o solo. O desempenho do método do bloco mínimo nessa região também se mostrou relativamente limitado em relação ao desempenho do mesmo nas demais regiões, em especial a R1 e R2. Os números apontam a menor diferença de -0,48m e maior de 3,02m, indicando representativos picos de afastamento entre as superfícies. A média de 0,18m pode ser considerada satisfatória, uma vez que reafirma o comportamento linear que o método do bloco mínimo apresentou nas quatro regiões de estudos. Contudo, o desvio padrão de 0,48m encontrado está acima do limite desejável. Vale salientar que a região de estudos é caracterizada por um relevo plano e heterogeneidade de feições naturais e artificiais. Na figura 20 a seguir pode ser percebidas as diferenças

entre as grades produzida e referencial:

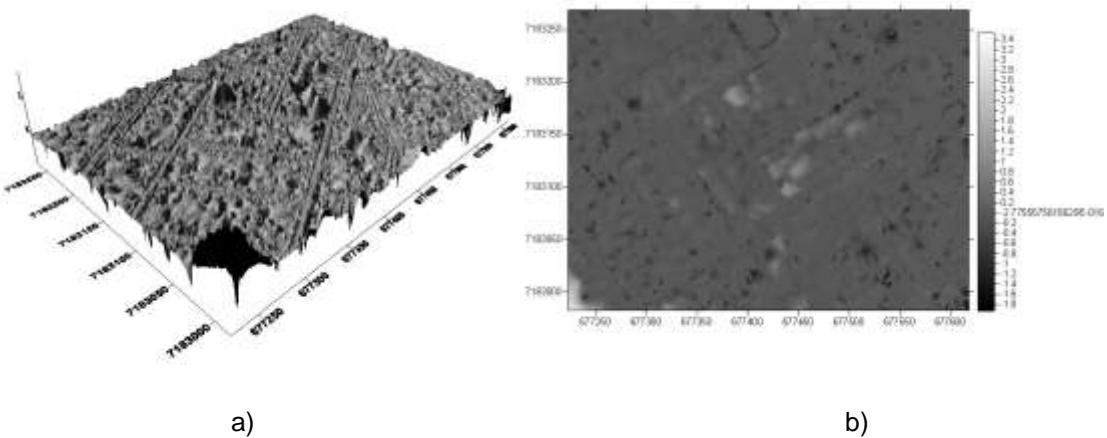


Figura 20 - R4: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo método do Bloco Mínimo (Diferença tridimensional e bidimensional)

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método do bloco mínimo nas quatro regiões de estudos indicam um desempenho linear e coerente em se tratando do comportamento classificatório do filtro. Tal fato pode ser notado ao observar atentamente as ilustrações dispostas ao longo dessa secção.

4.1.2 Aplicação do Método da Declividade

A filtragem e classificação pelo método descrito nesta secção, ou seja, o método da declividade implementado com janela móvel de busca por mínimos locais obteve os melhores resultados a partir dos parâmetros apresentados na tabela 3, a seguir:

Tabela 3 - Parâmetros para classificação de pontos pelo método da declividade

Regiões de Estudo	Grade (em metros)	Tol. Altimétrica (em metros)	Tol. de Declividade (em metros)
R1: LAGE	13x13	0.80	35
R2: Quadras Esportivas	30x30	2.90	19
R3: Bosque	25x25	0.80	35
R4: Residencial	24x24	0.50	19

Os parâmetros informados na tabela 3 visaram atender pontualmente as áreas cujo relevo é demasiadamente acidentado - como os encontrados na R1 e R2. A partir dessas definições foram obtidos os resultados ilustrados na figura 21, a

seguir:

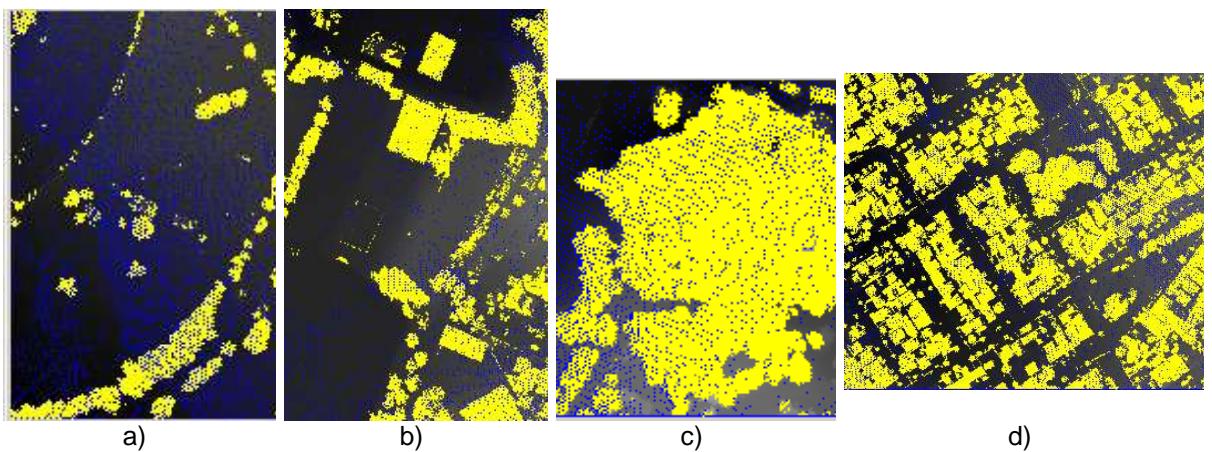
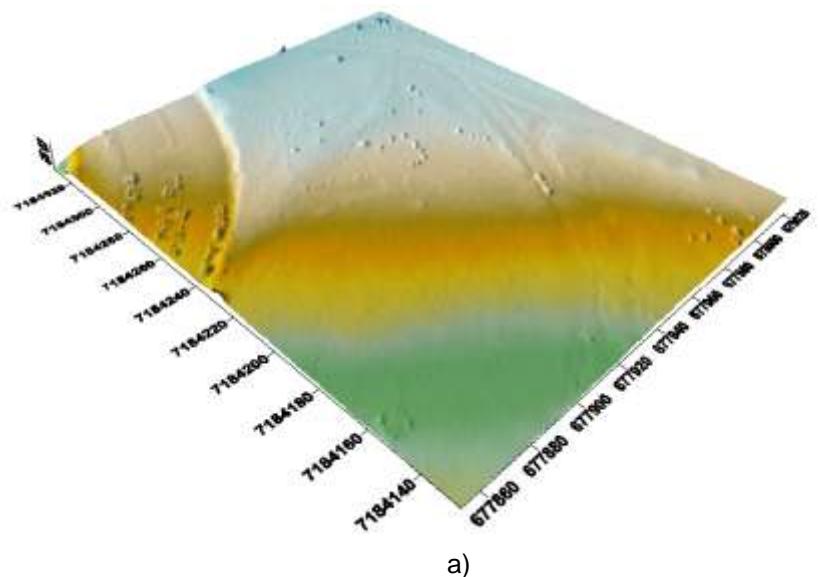
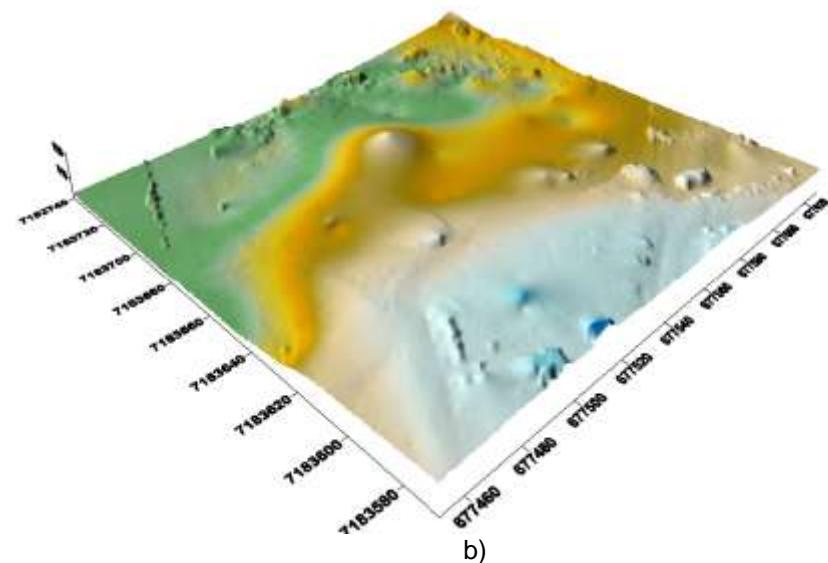


Figura 21 - Classificação pelo Método da Declividade

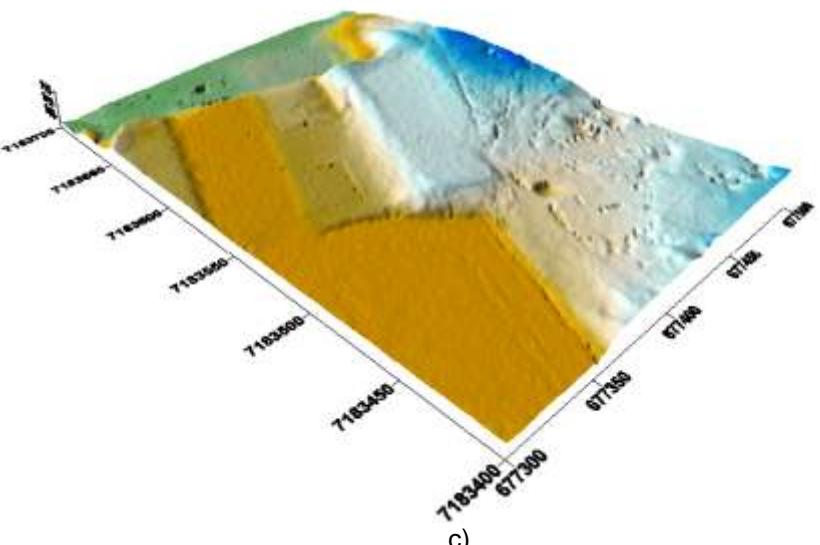
A figura 22 a seguir ilustra em cena tridimensional, os MDT's gerados para a região de aplicação dos experimentos:



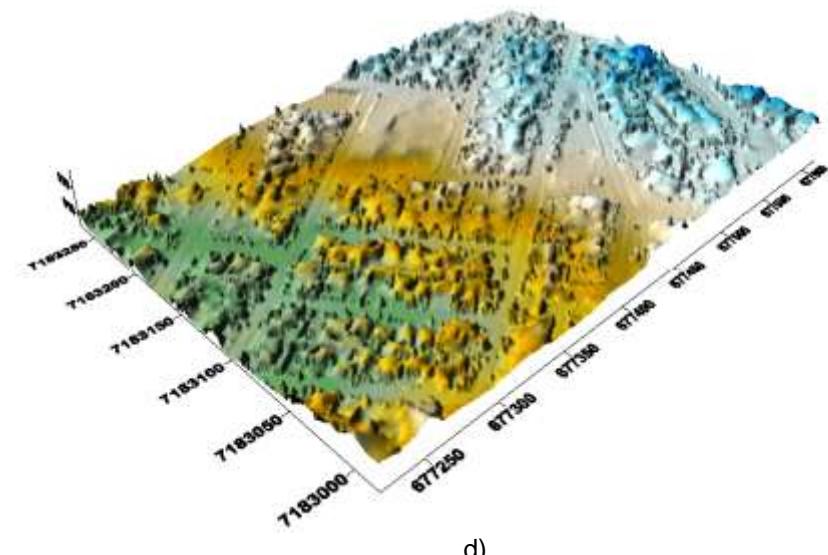
a)



b



c)



d

Figura 22 – MDT’s obtidos com a aplicação do Método da Declividade

4.1.2.1 Analise Comparativa

A subtração de grades entre os produtos gerados e o MDT referência (TERRASCAN) apresentou os resultados apresentados na tabela 4:

Tabela 4 – Resíduos da diferença entre grades (MDT-TERRASCAN – MDT-DECLIVIDADE) em metros:

Áreas de Estudos	R1	R2	R3	R4
Pontos Ver.	26543	40448	8778	62523
(<) Diferença	-0.64	-0.45	-0.31	-0.39
(>) Diferença	2.42	2.66	7.12	6.08
Média	0.02	0.07	0.12	0.60
Desvio Padrão	0.12	0.20	0.35	1.10

a) **R1:** Conforme pode ser observado na tabela 4, a aplicação do método da declividade nessa região de estudo produziu resultados similares aos obtidos com a aplicação do método do bloco mínimo. Os números apresentam uma pequena redução de valores em relação ao método anterior e se mantiveram bem abaixo do limite de tolerância altimétrica permitido pelo equipamento. Quanto ao afastamento entre a superfície gerada e a de verificação, a menor diferença encontrada de -0.64m e a maior de 2.42m indicam a oscilação de desempenho do filtro, cujas discrepâncias não afetaram de forma relevante o comportamento classificatório médio encontrado em 0.02m. O desvio padrão encontrado corresponde a 0.12m, valor esse que caracteriza como satisfatório o produto gerado para região de aplicação. Observar figura 23, a seguir:

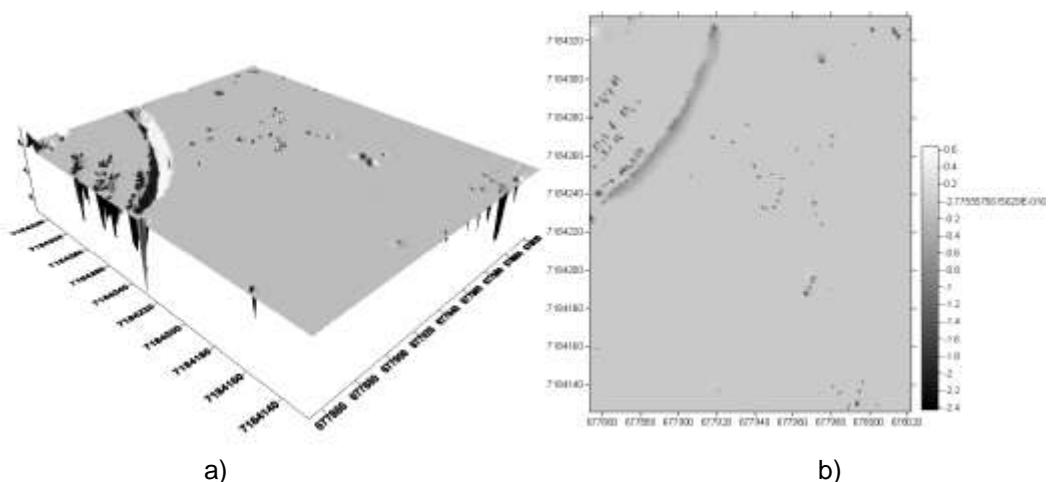


Figura 23 - R1: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método da Declividade (Diferença tridimensional e bidimensional)

b) **R2:** Para essa região de estudos, que apresenta relevo acidentado no qual se espera que o método da declividade apresente melhor desempenho pontualmente onde há indícios de acente/declive acentuado, as discrepâncias apontando o afastamento entre as superfícies gerada e de referência indicam, ainda que de forma sutil, o atendimento às expectativas geradas, uma vez que as discrepâncias foram reduzidas. A menor diferença encontrada corresponde a -0.45m e maior 2.66m. A média de 0.07 evidencia um comportamento classificatório linear e o desvio padrão de 0.20m caracteriza o processo de classificação como adequado para essa região, conforme pode ser observado da figura 24, a seguir:

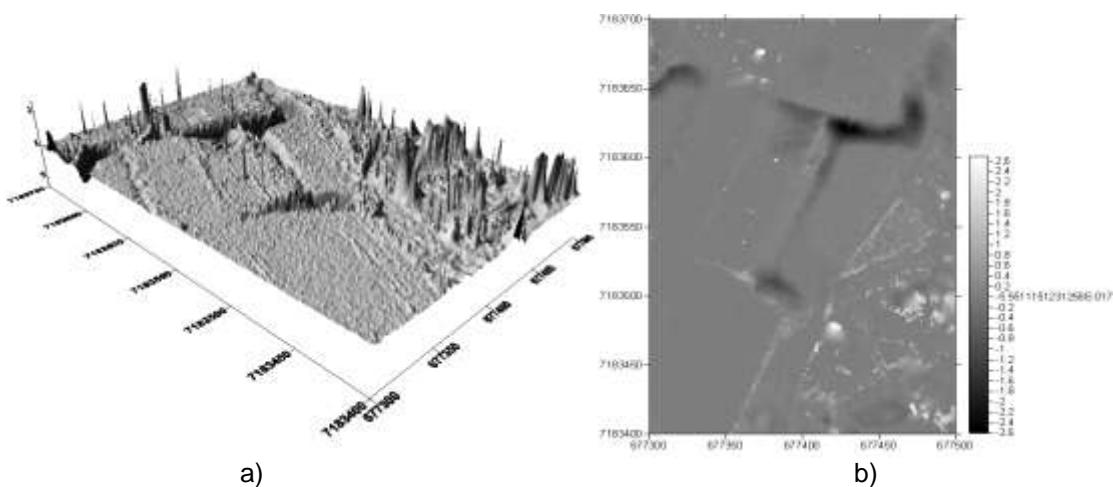
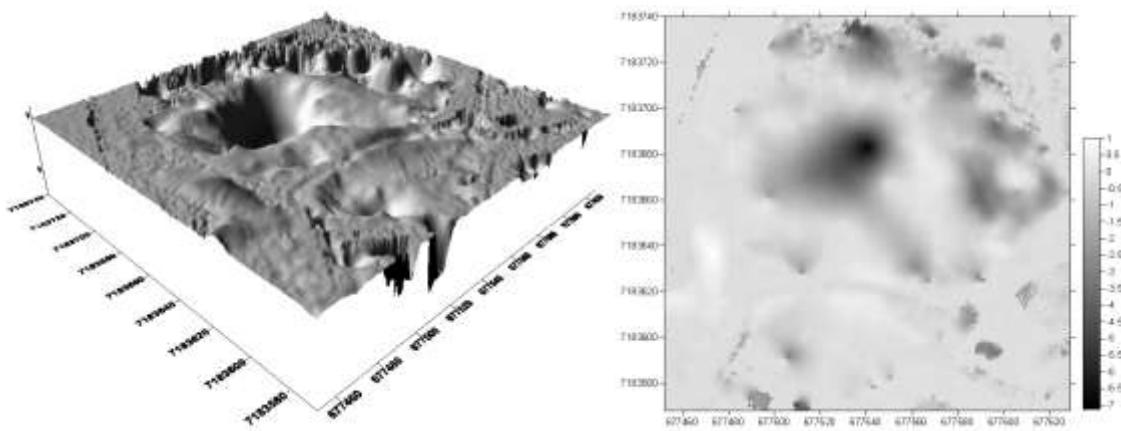


Figura 24 - R2: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método da Declividade (Diferença tridimensional e bidimensional)

c) **R3:** O desempenho do método da declividade nessa região não apresentou variação alguma em relação a aplicação do método do bloco mínimo descrito na seção anterior. As discrepâncias foram encontradas em: menor diferença de -0,31m, maior diferença de 7,12m, média de 0,12m e desvio padrão de 0,35m. A dificuldade encontrada aqui é, assim como na aplicação dos demais filtros, a baixa densidade de pontos *laser* em regiões de floresta. Desse modo, o resultado obtido para a região do bosque não é o ideal, mas representa, em questões numéricas, um desempenho classificatório equivalente aos demais filtros discutidos nesta pesquisa e também o implementado pelo software *TessaScan 2.0*. A figura 25 a seguir, ilustra os resultados da aplicação:

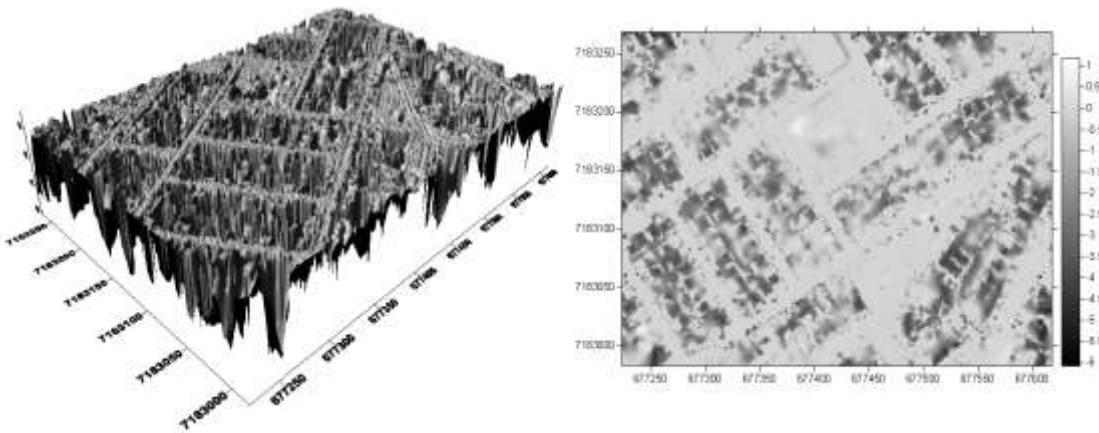


a)

b)

Figura 25 - R3: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método da Declividade (Diferença tridimensional e bidimensional)

d) **R4:** As premissas decisórias implementadas no método da declividade (parâmetros de tolerâncias voltadas para aclives/declives) não contemplam a heterogeneidade de feições naturais e executadas pelo homem que caracterizam essa região. Desse modo, não estimava-se que os resultados dessa aplicação na região em questão proporcionassem ao método um desempenho acima do filtro anteriormente discutido. Contudo, os números apresentaram um significativo aumento nos valores das variáveis adotadas. A média de 0.60m e o desvio padrão de 1.10m, refletem uma considerável diferença residual entre o produto gerado para essa região e a superfície de verificação. Esses números refletem os picos apontados pela menor e maior diferença de -0.39m e 6.08m, respectivamente. A figura 26 a seguir ilustra visualmente o baixo desempenho do comportamento classificatório do filtro nessa região.



a)

b)

Figura 26 - R4: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método da Declividade (Diferença tridimensional e bidimensional)

Os resultados expostos nessa secção permitem afirmar que as pretensões almejadas para a filtragem e classificação em regiões de relevo acentuado foram de certa forma atendidas, ainda que de maneira sutil.

Uma cuidadosa observação aos resultados apresentados e discutidos, destaca a dificuldade em se classificar pontos LIDAR em regiões de variação brusca de relevo.

Constatou-se ainda, que para as regiões em que a baixa incidência de pontos na superfície do solo, em decorrência da presença de vegetação densa e concentração de edificações, o fator declividade, variável condicional determinante pela qual o método tratado nessa secção foi implementado, é praticamente ignorado.

4.1.3 Aplicação do Método Integrado

Os resultados inerentes aos experimentos com a aplicação do método integrado visam apontar um melhor desempenho do processo de filtragem e classificação de dados *laser*, em especial nas regiões de áreas planas de formação homogênea e heterogênea. Nessa, embora a aplicação dos métodos do bloco mínimo e método da declividade ofereceram resultados satisfatoriamente relevantes, espera-se que esses sejam melhorados, quando se considera num mesmo processo classificatório, a altura e a declividade dos pontos LIDAR.

Partindo da premissa descrita no parágrafo anterior, os parâmetros estabelecidos e utilizados para a definição das janelas de análise e limites condicionais são apresentados na tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Parâmetros para classificação de pontos pelo método integrado

Regiões de Estudo	Grade (Em m ²)	Tolerância Altimétrica (H)	Tol. Declividade (em m)
Área 1: LAGE	13x13	0.80	35
Área 2: Quadras Esportivas	30x30	2.90	19
Área 3: Bosque	25x25	0.80	35
Área 4: Residencial	24x24	0.50	19

A partir desses parâmetros, os produtos da filtragem e classificação

corresponde às ilustrações da figura 25 a seguir:

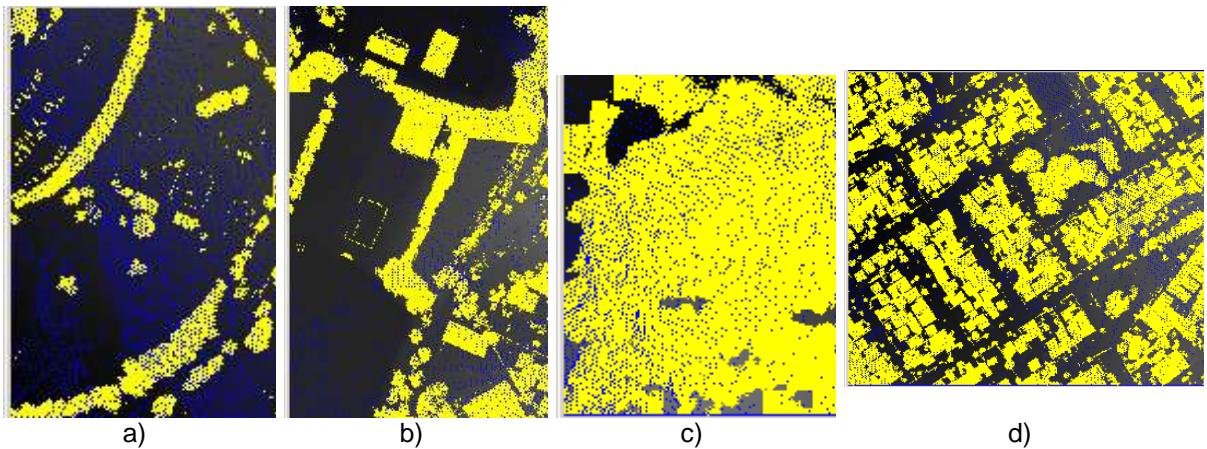
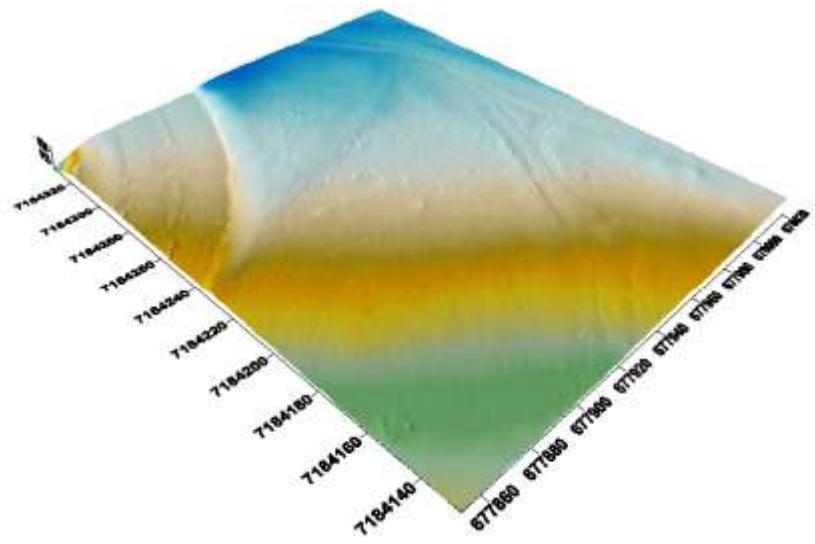
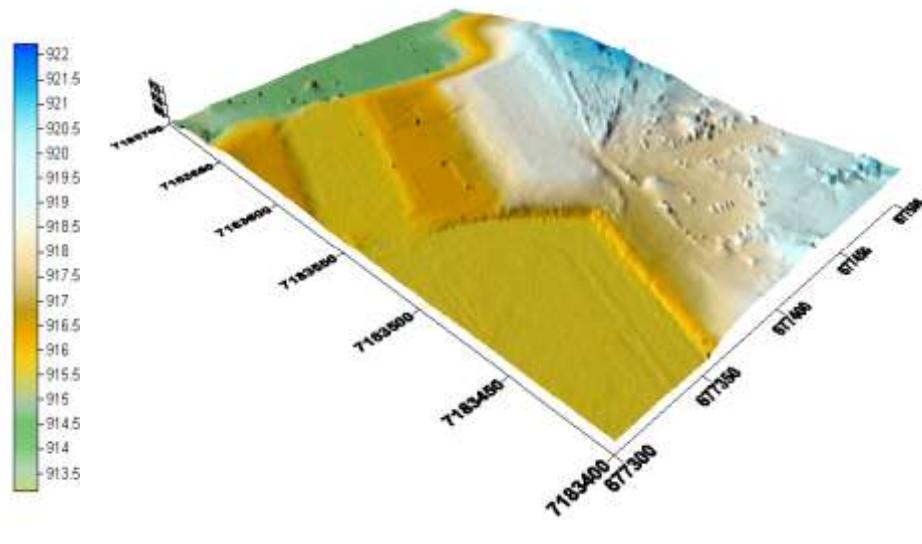


Figura 27 - Classificação pelo Método Integrado

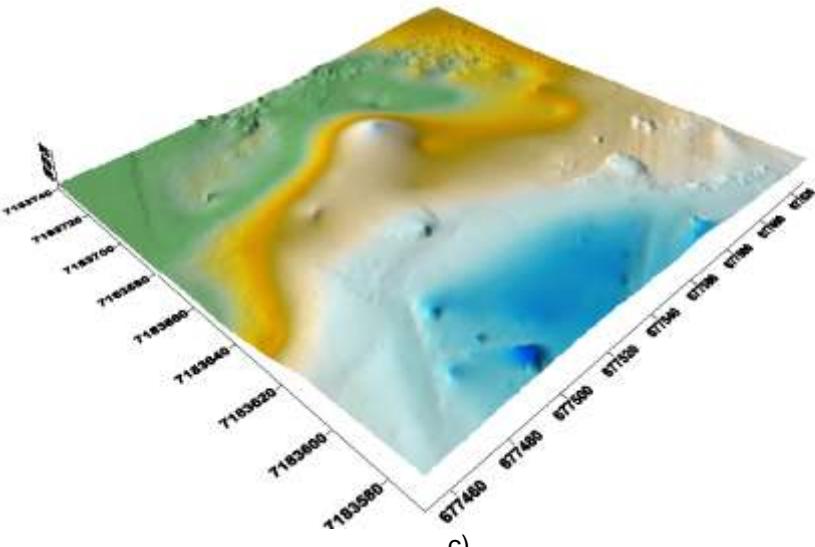
Para melhor avaliação visual dos MDT's gerados, são apresentadas na figura 28 a seguir, as ilustrações em cena tridimensional:



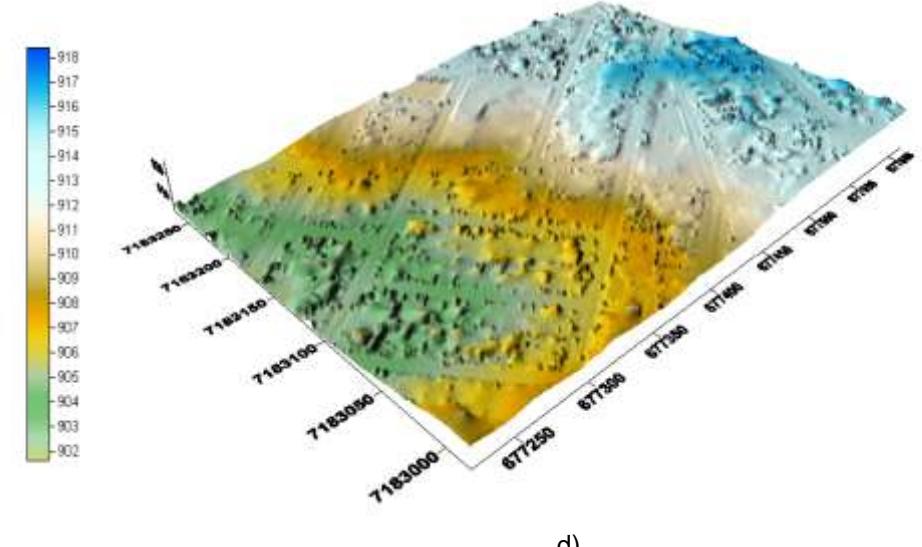
a)



b]



c)



10

Figura 28 – MDT’s obtidos com a Aplicação do Método Integrado

4.1.3.1 Análise Comparativa

A subtração de grades entre os produtos gerados e o MDT referência (*TerraScan 2.0*) apontou para os resíduos apresentados na tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Resíduos da diferença entre grades (MDT-TERRASCAN – MDT-INTEGRADO) em metros

Áreas de Estudo	R1	R2	R3	R4
Pontos Ver.	25615	40139	8653	52308
(<) Diferença	0.00	-0.45	-0.31	-0.39
(>) Diferença	0.00	2.66	7.12	2.90
Média	0.00	0.07	0.11	0.17
Desvio Padrão	0.00	0.20	0.30	0.46

a) **R1:** O desempenho da classificação a partir do método integrado proposto é, como pode ser observado na tabela a acima, plenamente satisfatório, pois não há diferença residual entre a superfície gerada a de referência, conforme pode ser constatado também na figura 29 a seguir:

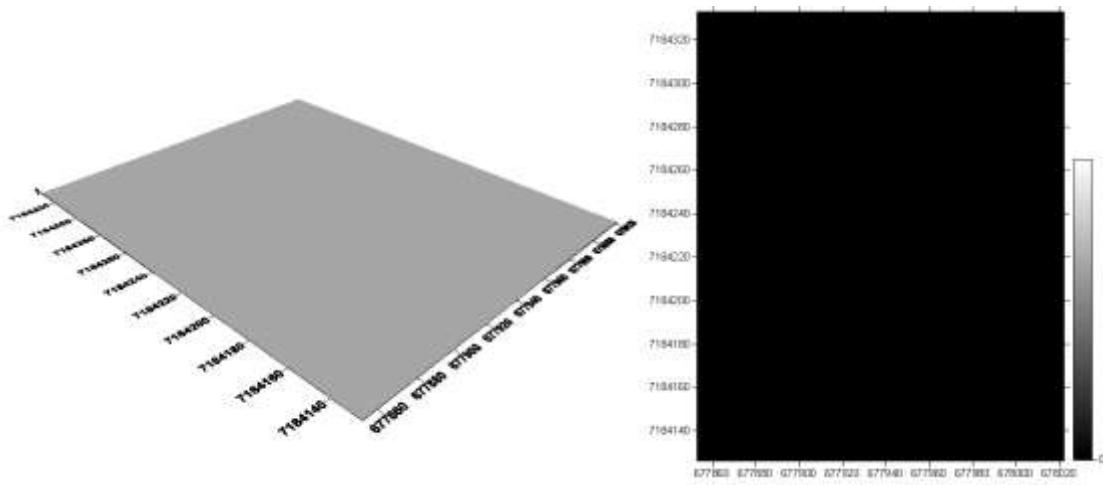


Figura 29 – R1: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Integrado

b) **R2:** Nessa região a classificação de pontos foi bem sucedida e proporcionou resultados visuais e numéricos notoriamente satisfatórios. As diferenças que caracterizam as discrepâncias entre as superfícies comparadas ficaram em -0.45m para o menor e 2.66m para o maior afastamento da superfície de verificação. A média de 0.07m e o desvio padrão de 0.20m encontrados proporcionaram para essa região, dentre os demais métodos discutidos até então, o melhor desempenho classificatório estando os indicares numericamente dentro do limite altimétrico do equipamento (0.20m). A figura 30 a seguir ilustra em cenas tridimensionais e

bidimensionais o resultado da subtração:

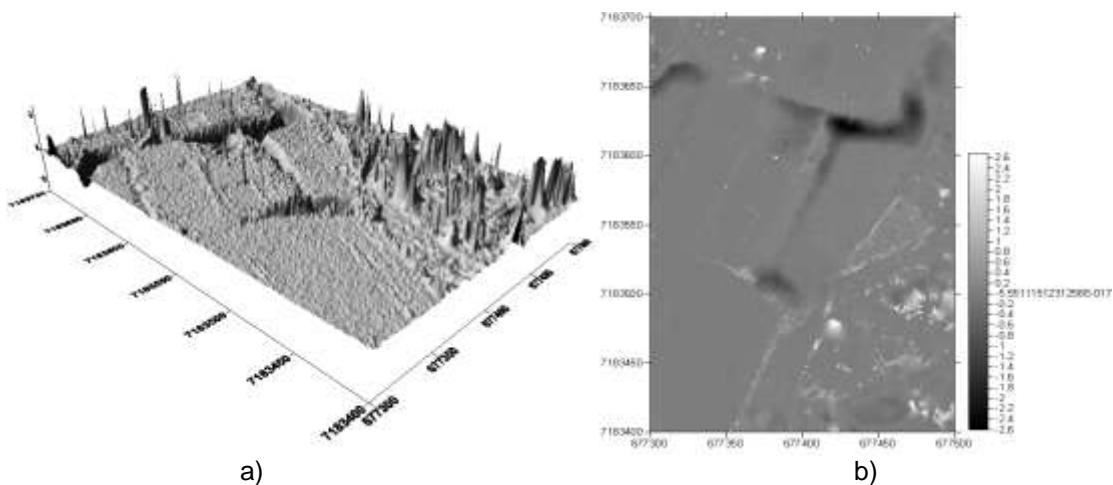


Figura 30 – R2: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Integrado (Diferença tridimensional e bidimensional)

c) **R3:** Os números apresentados na tabela 6 apontam para essa região, o desvio padrão de 0.306m e média de 0.11m. O desvio padrão em especial representa um desempenho classificatório não satisfatório em relação ao limite de tolerância altimétrico tolerável. Contudo, como discutido e ressaltado nos resultados anteriores a este, a filtragem e classificação em áreas de floresta como essa é reconhecidamente problemática em função da baixa incidência de pontos laser sobre a superfície do solo. Todavia, destaca-se o fato de que a aplicação do método integrado proposto representa o melhor desempenho para uma região de floresta, dentre os quatro métodos tratados nessa pesquisa. Ao observar a figura 31 ilustra visualmente a qualidade dos números apresentados.

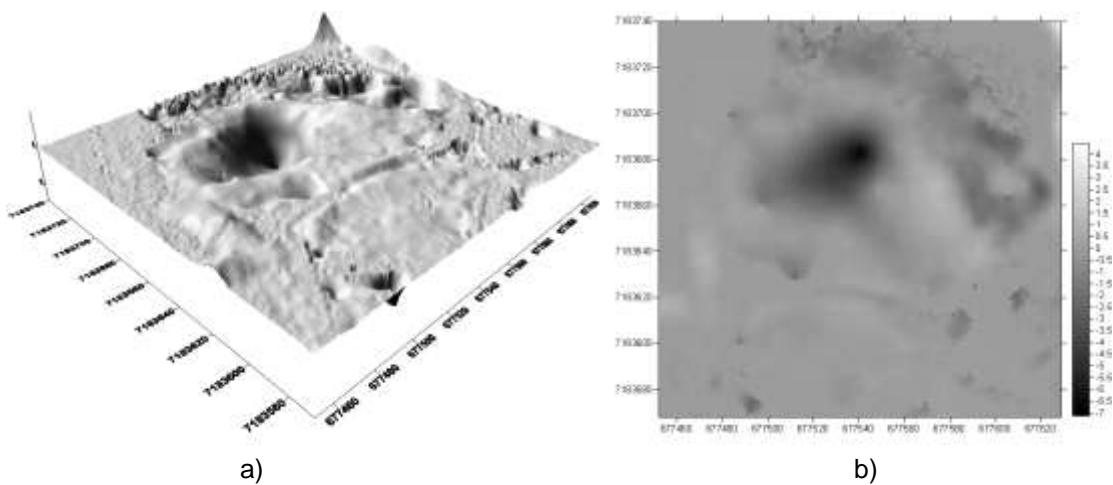


Figura 31 – R3: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Integrado (Diferença tridimensional e bidimensional)

d) **R4:** O produto gerado para essa região de estudos apresentou, de forma discreta, uma melhora nos indicadores de avaliação quantitativa. O desvio padrão encontrado corresponde a 0.46m e a média de 0.17m. Os picos de distanciamento entre as superfícies estão estimados em -0.39m para o menor afastamento e 2.90m para a maior distância, cujos aspectos visuais desses indicadores constituem produtos mais coerentes com a realidade constatada em campo. (Figura 32)

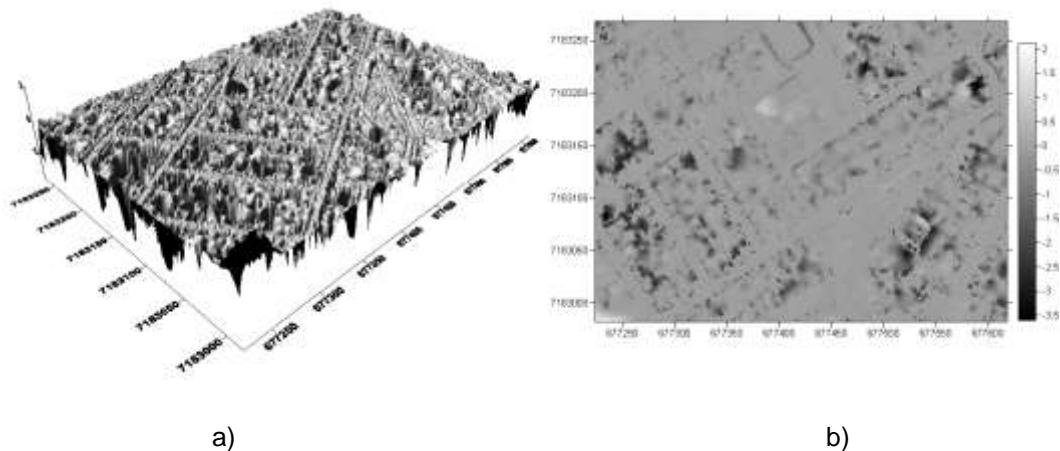


Figura 32 – R4: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Integrado (Diferença tridimensional e bidimensional)

Os apontamentos numéricos e a observação atenta às ilustrações apresentadas no decorrer dessa secção permitem afirmar que o método integrado apresentou destacada eficácia na classificação em regiões planas e homogêneas, atenuando de forma significativa pequenos problemas relacionados à classificação de pontos LIDAR nessas áreas. Nota-se, também, uma sutil evolução no tratamento de áreas accidentadas como a R2 e o discreto favorecimento em regiões de baixa densidade de pontos como a R3. O método apresentou ainda uma estabilidade classificatória em áreas heterogêneas (vegetação e concentração de edificações) como a R4.

4.1.4 Aplicação do Método Morfológico

As ilustrações disposta ao longo desta secção representam visualmente o MDT gerado para cada uma das quatro regiões de estudo e aplicação dos experimentos com o filtro morfológico, cujos parâmetros que promoveram os melhores resultados no processo classificatório são apresentados na tabela 7 a

seguir:

Tabela 7 – Parâmetros para classificação de pontos pelo método morfológico

Regiões de Estudo	Grade (Em m)	Tolerância Altimétrica (H)
Área 1: LAGE	13x13	0.80
Área 2: Quadras Esportivas	30x30	2.90
Área 3: Bosque	25x25	0.80
Área 4: Residencial	24x24	0.50

A partir desses parâmetros, os produtos da filtragem e classificação corresponde às ilustrações dispostas na figura 33 a seguir:

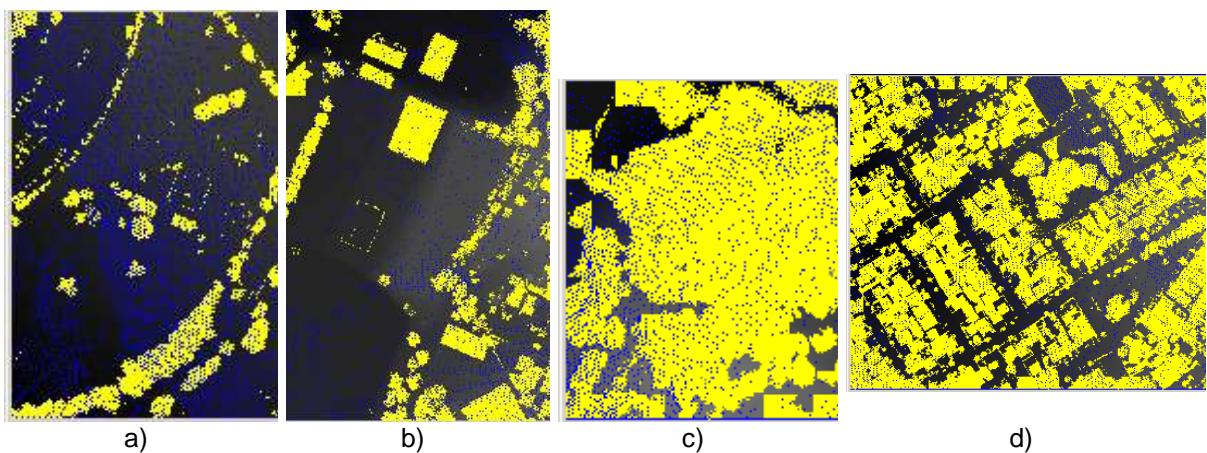
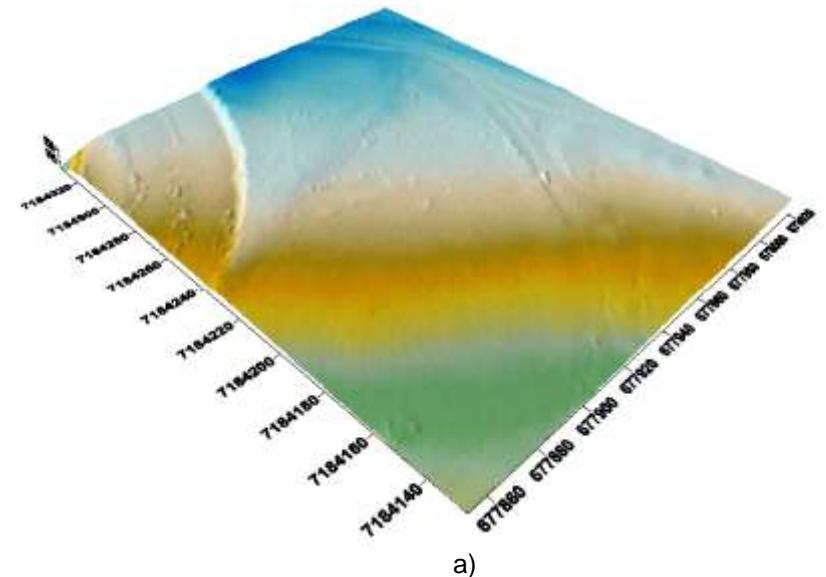
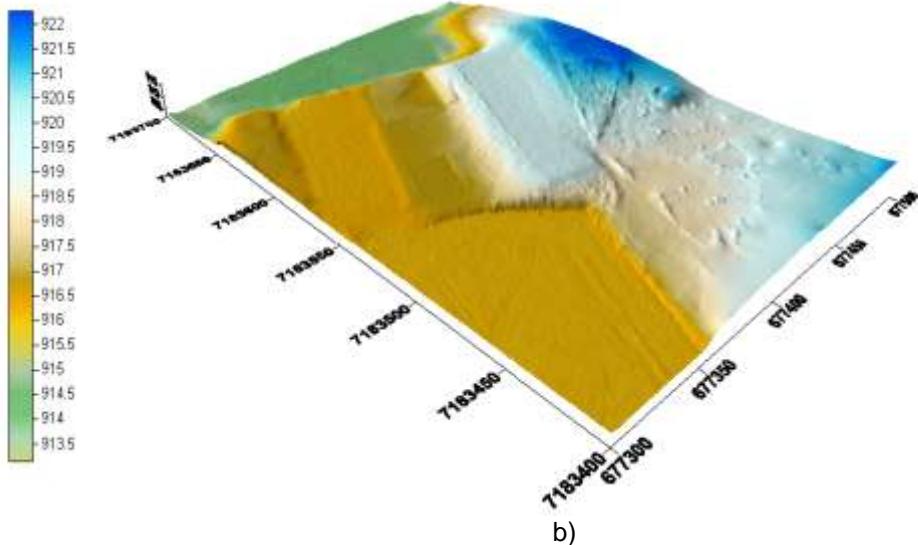


Figura 33 – Classificação pelo Método Morfológico

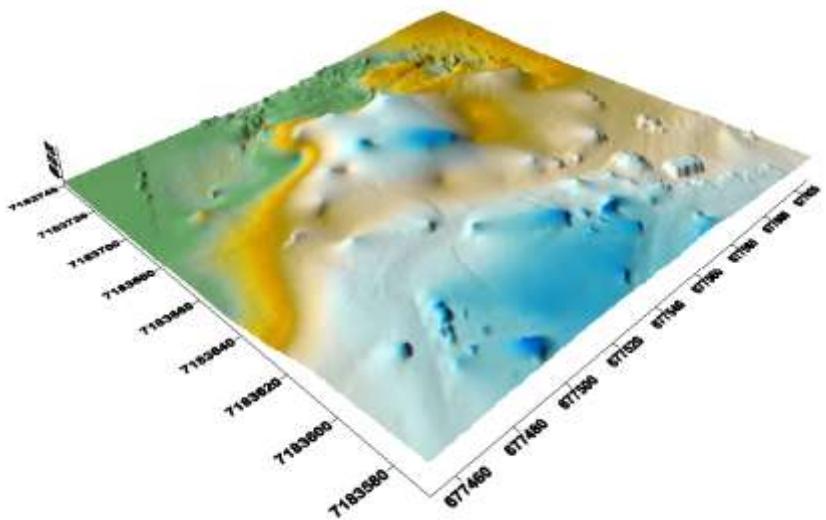
Para a avaliação visual dos MDT's gerados, são apresentadas na figura 34 a seguir, as ilustrações em cena tridimensional a comparação entre as grades:



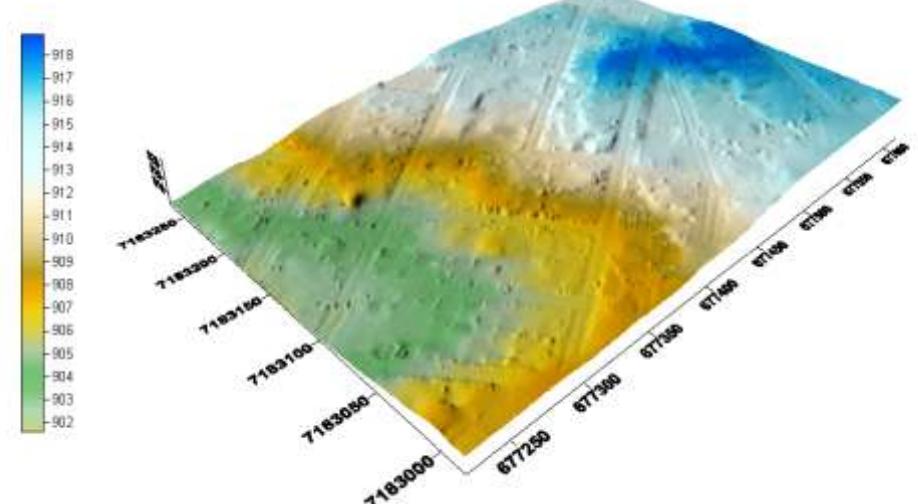
a)



b)



c)



d)

Figura 34 – MDT's obtidos com a Aplicação do Método Morfológico

4.1.4.1 Análise Comparativa

Tabela 8 - Resíduos da diferença entre grades (MDT-TERRASCAN – MDT-MORFOLÓGICO) em metros:

Área de Estudos	R1	R2	R3	R4
Pontos Ver.	26419	39796	9307	46880
(<) Diferença	-0.31	-0.45	-0.31	-0.39
(>) Diferença	1.36	3.15	11.77	3.09
Média	0.01	0.06	0.21	0.06
Desvio Padrão	0.07	0.14	0.69	0.15

a) **R1:** Os experimentos realizados nessa região de aplicação dos testes não apresentaram resultados aquém da variação dos obtidos com a aplicação dos métodos anteriores. O desvio padrão em 0.074m e a média em 0.10m apontam para uma regularidade no comportamento classificatório e estão semelhantemente dentro do limite de tolerância do equipamento. Os valores que indicam o afastamento das superfícies comparadas, a menor de -0.31m e a maior de 1.36m diferenças entre os produtos foram, em relação aos métodos anteriores, atenuadas mas dentro de um nível pouco significativo em se tratando de distinções visuais, conforme pode ser observado na figura 35 a seguir:

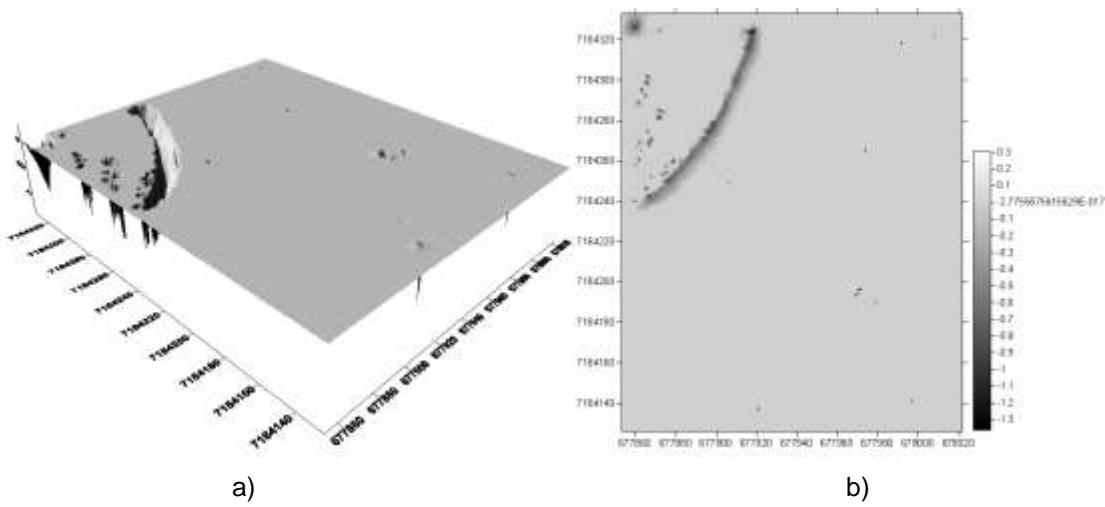


Figura 35 - R1: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo método morfológico

b) **R2:** Nessa região o desempenho do método foi surpreendente, em especial nas áreas de relevo acidentado. Dentre a aplicação dos quatro filtros implementados, este foi o que proporcionou o melhor desempenho classificatório. As discrepâncias que caracterizam o afastamento da superfície de verificação - a maior diferença de 3.15m e a menor em -0.45m - estão ainda acima do limite de tolerância do equipamento, mas foram os mais baixos índices nesse caso. O desvio

padrão de 0,14m e a média de 0,06m apontam para o bom comportamento classificatório. Observar na figura 36 a seguir:

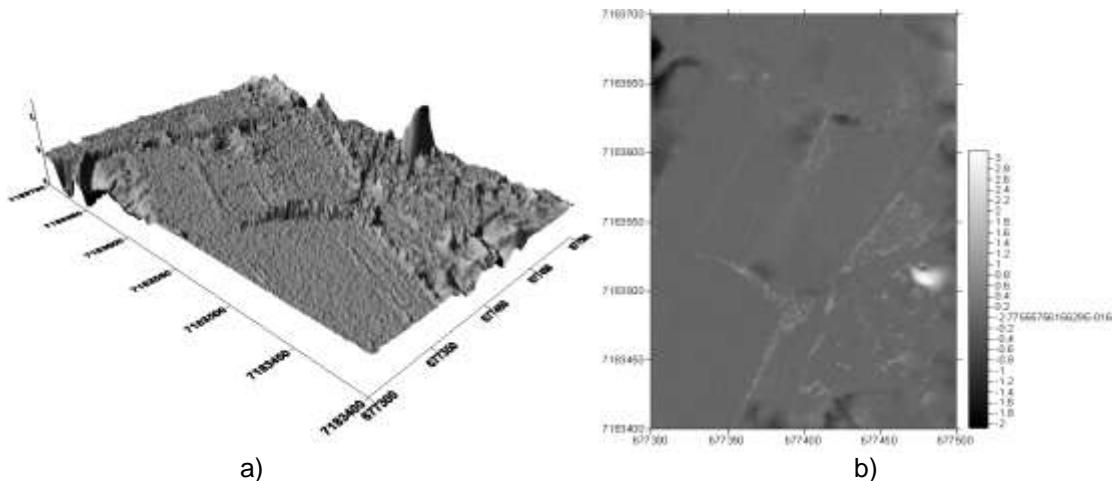


Figura 36 - R2: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Morfológico (Diferença tridimensional e bidimensional)

c) **R3:** Nessa área de estudos, ao contrario do ocorrido na R2 descrito anteriormente, as diferenças residuais ficaram em -0,31m para a menor diferença e 11,77m para a maior, sendo essas discrepâncias insatisfatórias para os fins propostos. A média de 0,21m e o desvio padrão 0,69 apontam que para esse tipo de região (floresta), o método obteve o pior desempenho dentre as demais regiões de aplicação. A observação à figura 37 a seguir, demonstra a baixa qualidade do produto gerado.

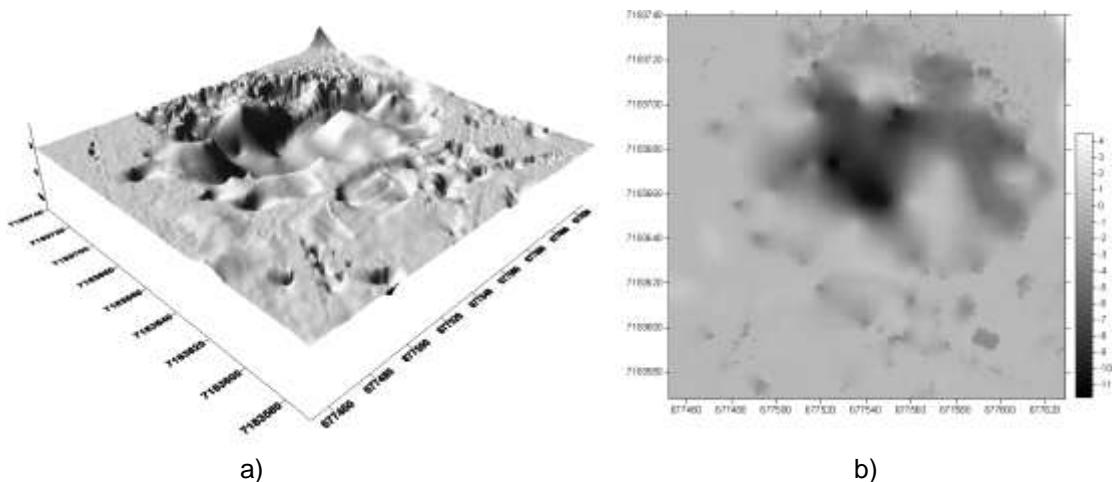


Figura 37 - R3: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Morfológico (Diferença tridimensional e bidimensional)

d) **R4:** O desempenho do método morfológico para essa região, assim como ocorreu na região de estudos 2 (quadras esportivas), apresentou resultados numéricos e visuais de qualidade satisfatória. As discrepâncias entre o produto

gerado e a superfície de referência correspondem a 0,39m e 3,09m para a menor e maior diferença respectivamente, média de 0,06m e desvio padrão fixado em 0,14m, estando esses dois últimos, abaixo do limite de tolerância do equipamento. (Observar figura 66)

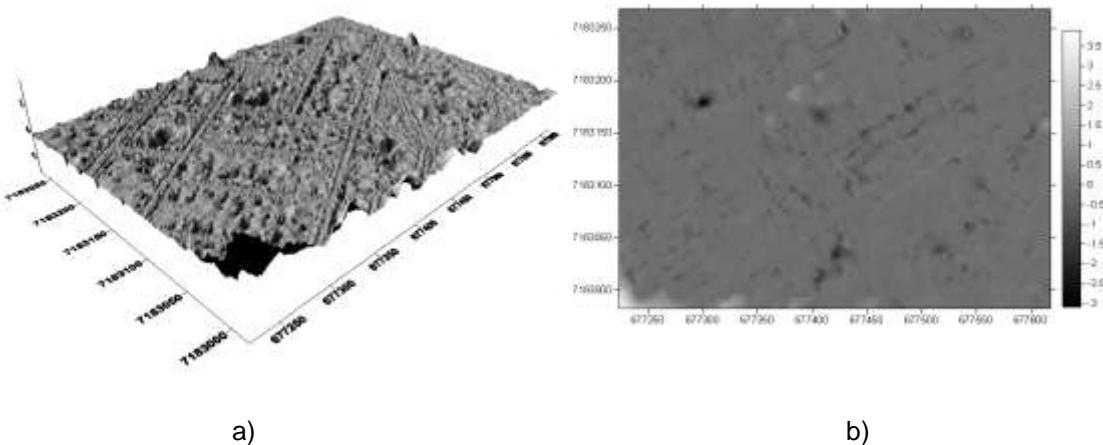


Figura 38 - R4: Subtração do MDT TERRASCAN 2.0 pelo MDT/Gerado pelo Método Morfológico (Diferença tridimensional e bidimensional)

O comportamento classificatório da filtragem morfológica, ou o método morfológico como denominado no decorrer desta pesquisa científica, ofereceu, de um modo geral, os resultados mais representativos dentre os obtidos com a aplicação dos demais métodos implementados.

Exceto para a R3, de composição vegetativa densa, as diferenças residuais oriundas da subtração entre o MDT gerados e o gerado pelo *TerraScan 2.0*, indicaram um comportamento classificatório efetivamente satisfatório, uma vez que os principais indicadores de desempenho (média e desvio padrão) ficaram dentro, e por vezes, bem abaixo do limite de tolerância do equipamento.

4.2 Apontamento de Discrepâncias

Uma atenta observação às figuras apresentadas na seção anterior, permite a identificação da presença constante de pequenas áreas mais escurecidas (sombras) presentes nas ilustrações bidimensionais referentes às subtrações realizadas. Essas “anomalias” correspondem a elementos ou manifestações locais não excluídas nos MDT’s gerados pelos métodos implementados e que não estão presentes nas

representações de verificação obtidas pelo *TerraScan 2.0*.

Nota-se também a manifestação de pequenas regiões bem mais claras que as demais (áreas esbranquiçadas). Essas, por sua vez, indicam pontos LIDAR que foram excluídos pelos métodos implementados neste trabalho e que estão presentes na superfície de verificação.

Para ambas as ocorrências, seja a manifestação de áreas bem mais escuras (pontos não excluídos) ou a constituição de zonas esbranquiçadas (pontos excluídos equivocadamente), as razões podem variar caso a caso.

Nessas situações, tornou-se conveniente a verificação “*in loco*” nas regiões em que o acesso a essas fosse possível - o que nem sempre viável, como em ambientes de mata densa e regiões montanhosas -, para averiguação de campo, onde foram constatadas as situações descritas nos parágrafos seguintes.

Em se tratando das regiões mais esbranquiçadas circuladas em amarelo na figura 39 (visualização bidimensional da região do LAGE), a explicação dá-se em virtude do acente/declive local, cuja variação de relevo o método do bloco mínimo, nesse caso, apresentou uma deficiência classificatória por não se comportar bem em áreas de variação de relevo.

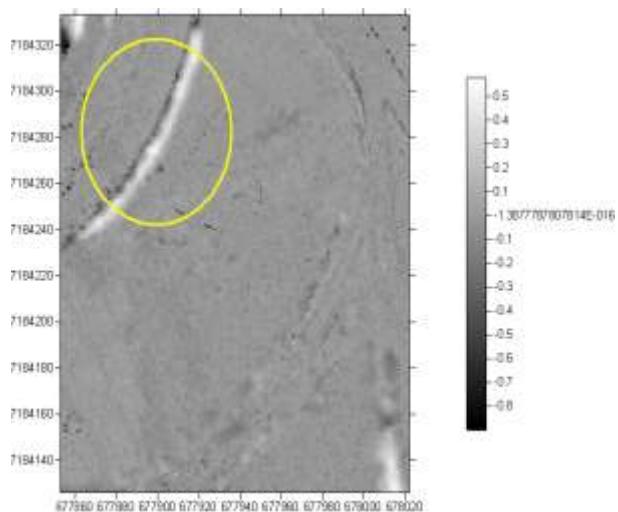


Figura 39 - Apontamento de deficiência no comportamento classificatório em regiões de relevo acidentado

Na figura 40, em R2 que abrange as quadras esportivas do Centro Politécnico, a área mais escura destacada com um círculo azul, trata-se da

existência de uma entrada coberta do vestiário local, cuja altura permeia o limite altimétrico para de decisão e consequente classificação.

Ainda da figura 40, agora circulada em amarelo, encontra-se a casa de energia elétrica central da associação dos funcionários da UFPR, que semelhantemente ao que ocorre no parágrafo anterior, trata-se de um elemento cujo limiar altimétrico é inferior ao estipulado no processo de filtragem e classificação dos pontos.

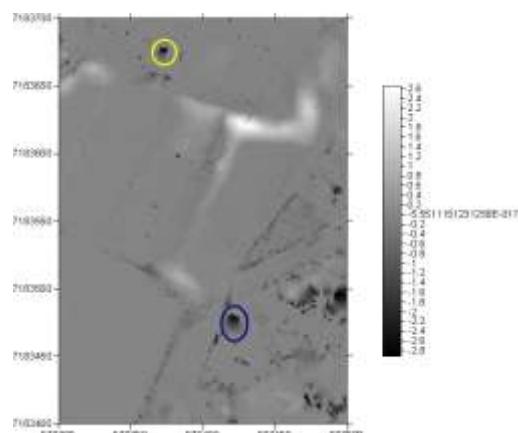


Figura 40 - Apontamento de deficiência no comportamento classificatório em função da limitação dos parâmetros estabelecidos

Para similares manifestações de áreas escuras na R3 (bosque próximo às dependências do curso de engenharia florestal), circuladas na figura 41 em amarelo, foi verificada a presença de árvores, cuja folhagem não permite que os raios laser do sistema de varredura cheguem até o solo, causando, desse modo, equívocos de classificação em regiões que apresentam baixa taxa de incidência de pontos na superfície do solo.

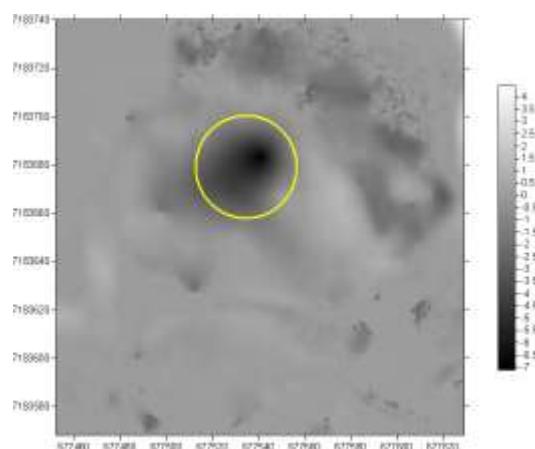


Figura 41 - Apontamento de deficiência no comportamento classificatório em regiões de vegetação densa

Evento similar ao anterior ocorre na R4 (área residencial). Contudo, os elementos dizem respeito ao aglomerado de edificações presentes no local, circulados em azul e as árvores arbustivas de uma praça circulada em amarelo, ambos ilustrados na figura 70 a seguir:

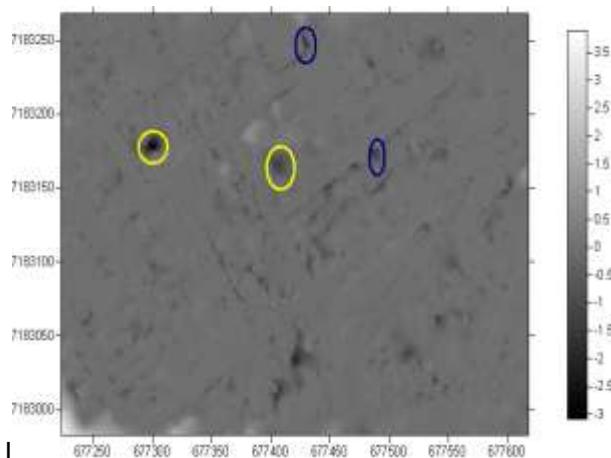


Figura 42 - Apontamento de deficiência no comportamento classificatório em regiões urbanas de baixa incidência de pontos LIDAR na superfície do solo

Os casos expostos e destacados nas figuras anteriores contemplam os principais condicionantes reincidentes em processos de classificação de pontos lidar, valendo-se de métodos de filtragem e classificação automática ou semi-automática, ocasionado incoerências entre os modelos gerados e a realidade de campo.

É possível que a simplicidade estrutural dos algoritmos de classificação implementados diga respeito a explicações para que, em regiões de busca variação de relevo ou vegetação densa por exemplo, os métodos não alcançassem resultados tão eficazes quanto os atingidos nas regiões planas ou de sutil variação topográfica.

Destaca-se também, dentre as prováveis causas para as situações de classificação equivocada, a dimensão (tamanho) das janelas de varredura utilizadas no processo inicial de filtragem, seja esta “região de busca por mínimos locais” de comportamento estático (janela fixa) ou móvel (janela móvel).

A definição de uma vizinhança em torno do ponto de interesse é comum a todos os métodos implementados, porém, as dimensões dessa pode variar de um filtro para outro, em função das características pré-conhecidas de cada região de aplicação.

Um dos pontos bastante relevante quanto ao estudo realizado, diz respeito à crucial importância da definição da vizinhança, uma vez que as dimensões da região de análise, também conhecida como “máscara” ou abertura, influí de maneira sobrecomum na identificação do mínimo local encontrado para cada célula de gradeamento a ser pesquisada e, desse modo, repercutindo na remoção (ou não) de elementos do MDS.

Nesse tocante, quando é estabelecida uma região de análise muito pequena, poderão estar presentes no MTD obtido pontos referentes a objetos que deveriam ser excluídos. Contrariamente a tal situação, se a região de análise for muito grande, a tendência é a não representação coerente da superfície do terreno propriamente dita. Situação semelhante foi discutida por SCHIEWE (2001), que abordou o efeito da variação do tamanho da janela de varredura no contexto da filtragem envolvendo o método da pirâmide de imagens.

4.3 Métodos Implementados e suas Especificidades

Haja vista que os resultados inerentes a cada método foram devidamente apresentados e discutidos, é pertinente pontuar algumas nuances que caracterizam o comportamento classificatório de cada implementação:

- A geração do MDT a partir da aplicação do método do bloco mínimo se destaca pelo bom desempenho em regiões planas, como a R1 (LAGE). Contudo, o filtro mostrou-se deficiente em áreas de relevo acidentado (com em parte da R2), baixa taxa de penetração de pontos (como na R3) e heterogeneidade de feições (como em R4);
- O método da declividade por sua vez, atenua, mas não resolve de forma definitiva as deficiências relacionadas aos relevos demasiadamente acidentados não tratados de forma eficaz pelo método do bloco mínimo, e também não oferece êxito significativo no tocante à questão da baixa taxa de penetração;
- O desempenho do método integrado proposto (bloco mínimo-declividade) intensifica a qualidade visual e numérica do que já é bom, como a

classificação de regiões planas e uniformes semelhantes a R1e apresenta relativa melhora no tratamento de regiões de relevo acidentado, como na R2 e, dentre as opções apresentadas, é o método que melhor se adéqua as regiões de baixa taxa de penetração, como em R3;

- O método morfológico, embora tenha apresentando resultados menos precisos que os métodos anteriores nas regiões de vegetação densa (R3, proporcionou os melhores resultados em regiões planas e heterogêneas e áreas de relevo acidentado. Esse método comportou-se bem também em regiões homogêneas e de pouca variação topográfica (R1).

Considerando o desempenho classificatório apresentando pelos filtros implementados e a relação entre esses e as características específicas de cada região de estudos e aplicação dos testes de verificação, a tabela 9 a seguir apresenta, em síntese, as indicações sugeridas de aplicabilidade, visando obter o melhor produto considerando as especificidades de cada região e similares:

Tabela 9 - Métodos e sugestões de aplicabilidade

Método/Filtro	Aplicações sugeridas
Bloco Mínimo	Regiões planas e homogêneas quanto à variedade de vegetação e edificações
Declividade	Regiões de relevo acidentado
Integrado	Regiões com sutil descontinuidade do terreno e baixa heterogeneidade de feições
Morfológico	Regiões planas e composta por feições heterogêneas

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1 Dos Métodos de Filtragem e Classificação de Pontos LIDAR Implementados

As aplicações dos métodos descritos nesse trabalho permitem caracterizar a utilização de dados LIDAR na aquisição automática do modelo digital do terreno (MDT) como sendo viável para os objetivos propostos na presente pesquisa, uma vez que os produtos obtidos oferecem destacada qualidade visual e numérica, como consequência de processos de filtragem e classificação simples mais eficazes.

A estrutura simples dos filtros implementados exige baixa interação humana e demanda pouco tempo de processamento dos dados em formato *raster*, o que os qualifica como alternativa notoriamente interessante e eficiente para geração automática do MDT,

O desempenho classificatório apresentado por cada filtro implementado, mesmo considerando uma pequena quantidade de parâmetros condicionais de classificação automática, representa de forma confiável a caracterização dos pontos de um MDS como pertencentes ou não à superfície do terreno propriamente dita.

Em algumas situações apontadas no capítulo VI RESULTADOS, os processos classificatórios produziram representações com variáveis numéricas consideravelmente distantes da superfície de verificação, indicando diferenças com o MDT gerado pelo processo classificatório do *TerraScan 2.0*, software referência na geração do MDT a partir de dados LIDAR. Contudo, as semelhanças entre esses, em sua maioria, estão dentro ou permeiam o limite de tolerância altimétrica permitível pelo equipamento LASER, que é de 0,20m.

Houve ainda uma situação em que a diferença residual entre as superfícies gerada e de referência foi nula, ou seja, não houve diferença entre o MDT calculado e o MDT/*TerraScan*, o que pode ser visto como um resultado bastante estimulante para continuidade das pesquisas nessa linha, bom base em soluções simples e

eficientes.

5.2 Da Influência da Variação do Solo e dos Elementos que Compõem as Regiões de Aplicação

A formação topográfica das regiões de estudos e aplicação dos filtros representaram fator determinante quanto à qualificação da metodologia proposta. Destaca-se, assim, as áreas planas e de feições homogêneas onde nessas, a aplicação de qualquer um dos métodos tratados neste trabalho possibilita a geração do MDT com notável fidelidade à realidade de campo, cujos numéricos apresentados apontaram para valores encontrados bem abaixo dos 0,20m de tolerância almejados.

Em se tratando de regiões que apresentam relevo sutilmente acidentado e poucas variações de feições naturais ou executadas pelo homem, os resultados mostraram-se um pouco inferiores, mas ainda assim, satisfatórios. Nesses casos, destaca-se a aplicação do método morfológico proposto, que promove uma classificação bastante eficiente, contemplando, entre outras, a heterogeneidade da região de interesse e aplicação recomendado.

Entretanto, permanecem ainda os desafios a serem resolvidos no tocante à remoção virtual de pontos LIDAR em áreas de densa vegetação e relevo demasiadamente acidentado, cujos estudos persistentes como esse, devem prosseguir a fim de se encontrar resultados cada vez mais eficientes até que se tenha uma solução considerada incontestavelmente ideal.

Consideradas assim, as intenções que motivaram os estudos propostos nesta pesquisa e haja vista a qualidade dos resultados obtidos, apresentados e devidamente discutidos, é pertinente caracterizar o presente trabalho científico como sendo uma relevante contribuição para a evolução dos estudos nessa área do conhecimento.

5.3 Sugestão de Trabalhos Futuros

Os estudos realizados apontam para a necessidade de evolução no tratamento de regiões de busca descontinuidade do terreno e a persistente verificação da qualidade de produtos gerados para áreas de baixa incidência de pontos *laser* sobre o solo, como nas áreas de vegetação densa e aglomeração de edificações.

Recomenda-se, então, a elaboração de métodos que contemplem uma maior quantidade de parâmetros de pertinência, a fim de se obter melhores resultados em áreas mais diversificadas.

Considerando que o presente trabalho tomou como forma de avaliação de resultados, a comparação entre MDT's gerados a partir de dados LIDAR, sugere-se também estudos comparativos entre esses e dados oriundos da topografia, similares ao desenvolvidos por SHIMALESKY (2007).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRINI JÚNIOR, M. J., **Estimativa da altura da vegetação utilizando dados Airborne Laser Scanner**. Dissertação de Mestrado – Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Catarina – SC, 2005.

BEHAN, A., **On the Matching Accuracy of Rastering Scanning Laser Altimeter Data**. ISPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2000.

BERG, R.; FERGUNSON, J. **Mapping Ontario's highways with LIDAR**, Gim International, Canadá, v. 15, n. 11, p. 44a 47, nov. 2001.

BOTELHO, M. F., **Modelagem tridimensional de edificações usando dados do sistema laser scanner e imagem orbital de alta**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – Paraná, 2007.

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a Laser: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. In: Anais do I Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente – SP, 2002.

BRANDALIZE, M. C. B. **A qualidade cartográfica dos resultados do laserscanner aerotransportado**. Tese de Doutorado – Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil . Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis 2004.

BRIESE, C.; PFEIFER, N. **Airborne Laser Scanning and Derivation of Digital Terrain Models**. In **Grün/Kahmen** (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F. Vienna. 2001.

BROVELLI, M. A.: CANNATA, M.; LONGONI, U. M. **Managing and processing lidar data within GRASS**. In: Open Source GIS – GRASS user conference 2002. Anais. Trento, Italy: [s.n.], 2002.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographic Information System for Land Resources Assessment.** New York, Oxford University Press, 194 p., 1986.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land**

Resources Assessment. Clarendon: Press-Oxford. 1989.

CAMARGO, E.G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas** (Spring). [S.l.: s.n.], 1997. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/eduardo>> Acesso em: 10 agosto. 2008.

CENTENO, J. S.; STEINLE, E.; VÖGTLER, T. **Análise de modelos numéricos de elevação derivados de laser scanner para o monitoramento urbano.** In: COBRAC, UFSC, Florianópolis, 2000.

CENTENO, J. A. S.; BOTELHO, M. F.; SILVA, C. R.; SCHÖENINGER, E. R. **Comparação dos Resultados de Interpoladores “Vizinho mais próximo” e “Inverso de uma distância” no cálculo de volume a partir de dados do laser scanner.** In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia. Brasil. 16 – 21 abril 2005. INPE.

COELHO, A. H.; VÖGTLER, T.; WINDORF, M.; BÄHR, H. P. **Utilização do método de pirâmide de imagens para a extração de modelos digitais de terreno de imagens geradas por dados de laser scanner.** In: V Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, Anais. Florianópolis, Brasil, 2002.

DALMOLIN, Q.; Santos, D. R. **Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento.** Curitiba, 2004. Editora do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR.

Felgueiras C. A., **Desenvolvimento de um Sistema de Modelagem Digital de Terreno para Microcomputadores.** Dissertação de mestrado em Computação Aplicada. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP, Brasil, 1987.

HAALA, N.; BRENNER, C.; ANDERS, K.-H. 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Columbus, 1998.

HAALA, N. & BRENNER, C., **Interpretation of urban surface models using 2D building information**. Computer Vision and Image Understanding. Vol 72, nº 2 November, pp 204-214, 1999.

HAUGERUD, R.A., HARDING D.J., "Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data". IAPRS, Vol. XXXIV –3/W4 Annapolis, MD, 22-24 October 2001. pp. 211-218.

JACOBSEN, K.; LOHMANN, P. **Segmented Filtering of Laser scanner DSMs. Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop "3-D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data"**. Dresden, Germany, 8-10 October 2003. Editors: H.-G. Maas, G. Vosselman, A. Streilein. Volume XXXIV, part 3/W13.

KRABIL, W. B.; COLLINS, J. G.; LINK, L. E.; SWIFT, R. N.; BUTLER, M.L. **Airborne Laser Topographic Mapping Results**. In: PERS, 50(6), P.685-684, 1984

KRAUS, K., and PFEIFER, N., 1998. **Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 53, pp. 193-203.

LACTEC – **Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - UFPR**. Arquivo de Varredura Laser. Centro Politécnico - Curitiba – PR, 2006.

LOCH, R. E. N.; SCHÄFER, A. G.; VARGAS, R. M. A. **Filtragem e Classificação de Pontos Laser scanner utilizando o Software TERRASCAN**. UFSC. Geodésia Online.4/2004.

LOHMANN, P.; KOCH, A, & SCHAEFFER, M. Approaches to the filtering of laser scanner data in **Int. Arch. Of Photogrammetry and Remote Sensing**. 33(B3), Amsterdam, 2000.

MAUNE, D. F., **Introduction** In: Maune, D. F. Ed.). **Digital elevation model**

technologies and applications: The DEM users manual. Bethesda: ASPRS, 2001, cap. 1. p 1-34.

MEANS, J. E., ACKER, A.A., FITT, B. J., RENSLOW, M., EMERSON, L., and HENDRIX, C., 2000. **Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LIDAR.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 66, No.11, pp. 1367-1371.

MOURA, M. C., LOCH, C., **Geração de Modelos Digitais de Áreas Urbanas** in Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - COBRAC · UFSC Florianópolis · 15 a 19 de Outubro 2006.

OLEA R.A. **Geoestatistical glossary and multilingual dictionary.** New York: Oxford University Press, 1991.

PEREIRA, L. M. G.; JANSSEN, L. L. F. **Suitability of Laser Data for DTM Generation: a Case Study in the Context of Road Planning and Design.** ISPRS – Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, 1999.

PEUCKER, T.K., **The Impact of Different Mathematical Approaches to Contouring.** Cartographica, 1980. 17(2):73-95.

REUTEBUCH, S. E.; AHMED, K. M.; CURTIS, T. A.; PETERMANN, D.; WELLANDER, M; FROSLIE, M. **A Test of Airborne Laser Mapping under Varying forest Canopy. Proceedings.** of the Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Washington, C.C., 2001.

REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H. E.; CARSON, W.W. **Accuracy of a High-resolution Lidar Terrain Model under a Conifer Forest Canopy.** Can. J. Remote Sensing. Vol. 29, No. 5, PP. 527-535, 2003.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J. **Métodos geoestatística no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo.** Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1995.

SCHIEWE, J. **Ein regionen-basiertes Verfahren zur Extraktion der**

Geländeoberfläche aus Digitalen Oberflächen-Modellen. In: Photogrammetrie – Fermerkundung – Geoinformation, CADERNO 2, P.81-90, Schweizerbart'sche, Germany, 2001.

SHIMALESKY, V., Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação: um estudo de caso. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Universidade Federal do Paraná. Curitiba – Paraná, 2007.

SITHOLE, G., Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing.** Vol. 33-3/W4, Annapolis, MD, 2001.

SITHOLE, G. e G. VOSSELMAN. 2003. **Comparison of Filter Algorithms.** International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 34, Part 3/W13, pp. 71-78.

THUY, V. e M. TOKUNAGA, 2002. **Wavelet-Based Clustering Method to Detect Building in Urban Area from Airborne Laser Scanner Data.** Conference Proceedings of Map Asia. Bangkok, Thailand.

VOSSELMAN, G., Building reconstruction using planar faces in very high density height data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Munich, Germany, 1999.

VOSSELMAN, G., Slope Based of Laser Altimetry Data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing.** Vol. 33, Part B3, Amsterdam, pp 935-942, 2000.

WACK, R. e A. WIMMER. 2002. **Digital Terrain Models from Airborne Laser Scanner Data – A grid Approach.** International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing. Vol. 34, Part B3, Graz. Pp. 293-296.

WEHR, A. e U. LOHR. 1999. **Airborne laser scanning – an introduction and overview.** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. Vol. 54. pp. 68-82.

YU, X.; HYYPÄ, H.; KAARTINEN, H.; HYYPÄ, J.; AHOKAS, E.; KAASALAINEN, S.

Applicability of First Pulse Derived Digital Terrain Models for Boreal Forest Studies. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “*Laser Scanning 2005*”, Enschede, the Netherlands, September 12 – 14, 2005.

ZANDONÁ, D. R., **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – Paraná, 2006.