

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**Avaliação de Modelos Digitais de Terreno gerados por escaneamento a  
*laser* (LiDAR) no Maciço da Tijuca, RJ.**

**LEONARDO DA SILVA BARBOSA**

**Dissertação de mestrado**

Rio de Janeiro

2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**Avaliação de Modelos Digitais de Terreno gerados por escaneamento a  
*laser* (LiDAR) no Maciço da Tijuca, RJ.**

**LEONARDO DA SILVA BARBOSA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA  
AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
GEOGRAFIA, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS,  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO – UFRJ, COMO REQUISITO PARCIAL  
À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
GEOGRAFIA NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
DE PLANEJAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL.

**ORIENTADOR**

**Prof. Dr. André de Souza Avelar**

**Rio de Janeiro**

**2015**

**Avaliação de Modelos Digitais de Terreno gerados por escaneamento a  
*laser* (LiDAR) no Maciço da Tijuca, RJ.**

**LEONARDO DA SILVA BARBOSA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
GEOGRAFIA, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO –  
UFRJ, COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM GEOGRAFIA NA ÁREA  
DE CONCENTRAÇÃO DE PLANEJAMENTO E  
GESTÃO AMBIENTAL.

Aprovada em 05 de maio de 2015.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ – Orientador

ANDRÉ DE SOUZA AVELAR  
Depto. Geografia / UFRJ

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

MANOEL DO COUTO FERNANDES  
Depto. Geografia / UFRJ

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

RAFAEL SILVA DE BARROS  
Depto. Geografia / UFRJ

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

REINER OLÍBANO ROSAS  
Depto. Geografia / UFF

## FICHA CATALOGRÁFICA

B238a      Barbosa, Leonardo da Silva  
            Avaliação de Modelos Digitais de Terreno gerados  
            por escaneamento a laser (LiDAR) no Maciço da  
            Tijuca, RJ / Leonardo da Silva Barbosa. -- Rio de  
            Janeiro, 2015.  
            129 f.

            Orientador: André de Souza Avelar.  
            Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do  
            Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,  
            Departamento de Geografia, Programa de Pós-Graduação  
            em Geografia, 2015.

            1. Escaneamento a laser (LiDAR). 2. Modelos  
            Digitais de Terreno. 3. Sensoriamento Remoto. I.  
            Avelar, André de Souza, orient. II. Título.



## AGRADECIMENTOS

Minha gratidão se estende a todos os amigos e familiares que me incentivaram e me apoiaram durante esta jornada.

A minha mãe e irmão, sem dúvida os pilares da minha vida que me apoiaram e incentivaram durante todo o tempo desde a graduação até nos momentos mais difíceis no desenvolvimento desta dissertação.

Um obrigado especial que envio até Portugal para meu avô e minha avó, já que hoje passam mais tempo na terrinha do que por aqui.

Ao professor André Avelar por toda a orientação e parceria no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Bruno Coutinho, Pedro Lima e Maria Isabel que contribuíram diretamente com ideias, conversas e ajudas neste trabalho.

Um agradecimento especial a todos os companheiros de laboratório, que sem dúvidas foram muito importantes para os momentos de descontração e também nos momentos de colaboração durante a dissertação.

A Dani e ao Jorge, que sempre e me ajudaram no dia a dia, com certeza foram muito essenciais para a construção deste trabalho.

A empresa Hansa - Geofísica e Aerolevante e a Fundação GeoRio pela disponibilização dos dados LiDAR.

OBRIGADO!

## RESUMO

As tecnologias de sensoriamento remoto vêm avançando nas últimas décadas e com elas a topografia de alta resolução torna-se um produto cada vez mais comum, ampliando a possibilidade de estudos em escalas cartográficas maiores dentro de áreas extensas. Porém, existe a necessidade de avaliar melhor esses produtos extraídos em áreas de relevos com grandes amplitudes altimétricas e com densa cobertura florestal. Neste estudo foram gerados e analisados 12 Modelos Digitais de Terreno no *software* ArcGis Desktop 10.1 nas escalas 1:2.000, 1:10.000 e 1:50.000 com 4 critérios diferentes de *Cell Assignment Type* para cada escala. Os MDTs foram gerados a partir de dados aerolevantados por *Light Detection And Ranging* (LiDAR) para a Bacia do Rio Cachoeira com 8 km<sup>2</sup> no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro (RJ), utilizando apenas pontos classificados como *ground*. O trabalho teve como objetivo avaliar o aerolevanteamento e os MDTs gerados em área de relevo montanhoso com densa cobertura florestal, fragmentos urbanos, vegetação arbustiva e gramínea. A partir do MDT, a topografia foi extraída com curvas de nível equidistantes em 1, 5 e 20 metros para as escalas 1:2.000, 1:10.000 e 1:50.000 respectivamente. Além da topografia, parâmetros morfométricos foram extraídos: declividade; *Topographic Position Index* (TPI) com finalidade de classificar o relevo em áreas de fundo de vale, baixa, média e alta encosta e divisores; e rede hidrográfica extraída de forma automática na extensão ArcHydro 10.1.

## ABSTRACT

Remote sensing technologies have increased in the last few decades and with them the high resolution topography becomes a more common product, increasing the possibility of research in bigger cartographic scales within large areas. However, there is a need to better evaluate these products in areas with large altimetric amplitude and dense forest cover. In this study were generated and analyzed 12 Digital Terrain Models in ArcGIS Desktop 10.1 software over the different scales: 1: 2,000, 1: 10,000 and 1: 50,000 with 4 different criteria for Cell Assignment Type for each scale. The DTMs were generated from airborne Light Detection And Ranging (LiDAR) for the Cachoeira River Basin (8 km<sup>2</sup>) in the Tijuca's Massif, Rio de Janeiro (RJ), using only points classified as ground. The study aimed to evaluate the aerial survey and DTMs generated in mountainous area with dense forest cover, urban fragments, shrub and grass. From the DTM, the topography was extracted with equidistant contours at 1, 5 and 20 meters for the scales 1: 2,000, 1: 10,000 and 1: 50,000 respectively. In addition to topography, morphometric parameters were extracted: slope; Topographic Position Index (TPI) for purposes of classifying the relief as valley bottom, low, medium and high slope and dividers; and extracted hydrographic network automatically in ArcHydro 10.1 extension.

## Sumário

1 – Introdução .....	1
2 – Questões e Objetivos .....	4
2.1 – Questões .....	4
2.2 – Objetivo Geral.....	4
2.3 Objetivos Específicos .....	4
3 – Revisão Bibliográfica.....	5
3.1 Sensoriamento remoto.....	5
3.2 Princípios físicos e funcionamento do Sistema LiDAR .....	7
3.3 Modelo Digital de Terreno em Sistemas de Informação Geográficas .....	16
4 – Área de estudo .....	26
4.1 Maciço da Tijuca .....	26
4.2 Bacia do Rio Cachoeira .....	31
5 – Materiais e Métodos .....	34
5.1 Utilização dos dados .LAS .....	35
5.2 Composição do LAS Dataset .....	37
5.3 Elaboração do MDT a partir do Las Dataset .....	38
5.3.1 Projeção Cartográfica.....	40
5.3.2 Áreas de análise .....	40
5.3.3 Fill.....	41
5.4 Análise dos MDTs gerados a partir dos dados LiDAR.....	42
5.4.1 Densidade de pontos <i>ground</i> .....	42
5.4.2 Validação com pontos de controle .....	43
5.4.3 Densidade de pontos <i>ground</i> e Uso e Cobertura .....	45

5.5 Geração de parâmetros morfométricos 1:10.000 .....	47
5.5.1 Topografia .....	47
5.5.2 Declividade.....	48
5.5.3 <i>Topographic Position Index</i> - TPI .....	48
5.5.4 Definição da e rede hidrográfica em ArcHydro 10.1 .....	49
6 – Resultados .....	51
6.1 Análise do LAS Dataset .....	51
6.2 Avaliação dos MDTs.....	58
6.2.1 Características do MDT 1:2.000 .....	58
6.2.2 Características do MDT 1:10.000 .....	62
6.2.3 Características do MDT 1:50.000 .....	65
6.3 Elaboração da base topográfica e parâmetros morfométricos 1:10.000 .....	68
6.3.1 Topografia .....	68
6.3.2 Declividade.....	71
6.3.3 <i>Topographic Position Index</i> - TPI .....	76
6.3.4 Rede Hidrográfica .....	83
7 – Conclusões.....	89
7.1 Desdobramentos .....	91
8 – Referências Bibliográficas.....	92

## Índice de figuras

Figura 1 - Componentes do sistema LiDAR .....	7
Figura 2 - Espelhos de varredura e os padrões de varredura gerados. (A) Espelho oscilante, (B) Polígono rotatório, (C) Varredura Palmer, (D) Varredura de fibras rotatórias. Fonte: adaptado de Giondo <i>et al.</i> 2010 e Wehr & Lohr 1999) .....	9
Figura 3 - (A) Ângulo de escaneamento. (B) <i>Footprint</i> . Fonte: Gatziolis & Andersen (2008) .....	10
Figura 4 – Ilustração demonstrando os diferentes retornos do pulso de <i>laser</i> . Fonte (Albacete 2011) .....	10
Figura 5 - Ilustração dos 3 tipos de rotação sofridas por uma aeronave. Fote Moraes Novo (2008).....	11
Figura 6 - Diferenciação do MDS e MDT. Fonte: SPOT IMAGE (2004).....	17
Figura 7 – Representação do modelo de grade regular retangular. Fonte: Felgueiras (1999) .....	18
Figura 8 – Amostragem irregular e regular. Fonte: Felgueiras (1999) .....	19
Figura 9 - A) ajuste polinomial linear. B) ajuste polinomial quadrático. Fonte: Felgueiras (1999) .....	20
Figura 10 - Superfície de uma seção obtida para diferentes interpoladores: Fonte: Valeriano (2008).....	21
Figura 11 – Representação do TIN. Fonte: Felgueiras (1999).....	22
Figura 12 – Critério do circuncírculo para a geração da triangulação de Delaunay. A) Não é uma triangulação de Delaunay, pois $P_l$ e $P_k$ estão inseridos nos círculos; e $\alpha_1, \alpha_3 < \alpha'_1, \alpha'_3$ e $\alpha_4, \alpha_5 < \alpha'_4, \alpha'_5$ (triângulos isósceles). B) É uma triangulação de Delaunay: $P_l$ e $P_k$ não estão inseridos nos círculos; $\alpha'_1, \alpha'_3 > \alpha_1, \alpha_3$ e $\alpha'_4, \alpha'_5$ . Fonte: Fernandes (2004). .....	23
Figura 13 - Eliminação de triângulo horizontais. Fonte: Fernandes (2004, modificado de Felgueiras 1999) .....	24

Figura 14 - Transofrmação da triangulação de Delaunay de A) para B) para manter as características topográficas. Fonte: Fernandes (2004, modificado de Felgueiras 1999)	24
Figura 15 – Localização do Maciço da Tijuca. Fonte: (Fernandes, 2004)	26
Figura 16 - Mapa com os setores hidrográficos do Maciço da Tijuca. Fonte: Fernandes <i>et al.</i> (1998)	27
Figura 17 - Maciço da Tijuca	28
Figura 18 – Histograma com a série temporal 1977-2009, estação Capala Mayrink (Negreiros 2011)	29
Figura 19 - - Perfil geológico do Maciço da Tijuca (Pires <i>et al.</i> 1989)	31
Figura 20 - Localização da Bacia do Cachoeira	32
Figura 21 – Gráfico do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do Rio Cachoeira.	33
Figura 22 - Fluxograma geral dos materiais e métodos	34
Figura 23 – A) visualização 2D da Nuvem de pontos. B) visualização 2D da Nuvem de pontos.	35
Figura 24 – Articulação dos arquivos .LAS e área de estudo (Bacia do Rio Cachoeira)	36
Figura 25 – (A) TIN. (B) Curvas de Nível. (C) Visualização 3D do TIN. (D) Declividades.	37
Figura 26 – Janela da ferramenta <i>Create LAS Dataset</i> no <i>software</i> ArcGis 10.1.	38
Figura 27 - Janela da ferramenta <i>LAS Dataset to Raster</i> no <i>software</i> ArcGis 10.1	40
Figura 28 – Mapa com as áreas de análise e de produção do MDT.	41
Figura 29 – Janela da ferramenta <i>LAS Point Statistics as Raster</i> do <i>software</i> ArcGis 10.1.	43
Figura 30 – Mapa com a localização dos 641 pontos de controle da base IPP 1:2.000.	45
Figura 31 – Comparação do mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal de Martinez (2015) com a nova classificação para este estudo.	47
Figura 32 – Desenho esquemático simulando 3 raios diferentes como parâmetro para TPI. (A) Plano; (B) Divisor; (C) Fundo de Vale. (Fonte: Janness <i>et al.</i> 2013)	49

Figura 33 – Valores associados à direção de fluxo (Araujo 2013) modificado de Maidment, 2002.....	49
Figura 34 – <i>Raster</i> de resolução de 10x10m com densidade de pontos <i>ground</i> em cada célula. ....	52
Figura 35 – Gráfico com as classes de densidades de pontos (pts/m <sup>2</sup> ) e sua área percentual na Bacia do Rio Cachoeira.....	53
Figura 36 – Classes de densidade de pontos e sua área percentual em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal.....	54
Figura 37 – Percentura de Cobertura Florestal em cada arquivo .LAS relacionado ao total de pontos <i>ground</i> contabilizados .....	55
Figura 38 – Detalhe do MDT 1:2.000 na área urbana e encosta florestada.....	56
Figura 39 – Detalhe do MDT 1:2.000 na interface de afloramento rochoso com cobertura florestal. ....	57
Figura 40 - MDT após a classificação ainda apresentou pontos relativos a vegetação. Fonte: (Tang <i>et al.</i> 2008) .....	60
Figura 41 – Pontos de controle da base IPP 1:2.000 no MDT 1:2.000. ....	60
Figura 42 – Visualização 3D do MDT (Hillshade) 1:2.000 no <i>software</i> ArcScene 10.1. .	61
Figura 43 Pontos de controle da base IPP 1:2.000 no MDT 1:10.000. ....	63
Figura 44 – Visualização 3D do MDT (Hillshade) 1:10.000 no <i>sfotwate</i> ArcScene 10.1. .	64
Figura 45 – Pontos de controle da base IPP 1:2.000 no MDT 1:50.000. ....	66
Figura 46 – Visualização 3D do MDT (Hillshade) 1:50.000 no <i>sfotwate</i> ArcScene 10.1. .	67
Figura 47 – Visualização do erro de Topologia circulado em vermelho.....	68
Figura 48 – Detalha da topografia 1:10.000 na parte Norte da bacia.....	69
Figura 49 – Detalha da topografia 1:10.000 na parte Sul e mais urbanizada da bacia. .	70
Figura 50 – Mapa de Declividades.....	71
Figura 51 – Mapa com detalhe da declividade 1:10.000.....	72



Figura 52 – Gráfico com o percentual as classes de declividades da área de estudo (IPP 1:10.000 e LiDAR). .....	73
Figura 53 – Comparação dos mapeamentos de declividade LiDAR e IPP 1:10.000 (Martinez, 2014).....	74
Figura 54 – Visualização 3D do mapeamento de declividade no <i>software</i> ArcScene 10.1. ....	75
Figura 55 – Gráfico com o percentual de cada classe de TPI dos mapeamentos Lidar e Martinez (2014).....	76
Figura 56 – Mapa com o valor de TPI ( <i>TPI Value</i> ).....	77
Figura 57 – Gráfico com o total de comprimento de canais inseridos em cada classe de TPI dos mapeamentos LiDAR e Martinez (2014). .....	79
Figura 58 – Comparação dos mapeamentos de TPI do LiDAR e de Martinez (2014). ....	81
Figura 59 – Visualização 3D do valor do TPI ( <i>TPI Value</i> ).....	82
Figura 60 – Mapa da direção de fluxo no MDT 1:10.000 .....	83
Figura 61– Mapa do acúmulo de fluxo no MDT 1:10.000 .....	84
Figura 62 – Rede hidrográfica gerada automaticamente no ArcHydro 10.1.....	85
Figura 63 – Fluxo de recarga do lençol freático no Morro do Archer (Abreu 1992) .....	86
Figura 64 – (A) Evidência do fluxo superficial de água à jusante da estrada em ambiente florestal. (B) Curvas de nível com equidistância de 1m. (C) RPII (Relative Path Impact Index) Indicando em vermelhas as áreas com maior impacto das estradas. Fonte: Tarolli <i>et al.</i> (2013). .....	87
Figura 65 – Detalhe da rede hidrográfica gerada no ArcHydro 10.1. (A) Influência do Morro do Archer na gereção dos canais. (B) Resposta dos cortes de estrada no resultado da delimitação de canais. (C) Comportamento dos canais em áreas planas urbanizadas. ....	88

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de algumas aplicações do uso de sensoriamento remoto. Fonte: Moraes Novo (2008). .....	6
Tabela 2 – Classificação dos ponto LiDAR. Fonte: Albacete 2011. ....	13
Tabela 3 – Classificação dos tipos de filtros dos dados LiDAR. Fonte: Pacheco <i>et al.</i> (2011) .....	14
Tabela 4 - Comparação entre modelos de grades regulares e irregulares. Fonte: Felgueiras (1999).....	25
Tabela 5 – Síntese dos principais serviços ambientais prestados pelo geossistema florestal do maciço da Tijuca. (Modificado de Figueiró 2004, SMAC/Geoheco (2.000).30	
Tabela 6 - Arquivos .LAS utilizados no estudo.....	35
Tabela 7 – Tolerância e EMQ para as 3 escalas de análise segundo PEC (modificado de Cruz <i>et al.</i> 2011). ....	44
Tabela 8 – Agrupamento das classes de uso e cobertura do solo.....	46
Tabela 9 – Propriedades dos arquivos .LAS utilizados na área de estudo.....	51
Tabela 10 – Pontos de controle em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal no MDT na escala 1:2.000 .....	58
Tabela 11 – Erros mínimo, máximo e médio quadrático nas classes de uso e cobertura vegetal no MDT na escala 1:2.000. ....	59
Tabela 12 – Pontos de controle em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal no MDT na escala 1:10.000 .....	62
Tabela 13 – Erros mínimo, máximo e médio quadrático nas classes de uso e cobertura vegetal no MDT na escala 1:10.000. ....	62
Tabela 14 – Pontos de controle em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal no MDT na escala 1:50.000 .....	65
Tabela 15 – Erros mínimo, máximo e médio quadrático nas classes de uso e cobertura vegetal no MDT na escala 1:50.000. ....	65

## Lista de Siglas

**ALDPAT** – *Airborne LiDAR Data Processing and Analysis Tools*

**ATIN** – *Adaptive Triangulated Irregular Network*

**DGPS** – *Differential GPS*

**ETEW** – *Elevation Threshold with Expand Window*

**EMQ** – Erro médio quadrático

**GeoRio** – Fundação Instituto de Geotécnica

**INS** – *Inertial Navigation System*

**IPP** – Instituto Pereira Passos

**LAS** – LiDAR data Exchange format file

**LiDAR** – *Light Detection and Ranging*

**MDS** – Modelo digital de superfície

**MDT** – Modelo digital de terreno

**MNT** – Modelo numérico de terreno

**PEC** – Parâmetros de exatidão cartográfica

**PNT** – Parque Nacional da Tijuca

**RTK** – *Real Time Kinematic*

**SIG** – Sistema de Informações Geográficas

**TIN** – *Triangulated Irregular Network*

## 1 – Introdução

As tecnologias de sensoriamento remoto de alta resolução evoluíram rapidamente nas últimas décadas, proporcionando a pesquisadores e profissionais das mais diversas áreas a execução de mapeamentos e possibilidades de análise cada vez mais avançados e detalhados. Não apenas imagens de satélites, mas também sensores ativos com emissão de feixes de *lasers* aerotransportados se tornam cada vez mais comuns. O uso crescente de LiDAR (Light Detection and Ranging) é um exemplo dessas novas tecnologias.

O estudo de processos morfológicos no campo das Geociências tem na topografia de alta resolução proveniente de escaneamentos a *laser*, um avanço na qualidade e no detalhamento. Tarolli (2014) afirma que na última década o número de pesquisas envolvendo topografia de alta resolução cresceu como o objetivo de mapeamento e quantificação de deslizamentos, levantamento batimétrico do leito de rios, detecção de falhas geológicas e reconhecimento de rede de canais. Além do avanço nesses campos, ainda segundo o autor, a topografia de alta resolução “também oferece oportunidade para o desenvolvimento de novas metodologias para gerenciar tal informação topográfica detalhada”.

As análises geomorfológicas ao longo da história estiveram limitadas a trabalhos de campo, cartas topográficas analógicas e fotografias aéreas, e mesmo com os avanços da fotogrametria digital e radar, segundo Slatton *et al.* (2007) o estudo da aplicação de diversas teorias sobre processos mecânicos atuantes na mudança da superfície terrestre necessitam de bases topográficas de alto detalhe e qualidade, tornando possível com a evolução do LiDAR aerotransportado. Esse levantamento a *laser* permite a obtenção de dados topográficos de alta resolução em amplas áreas trazendo vantagens frente às técnicas de fotogrametria tradicionais, uma vez que permitem: (1) capacidade de prover filtragem automática para diferenciação de pontos como vegetação e solo; (2) geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Superfície (MDS) com resoluções menores que 1 metro (Tarolli 2014).

Os MDTs e MDSs derivados de dados LiDAR apresentam elevada precisão e expressiva qualidade de detalhamento devido à grande densidade de pontos georreferenciados com coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  e sua posterior classificação conforme à intensidade do retorno dos pulsos *laser*. O uso dessa tecnologia em áreas florestadas com densa cobertura vegetal vem aumentando significativamente, porém, inúmeros erros de precisão com relação aos pontos relativos ao solo são observados e estudos da quantificação desses erros ainda necessitam ser realizados para permitirem o uso com mais confiabilidade dessa técnica (Reutebuch *et al.* 2003). O docel das árvores pode causar interferência e dificultar a maioria dos pulsos *laser* chegarem ao solo e, com isso têm-se intensificado os trabalhos que pretendem melhorar a classificação dos pontos, quantificar o erro da classificação e avaliar a acurácia dos MDTs gerados em áreas florestadas (Gonçalves-Seco *et al.* 2006; Tang *et al.* 2008; Wang & Glenn 2009).

Recentemente foi realizado o aerolevanteamento a *laser* (LiDAR) do Maciço da Tijuca pela empresa Hansa – Geofísica e Aerolevanteamento Ltda. para Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GeoRio), cobrindo uma área de 155 km<sup>2</sup>. O levantamento foi cedido por eles ao Prof. André Avelar e ao Laboratório Geoheco – UFRJ para fins de pesquisa. Deste modo, o Maciço da Tijuca torna-se importante nesse contexto tendo em vista aos processos históricos de adensamento da população em suas vertentes e áreas circundantes, que no caso das encostas apresentou um processo intenso de ocupação por comunidades mais pobres. Estas se instalam de modo informal e compõem as chamadas “favelas” instaladas principalmente devido à necessidade de moradia em proximidade dos locais de trabalho (Coelho Netto 2005) e também por dificuldade de acesso às edificações formais em áreas valorizadas. A autora ainda afirma que “sob tais circunstâncias a relação Homem-Natureza traduz-se numa forte competição pelo habitat, comum a grupos sociais heterogêneos e a biota da floresta remanescente e acentua a vulnerabilidade do geocossistema frente aos problemas sócio-ambientais”.

Os problemas sócio-ambientais causados pela ocupação no Maciço da Tijuca é alvo de preocupação e de planejamento tanto da Prefeitura do Rio de Janeiro quanto da administração do Parque Nacional da Tijuca, com a intenção de preservar o remanescente de Floresta Atlântica responsável por diversos serviços ambientais à

cidade e a delimitação de áreas de risco devido a movimentos de massa em eventos de chuva (Coelho Netto *et al.* 2007).

As análises realizadas pelos órgãos públicos e pelas pesquisas desenvolvidas no Maciço da Tijuca têm na topografia de alta resolução a possibilidade de avançar nos estudos sobre suscetibilidade e risco a movimentos de massa, modelagem hidrológica, processos erosivos, planejamento urbano e nas mais diversas temáticas envolvidas no entendimento dos processos geoecológicos dos relevos montanhosos florestais. Esta dissertação de mestrado justifica-se nesta problemática, isto é, a necessidade de avanço no entendimento dos processos presentes nas paisagens montanhosas que são viabilizados pelas novas tecnologias de topografias e parâmetros morfométricos detalhados. Por isso a motivação de analisar a qualidade, as possibilidades e limitações do levantamento LiDAR disponibilizado para a geração de MDT em áreas com relevos acentuados e densa cobertura florestal.

## 2 – Questões e Objetivos

### 2.1 – Questões

As principais questões que norteiam o trabalho são:

O levantamento LiDAR em áreas de relevo montanhoso florestado é capaz de gerar um Modelo Digital de Terreno com alta precisão?

Qual a quantidade de pontos referentes ao terreno que o escaneamento LiDAR consegue levantar com uma cobertura vegetal densa?

É possível tratar dados LiDAR e extrair parâmetros morfométricos com qualidade e facilidade através do no *software* ArcGis Desktop 10.1?

### 2.2 – Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a análise do levantamento LiDAR baseado na distribuição e quantidade de pontos referentes ao solo utilizados para a geração de Modelos Digital de Terreno e a extração de parâmetros morfométricos em uma área de relevo montanhoso e com densa cobertura vegetal.

### 2.3 Objetivos Específicos

Fazer uma análise da distribuição espacial da densidade de pontos referentes ao solo (*ground*) e analisar sua distribuição frente ao uso do solo e cobertura vegetal.

Comparar a altimetria dos modelos digitais de terreno gerados nas escalas 1:2.000, 1:10.000 e 1:50.000 com as bases existentes elaboradas pelo Instituto Pereira Passos da Prefeitura do Rio de Janeiro

Definir os melhores parâmetros para a geração do modelo digital de elevação no *software* ArcGis Desktop 10.1.

Comparação e extração a partir do Modelo Digital de Terreno parâmetros morfométricos como declividade, *Topographic Position Index* (TPI), rede hidrográfica gerada automaticamente (ArcHydro 10.1).

## 3 – Revisão Bibliográfica

### 3.1 Sensoriamento remoto

O origem do conceito de sensoriamento remoto pode encontrar-se na *câmera escura* de Aristóteles no século IV a.C., entretanto, mesmo com o avanço do estudo no campo da ótica no século XVII, é com o invento da fotografia no século XIX que o conceito moderno de sensoriamento remoto obteve o primeiro grande avanço. “A coleta de informações sobre um objeto sem manter contato físico” é a definição mais ampla de sensoriamento remoto aceita segundo Rees (2001), tal definição não inclui somente técnicas e coletas de informações ligadas à superfície e à atmosfera terrestre, mas aborda inúmeras técnicas encontradas nos campos da medicina, sismologia, dentre outros. Sendo assim, é possível obter informações sobre um objeto sem manter contato físico de diversas formas, como por exemplo, um microfone ao captar ondas sonoras. Por isso, Elachi (1987 *apud* Moraes Novo 2008) define sensoriamento remoto de forma mais objetiva como sendo a “mensuração das mudanças que um determinado objeto impõe aos campos [eletromagnéticos, acústicos ou potenciais] de força que o circundam”. Por isso, o propósito do sensoriamento remoto neste estudo está relacionado com a coleta de informações altimétricas da superfície terrestre utilizando radiação eletromagnética (Rees 2001).

A utilização de dados obtidos através de sensoriamento remoto cresceu de forma intensa nas últimas décadas, tal processo deve-se principalmente ao avanço das tecnologias nos sensores e também na diminuição dos custos para a produção e acesso aos dados coletados. As aplicações no uso do sensoriamento remoto são inúmeras, alguns exemplos podem ser observados na tabela 1.



Tabela 1 - Exemplos de algumas aplicações do uso de sensoriamento remoto. Fonte: Moraes Novo (2008).

<b>Aplicações</b>	<b>Exemplos</b>
Urbanas	Inferência demográfica, cadastro, planejamento urbano, suporte ao setor imobiliário.
Agrícolas	Condição das culturas, previsão de safras, erosão de solos.
Geológicas	Minerais, petróleo, gás natural.
Ecológicas	Regiões alagadas, solos, florestas, oceanos, águas continentais.
Florestais	Produção de madeira, controle de desflorestamento, estimativa de biomassa.
Cartográficas	Mapeamento topográfico, mapeamento temático, atualização de terra.
Oceanográficas	Produtividade primária, monitoramento de óleo, estudos costeiros, circulação oceânica.
Hidrológicas	Mapeamento de áreas afetadas por inundações, avaliação de consumo de água por irrigação, modelagem hidrológica.
Limnológicas	Caracterização da vegetação aquática, identificação de tios de água, avaliação do impacto do uso da terra em sistemas aquáticos.

O processo de mensuração da alteração que o objeto em estudo causa no campo que o circunda é realizado através de um sensor. Os sensores podem ser classificados quanto à fonte da energia mensurada, dividindo-se entre sensores ativos e passivos. Os sensores ativos utilizam uma fonte de energia própria, na qual é emitida pelo sensor, interage com o objeto e retorna ao sensor. O tempo de resposta ou a intensidade da energia retornada são mensurados pelo sensor, enquanto que os sensores passivos necessitam de uma fonte externa de energia refletida ou emitida pelo objeto, geralmente a energia solar ou a energia irradiada pela Terra.

Os sensores também podem ser classificados quanto ao resultado dos dados obtidos em sensores imageadores e não-imageadores. Os sensores imageadores resultam os dados obtidos em uma imagem bidimensional ou tridimensional do objeto, por exemplo, uma imagem de satélite da superfície terrestre (Liu 2007). Já os sensores não-imageadores não são capazes de produzir uma imagem bidimensional do objeto, resultando em gráficos com resposta da informação espectral (espectrorradiômetros) ou informação de altimétricas (radar altimétrico e altímetro a *laser*), que segundo Moraes

Novo (2008) as informações altimétricas “podem posteriormente ser interpoladas para se obter uma imagem tridimensional do terreno”.

### 3.2 Princípios físicos e funcionamento do Sistema LiDAR

O Sistema *Light Detection and Ranging* (LiDAR) é uma técnica de sensoriamento remoto ativo, não-imageadora que utiliza escaneamento a *laser* para o levantamento com alta densidade e acurácia da superfície terrestre. O sensor pode estar localizado em plataformas fixas, como um tripé para levantamento de pequenas áreas, ou automóveis terrestre para levantamento de áreas específicas como em locais urbanos. Porém, para o levantamento de áreas extensas e contínuas o mais comum é a utilização do sensor aerotransportado. O sensor quando transportado em veículos aéreos (avião, helicóptero ou VANT – veículo aéreo não tripulado) é denominado *Airborne LiDAR* e é capaz da mensuração com alta precisão de pontos georreferenciados com coordenadas  $x, y$  e  $z$ . O sistema consiste em basicamente três componentes (figura 1) utilizados juntamente para o levantamento dos pontos: (1) sensor GPS; (2) *laser* e; (3) *Inertial Navigation System* (INS).

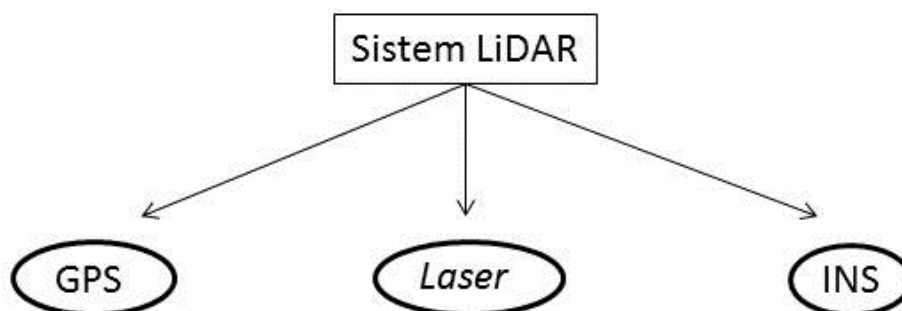


Figura 1 - Componentes do sistema LiDAR

#### **Laser**

O princípio do funcionamento do escaneamento a *laser* aerotransportado consiste na mensuração precisa do tempo gasto em que o feixe de *laser* emitido pelo sensor reflete sobre a superfície e retorna ao sensor. Segundo Giongo *et al.* (2010) O

feixe de *laser* dos sensores LiDAR consiste na emissão de radiação eletromagnética com ondas curtas (1 – 10µm), sendo assim, por ser uma onda eletromagnética sua velocidade é constante e de valor conhecido, a velocidade da luz. Devido a isso, a distância entre o sensor e o alvo pode ser calculada pela metade da distância percorrida pelo *laser*, isto é, o tempo que o *laser* leva para voltar ao sensor é referente ao percurso de saída do sensor e o retorno (Baltsavias 1999). Essa relação pode ser observada na Equação 1:

$$R = c \frac{t}{2} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

*R* – *range*, distância percorrida pelo *laser*

*c* – velocidade da luz

*t* – tempo

Sendo assim, segundo Giongo *et al.* (2010) os sensores de varredura a *laser* apresentam uma vantagem “em relação aos clássicos sensores passivos (fotografias aéreas e imagens de satélite) é que os *scanners* a *laser* não dependem do sol como uma fonte de iluminação”, ou seja, áreas sombreadas por nuvens e outros objetos não interferem na qualidade do levantamento, assim como torna possível levantamentos a noite.

A frequência do escaneamento é outro atributo importante do sensor e influencia diretamente no detalhamento do levantamento realizado, de modo que quanto maior a frequência, maior será a quantidade de pontos levantados. A frequência do escaneamento é o número de pulsos de *laser* emitido pelo sensor em um segundo. Gatzolis & Andersen (2008) afirmam que os sensores em poucos anos, avançaram de poucos milhares de pulsos por segundo para frequências de mais de 167kHz atualmente, porém os levantamentos mais frequentes são realizados na faixa de 71 até 150 kHz.

Além da frequência de emissão do pulso de *laser*, existe ainda a presença do conjunto ótico de espelhos responsável por realizar a varredura direcionando o pulso de *laser* gerado para o objeto. Os espelhos de varredura mais utilizados nos sensores do

sistema LIDAR são: espelho oscilantes, polígono rotatório, varredura Palmer e varredura de fibras rotatórias (Giongo *et al.* 2010). Cada espelho de varredura promove uma varredura de pontos com padrões espaciais diferenciados, podendo ser observado na figura 3.

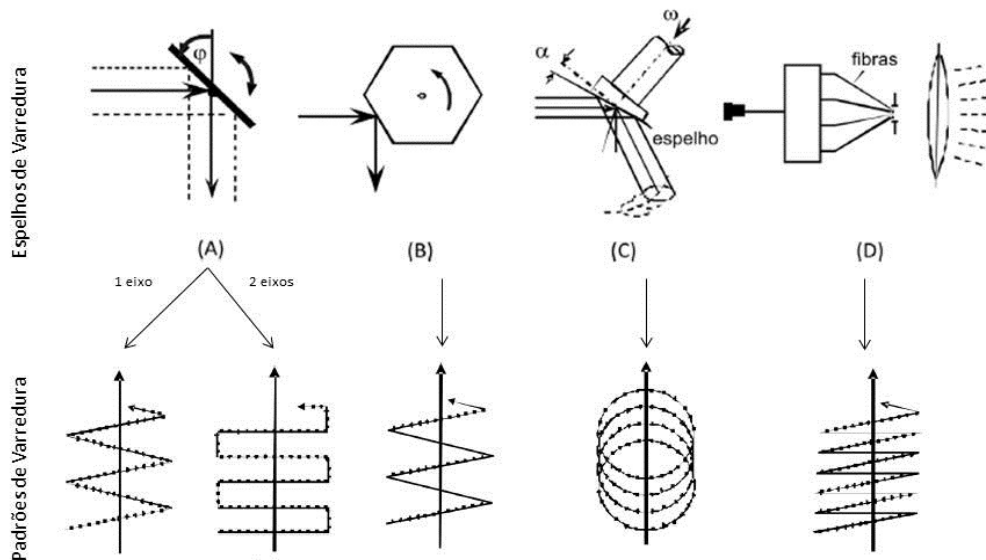


Figura 2 - Espelhos de varredura e os padrões de varredura gerados. (A) Espelho oscilante, (B) Polígono rotatório, (C) Varredura Palmer, (D) Varredura de fibras rotatórias. Fonte: adaptado de Giondo *et al.* 2010 e Wehr & Lohr 1999)

Os espelhos de varredura têm duas configurações importantes: o ângulo de escaneamento e o *footprint*. O ângulo de escaneamento é o ângulo em que o pulso do *laser* diverge do foco garantindo uma cobertura de área mais abrangente. Já o *footprint* é o diâmetro que o pulso do *laser* é capaz de divergir do foco no terreno. Para um mesmo ângulo de escaneamento o *footprint* torna-se maior com o aumento da altitude de voo, cobrindo uma área maior, porém com menor densidade de pontos (figura 3).

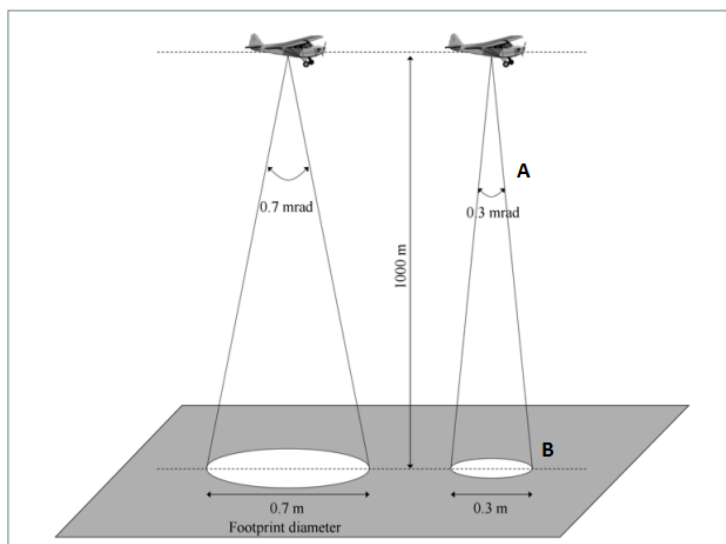


Figura 3 - (A) Ângulo de escaneamento. (B) *Footprint*. Fonte: Gatzolis & Andersen (2008)

O pulso do *laser* emitido pelo sensor pode ao encontrar com o objeto retornar ao sensor em um único retorno (*laser return*) ou em vários. A figura 4 apresenta a diferenciação dos retornos do *laser*. O primeiro retorno é identificado como o objeto mais alto do terreno, como o topo de uma árvore, enquanto que o último é referente ao solo, no caso de uma área com cobertura vegetal. Em casos de áreas sem cobertura vegetal, como solo exposto ou afloramentos rochosos, o primeiro retorno é referente ao solo, porém é o único retorno devido a ausência de outras feições para refletir o pulso.

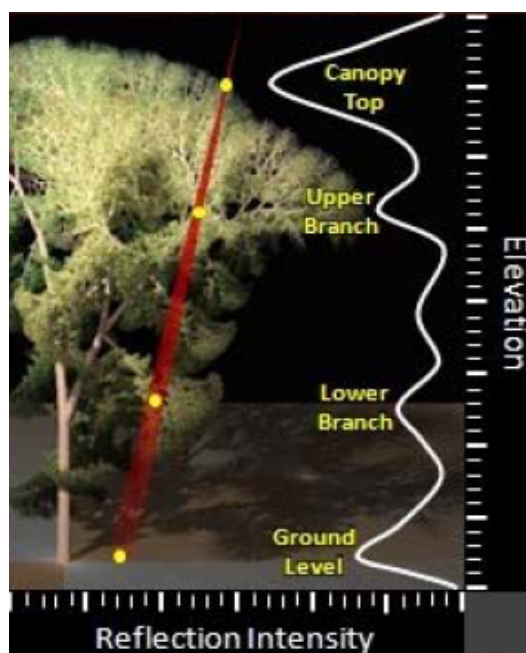


Figura 4 – Ilustração demonstrando os diferentes retornos do pulso de *laser*. Fonte (Albacete 2011)

## GPS

O sensor GPS é necessário para o posicionamento da aeronave com precisão quando o pulso do *laser* é emitido. Isso permite a localização do ponto levantado (coordenadas  $x$  e  $y$ ) assim como a altitude do voo. A distância entre o sensor e objeto levantado é obtida através do *laser* pela equação 1 e a diferença da altitude do voo com a distância do objeto obtém-se a altimetria do objeto (coordenada  $z$ ). Giongo *et al.* (2008) ressalta a importância do levantamento realizado pelo sensor GPS, que usualmente é realizado por “RTK (*Real Time Kinematic*) ou DGPS (*Differential GPS*) e são baseadas no modo diferencial em que as correções dos sinais dos satélites são transmitidas, em tempo real, da estação de referência para uma estação a qual se deseja determinar as coordenadas”. Por isso, durante o levantamento, o autor ainda afirma que a distancia do voo e da estação de referencia utilizada deve ficar dentro de 20km para não prejudicar a precisão do levantamento.

## Inertial Navegation System – INS

O *Inertial Navegation System* é utilizado para que os movimentos realizados pela aeronave por turbulência e correção de trajeto não interfiram na precisão do levantamento. O sistema consiste em sensores como acelerômetros e giroscópios para a mensuração da rotação sofrida pela a aeronave em três eixos (arfagem, deriva e rolagem), figura 5.

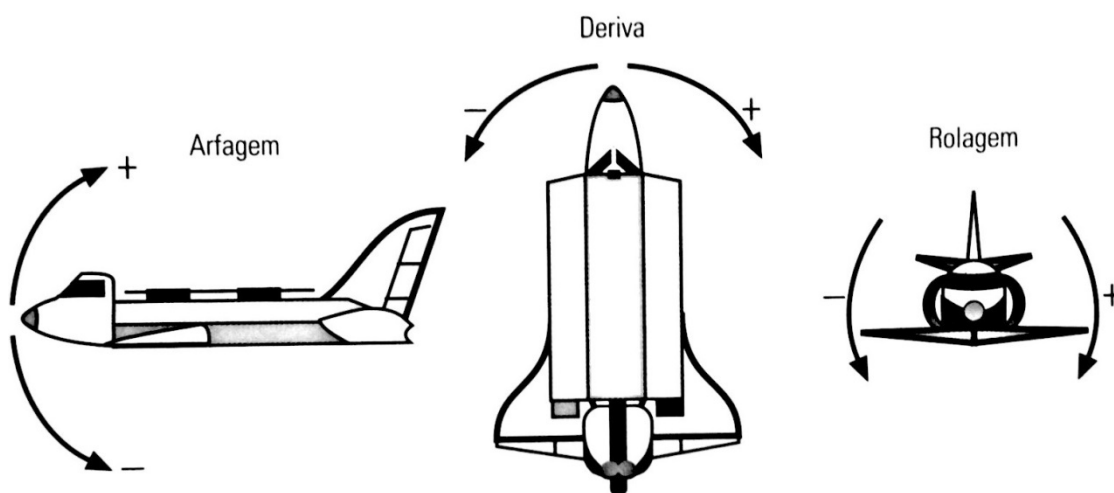


Figura 5 - Ilustração dos 3 tipos de rotação sofridas por uma aeronave. Fote Moraes Novo (2008)

### Atributos dos dados LiDAR

Os dados primários gerados pelo Sistema LiDAR trazem diversos atributos sobre o levantamento, não apenas as coordenadas  $x$ ,  $y$ , e  $z$  mas também informações sobre os pulsos *laser* emitido (Gatziolis & Andersen 2008):

- Desidade do pulso (*pulse density*) – é a razão entre o espaçamento dos *footprints* sobre uma superfície plana medida em  $1/(\text{espaçamento do footprint})^2$  e consiste em uma resolução espacial confiável para o levantamento.
- Densidade de retorno (*return density*) – consiste na média de retornos do pulso de *laser* presente em um conjunto de dados, medidos em  $\text{m}^2$ . Em um cenário onde as configurações do levantamento continuem as mesmas, a densidade de retorno em um área de floresta apresentará maior densidade em comparação com uma área de solo exposto, devido ao maior número de retornos causados pela vegetação, como demonstrado na figura 4.
- Intensidade de retorno (*return intensity*) – descreve a intensidade (força) que o pulso do *laser* retorna ao sensor. A intensidade de retorno está ligada à refletância do alvo. Tal atributo é importante, pois não apenas o tempo de retorno pode ser utilizado na classificação dos pontos, mas o padrão da intensidade do retorno também pode ser utilizado.
- Valor do retorno (*return number*) – indica o valor do retorno dentro do *rank* de retornos de um pulso, ou seja, indica o primeiro, o segundo até o último retorno do pulso.
- Valor de classificação (*classification schemes*) – indica o valor da classificação dos pontos. A tabela 2 apresenta os valores de classificação mais comum utilizados.
- *GPS Time* - horário preciso da emissão de cada pulso
- Outros atributos referentes à configuração do pulso do *laser* utilizado como: ângulo de escaneamento, linha de voo, *end-of-scan-line*.

Tabela 2 – Classificação dos ponto LiDAR. Fonte: Albacete 2011.

<b>Valor</b>	<b>Descrição</b>
0	Nunca classificados
1	Sem classificação
2	Solo
3	Vegetação baixa
4	Vegetação média
5	Vegetação alta
6	Edifícios
7	Ruído
8	<i>Model key</i>
9	Água
10	Reservado para ASPRS
11	Reservado para ASPRS
12	Sobreposição
13 -31	Reservado para ASPRS

### **Classificação dos pontos LiDAR**

A capacidade de classificação dos pontos LiDAR em diferentes objetos torna-se uma vantagem deste tipo de levantamento frente à outros tipos. Essa classificação segundo Gatzolis & Andersen (2008) pode ser realizada através de limiares quanto à velocidade de retorno e à diferença altimétricas, ou seja, pontos podem ser classificados, como observado na figura 4, do primeiro retorno ao último, ou através de limites de altura estipulados pela estrutura da vegetação encontrada na área levantada. Pacheco *et al.* (2011) cita os principais método de classificação em 4 tipos distintos e a sua descrição pode ser observada na tabela 3.



Tabela 3 – Classificação dos tipos de filtros dos dados LiDAR. Fonte: Pacheco *et al.* (2011)

Declividade	Essencialmente a ideia desse filtro é a de que, para uma das diferenças de altura entre dois pontos, a probabilidade de o ponto mais alto não pertencer ao terreno aumenta com a diminuição da distância linear entre eles (VOSSSELMAN, 2000).
Superfície	VOSSSELMAN (2000) considera que visto que uma pequena porcentagem de pontos de um levantamento LIDAR atinge o terreno, estes podem ser usados para classificar os restantes. Os mínimos locais da nuvem de pontos são considerados como pertencentes ao terreno e dão origem a uma superfície inicial. Um ponto qualquer pertenceria ao terreno se a diferença de altura entre este ponto e a superfície inicial for menor que um limiar pré-estabelecido. O método é iterativo e a cada passo novos pontos são adicionados, melhorando a superfície inicial e aproximando-a do MDT.
Segmentação	Neste caso, o conjunto de dados é inicialmente segmentado e depois classificado, considerando que os pontos de um segmento ( <i>cluster</i> ) não pertencem ao terreno se a altura do segmento estiver acima dos segmentos na vizinhança. THUY e TOKUNAGA (2002) utilizaram a transformada Wavelet para realizar a segmentação de dados LIDAR a fim de verificar se a imagem segmentada poderia ser utilizada para detecção de edificações e outros objetos não pertencentes ao terreno.
Bloco mínimo	O princípio fundamental desse método é mais comumente conhecido nas literaturas internacionais como <i>block-minimum</i> . Dentro de uma região da nuvem de pontos se identifica o menor valor, supostamente do terreno. Em relação a sua altura se definem dois planos horizontais de tolerância, entre os quais se espera que residam os pontos pertencentes ao terreno.

No estudo de Polat & Uysal (2015) foram comparados 5 métodos mais utilizados para a filtragem dos dados brutos do LiDAR no *software* gratuito chamado *Airborne LiDAR Data Processing and Analysis Tools* (ALDPAT) desenvolvido pela *International Hurricane Research Center*, instituição do Departamento de Estudos Ambientais da Universidade da Florida. Cada algoritmo realiza a classificação dos pontos com parâmetros diferentes:

- *Elevation Threshold with Expand Window* (ETEW) – identifica as diferenças altimétricas dos pontos dentro de uma janela móvel para a separação de pontos *ground* e pontos *non-ground*. A nuvem de pontos é separada em um *grid* onde os pontos de cada célula são eliminados menos o com o valor mínimo.
- *Progressive Morphology* (*Morph Filter*) – semelhante ao ETEW, o método utiliza de um limiar de diferença altimétricas escolhido para a área

analisada, assim como o tamanho de célula para a eliminação de pontos *non-ground* que extrapolem o limiar.

- *Maximum Local Slope (Slope Filter)* – os pontos *ground* são classificados pela diferença de declividade encontrada entre a topografia do terreno e o topo de árvores e prédios. Porém, esse método pode não apresentar bons resultados em áreas de relevos heterogêneos, pois os limiares escolhidos para a classificação podem causar erros na classificação.
- *Iterative Polynomial Fitting (Polynomial Filter)* – utiliza um ajuste polinomial para cada conjunto de dados LiDAR, classificando os pontos diretamente dos dados brutos.
- *Adaptive TIN (ATIN)* – é utilizado em áreas reduzidas com superfícies descontínuas, apresenta bons resultados em áreas urbanas. O processo consiste na geração de TIN com pontos selecionados pelo utilizador. As diferenças entre o TIN gerado com os pontos selecionados e o TIN gerado com os pontos LiDAR são comparados e os pontos classificados os pontos que não estiverem dentro do limiar são excluídos restando apenas os pontos referentes ao solo.

Diversos trabalhos como Mongus & Zalik (2012, 2014), Mongus *et al.* (2014), Vosselman (2000) e Wang & Tseng (2010) utilizaram limiares para classificação dos pontos com base nas diferenças de altimetria ou de declividade como método. Tais estudos sugerem que para cada área levantada, os algoritmos e limiares a serem escolhidos devem levar em conta o relevo e o tipo de cobertura presente para reduzir a quantidade de pontos classificados de maneira equivocada. A classificação dos pontos é o primeiro passo para a obtenção de um MDT de qualidade, principalmente em áreas de relevos declivosos e com cobertura vegetal densa e heterogênea (Cobby *et al.* 2001; Reutebuch *et al.* 2003; Slatton 2007; Liu *et al.* 2007; Heritage & Milan 2009)

Wang & Glenn (2009) utilizaram a intensidade do retorno (*return intensity*) ao invés da diferença altimétrica dos pontos levantados pelo *laser*. A classificação proposta pelos autores foi realizada em uma área com presença de coníferas, vegetação arbustiva até um metro de altura e terreno apresentando declividades maiores do que 45°. Devido a mensurações em campo da refletância da vegetação, foi obtido uma

relação linear com os valores de intensidade do retorno do LiDAR, estabelecendo o limiar para vegetação e terreno. A classificação resultou em uma acurácia de 85% dos pontos classificados e um MDT gerado com erro médio de 0,31m.

### **3.3 Modelo Digital de Terreno em Sistemas de Informação Geográficas**

Christofolletti (1999) discorre a cerca do uso de modelos desde o início da ciência contemporânea e o seu uso possibilitou avanços no conhecimento científico e se tornou uma das abordagens mais comuns na metodologia de um trabalho científico. O autor afirma que um modelo é “qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que surja como de interesse do pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução.”.

Quando os fenômenos ocorrem sobre a superfície terrestre torna-se necessário para maior adequação e precisão do modelo analisá-lo através de outras condicionantes que estabelecem sua localização, trabalhá-los em Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) vem se tornando cada vez mais comum. Segundo Câmara (1996) os SIGs são sistemas que através de meio computacional tratam dados não apenas em sua forma alfanumérica, mas também os processam através de sua localização espacial. Tais sistemas possibilitam que informações variadas sobre determinado tema estejam inter-relacionadas com a sua localização espacial. Essa inter-relação é essencial nos estudos de movimentos de massa, análises hidrológicas, variação de uso do solo e cobertura vegetal, dentre outros. Por isso, os SIGs permitem a sobreposição de diversos mapeamentos temáticos necessários à análise do fenômeno. O autor conclui que para esse processo ser possível há a necessidade dos dados tenham sua geometria e atributos georreferenciados.

Schumann *et al.* (2000) especifica a importância da integração da modelagem hidrológica com SIGs devido à melhora na estimação de parâmetros importantes para a modelagem, através de mapas digitais temáticos. Uma vez que estas informações estejam devidamente georreferenciadas, as mesmas podem ser sobrepostas e posteriormente analisadas no contexto da bacia hidrográfica (ou diferentes áreas de

contribuição), assim como em áreas menores ou células. Este procedimento em SIG permite um recorte espacial que expressa os processos hidrológicos e os conjuntos de parâmetros morfométricos ligados a cada célula.

Felgueiras (1999) define o Modelo Numérico de Terreno (MNT) como uma “representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre”, podendo assim representar informações geológicas, geoquímicas, meteorológicas, dentre outras. A nomenclatura utilizada em SPOT IMAGE (2004) para o MNT gerado com informações altimétricas podem ser definidos como Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT), figura 6. Tal classificação enquadra-se no MNT definido por Felgueiras (1999) para os casos de utilização de valores de altimetria do relevo (MDT) e para valores de altimetria para a cobertura (MDS).

O avanço dos levantamentos topográficos de alta resolução traz a necessidade de diferenciação dos MDS e MDT, devido ao levantamento realizado através do sistema LiDAR ser capaz de levantar pontos tanto da cobertura (vegetação e edificações) quanto do terreno. Deste modo, os MDS são gerados a partir dos pontos que levam em consideração os objetos que estão presentes no terreno, como árvores e edificações. Cabe ressaltar que o MDS gerado a partir de levantamentos LiDAR tem sido utilizado em diversos estudos para a estimativa de parâmetros de estrutura da vegetação como, altura das copas, números de indivíduos e estimativa da biomassa (Nilson 1996; Dubayah *et al.* 2000; Andersen *et al.* 2006; Packalén 2009). Este estudo utiliza a classificação de MDT, ou seja, referente ao modelo em que considera apenas os pontos relativos ao relevo, excluindo-se a cobertura de vegetação e edificações.

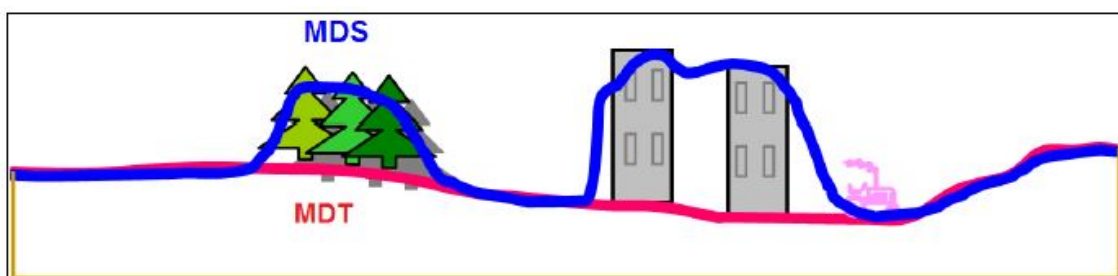


Figura 6 - Diferenciação do MDS e MDT. Fonte: SPOT IMAGE (2004)

### Modelo Digital de Terreno em Grade Regular

Uma das estruturas de representação espacial dos dados em um MDT é em formato de *grid* ou grade regular retangular e Felgueiras (1999) define a grade regular como “um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares”, essa configuração divide a superfície em células  $(x,y)$  de mesma resolução, onde o espaçamento horizontal e vertical são iguais em todas as células, porém podendo ter dimensões de  $x$  e  $y$  diferentes (grade regular retangular). Os *grids* com mesmo espaçamento horizontal e vertical são chamados de modelos de grade regular quadrada (Fernandes, 2004).

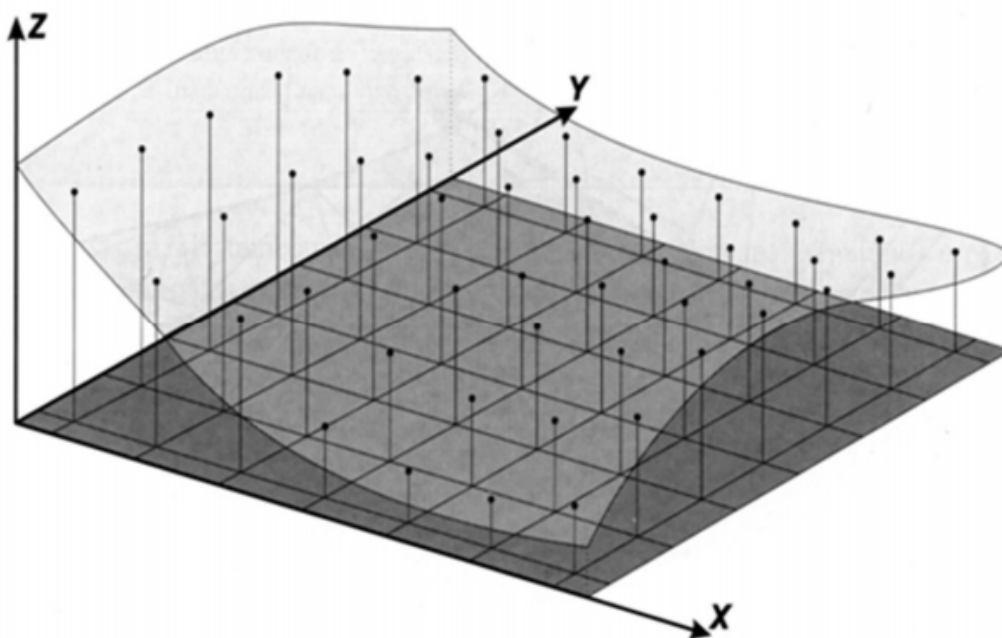


Figura 7 – Representação do modelo de grade regular retangular. Fonte: Felgueiras (1999)

Ainda segundo Felgueiras (1990) “o processo de geração de uma grade regular consiste em estimar os valores de cota de cada ponto da grade a partir do conjunto de amostras de entrada”, ou seja, cada célula presente na grade regular de um MDT terá o valor de altimetria  $z$  estipulado pela amostra localizada dentro da célula. No caso deste estudo as amostras são proveniente da nuvem de pontos gerada pelo levantamento LiDAR, classificadas como *ground* pela empresa Hansa - Geofísica e Aerolevantamento Ltda., responsável pelo levantamento.

A qualidade do MDT está diretamente ligada à amostragem utilizada, podendo esta ser regularmente espaçadas ou irregularmente espaçadas (figura 8). Em ambos os casos, a resolução da grade regular “deve ser idealmente menor ou igual a menor distância entre duas amostras com diferentes cotas” (Fernades 2004), ou seja, cada célula da grade regular, ao respeitar esse parâmetro para sua resolução deve conter ao menos uma amostra. A amostragem realizada através do levantamento LiDAR como já foi visto, permite o espaçamento entre amostras muito pequeno, geralmente menor do que 1 metro, e uma grade regular muito densa, apesar de manter muita informação e gerar um nível de detalhamento elevado, pode aumentar o tempo de processamento.

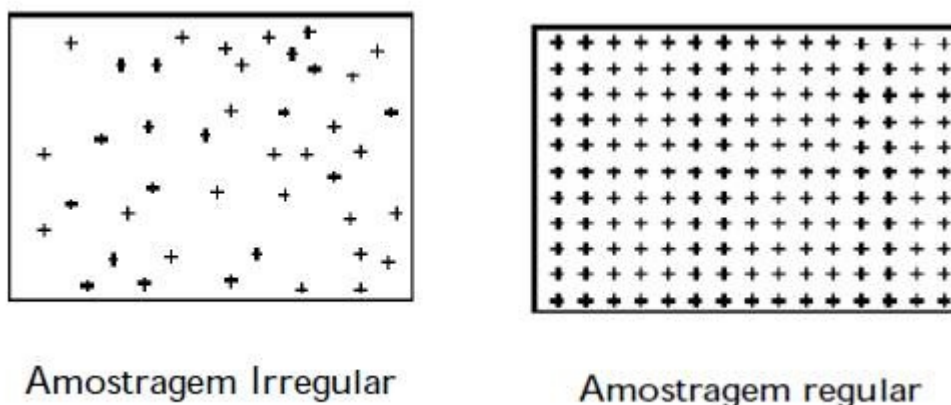


Figura 8 – Amostragem irregular e regular. Fonte: Felgueiras (1999)

O espaçamento das amostras em uma amostragem irregular ou com resolução menor do que os espaçamentos entre as amostras o valor da célula é estipulado através do processo de interpolação. Diversos interpoladores são utilizados e os mais comuns utilizados são os interpoladores por média móvel, superfícies de tendência e krigagem (Felgueiras 1999; Valeriano 2008):

- Média móvel – consiste no método de interpolação mais simples para a estimativa de cotas na grade retangular regular, a equação 2 expressa a formulação básica dos interpoladores de média móvel. As variações mais comuns dessa formulação são os interpoladores por: vizinho mais próximo; média simples; média ponderada; média ponderada por quadrante; média ponderada por quadrante e por cota.

$$z_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n w_{ij}}, \quad \text{Eq. 2}$$

onde:

$z_i$  – valor de cota de um ponto  $i$  qualquer da grade,

$z_j$  – cota de uma amostra

$j$  – vizinha do ponto  $i$  da grade

$w_{ij}$  – fator de ponderação

- Superfícies de Tendência – utiliza regressões polinomiais dos dados amostrais em relação à sua localização geográfica. Deste modo, o valor da cota é expresso em função de suas coordenadas, tendo como exemplo as funções lineares (equações 3 e 4) e funções quadráticas (equação 5.). Na figura 9 é possível observar o ajuste da curva na variação dos dados.

$$w = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad \text{Eq 3}$$

$$w = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \quad \text{Eq 4}$$

$$w = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy + \alpha_5 x^2 + \alpha_6 y^2 \quad \text{Eq 5}$$

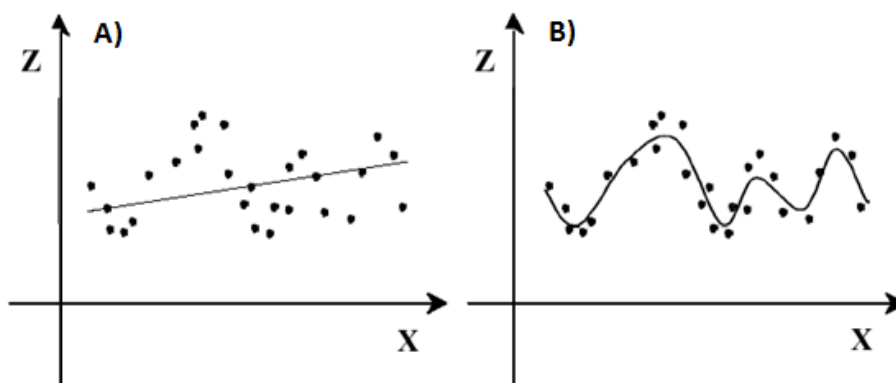


Figura 9 - A) ajuste polinomial linear. B) ajuste polinomial quadrático. Fonte: Felgueiras (1999)

- Krigagem – este método de interpolação utiliza procedimentos geoestatísticos sobre o conjunto de dados. Apesar de sua formulação expressa pela equação 6

ser muito semelhante à média móvel, a krigagem utiliza pesos estabelecidos a partir de uma análise espacial de um semivariograma do conjunto amostral (Fernades 2004).

$$H = \sum_{i=1}^n \lambda_i H_i \quad \text{Eq 6}$$

Onde:

H - valor a ser estimado

$\lambda_i$  - pesos de influência de cada vizinho

$Z_i$  - altitudes dos vizinhos

Para a interpolação de valores altimétricos, cada interpolador terá uma resposta diferente para a uma mesma área analisada, os interpoladores de tendência como o linear pode apresentar feições planas e não representar de forma correta a curvatura do relevo. O interpolador de média móvel IDW (sigla em inglês de Inverso do Quadrado da Distância), produz inúmeras feições não existentes no terreno, enquanto o interpolado por meio da krigagem apresenta uma suavização maior do relevo (Valeriano 2002, 2008). Na figura 10 pode-se observar a diferença desses três tipos de interpoladores para uma mesma seção.

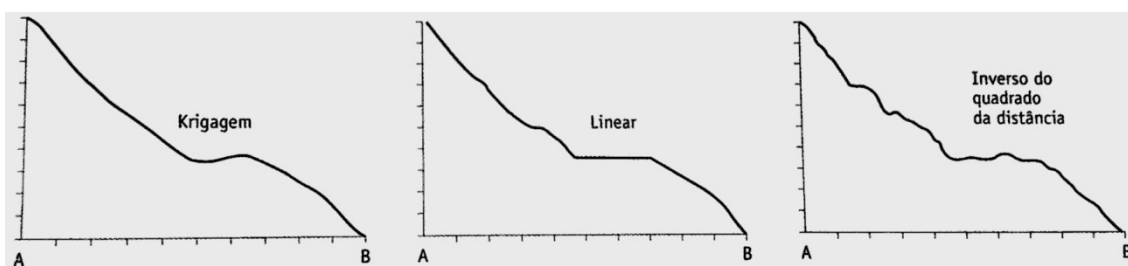


Figura 10 - Superfície de uma seção obtida para diferentes interpoladores: Fonte: Valeriano (2008).



## Modelo Digital de Terreno em Grade Irregular Triangular

Segundo Felgueiras (1999) a grade irregular triangular (TIN – *triangulated irregular network*) é um poliedro de faces triangulares e “em um modelo de grade irregular triangular os pontos amostras são conectados por linhas para formar triângulos”. Abdul-Rahman & Desa (1996) descrevem o modelo TIN onde os 3 vértices de cada triângulo formado pela rede tem coordenadas  $x$ ,  $y$ , e  $z$ . Os vértices representam os pontos amostras originados de coletas de campo, amostragem fotogramétrica, digitalização de curvas de nível ou qualquer outro método sem ser interpolados. A conexão de 3 pontos forma um triângulo e com mais conexões entre todas as amostras formando triângulos é estabelecido o TIN (figura 11).

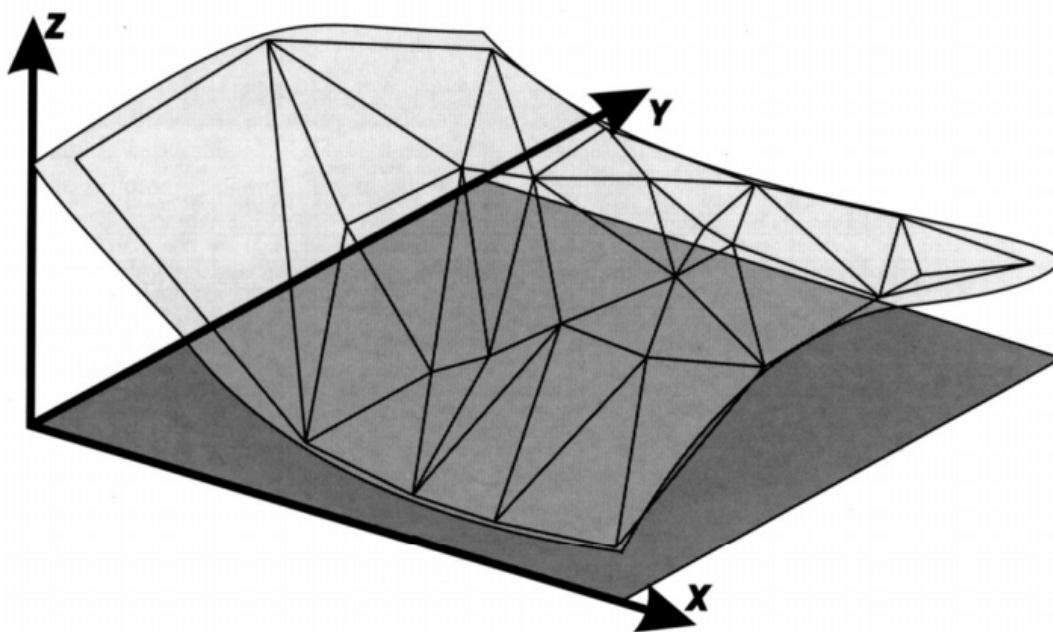


Figura 11 – Representação do TIN. Fonte: Felgueiras (1999)

O método de triangulação das amostras mais comum é a Triangulação de Delaunay, que consiste na formação do triângulo com a maximização dos ângulos mínimos, para que ocorra a formação de triângulos o mais próximo possível de triângulos equiláteros. Para Felgueiras (1999) outra forma de implementar-se a Triangulação de Delaunay é com o critério do circuncírculo, em que a triangulação é

formada apenas se o círculo que contém os três vértices de cada triângulo formado na malha triangular não contém nenhum ponto (vértice) de outro triângulo (figura 12)

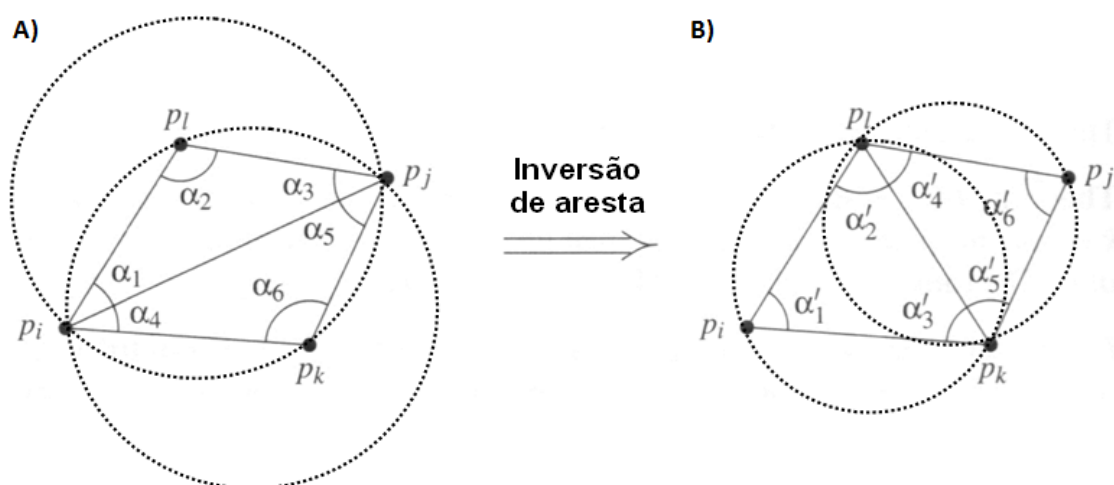


Figura 12 – Critério do circuncírculo para a geração da triangulação de Delaunay. A) Não é uma triangulação de Delaunay, pois  $p_l$  e  $p_k$  estão inseridos nos círculos; e  $\alpha_1, \alpha_3 < \alpha'_1, \alpha'_3$  e  $\alpha_4, \alpha_5 < \alpha'_4, \alpha'_5$  (triângulos isósceles). B) É uma triangulação de Delaunay:  $p_l$  e  $p_k$  não estão inseridos nos círculos; e  $\alpha'_1, \alpha'_3 > \alpha_1, \alpha_3$  e  $\alpha'_4, \alpha'_5 > \alpha_4, \alpha_5$ . Fonte: Fernandes (2004).

Uma vantagem do TIN é a utilização de restrições para a geração da malha triangular, isto é, feições topográficas como linhas de mínimo (drenagem) e linhas de máximo (divisores topográficos) podem ser inseridas e a triangulação respeitará essas feições, assim a triangulação “deve considerar primeiro as características topográficas da superfície e depois o critério do circuncírculo de Delaunay” Felgueiras (1999). A figura 13 apresenta um exemplo de triangulação formada em áreas côncavas onde há presença de drenagem que não foi considerada, e na figura 14 há a presença de arestas de triângulos em feições lineares como as linhas de drenagem.

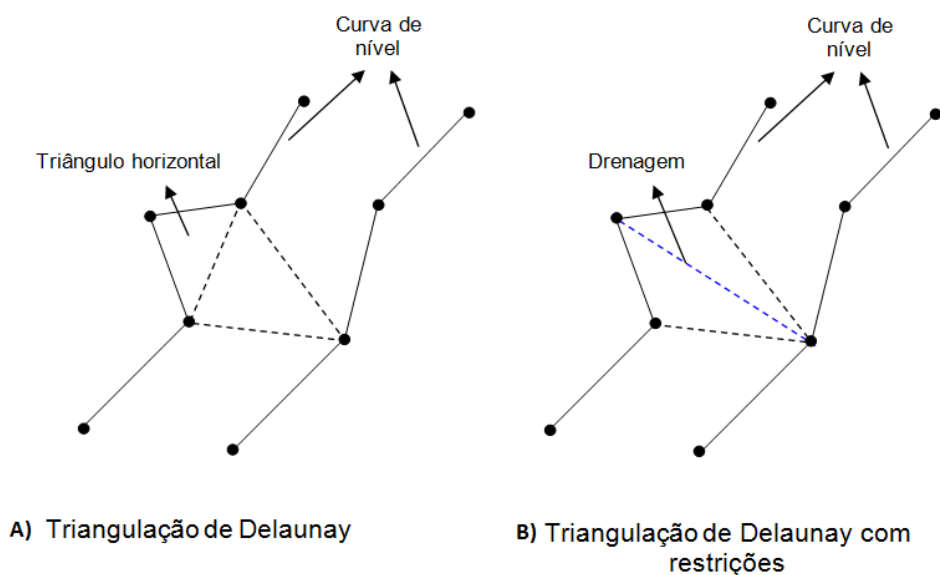


Figura 13 - Eliminação de triângulo horizontais. Fonte: Fernandes (2004, modificado de Felgueiras 1999)

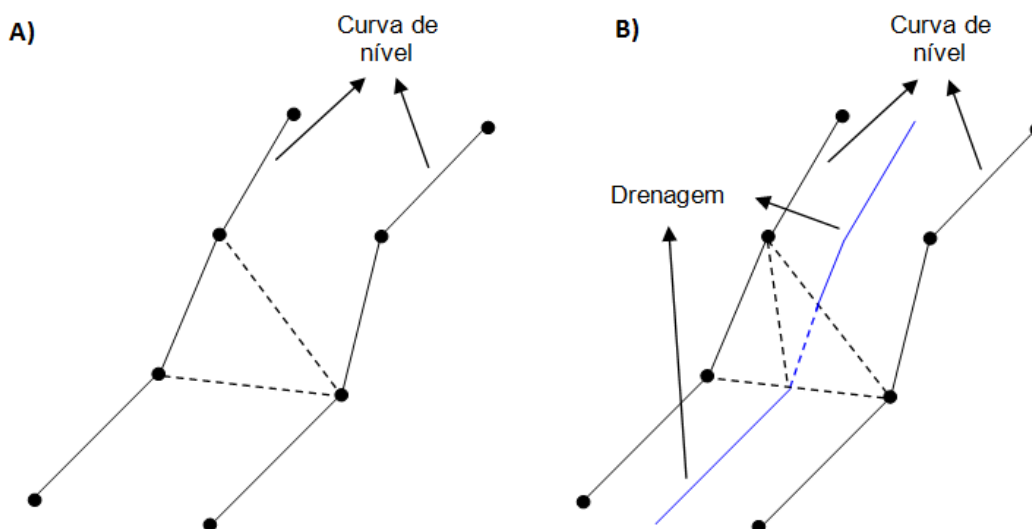


Figura 14 - Transformação da triangulação de Delaunay de A) para B) para manter as características topográficas. Fonte: Fernandes (2004, modificado de Felgueiras 1999)

O ajuste linear e o ajuste quártico são os interpoladores mais comuns utilizados para estimar o valor associado a qualquer ponto na malha triangular (Felgueiras 1999). O ajuste linear considera a variação dos valores de cota com comportamento linear, o que o torna o interpolador mais simples utilizado na malha triangular, deste modo, os três vértices do triângulo formam um plano. Esse ajuste gera uma continuidade entre os triângulos vizinhos, porém não garante uma suavização na transição entre diferentes

superfícies. A formulação do interpolador é descrita pela equação do plano (equação 7), onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  são pontos do plano:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad \text{Eq 7}$$

O ajuste quártico é um interpolador mais complexo em relação ao ajuste linear. Desenvolvido por Akima (1978), o ajuste quártico trabalha de forma semelhante ao ajuste linear, utilizando o plano formado pelos vértices do triângulo, porém os valores nos pontos da malha triangular são estipulados pelo ajuste de uma superfície polinomial de quinta ordem incompleta, através da equação 8:

$$Z(x, y) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^{5-i} q_{ij} x^i y^j \quad \text{Eq 8}$$

Onde,

$Z_i$  – valor da cota de um ponto  $i$

$Q_{ij}$  – fator de ponderação

A tabela 4 apresenta uma breve comparação entre os modelos regulares e irregulares:

Tabela 4 - Comparação entre modelos de grades regulares e irregulares. Fonte: Felgueiras (1999)

Grade Regular Retangular	Grade Irregular Triangular
Apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo	Não apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo
Os vértices dos retângulos são estimados a partir das amostras	Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral
Apresenta problemas para representar superfícies com variações locais acentuadas	Representa melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas
Estrutura de dados mais simples	Estrutura de dados mais complexa
Relações topológicas entre os retângulos são explícitas	É necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos
Mais utilizado em aplicações qualitativas para análises multiníveis no formato "raster"	Mais utilizado em aplicações quantitativas.

## 4 – Área de estudo

### 4.1 Maciço da Tijuca

Situado entre os paralelos: 22°55' e 23°00' S e os meridianos 43°20' e 43°10' W e com área aproximada de 120 km<sup>2</sup> (figura 15), o Maciço da Tijuca pertence ao domínio dos maciços costeiros do município do Rio de Janeiro, onde se encontram também o Maciço da Pedra Branca e o Gericinó-Mendanha. Seu recorte espacial é realizado a partir da cota de 40m, atingindo ponto culminante em 1.021 m de altitude no Pico da Tijuca.

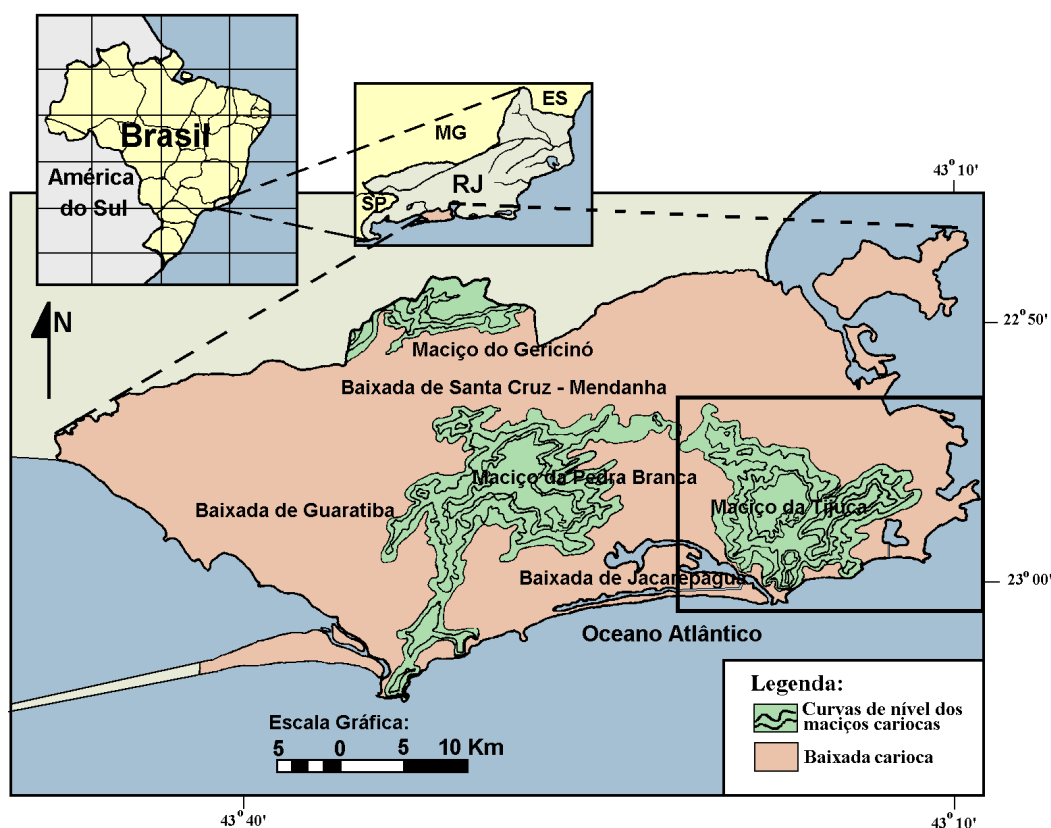


Figura 15 – Localização do Maciço da Tijuca. Fonte: (Fernandes, 2004)

O Maciço da Tijuca é caracterizado pelo seu relevo montanhoso florestado, com grande avanço urbano da Cidade do Rio de Janeiro, além de ser um importante regulador hidrológico e reservatório de água para a cidade, com padrão de drenagem radial conectando as zonas de cabeceiras de drenagem com as planícies flúvio-marinhas nas baixadas, posteriormente alcançando as lagoas e o mar (Coelho Netto 1985) (figura 17). Sua drenagem é constituída por cinco setores hidrográficos, “os setores 1 (direção

N) e 2 (direção NE) drenam em direção à Baía de Guanabara; o setor 3 (direção E) drena em direção à zona sul da cidade; e os setores 4 (direção S) e 5 (direção W) drenam em direção à baixada de Jacareáguá.” (figura 16).



Figura 16 - Mapa com os setores hidrográficos do Maciço da Tijuca. Fonte: Fernandes *et al.* (1998)

Sua área total é de 11.870 hectares e suas encostas são recobertas de vegetação florestal em diferentes estágios sucessionais, bem como gramíneas, afloramentos rochosos e áreas urbanizadas, que formam um mosaico urbano-florestal (Coelho Netto 2005). Nas áreas de fragmentos secundários, Coelho Netto (1992) afirma que 3 diferentes estratos podem ser observados: (1) o estrato arbóreo com presença de indivíduos com mais de 20 metros de altura; (2) sub-bosque arbustivo com espécies de estatura mais baixa e com pouca necessidade de luz; (3) e o estrato herbáceo. A temperatura média anual é de 22°C, com mínimas que chegam a 10°C durante o inverno e máximas de 35°C no verão.



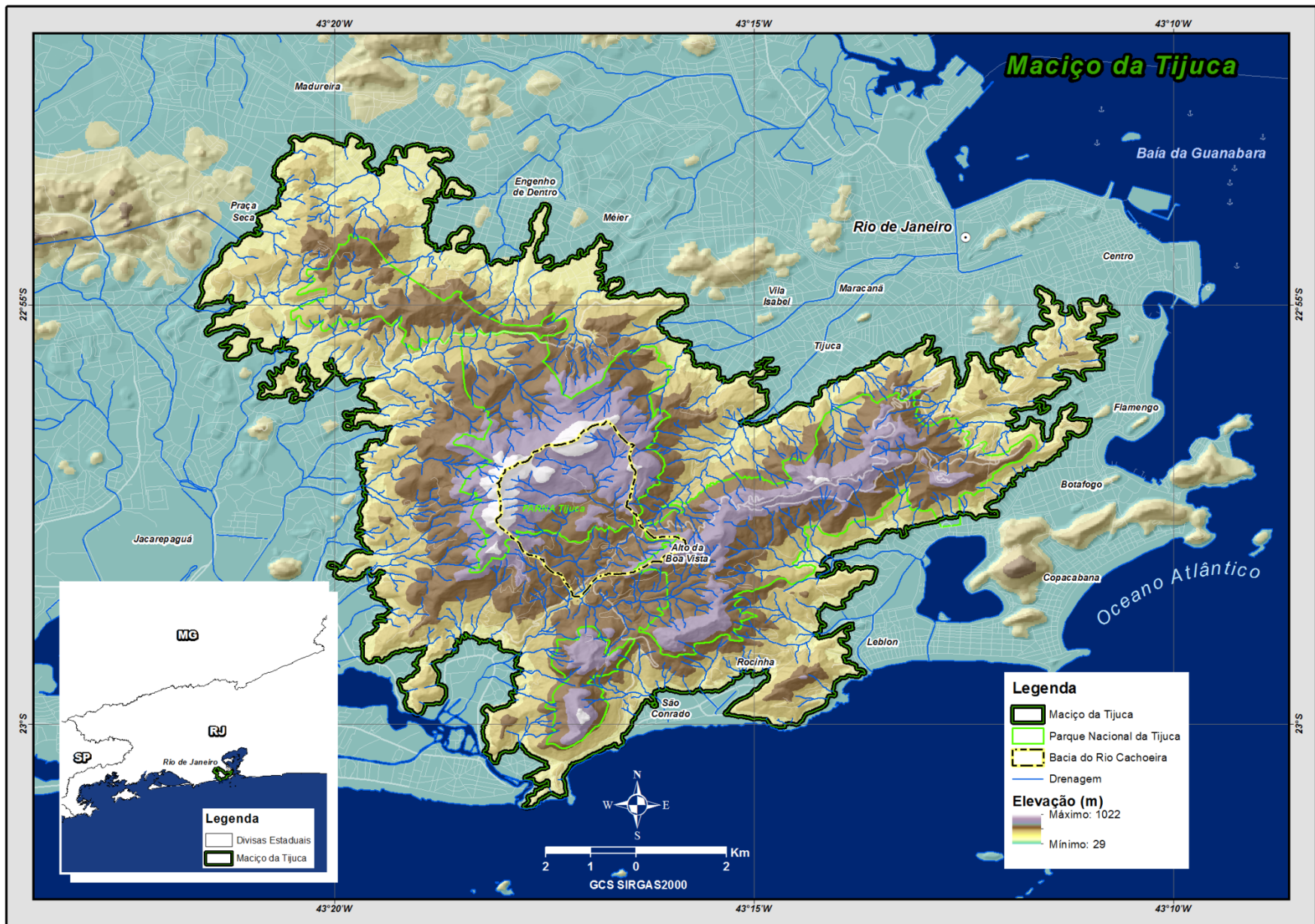


Figura 17 - Maciço da Tijuca

A média anual de precipitação oscila de 2000 a 2500 mm para a região do Alto da Boa Vista, podendo atingir extremos de 3600 mm em anos mais úmidos e 1600 mm em anos mais secos. Para a estação Capela Mayrink localizada no Parque Nacional da Tijuca (PNT), segundo a análise realizada por Negreiros (2011) utilizando a série temporal de 1977 a 2009, observa-se o acumulado de 3.101mm para o ano mais chuvoso (em 1988) e o com maior a estiagem no ano de 1997 com precipitação anual de 1.264 mm (figura 18). Os meses de verão são os que mostram maiores índices pluviométricos, sendo comuns chuvas mais intensas que são responsáveis por grande parcela da precipitação total anual (Coelho Netto, 1985).

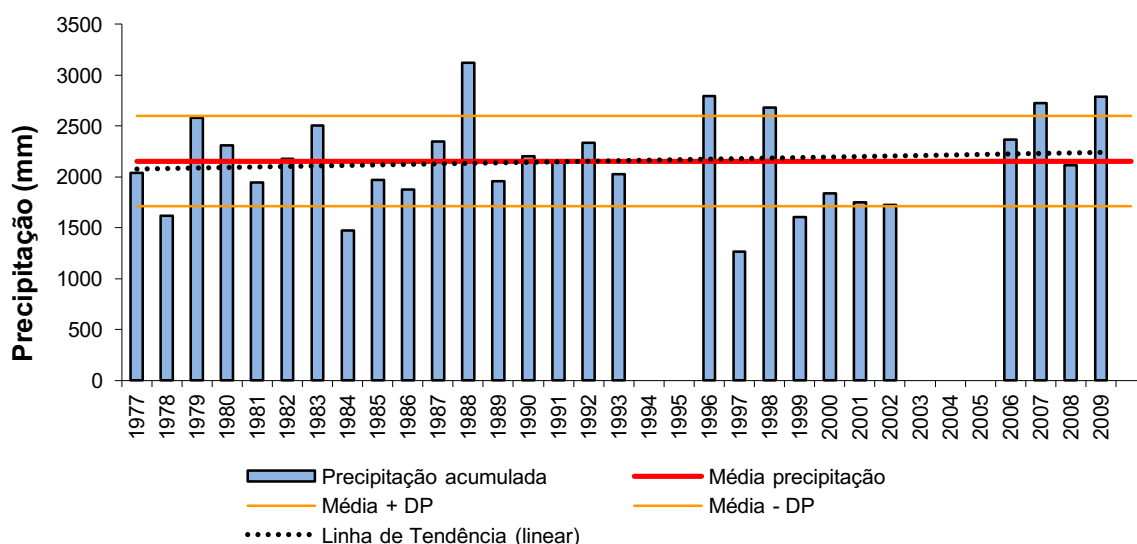


Figura 18 – Histograma com a série temporal 1977-2009, estação Capala Mayrink (Negreiros 2011)

O Maciço da Tijuca conta ainda com o Parque Nacional da Tijuca (PNT), possui uma área total de 3953 hectares, sendo dividido em quatro setores. Segundo Negreiros (2011):

O fato [do PNT] de estar circundado por uma grande metrópole produz diferentes tipos de pressões ao ambiente florestal. Em período de chuvas intensas, processos erosivos são gerados nas cabeceiras das bacias e ao longo delas, ocasionando movimentos de massa e assoreamento dos canais fluviais, resultando conseqüentemente em deslizamentos e enchentes na área em seu entorno. Registros apontam para uma recorrência de eventos extremos na cidade do Rio de Janeiro,



como indica estudo de Brandão (2001) para os anos de 1966/67, 1988, 1996 e como recentemente visto em abril de 2010.

Segundo Fernandes (2004) o grande dinamismo da paisagem no Maciço da Tijuca tem como principal causa a degradação da floresta e sua substituição por gramínea através de incêndios, aumento da poluição ou desmatamento ilegal:

Dentre as modificações da cobertura vegetal para uso urbano, ganha grande destaque no cenário do maciço da Tijuca o surgimento e crescimento de feições urbanas de ocupação espontânea do tipo favela. Essas caracterizam o ponto final do processo de forte pressão urbana, decorrente do adensamento populacional que ocorre na cidade como um todo.

O PNT torna-se essencial para a preservação dos serviços ambientais que o geossistema florestal presente no maciço fornece para a cidade do Rio de Janeiro, dos quais a tabela 5 apresenta uma síntese.

Tabela 5 – Síntese dos principais serviços ambientais prestados pelo geossistema florestal do maciço da Tijuca. (Modificado de Figueiró 2004, SMAC/Geoheco (2.000)

Serviço	Eficiência	Fonte
Fixação de C na biomassa	160 ton/há	Clevelário Jr. (1996)
Fixação de C na matéria orgânica do solo	150 ton/há	Clevelário Jr. (1996)
Produção de água pelas fontes	7.660 m <sup>3</sup> /há	Oliveira <i>et al.</i> (1995)
Redução no PH da água da chuva, na filtragem das copas	Até 3 unidades de PH	Silva Filho (1985) Silveira (1997)
Interceptação de 17 a 24,5% da chuva pelo dossel	Até 5.750 m <sup>3</sup> /há	Coelho Netto (1985); Miranda (1992)
Interceptação das chuvas pela serrapilheira	250% do peso seco da serrapilheira	Coelho Netto (1985)
Favorecimento da infiltração da água da chuva (70%)	1600 mm/ano na porção superior do Maciço	Coelho Netto (1979)
Evapotranspiração (solos e plantas)	40% da pluviosidade anual	Coelho Netto (1985)
Reforço dos solos pelo sistema radicular arbóreo	Variável	Prandini <i>et al.</i> (1976)

A geologia do Maciço de forma geral é composta por um embasamento rochoso Pré-Cambriano de gnaisses e granitos com (Heilbron 1995 *apud* Coelho Netto 2007) e Pires *et al.* descrevem o perfil geológico ao longo da Serra da Carioca com presença de dobras nos gnaisses e granitos (figura 19).

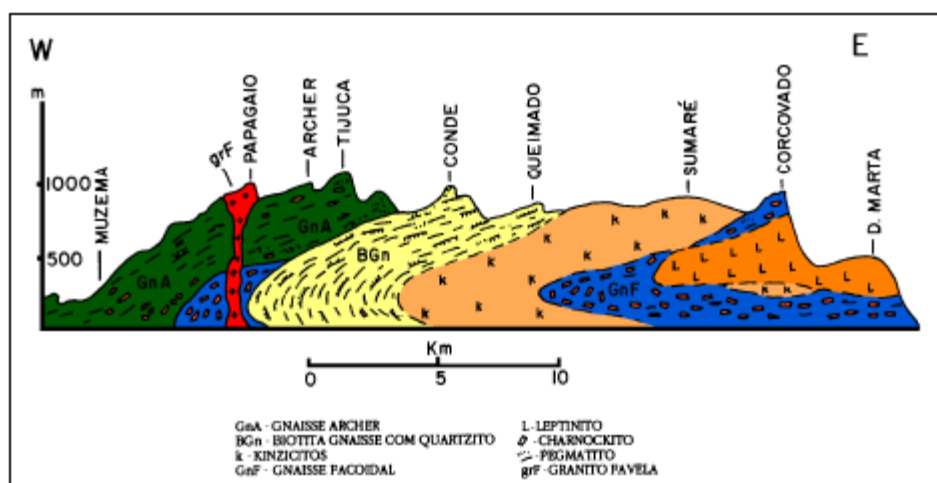
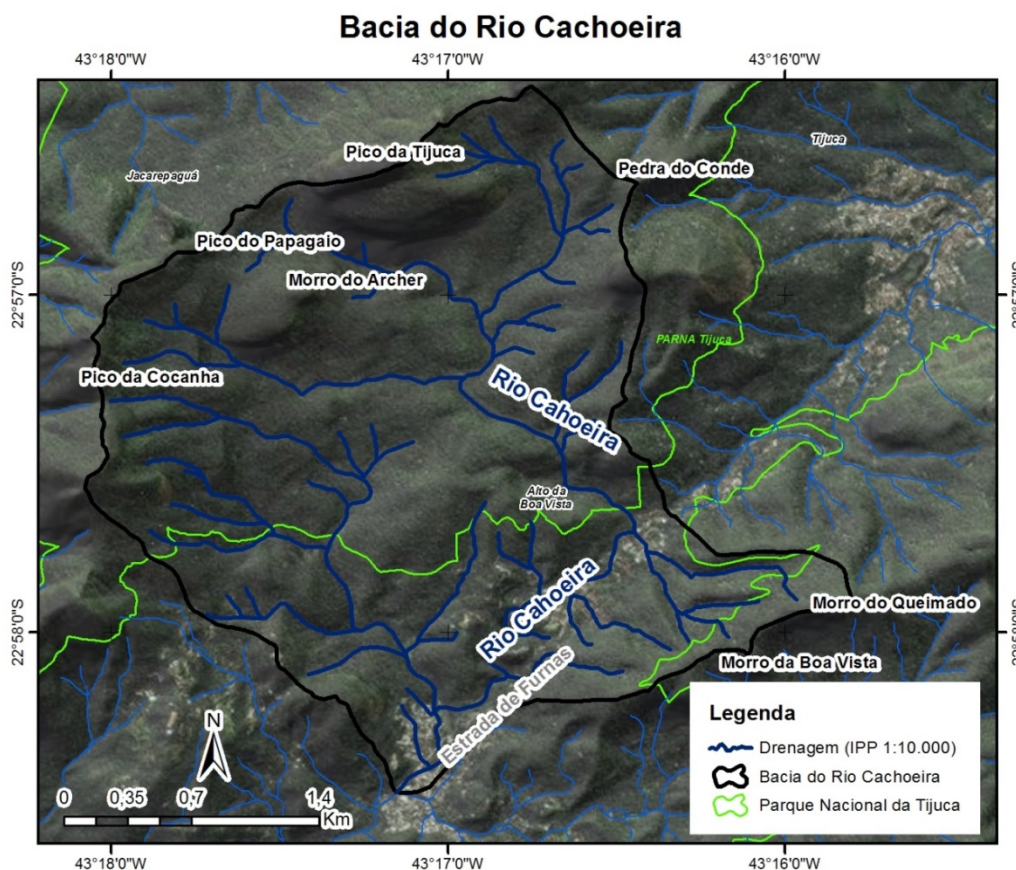


Figura 19 - - Perfil geológico do Maciço da Tijuca (Pires *et al.* 1989)

Há também estruturas geológicas relacionadas a fraturas subverticais com direção predominantemente NO – SE e NO – SO, que funcionam como zonas profundas de recarga de água dentro do perfil de solo e sistemas de diáclases (Coelho Netto 1985). Tal maciço apresenta regolitos rasos, situados predominantemente em encostas declivosas que vão se tornando mais espessos nos eixos de concavidades, com marcante deposição de colúvios com blocos de rocha.

## 4.2 Bacia do Rio Cachoeira

A área de análise deste estudo está inserida na parte ocidental do Maciço da Tijuca e na Bacia do Rio Cachoeira, contendo parte de três setores do Parque Nacional da Tijuca, sendo o setor A ao norte (Floresta da Tijuca), o setor B a leste (Serra da Carioca) e setor D ao sul (Pedra da Gávea/Pedra Bonita). Seus divisores ao norte são marcados por 4 grandes picos (Conde, Tijuca, Papagaio e Cocanha), enquanto que ao sul, seus divisores são mais rebaixado (Morro do Queimado e Morro da Boa Vista) (figura 20).



O Rio Cachoeira tem suas cabeceiras de drenagem na parte norte da bacia, dentro do PNT desaguando na Lagoa da Tijuca na baixada de Jacarepaguá e a confluência com seu principal tributário, Rio da Pequena Gávea, ocorre na localidade Mata Machado. É a partir da confluência com seu principal tributário que a bacia do Rio Cachoeira é delimitada como área de análise deste estudo.

O levantamento LiDAR gera um elevado número de dados, por isso, a área de estudo não contempla toda a Bacia do Rio Cachoeira, apenas seu médio e alto curso. Ainda assim, estão presentes distintas classes de uso do solo e cobertura vegetal, como área urbana, gramínea, afloramento e cobertura florestal, que foram o foco da pesquisa

A bacia do Rio Cachoeira delimitada a partir de sua confluência com o Rio da Pequena Gávea possui uma área de 7,9 km<sup>2</sup>. Segundo o CENSO (2010) há na bacia cerca de 10 mil pessoas habitando em 3,5 mil domicílios de ocupação formal e informal localizadas principalmente na proximidade da Estrada de Furnas. O mapeamento de uso e cobertura realizado por Martinez (2014) indica que 90% da área é formada por floresta

(conservada e alterada); 6% de ocupação formal e informal, 3% de afloramento rochoso e 2,4% de áreas arborizadas urbanisticamente (figura 21).

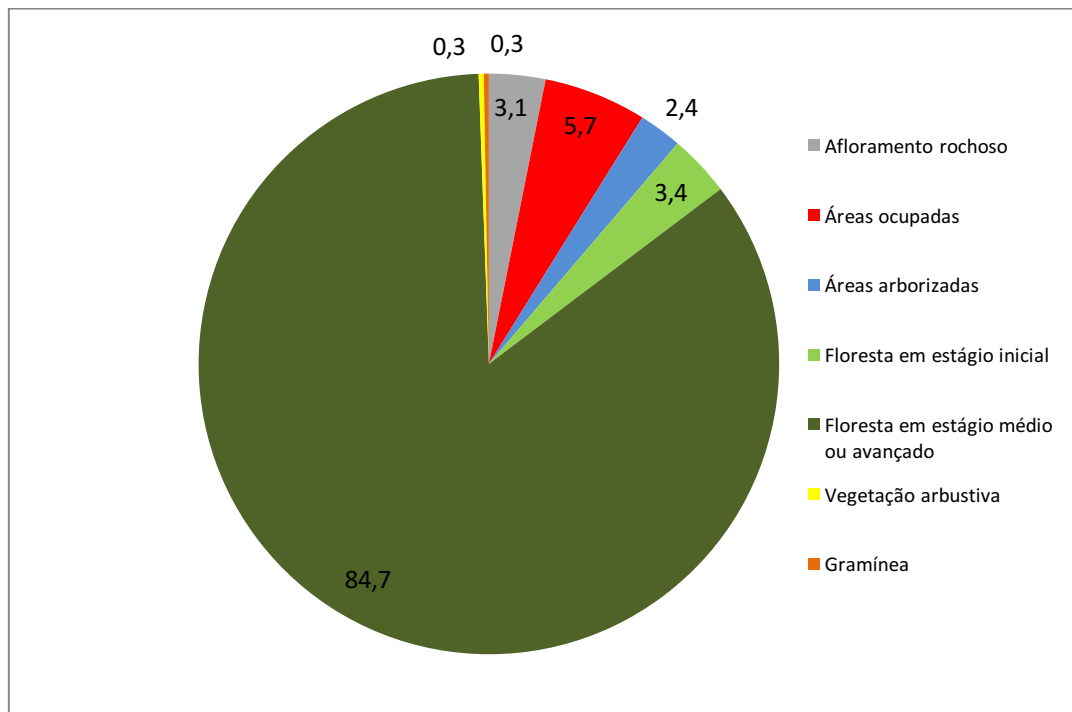


Figura 21 – Gráfico do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do Rio Cachoeira.

## 5 – Materiais e Métodos

Os materiais e métodos utilizados neste trabalho foram essencialmente base de dados digitais, referentes ao aerolevanteamento LiDAR realizado pela empresa Hansa - Geofísica e Aerolevanteamento Ltda. que foi contratada pela Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GeoRio) com o sensor transportado em helicóptero abrangendo 155km<sup>2</sup> do Maciço da Tijuca, juntamente com a base topográfica do IPP (1:2.000). Vários procedimentos foram realizados, conforme apontado no fluxograma na figura 22.

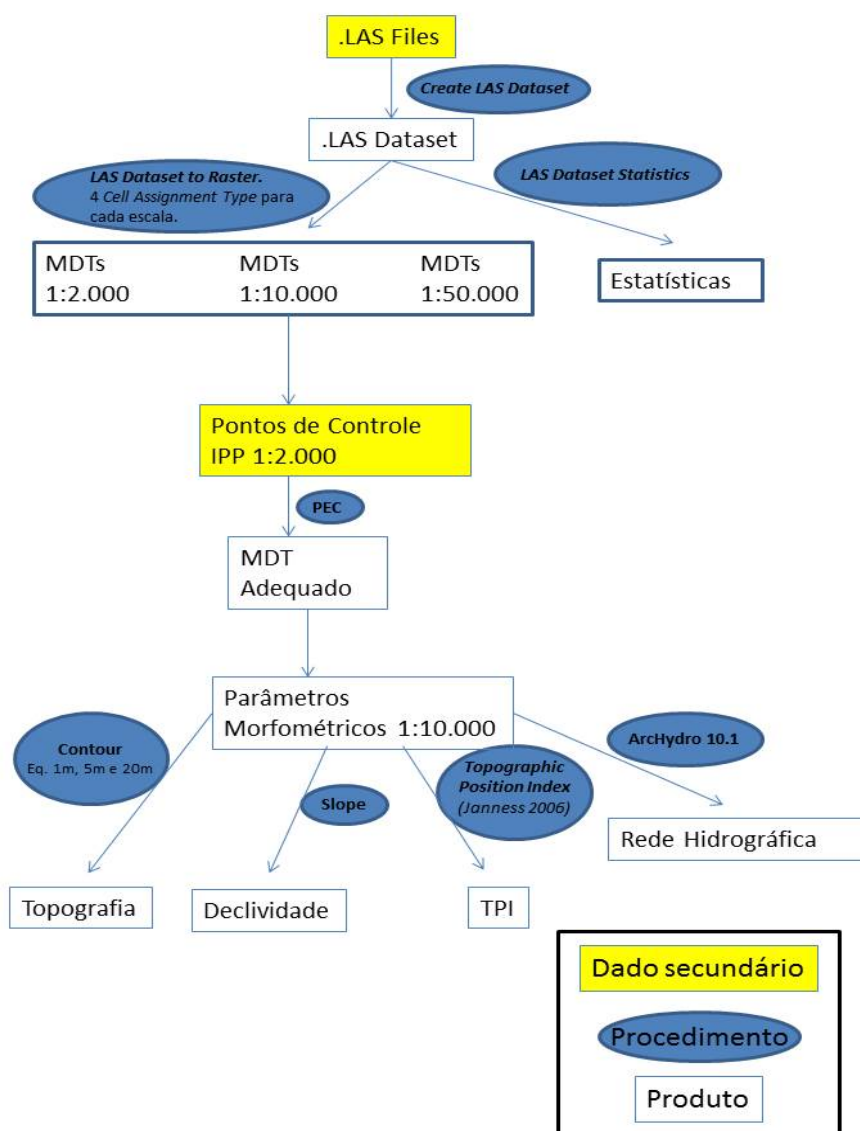


Figura 22 - Fluxograma geral dos materiais e métodos

## 5.1 Utilização dos dados .LAS

O *software* utilizado para a classificação dos pontos após o levantamento foi o *TerraScan* e a nuvem de pontos já classificada foi cedida ao Prof. André Avelar e ao Laboratório Geoheco – UFRJ com um total de 179 arquivos *Lidar Data Exchange Format File* (.LAS) na projeção cartográfica UTM 23S e *datum* SAD69 articulados (figura 24). A figura 23 demonstra a nuvem de pontos em visualização em 2 dimensões e em 3 dimensões pelo *software* Global Mapper 15.

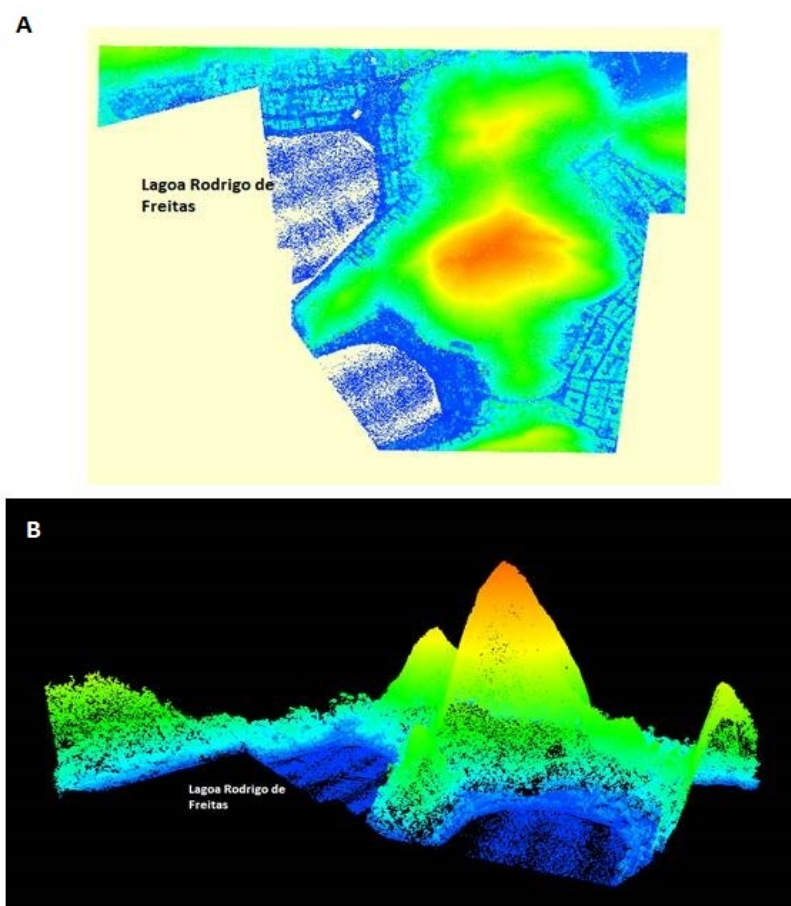


Figura 23 – A) visualização 2D da Nuvem de pontos. B) visualização 2D da Nuvem de pontos.

A área em estudo está inteiramente coberta por 12 arquivos, totalizando mais de 134 milhões de pontos:

Tabela 6 - Arquivos .LAS utilizados no estudo.

286-d-iii-2	286-d-iii-6	286-f-i-2	286-f-ii-1
286-d-iii-3	286-d-iv-1	286-f-i-3	286-f-ii-2
286-d-iii-5	286-d-iv-4	286-f-i-6	286-f-ii-4

O formato .LAS é o formato padrão mais utilizado para o armazenamento de dados LiDAR na forma binária, o que permite tratar de forma mais eficiente a grande quantidade de informação levantada por um escaneamento LiDAR. Segundo ALBACETE (2011) o *software* ArcGIS Desktop 10.1 é um dos mais utilizados por profissionais e pesquisadores de diversas áreas para análises em SIG, trazendo grande vantagem para a compatibilidade de arquivos .LAS e permitindo o tratamento e análises dos dados.

Cada arquivo .LAS armazena informações como coordenada  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , *GPS time*, intensidade, número de retorno, classificação de cada ponto e *scan angle* de cada pulso de laser emitido. Porém no ArcGIS Desktop 10.1 o tratamento dos arquivos .LAS são feito através do formato LAS Dataset, o qual é capaz de acessar um ou mais arquivos .LAS de forma mais rápida e fácil.

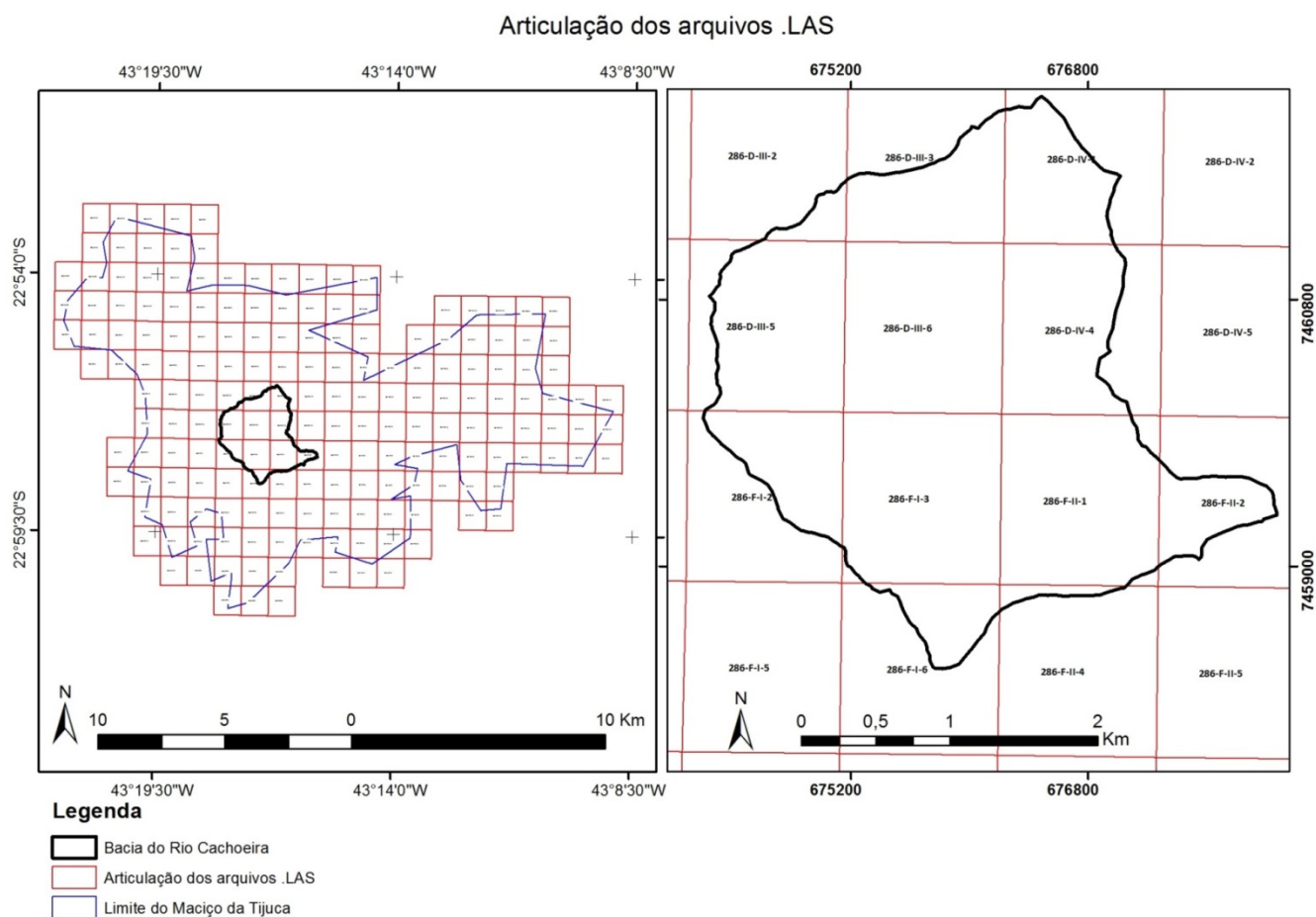


Figura 24 – Articulação dos arquivos .LAS e área de estudo (Bacia do Rio Cachoeira)



## 5.2 Composição do LAS Dataset

O Las Dataset foi gerado com os 12 arquivos .LAS que que contemplam toda a área de estudo através da ferramenta *Create LAS Dataset*. A partir do LAS Dataset é possível visualizar rapidamente a nuvem de ponto em 2D e 3D, alterando a visualização de quais as classificações o usuário deseja representar (*ground, low vegetation, etc.*), além da representação de curvas de nível, declividade, aspecto e TIN (figura 25). Além do citado, é a partir do LAS Dataset onde os MDTs são gerados e as estatísticas quanto à nuvem de ponto podem ser calculadas.

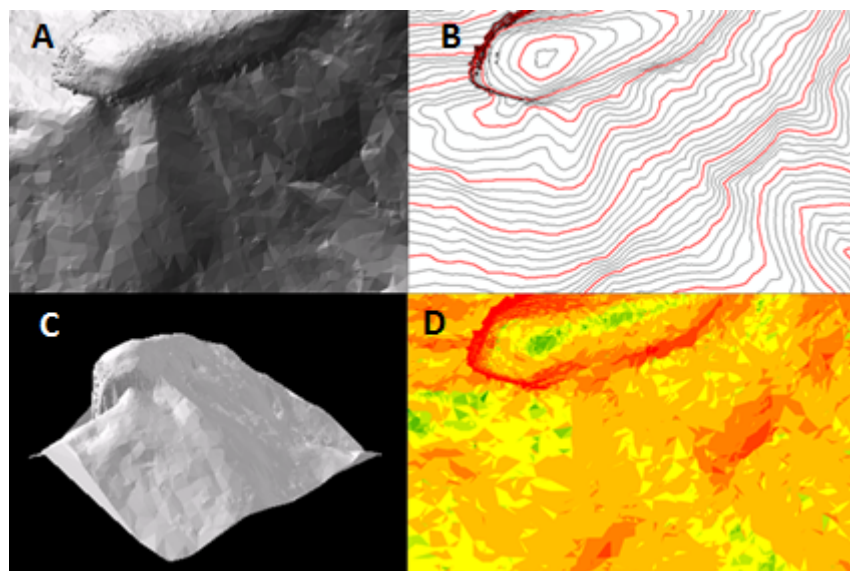


Figura 25 – (A) TIN. (B) Curvas de Nível. (C) Visualização 3D do TIN. (D) Declividades.

Na figura 26 está demonstrado como foi produzido o LAS Dataset, onde: A são localizados os arquivos .LAS desejados; B o local de destino do LAS Dataset; e C é marcado para o cálculo preliminar das estatísticas em torno dos arquivos.



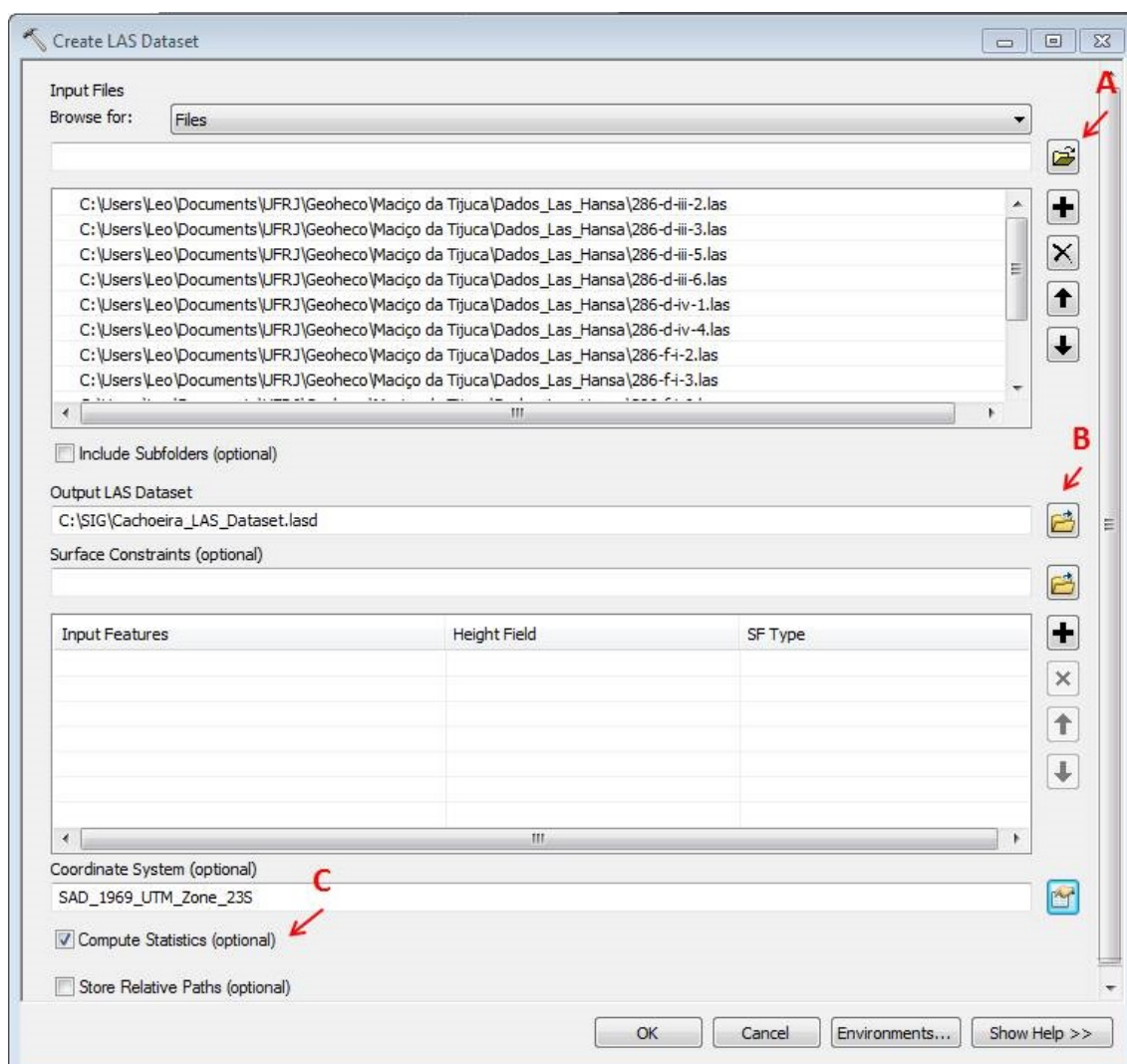


Figura 26 – Janela da ferramenta *Create LAS Dataset* no software ArcGis 10.1.

### 5.3 Elaboração do MDT a partir do Las Dataset

Neste estudo os MDTs criados a partir do LiDAR foram tratados para as escalas cartográficas 1:2.000, 1:10.000 e 1:50.000 com o tamanho da *pixel* respeitando a acuidade visual de 0,2mm na representação. Deste modo, foram gerados MDTs no formato *raster* com 0,4; 2 e 10 metros de célula. Somente os pontos classificados como *ground* foram interpolados. É importante ressaltar que foi utilizado o modelo de grade regular retangular (*grid*), pois a interpolação por TIN força a geração de feições triangulares no terreno onde há uma densidade menor de dados e pode criar topologias mal definidas.

Os MDTs em formato *raster* foram gerados através da ferramenta *LAS Dataset to Raster*, utilizando somente os valores de altimetria de cada ponto LiDAR. O método utilizado para geração do *grid* foi o *Binning*, que define o valor da célula como sendo o valor de altimetria do ponto amostral inserido na célula. Porém, devido à alta densidade de pontos, é comum dentro de uma mesma célula conter 2 ou mais pontos e o valor estipulado para a célula depende do critério de *Cell Assignment Type* utilizado. Com isso, para avaliar a melhor resposta foram utilizados para cada escala 4 *Cell Assignment Types*, isto é, foram adotados os seguintes parâmetros:

- -Average: utiliza o valor médio de todos os inseridos na célula.
- -Minimum: utiliza o menor valor encontrado na célula
- -IDW: utiliza o Inverso da Distância ao Quadrado para calcular o valor da célula
- -Nearest: utiliza o valor do vizinho mais próximo para determinar o valor da célula

Para as células em que não há ocorrência de pontos, a interpolação foi feita pelo vizinho mais próximo (*Natural Neighbor*). No fim, foram produzidos 12 MDTs, sendo quatro para cada escala, a fim de permitir a validação com pontos de altimetria conhecidos.

Na figura 27 é apresentada a janela do *software* ArcGis 10.1 para a elaboração do processo de geração do MDT pela ferramenta *Las Dataset to Raster*, onde: A é o LAS Dataset escolhido; B o local de destino do *raster*; C é o campo escolhido com os valores de altimetria, D é o *Cell Assignment Type* desejado; E é o interpolador para as células onde não há informação de altimetria e; F o tamanho da célula em unidades mapeadas (metros).

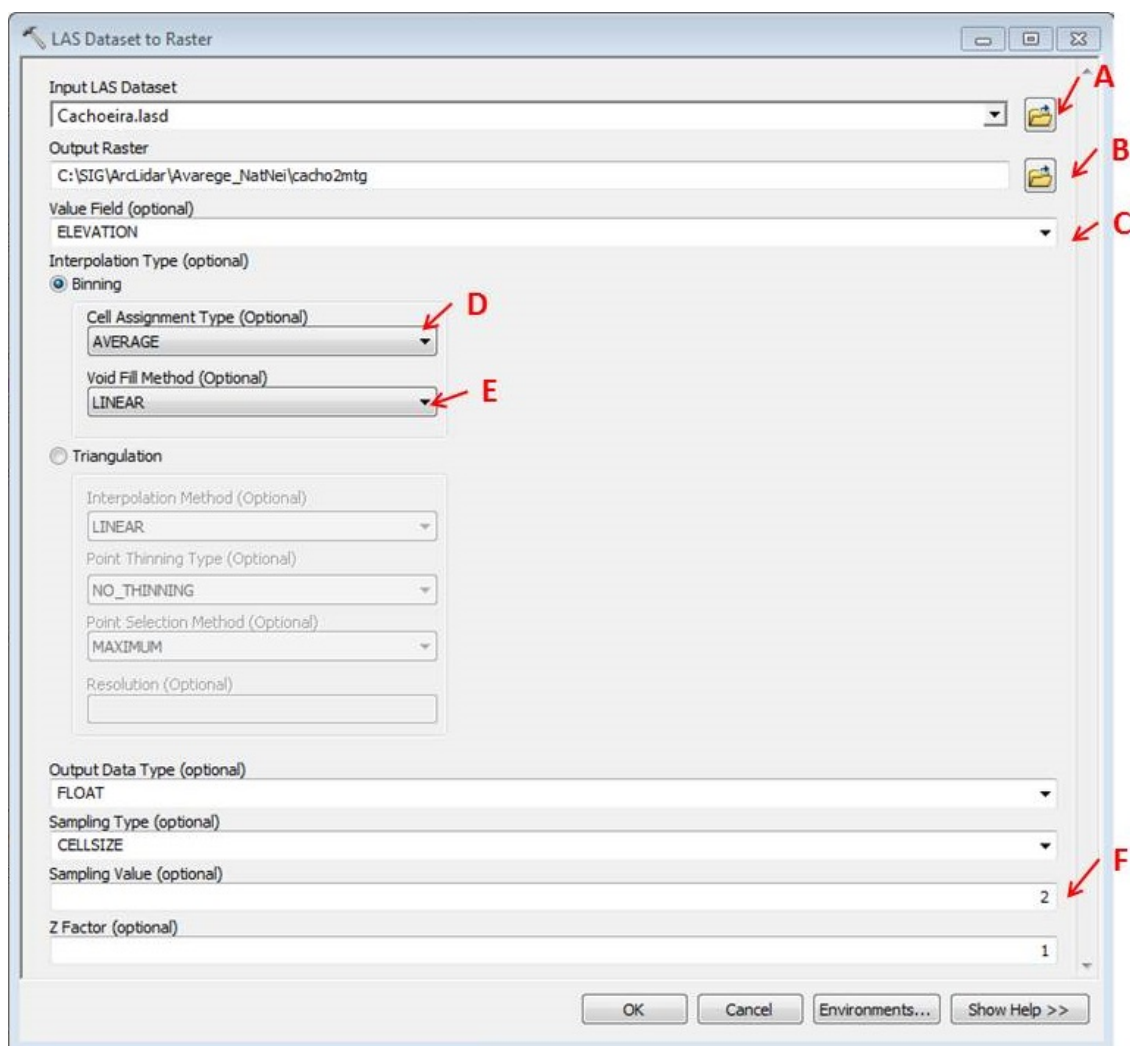


Figura 27 - Janela da ferramenta *LAS Dataset to Raster* no software ArcGis 10.1.

### 5.3.1 Projeção Cartográfica

O levantamento foi realizado em SAD69, porém nem o LAS Dataset, nem os arquivos .LAS puderam ser reprojetados no ArcGIS 10.1. Por isso as coordenadas foram alteradas para o sistema geodésico de referencia oficial do Brasil, SIRGAS 2000, após a geração dos MDTs, com base nos parâmetros de transformações entre sistema geodésicos do IBGE na ferramenta *Project Raster*: x (-67,348m) y (+3,879m) z (-38,223m)

### 5.3.2 Áreas de análise

Os MDTs foram gerados conforme descrito no item 5.3, porém ocorre a extrapolação dos dados nas áreas não onde não há cobertura de arquivos .LAS, sendo considerado para a análise dos modelos apenas a área em verde na figura 28. Essa área

foi extraída de todos os MDTs através da ferramenta *Extract by Mask* e compreende toda a área limitada pela Bacia do Rio Cachoeira.

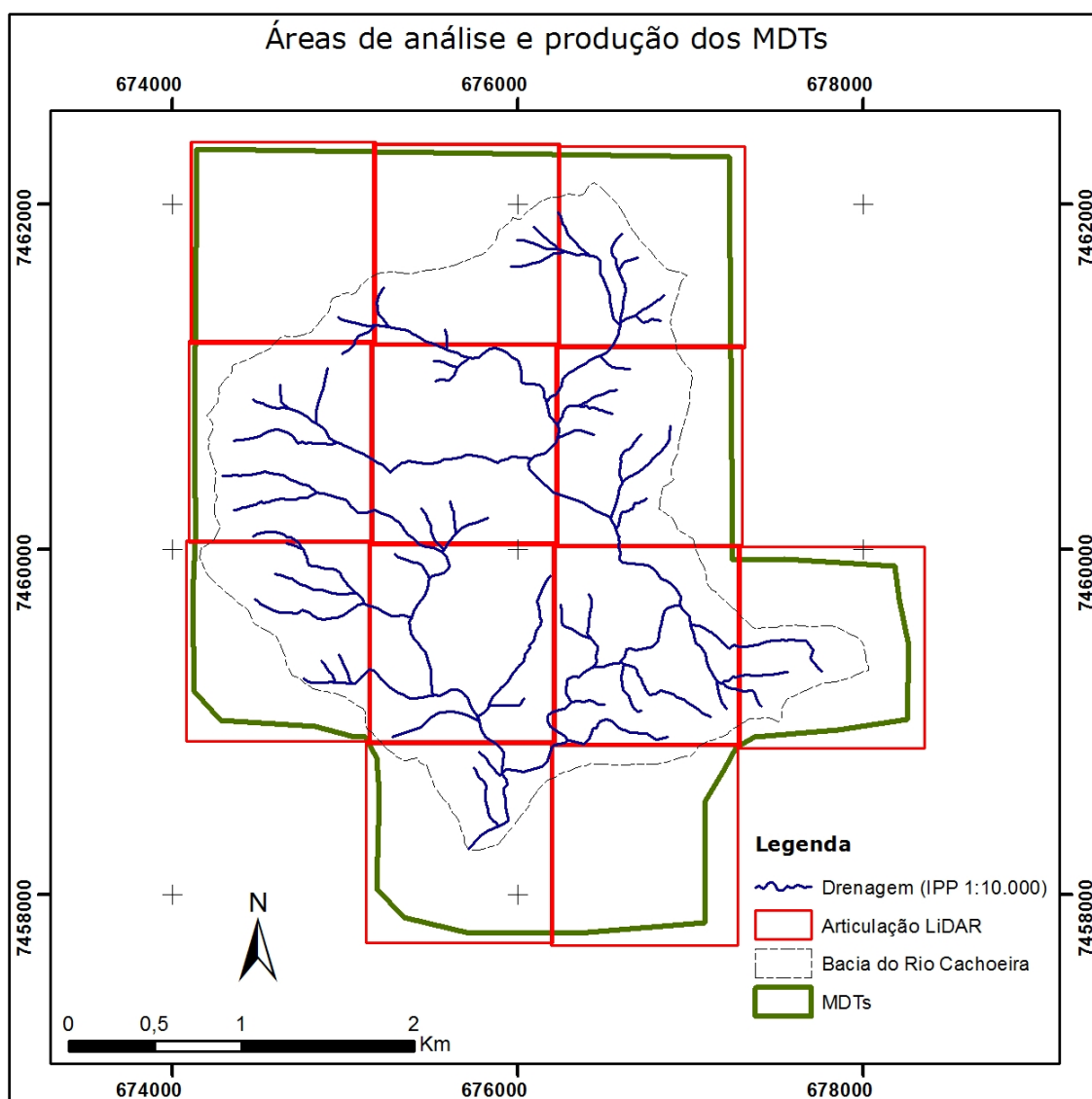


Figura 28 – Mapa com as áreas de análise e de produção do MDT.

### 5.3.3 Fill

A interpolação dos pontos LiDAR para a elaboração do MDT pode resultar em “vazios” denominados como *sinks* que interferem na geração da rede hidrográfica pela extensão ArcHydro 10.1 e para eliminar esses *sinks* foi utilizada a ferramenta *Fill* (Araújo 2013).

## 5.4 Análise dos MDTs gerados a partir dos dados LiDAR

As estatísticas do levantamento LiDAR foram realizadas pela ferramenta *LAS Dataset Statistics* para obter informações como a contagem total dos pontos, o espaçamento médio, a contagem de pontos por classificação, a intensidade do retorno, o ângulo do escaneamento e o *software* utilizado para o processamento dos arquivos .LAS.

### 5.4.1 Densidade de pontos *ground*

As análises elaboradas através do *LAS Dataset Statistics* utilizam como espaço amostral a área de abrangência de cada arquivo LAS, não oferecendo cálculo da densidade de pontos, nem o espaçamento médio dos pontos em cada classe de pontos, servindo apenas para uma visão geral do levantamento. Devido aos MDTs terem sido gerados através dos pontos classificados como *ground*, é nessa classe que as características da distribuição e quantidade de pontos devem interessar para a qualidade do modelo gerado. Portanto, não é a contagem geral dos pontos que serve para qualificar o MDT, visto que pontos classificados como vegetação e prédios não são atribuídos à geração dos MDTs.

A ferramenta *LAS Point Statistics as Raster* permite a análise dos pontos selecionados em um *grid* com tamanho da célula estipulado para uma análise mais refinada. Assim, foi criado um *raster* com células de 100m<sup>2</sup> (10x10m) apenas com os pontos classificados como *ground*, a fim de que em cada célula de área conhecida apresente a contagem de pontos e permitir o posterior cálculo da densidade de pontos, isto é, o número de pontos por unidade espacial (pts/m<sup>2</sup>). Para a transformação dos valores de espaçamento dos pontos (distância média entre os pontos, mensurados em metros) para a densidade de pontos (pts/m<sup>2</sup>) foi utilizada a seguinte equação:

$$\text{Densidade} = 1/(\text{Espaçamento})^2$$

Eq. 9

Na figura 29 são apresentados os parâmetros necessários na ferramenta *LAS Point Statistics as Raster* onde: A é o LAS Dataset de interesse, B o local de destino para o raster; C é escolhido a contagem de pontos e; D o tamanho de célula desejado.

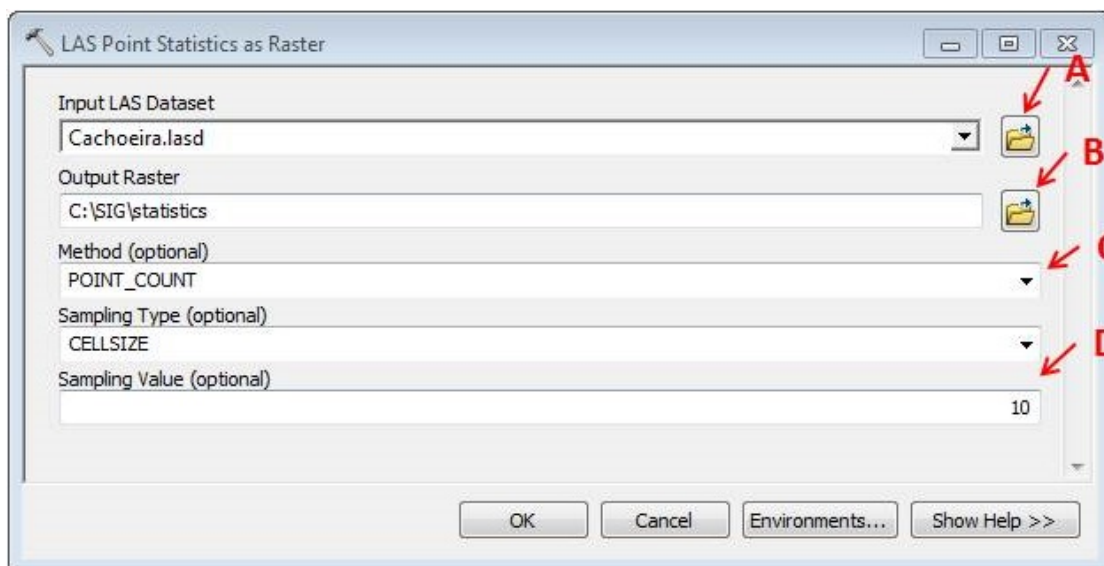


Figura 29 – Janela da ferramenta *LAS Point Statistics as Raster* do software ArcGis 10.1.

#### 5.4.2 Validação com pontos de controle

A validação do melhor método de interpolação foi feita através do cruzamento dos MDTs com pontos de altimetria conhecidos. O mais adequado para a validação seria o levantamento em campo de pontos aleatórios seguindo os Parâmetros de Exatidão Cartográfica (PEC). O PEC foi definido pelo Decreto Nº 89.817 de 20 de junho de 1984 (Anexo 1) e instituindo:

*Art 8º - As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - - PEC, seguinte o critério abaixo indicado:*

*1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico - estabelecido.*

*2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido.*

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

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

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

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

A tabela 7 mostra os parâmetros para as Classes segundo o PEC aplicado nas escalas analisadas:

Tabela 7 – Tolerância e EMQ para as 3 escalas de análise segundo PEC (modificado de Cruz *et al.* 2011).

	PEC		1:2.000		1:10.000		1:50.000	
	Tolerância	EMQ	Tolerância	EMQ	Tolerância	EMQ	Tolerância	EMQ
Classe A	1/2 Eq.	1/3 Eq.	0,5	0,33	2,5	1,7	10	6,7
Classe B	3/5 Eq.	2/5 Eq.	0,6	0,4	3,3	2	12	8
Classe C	3/4 Eq.	1/2 Eq.	0,75	0,5	3,8	2,5	15	10

Os MDTs nas escalas 1:10.000 e 1:50.000 podem ser utilizados com maior qualidade se comparados aos pontos cotados da base 1:2.000 elaborada pelo Instituto Pereira Passo (IPP) do município do Rio de Janeiro, compreendo um total de 641 pontos (figura 30) tendo sua maioria na área urbana. Para o MDT na escala 1:2.000 os pontos também foram cruzados, mas devido ao fato de estar na mesma escala que os pontos de validação, a análise se enquadra apenas para a avaliação da proximidade do resultado dos modelos com a base do IPP.

O Erro Médio Quadrático (EMQ) foi calculado pela equação 10:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum(Zl - Zi_{ipp})^2}{N-1}} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde,

EMQ – erro médio quadrático

Zl – valor de altimetria do MDT LiDAR

Zipp – valor de altimetria do ponto de controle IPP

N – número total de pontos analisados

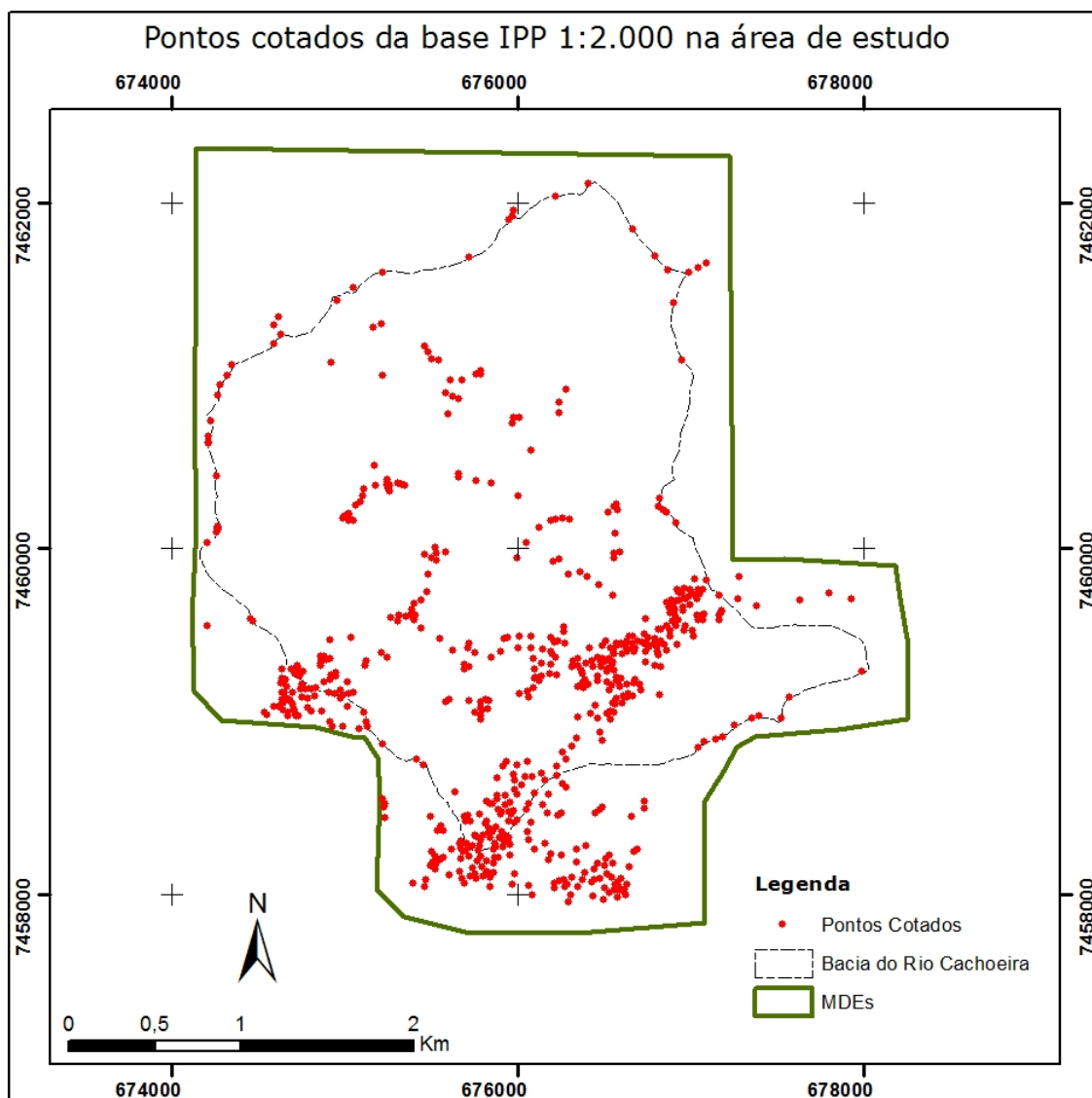


Figura 30 – Mapa com a localização dos 641 pontos de controle da base IPP 1:2.000.

#### 5.4.3 Densidade de pontos *ground* e Uso e Cobertura

A avaliação do levantamento e a distribuição dos pontos classificados como *ground* podem promover áreas com maior erro na interpolação topográfica, ou seja, menor densidade de pontos levantados em áreas com densa cobertura florestal. Por isso, os resultados das análises de densidade dos pontos e cruzamento dos pontos cotados foram cruzados com o mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal de Martinez (2014). Devido ao fato do mapeamento citado apresenta muitas classes de cobertura vegetal e uso do solo pode gerar uma análise mais dispersa, as classes



apresentadas na área de estudo foram agrupadas de acordo com o objetivo do atual trabalho, tal como apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 – Agrupamento das classes de uso e cobertura do solo.

Classificação Martinez (2014)	Este estudo
Afloramento rochoso	Afloramento rochoso
Áreas ocupadas	Área urbana
Estrada no urbano	
Áreas arborizadas	Áreas arborizadas
Floresta em estágio inicial de sucessão	Cobertura florestal
Floresta em estágio médio ou avançado de sucessão	
Cultivo	Gramínea e vegetação arbustiva
Gramínea	
Silvicultura	
Vegetação arbustiva	
Solo exposto	Solo exposto

Esta generalização levou em conta o que é esperado para o comportamento dos pontos *ground*, ou seja, as áreas urbanas, afloramentos e solo exposto vão ser atingidos mais facilmente pelo feixe de *laser* e são mais propícias a uma densidade maior de pontos, enquanto áreas arborizadas, gramínea e vegetação arbustiva, e principalmente áreas com cobertura florestal vão ter maior impedimento e menor densidade de pontos, fornecendo o MDT de menor qualidade. A mudança entre a classificação de Martinez (2014) e o agrupamento realizado neste estudo pode ser observado na figura 31.

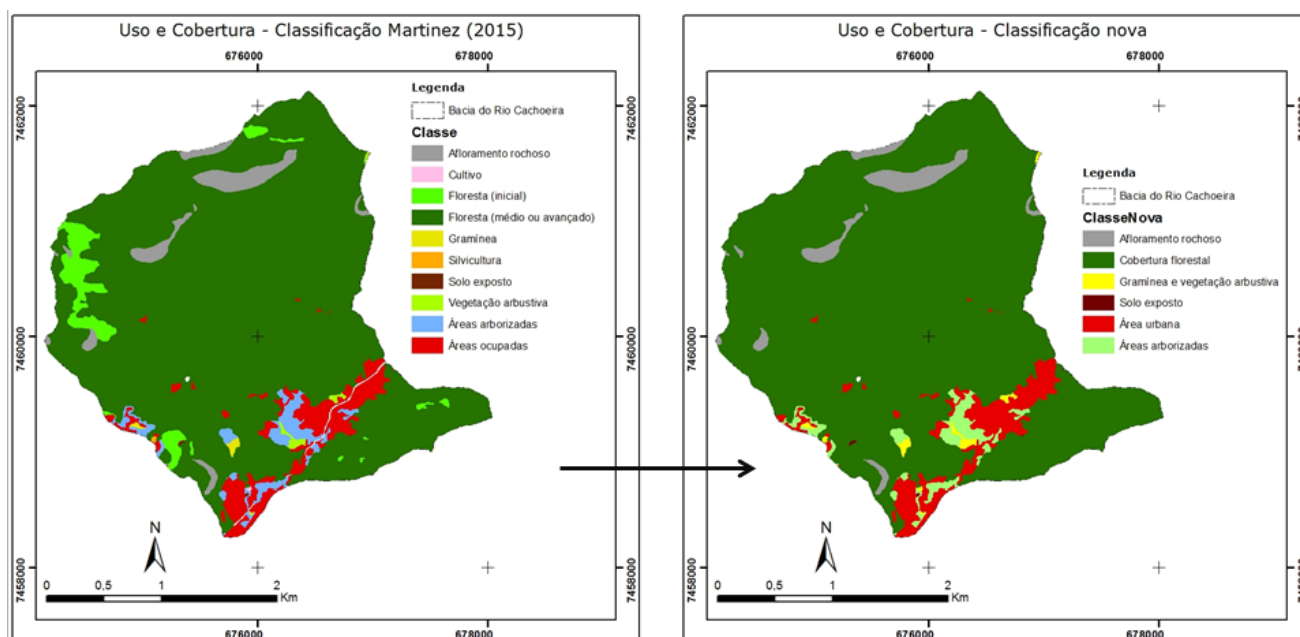


Figura 31 – Comparação do mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal de Martinez (2015) com a nova classificação para este estudo.

## 5.5 Geração de parâmetros morfométricos 1:10.000

A escala 1:10.000 foi escolhida para a extração de parâmetros morfométricos devido a outros trabalhos na área de estudo terem sido desenvolvidos nessa temática com outras bases topográficas, assim para uma primeira avaliação dos dados gerados a partir do LiDAR poder ser feita.

### 5.5.1 Topografia

As topografias foram geradas pela ferramenta *Contour* a partir do MDT, com curvas de nível espaçadas de 1m, 5m e 20m para as escalas 1:2.000, 1:10.000 e 1:50.000 respectivamente.

Os arquivos *shape* foram criados e armazenados em um Geodatabase dentro de um *Feature Dataset* para ser possível a análise topológica e encontrar possíveis erros na geração da topografia. A topologia para dados geoespaciais pode ser entendida como a relação espacial de suas representações, por exemplo: uma curva de nível não pode sobrepor-se à outra.

As regras utilizadas para a análise topológica foram: *Must be Not Overlap*, *Must be Not Intersect*, *Must be Not Have Dangles* e *Must Have Pseude Nodes*.

### 5.5.2 Declividade

A declividade foi gerada pela ferramenta *Slope* resultando em um arquivo *raster*. Após a declividade gerada foi utilizada a ferramenta *Reclassify* para a classificação segundo o proposto por Coelho Netto *et al.* (2007) em quatro classes ( $0^{\circ}$ – $10^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$ – $20^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ – $35^{\circ}$  e  $>35^{\circ}$ ). Seguente à reclassificação, o *raster* foi vetorizado para polígono com a ferramenta *Raster to Polygon*, o que criou inúmeros polígonos com áreas desprezíveis, sendo utilizado, por fim, a ferramenta *Eliminate* para juntar os polígonos menores que  $50\text{m}^2$  ao polígono vizinho com maior contato.

### 5.5.3 Topographic Position Index - TPI

A classificação da posição da encosta foi realizada através da extensão *Land Facet Corridor* com a ferramenta *Topographic Position Index* (TPI) elaborado por Janness (2006) com base no trabalho de Weiss (2001). Esta ferramenta utiliza um algoritmo em no qual a diferença do valor de altitude da célula é subtraída pela média dos valores vizinhos, definido previamente por um raio em metros ou células. Valores positivos significam que a célula tem altitude maior do que os vizinhos com comportamento divergente de fluxos (convexidade); valores negativos demonstram que a célula tem valor menor do que os vizinhos com comportamento convergente de fluxos (concavidades); e os valores nulos (ou próximos de zero) demonstram área planas, de transferência de fluxos.

O estudo de Coutinho *et al.* (2014) utilizou a combinação de mais de um raio, tendo em vista que raios menores tendem a recortar mais o terreno e raios grande tendem a generalizar a informação (figura 32), as somas dos raios promoveram um melhor resultado para esse problema, apresentando topos e vales mais contínuos. As diversas combinações de raios para uma área de relevo montanhoso apresentou bom resultado na elaboração do TPI *values* com os raios de 50, 70, 80 e 100 metros, e sua posterior soma.

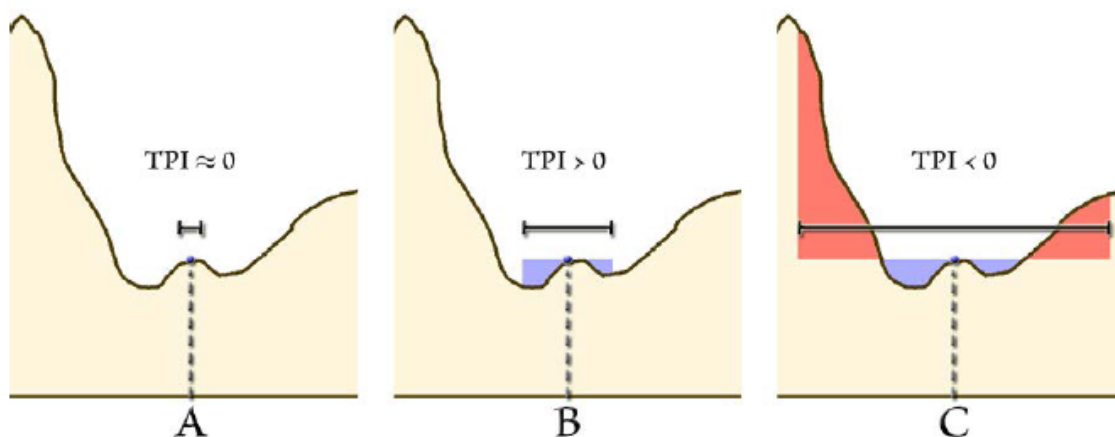


Figura 32 – Desenho esquemático simulando 3 raios diferentes como parâmetro para TPI. (A) Plano; (B) Divisor; (C) Fundo de Vale. (Fonte: Janness *et al.* 2013)

#### 5.5.4 Definição da e rede hidrográfica em ArcHydro 10.1

A rede hidrográfica foi extraída de forma automática através das ferramentas da extensão *ArcHydro10.1*:

- Direção de Fluxos (*flow direction*)

A partir do MDT, esta ferramenta produz um *raster* onde cada célula contém o valor indicativo da direção que o fluxo de água segue, ou seja, a direção para a célula adjacente menos íngreme. Como demonstrado na figura 33 o valor a ser incorporado à célula é referente à qual direção o fluxo irá tomar a partir dela, sendo 1 escoando para o leste, 2 sudeste, 4 sul e assim por diante.

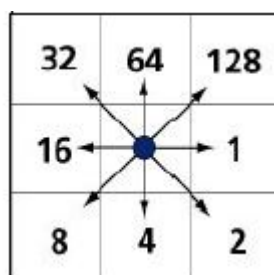


Figura 33 – Valores associados à direção de fluxo (Araujo 2013) modificado de Maidment, 2002

- Acumulação de fluxos (*flow accumulation*):

A acumulação de fluxos utiliza os valores da direção de fluxo para que cada célula tenha o valor representando o número total de células que drenam fluxo para ela.

- Definição do fluxo (*stream definition*)

A ferramenta *stream definition* a partir de um critério estabelecido delimita a rede de drenagem através da área mínima para o surgimento da drenagem. O trabalho de Araújo (2013) demonstrou que 0,125% da área da bacia para iniciar a delimitação dos canais apresentou melhor resultado para a mesma área de estudo quando comparada com a rede de canais reconstituída. Para o caso em estudo o valor de 0,125% (0,1km<sup>2</sup> com um total de 25 mil células acumuladas) também se mostrou satisfatório, porém áreas planas assim como a influência dos cortes de estradas que aparecem bem delimitados.

- Segmentação da drenagem (*stream segmentation*)

Após a definição da área mínima para a formação da rede de drenagem, a ferramenta *stream definition* cria um número indicador para cada segmento de canal.

- Vetorização da rede de drenagem (*drainage line processing*)

A segmentação da drenagem ainda está em formato *raster* e a ferramenta *drainage line processing* cria um arquivo *shape* de vetor com a toda a rede de drenagem. Como a vetorização mantém as feições de pixels provenientes do *raster*, foi utilizada a ferramenta *Smooth Line* para a suavização das linhas e a correção manual da drenagem nas áreas urbanas onde o canal encontra-se retificado.

## 6 – Resultados

### 6.1 Análise do LAS Dataset

O resultado do *LAS Dataset Statistics* proporcionou a contagem de pontos em cada *LAS file*, assim como o espaçamento e total de pontos *ground*. A média do total de pontos foi superior a 11 milhões de pontos por *LAS file* com a um espaçamento médio de 0,33 m entre pontos, o que demonstra uma alta qualidade de levantamento foi como o esperado (Huang *et al.* 2011; Polat & Ussal 2015).

A densidade média de pontos foi de 9,13 pts/m<sup>2</sup>, apresentando o menor valor de 7,11 e o maior de 11,65 pts/m<sup>2</sup>. Porém, ao comparar a porcentagem de pontos *ground* que foram utilizados na interpolação dos MDTs, podemos observar na tabela 9 que em média, apenas pouco mais de 6% foram utilizados, ou seja, pulsos do *laser* que chegaram a atingir o solo, com o maior valor de 14,86% e o menor de 2,24%.

Tabela 9 – Propriedades dos arquivos .LAS utilizados na área de estudo.

LAS file	Contagem de pontos	Espaçamento dos pontos (m)	Densidade de pontos (pts/m <sup>2</sup> )	Total de pontos <i>ground</i>	Porcentagem de pontos <i>ground</i>
286-d-iii-2	9.231.121	0,363	7,59	252.164	2,73
286-d-iii-3	11.403.195	0,329	9,24	905.585	7,94
286-d-iii-5	12.758.039	0,309	10,47	318.791	2,50
286-d-iii-6	12.953.709	0,309	10,47	290.417	2,24
286-d-iv-1	14.272.593	0,294	11,57	657.935	4,61
286-d-iv-4	14.215.711	0,295	11,49	391.401	2,75
286-f-i-2	14.181.394	0,293	11,65	797.095	5,62
286-f-i-3	9.935.625	0,352	8,07	406.486	4,09
286-f-i-6	9.811.090	0,354	7,98	1.457.923	14,86
286-f-ii-1	9.419.630	0,362	7,63	1.160.095	12,32
286-f-ii-2	8.756.303	0,375	7,11	318.726	3,64
286-f-ii-4	7.707.271	0,398	6,31	806.209	10,46
Média	11.220.473	0,336	9,13	646.902	6,15

A fim de permitir uma melhor análise da distribuição da densidade de pontos *ground*, foi gerado o *raster* com células de 100m<sup>2</sup>, onde são contabilizados os pontos dentro de cada célula (figura 34). A distribuição dispersa e heterogênea dos pontos

*ground* fica bem representada e torna-se alvo de atenção para a geração de MDTs, onde grande parte da área tem uma densidade de menos de um ponto em 100m<sup>2</sup>. Por outro lado, outras áreas sem cobertura florestal receberam uma concentração muito mais elevada de pontos, chegando a mais de 20 pts/m<sup>2</sup>.

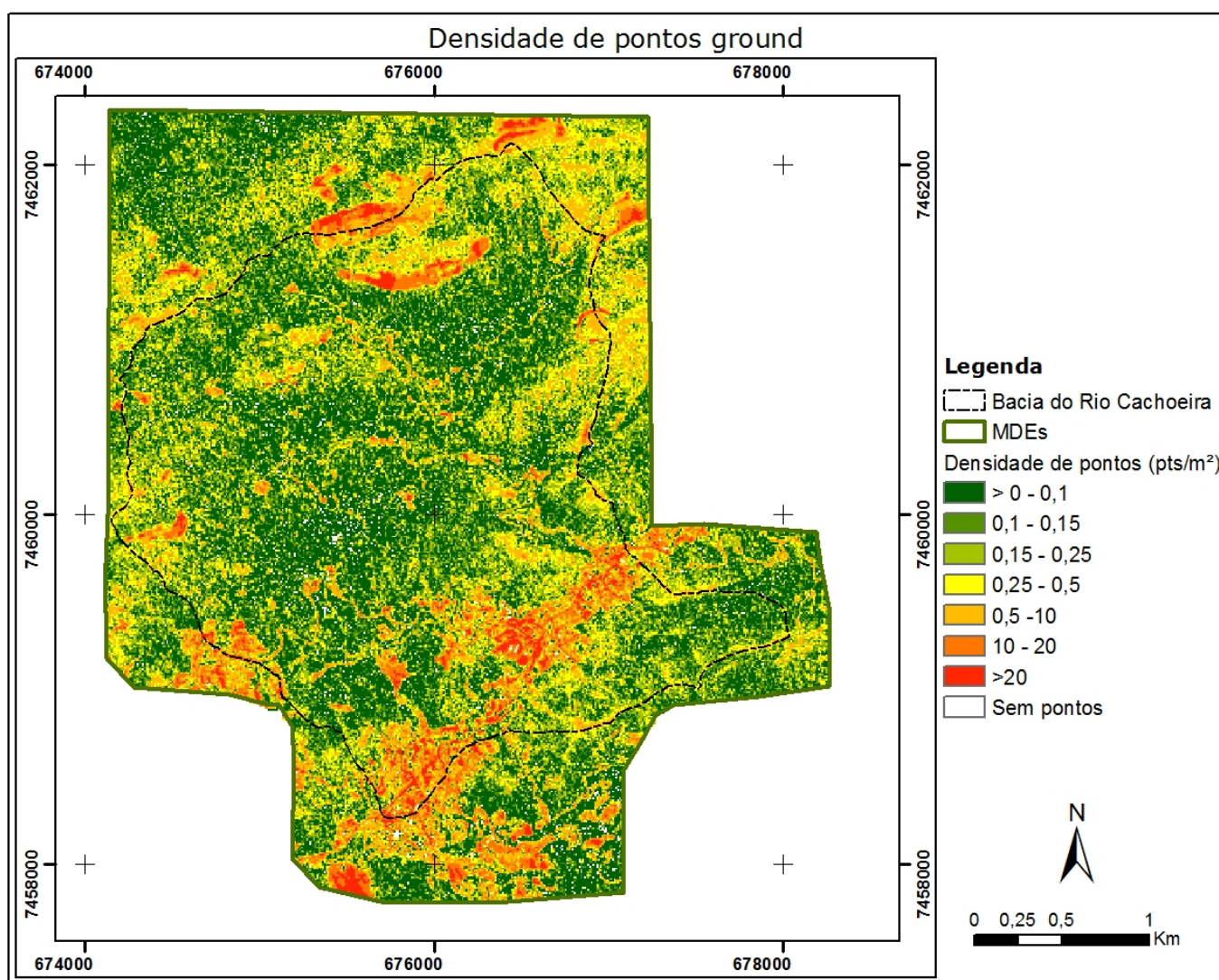


Figura 34 – Raster de resolução de 10x10m com densidade de pontos *ground* em cada célula.

O figura 35 apresenta o percentual das classes de densidade de pontos, sendo contabilizado mais de 30% da área com menos de um ponto por 100 m<sup>2</sup>, chegando a 80% da área com menos de um ponto por m<sup>2</sup> e pouco mais de 1% da área sem nenhum ponto em 100m<sup>2</sup>. Estes resultados contrastam com as estatísticas gerais do

levantamento, que mostram média de 9,13 pts/m<sup>2</sup> levando em consideração todos os pontos levantados.

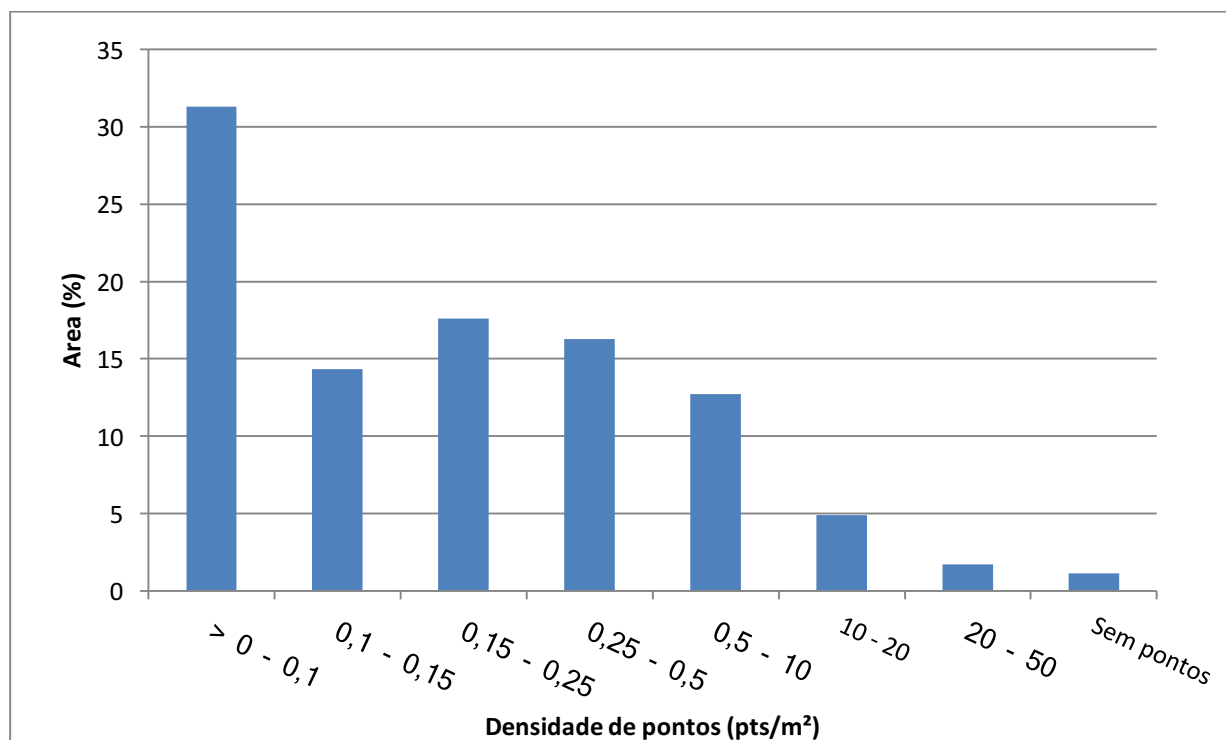


Figura 35 – Gráfico com as classes de densidades de pontos (pts/m<sup>2</sup>) e sua área percentual na Bacia do Rio Cachoeira.

O cruzamento da densidade de pontos com o uso e cobertura apontou a presença de mais de 90% de cobertura florestal nas classes mais baixas de densidade de pontos (até 0,5 pts/m<sup>2</sup>). As classes de densidade de pontos mais elevada demonstraram aumento em áreas de afloramento, solo exposto e edificações urbanas, onde os pulsos de *laser* não tiveram tanta interferência para chegar ao solo, propiciando uma melhor representação topográfica do terreno (figura 36).



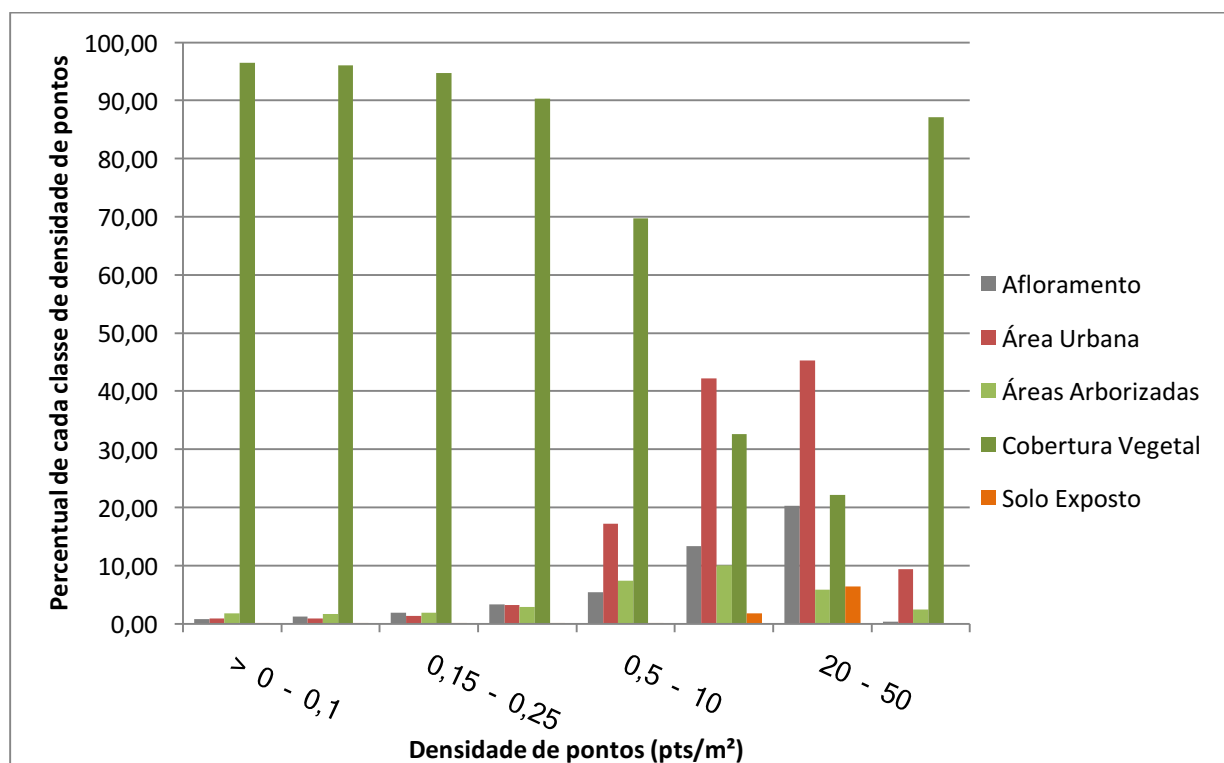


Figura 36 – Classes de densidade de pontos e sua área percentual em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal.

A contagem total dos pontos *ground* em cada LAS *file*, quando comparada ao domínio da cobertura florestal obteve um coeficiente de correlação de 0,92. A figura 37 demonstra que o retorno dos pulsos de *laser* classificados como *ground* aumenta inversamente à presença da cobertura florestal, indicando que áreas florestadas dificultam o levantamento e interferem diretamente na qualidade do MDT, já que impedem o registro dos pontos relacionados ao terreno.

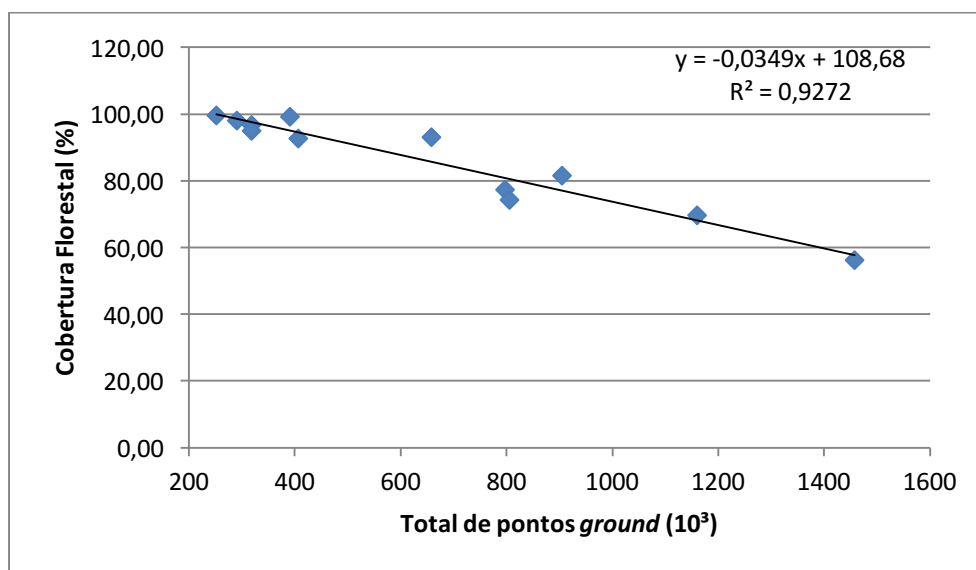


Figura 37 – Percentura de Cobertura Florestal em cada arquivo .LAS relacionado ao total de pontos *ground* contabilizados

Nas figuras 38 e 39 é possível observar a diferença de qualidade no MDT 1:2.000 para as áreas abertas aos pulsos de *laser* (afloramento e área urbana) em relação às áreas cobertas por florestas. Nas áreas abertas o nível de detalhamento apresenta-se mais elevado devido à maior densidade de pontos, com registro médio superior a 1 pt/m<sup>2</sup>. Já nas áreas de cobertura florestal a generalização fica mais evidente devido à necessidade de interpolação dos valores, proveniente da baixa densidade de pontos.

## Modelo Digital de Elevação 1:2.000 em detalhe

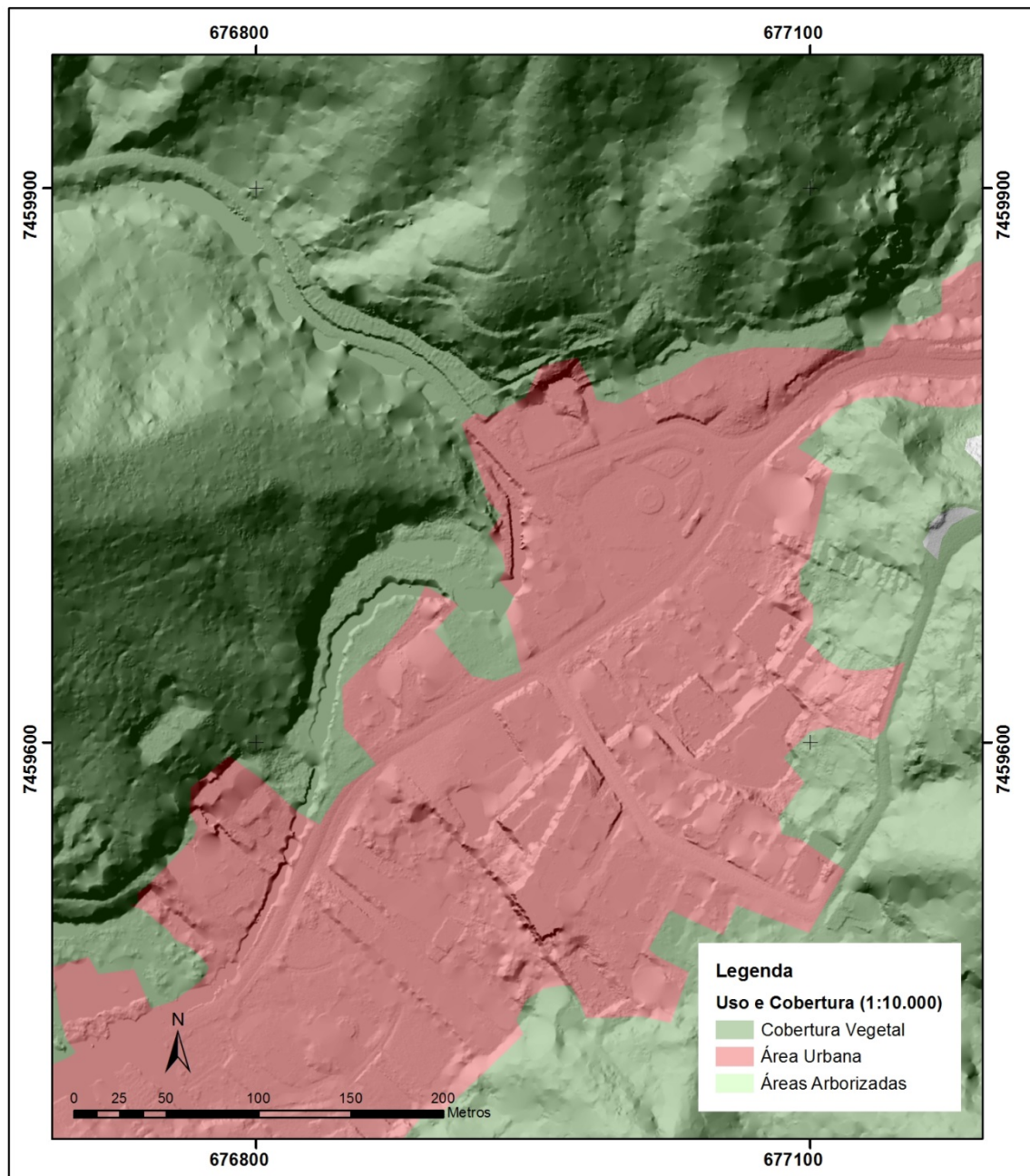


Figura 38 – Detalhe do MDT 1:2.000 na área urbana e encosta florestada.

## Modelo Digital de Elevação 1:2.000 em detalhe

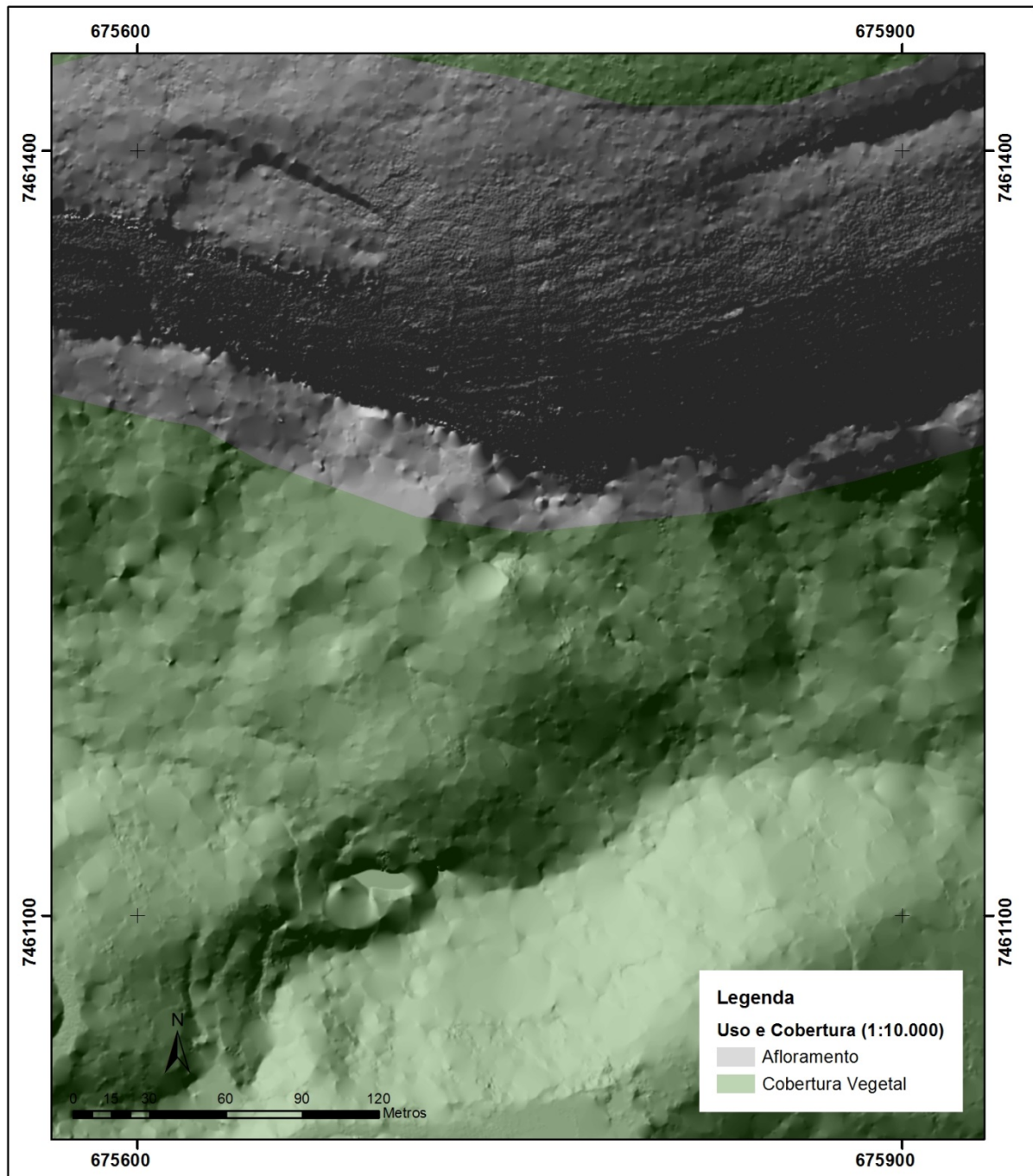


Figura 39 – Detalhe do MDT 1:2.000 na interface de afloramento rochoso com cobertura florestal.

## 6.2 Avaliação dos MDTs

O total de 12 arquivos MDTs foram produzidos nas escalas 1:2.000; 1:10.000; 1:50.000 através dos quatro diferentes métodos de *Cell Assignment Type*. Contudo, estes diferentes métodos indicaram diferenças desprezíveis quando comparados entre si em todas as escalas, menos de 0,5% da área apresentou diferença de altimetria maior do que a acuidade visual. Isso ocorreu devido a grande parte da área estudada ter baixa densidade de pontos do tipo *ground*, fazendo com que a célula recebesse o valor de altimetria de um único ponto existente. As áreas que mostraram variação disso são as áreas onde houve uma densidade de pontos elevada. Por isso foi escolhido o método *Average*, por calcular o valor médio quando houver mais de um ponto localizado na mesma célula.

### 6.2.1 Características do MDT 1:2.000

Os valores de altimetrias do MDT 1:2.000 quando comparados aos pontos cotados da base IPP, indicaram que apenas 63,65% dos pontos possuem erro menor do que 0,75 m, não atingindo a Classe C do PEC. A tabela 10 apresentada o número total de pontos frente a cada classe de uso e cobertura, concentrando o maior número de erros na cobertura florestal.

Tabela 10 – Pontos de controle em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal no MDT na escala 1:2.000

Erro (m)	Afloramento	Área Urbana	Áreas Arborizadas	Cobertura Florestal	Gramínea e vegetação arbustiva	%
< -0,75	0	42	6	25	4	12,01
> -0,75 - < 0,75	2	251	46	88	21	63,65
> 0,75	1	29	5	118	3	24,34

Os valores absolutos dos erros e o erro médio quadrático (EMQ) podem ser observados na tabela 11. A área total mapeada apresentou EMQ de 0,92, quase o dobro do limite da Classe C, que é de 0,5. Porém a área urbana apresentou erro de 0,34, apenas 0,01 acima do limite da Classe A com erros absolutos mínimo e máximo de -6,26 e 9,34 metros respectivamente. As áreas com cobertura florestal resultaram no pior resultado

entre as classes de uso do solo e cobertura vegetal, caso se desprezado o afloramento, tendo em vista que o afloramento teve apenas 3 pontos analisados com erro máximo absoluto de 12,27 metros em um deles, o que elevou consideravelmente o EMQ. A cobertura florestal apresentou 1,58 de EMQ, três vezes acima do limite da Classe C e também apresentando o maior erro absoluto de 21,40 metros.

Tabela 11 – Erros mínimo, máximo e médio quadrático nas classes de uso e cobertura vegetal no MDT na escala 1:2.000.

Classes de uso e cob.	Erro Mínimo (m)	Erro Máximo (m)	EMQ (m)
Área Total	-6,26	21,40	0,92
Afloramento	-0,62	12,27	2,42
Área Urbana	-6,26	9,34	0,34
Áreas Arborizadas	-2,63	3,70	0,26
Cobertura Florestal	-6,03	21,40	1,58
Gramínea e Veg. Arb.	-4,39	1,52	0,42

O MDT para a área mapeada na escala de 1:2.000 não enquadrou-se no PEC Classe C, com os maiores erros concentrados na área com cobertura florestal elevando o erro total do mapeamento, indicando que as áreas com maior cobertura, logo menor densidade de pontos *ground* causaram grande interferência no mapeamento final. A figura 41 mostra a distribuição dos pontos cotados classificados quanto ao erro, é possível observar a maior distribuição de erro acima de 0,75 metros na área do PNT com densa cobertura florestal e os pontos dentro da Classe C concentrados nas áreas urbanas.

O trabalho de Tang *et al.* (2008) em uma área com floresta de coníferas, no oeste de Washington (EUA) classificou pontos *ground* através da diferença entre o primeiro retorno do laser e o último com base em limiares referente a estrutura da vegetação presente na área de estudo. Os resultados apontaram uma cobertura de 23% dos pontos como referente ao solo. Porém o resultado do MDT gerou erros devido a classificação dos pontos ter sido influenciados por espécies de vegetação de menor porte ou parte inferior das árvores, resultando em ruídos no MDT devido a incorporação de ponto referentes à vegetação (figura 40)



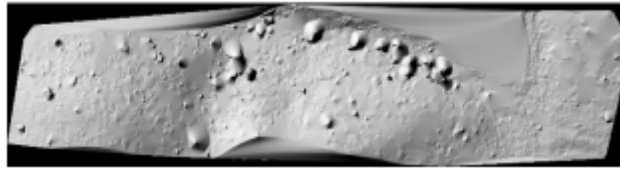


Figura 40 - MDT após a classificação ainda apresentou pontos relativos a vegetação. Fonte: (Tang *et al.* 2008)

### Pontos cotados no MDE 1:2.000

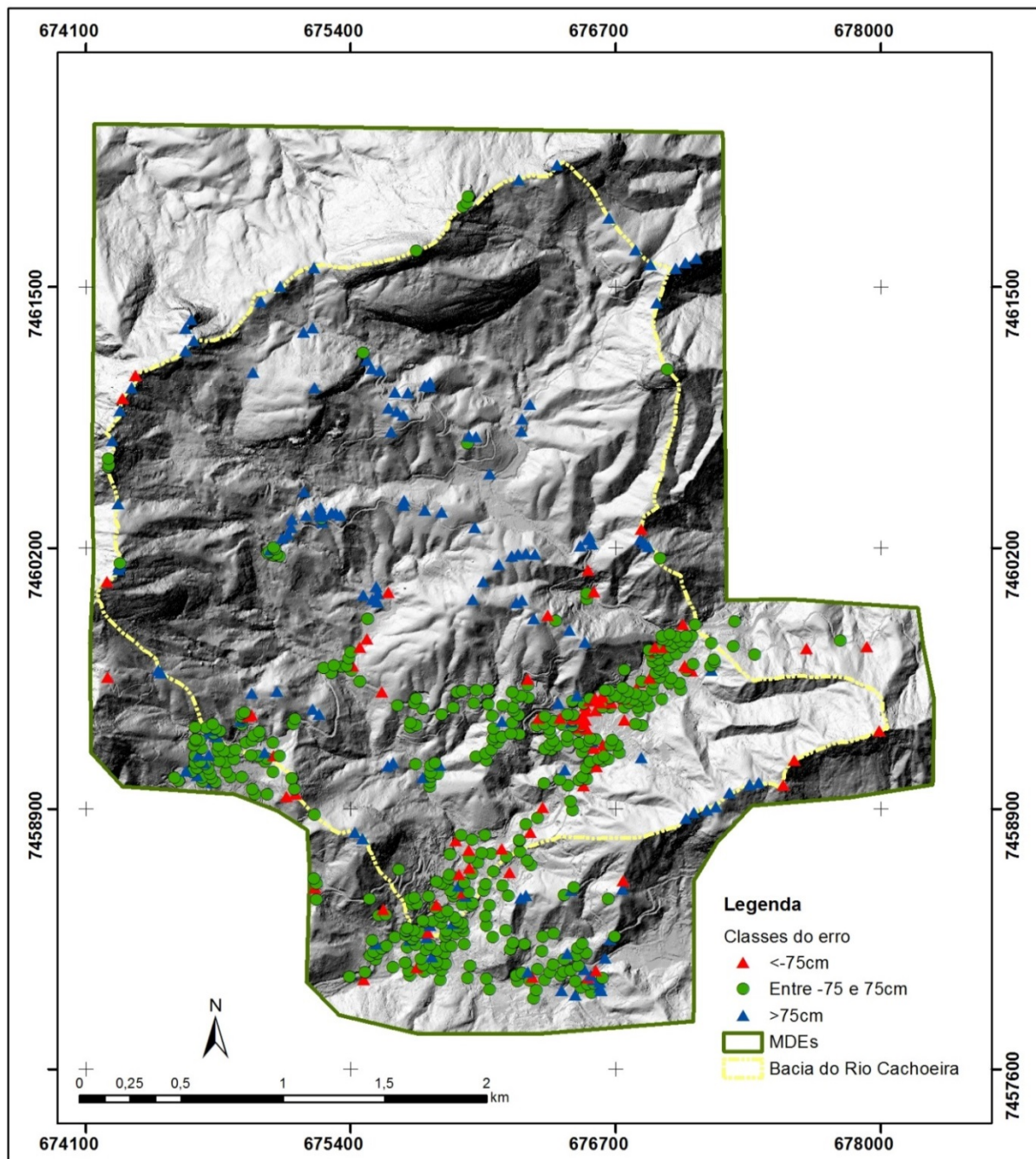


Figura 41 – Pontos de controle da base IPP 1:2.000 no MDT 1:2.000.

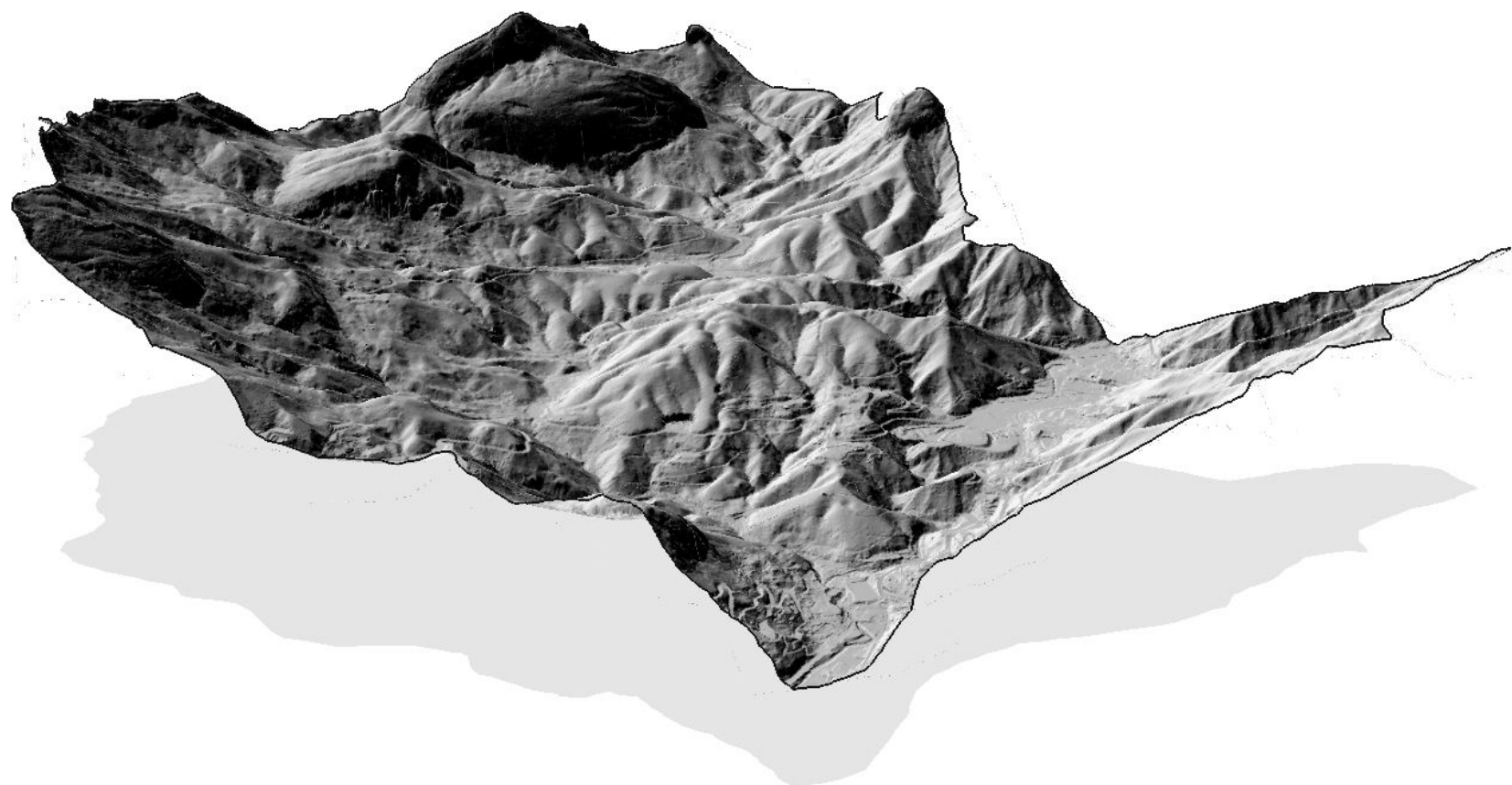


Figura 42 – Visualização 3D do MDT (Hillshade) 1:2.000 no *software* ArcScene 10.1.



### 6.2.2 Características do MDT 1:10.000

O MDT na escala 1:10.000 apresentou resultado um pouco melhor para os pontos cotados, porém atingiu apenas 85% dos pontos dentro da Classe C (tabela 12), mantendo o mesmo comportamento na distribuição dos erros frente às classes de uso do solo e cobertura vegetal. Houve maior número de erros dentro da cobertura florestal, totalizando 74 erros, cerca de 92%.

Tabela 12 – Pontos de controle em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal no MDT na escala 1:10.000

Erro (m)	Afloramento	Área Urbana	Áreas Arborizadas	Cobertura Florestal	Gramínea e vegetação arbustiva	%
< -3,3	0	6	0	4	0	1,72
> -3,3 - < 3,3	2	312	56	153	28	85,80
> 3,3	1	4	1	74	0	12,48

Deste modo, para a escala 1:10.000 o EMQ enquadrou-se na Classe A com 0,93, sendo o maior erro mínimo de -6,27 e máximo de 21,76 (tabela 13). O EMQ manteve os valores próximos aos valores da escala 1:2.000, e por ter classes abrangendo maiores erros, o mapeamento 1:10.000 satisfaz o limite de 1,7 metros para a escala 1:10.000. O maior EMQ ocorreu novamente na classe de Cobertura Vegetal, com erro mínimo de -6 m e máximo de 21,76 m.

Tabela 13 – Erros mínimo, máximo e médio quadrático nas classes de uso e cobertura vegetal no MDT na escala 1:10.000.

Classes de Uso	Erro Mínimo (m)	Erro Máximo (m)	EMQ (m)
Área Total	-6,27	21,76	0,93
Afloramento	-0,51	13,96	2,60
Área Urbana	-6,27	9,30	0,33
Áreas Arborizadas	-2,27	3,58	0,30
Cobertura Florestal	-6,00	21,76	1,59
Gramínea e Veg. Arb.	-4,42	1,13	0,50

A figura 43 demonstra a destruição dos pontos de controle classificados quanto ao erro para a Classe C do PEC.

## Pontos cotados no MDE 1:10.000

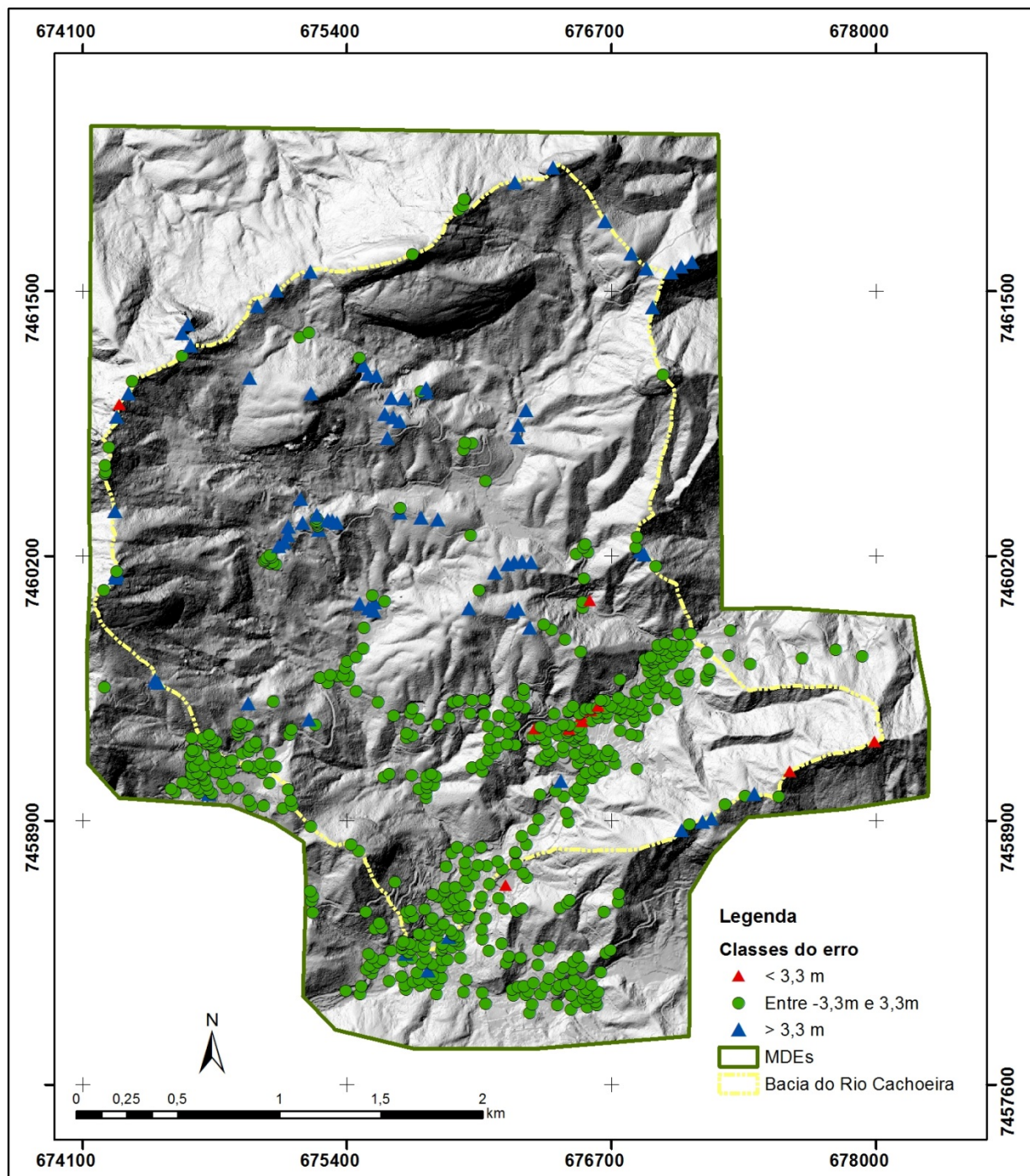


Figura 43 Pontos de controle da base IPP 1:2.000 no MDT 1:10.000.

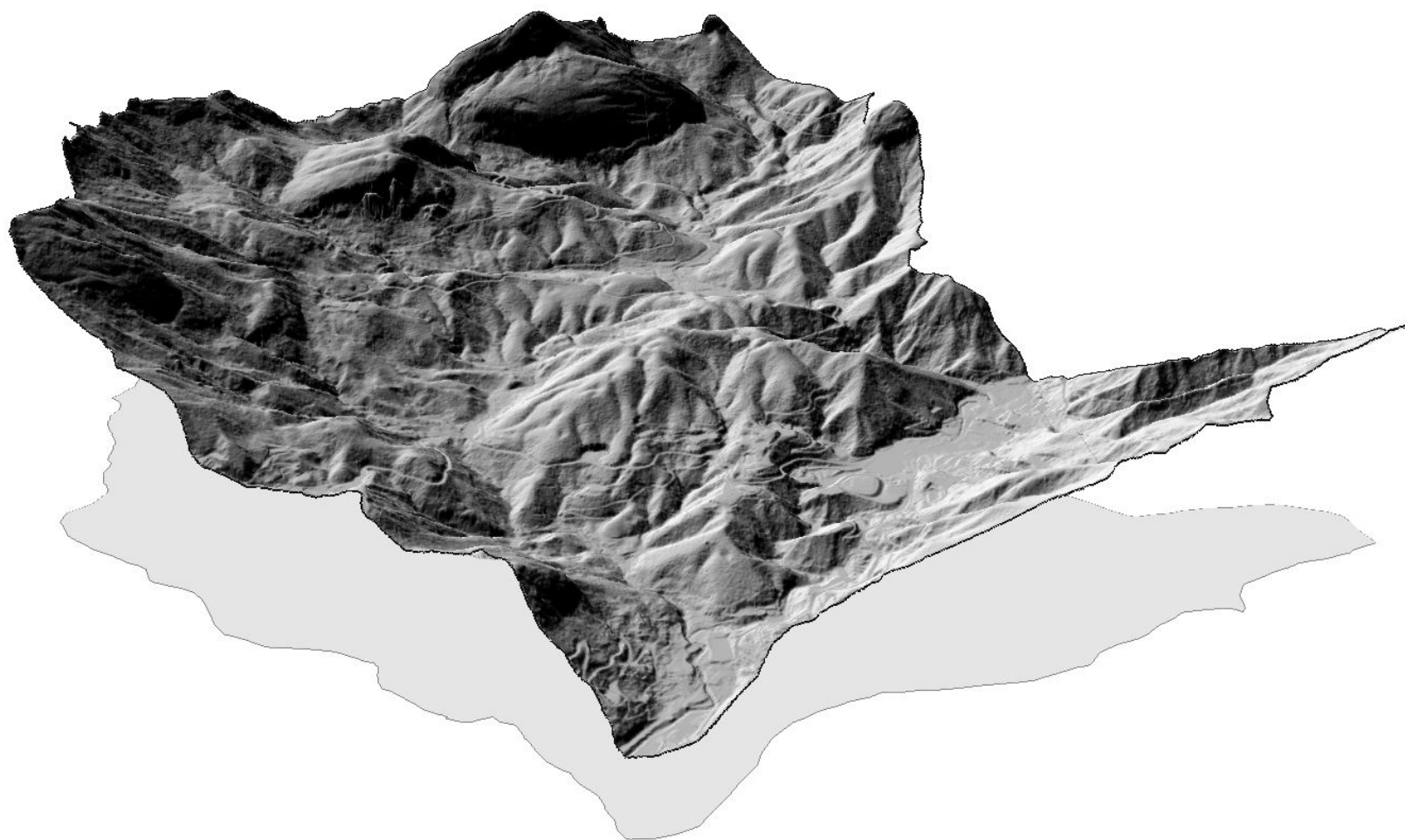


Figura 44 – Visualização 3D do MDT (Hillshade) 1:10.000 no *software* ArcScene 10.1.

### 6.2.3 Características do MDT 1:50.000

O MDT gerado para a escala 1:50.000 apresentou 96,57% dos pontos de controle dentro da Classe A, ocorrendo apenas 21 erros maiores que 10 metros nas áreas de cobertura florestal e 1 em afloramento, como observado na tabela 14.

Tabela 14 – Pontos de controle em cada classe de uso do solo e cobertura vegetal no MDT na escala 1:50.000

Erro (m)	Afloramento	Área Urbana	Áreas Arborizadas	Cobertura Florestal	Gramínea e vegetação arbustiva	%
< 10	0	0	0	0	0	0
> -10 - < 10	2	322	57	210	28	96,57
>10	1	0	0	21	0	3,43

O erro mínimo encontrado foi de -8,88 metros, ficando dentro da Classe A e o erro máximo de 21 metros localizado em área florestal (tabela 15). O EMQ calculado foi de 1,01 metros também atendendo a Classe A. O comportamento do EMQ se manteve apresentando seu maior valor em áreas com cobertura vegetal, desprezando o afloramento.

Tabela 15 – Erros mínimo, máximo e médio quadrático nas classes de uso e cobertura vegetal no MDT na escala 1:50.000.

Classes de uso e cob.	Erro Mínimo (m)	Erro Máximo (m)	EMQ (m)
Área Total	-8,88	21,00	1,01
Afloramento	0,31	16,16	2,94
Área Urbana	-6,22	9,64	0,30
Áreas Arborizadas	-3,38	5,81	0,30
Cobertura Florestal	-8,88	21,00	1,72
Gramínea e Veg. Arb.	4,29	2,63	0,58

A figura 45 apresenta a distribuição dos pontos de controle classificados quanto ao erro para a Classe A. Apenas erros maiores que 10 metros foram gerados distribuídos principalmente na área do PNT com densa cobertura florestal.

## Pontos cotados no MDE 1:50.000

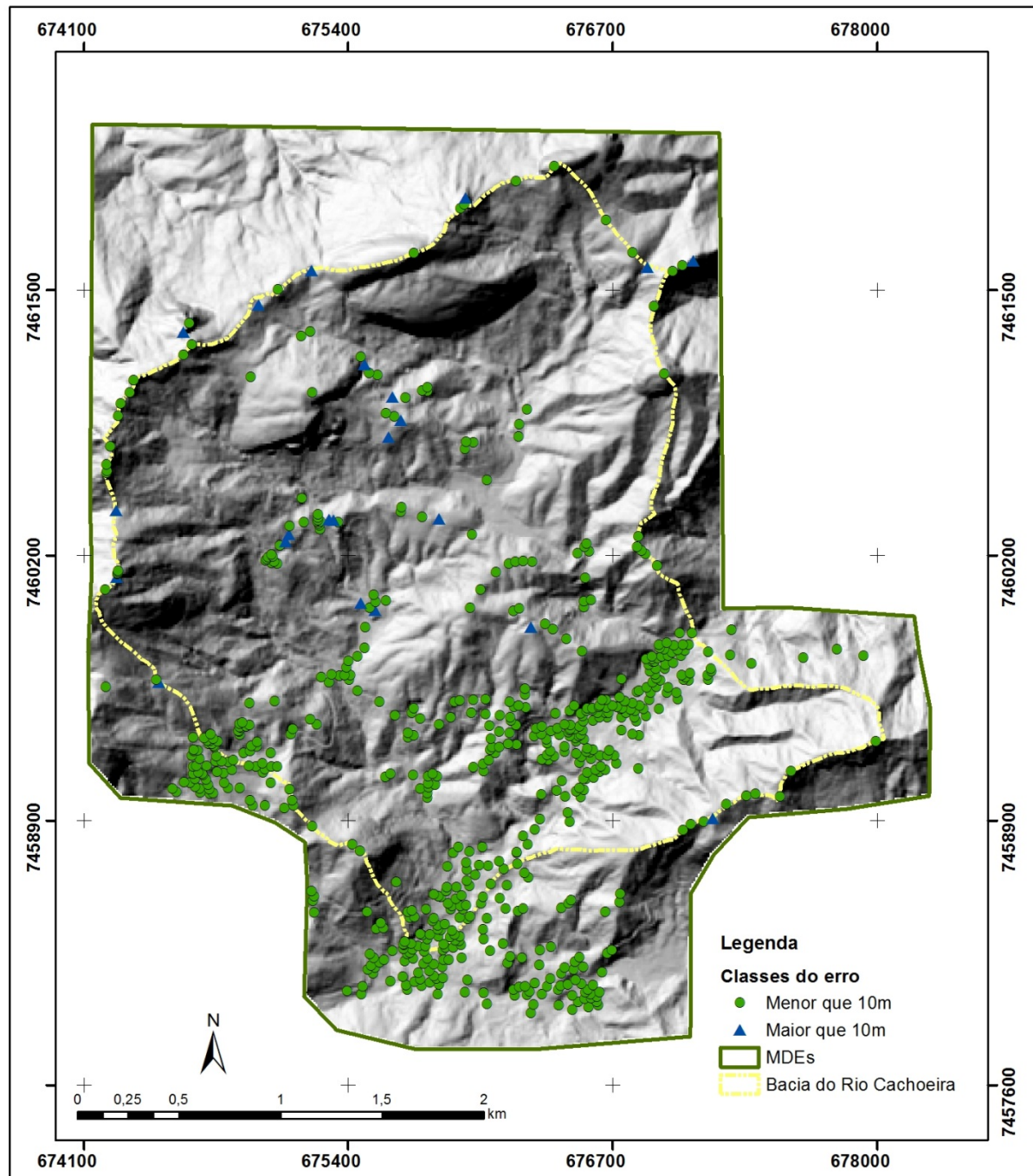


Figura 45 – Pontos de controle da base IPP 1:2.000 no MDT 1:50.000.

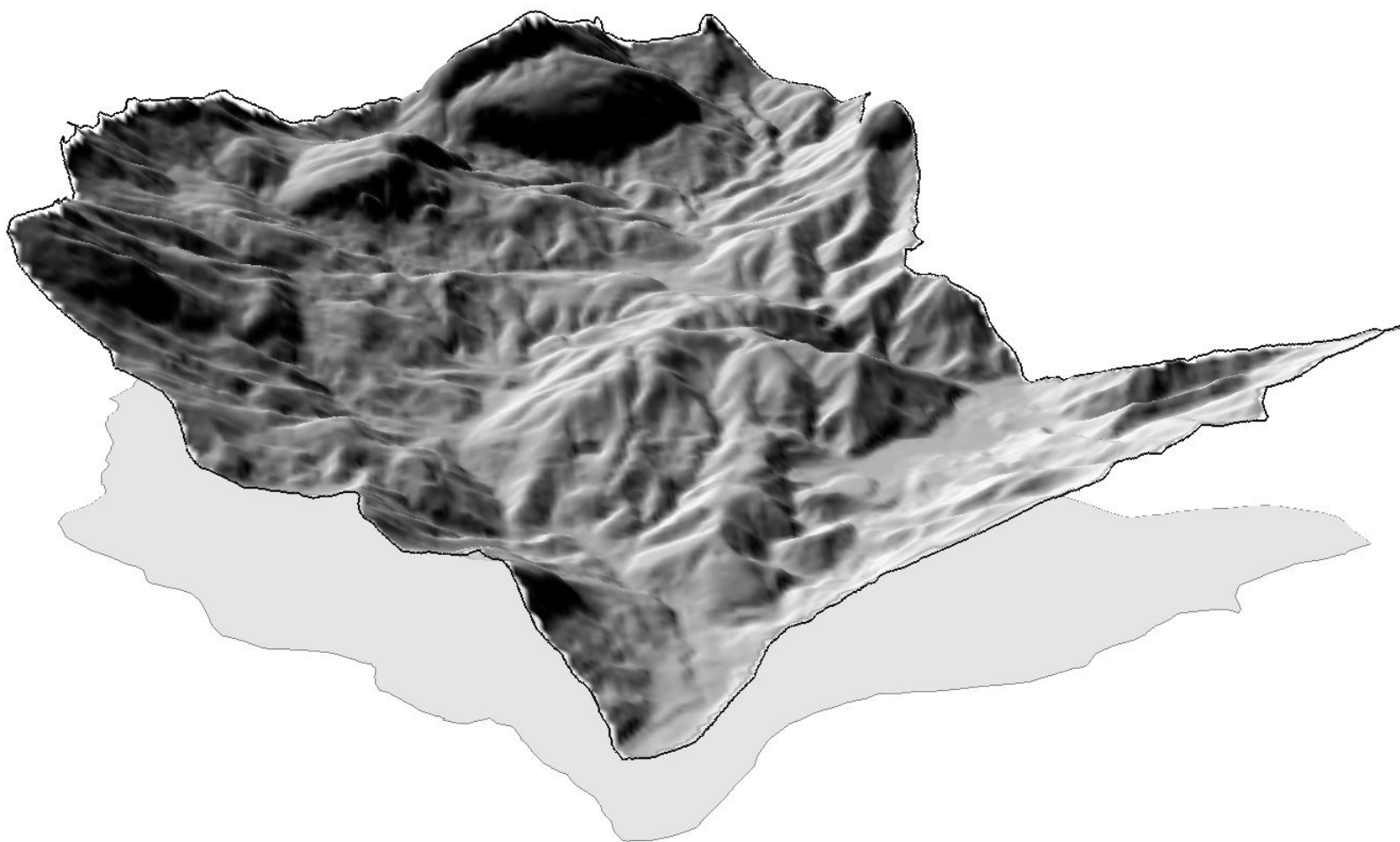


Figura 46 – Visualização 3D do MDT (Hillshade) 1:50.000 no *software* ArcScene 10.1.



## 6.3 Elaboração da base topográfica e parâmetros morfométricos 1:10.000

### 6.3.1 Topografia

A topografia gerada através da ferramenta *Contour* com equidistância de 5 metros e apresentou apenas um erro na verificação topológica que pode ser observado na figura 47. Martinez (2014) utilizou a base topográfica do IPP para o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos no Maciço da Tijuca e encontrou diversos erros topológicos que necessitam de correção manual e demandam muito tempo. Deste modo, uma base cartográfica gerada rapidamente sem erros topológicos demonstra uma expressiva vantagem.

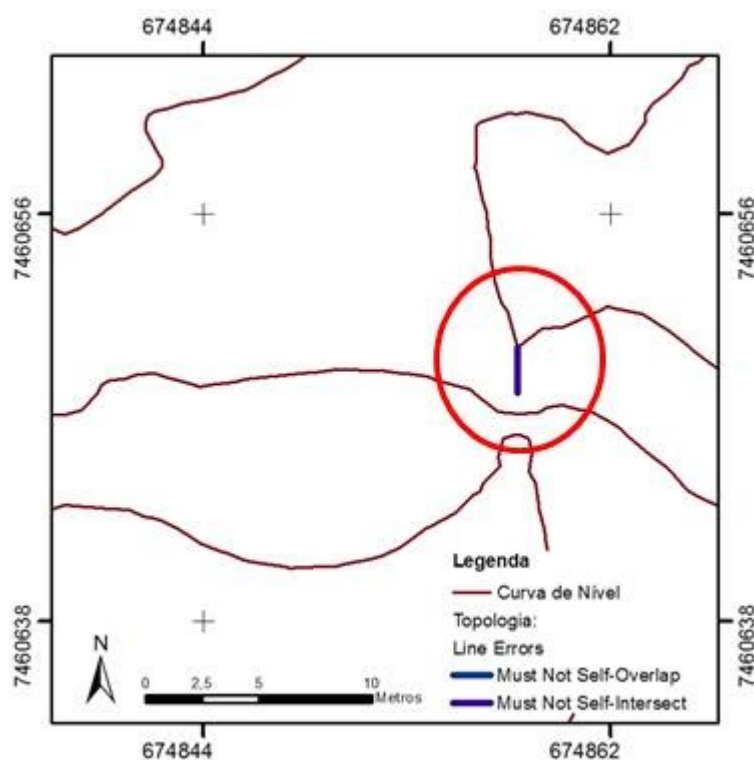


Figura 47 – Visualização do erro de Topologia circulado em vermelho.

Na figura 48 é possível observar a topografia gerada com detalhe na parte norte e mais elevada da bacia, na área do PNT com cobertura florestal densa e na figura 49 a parte mais ao sul da bacia com presença de ocupação urbana.

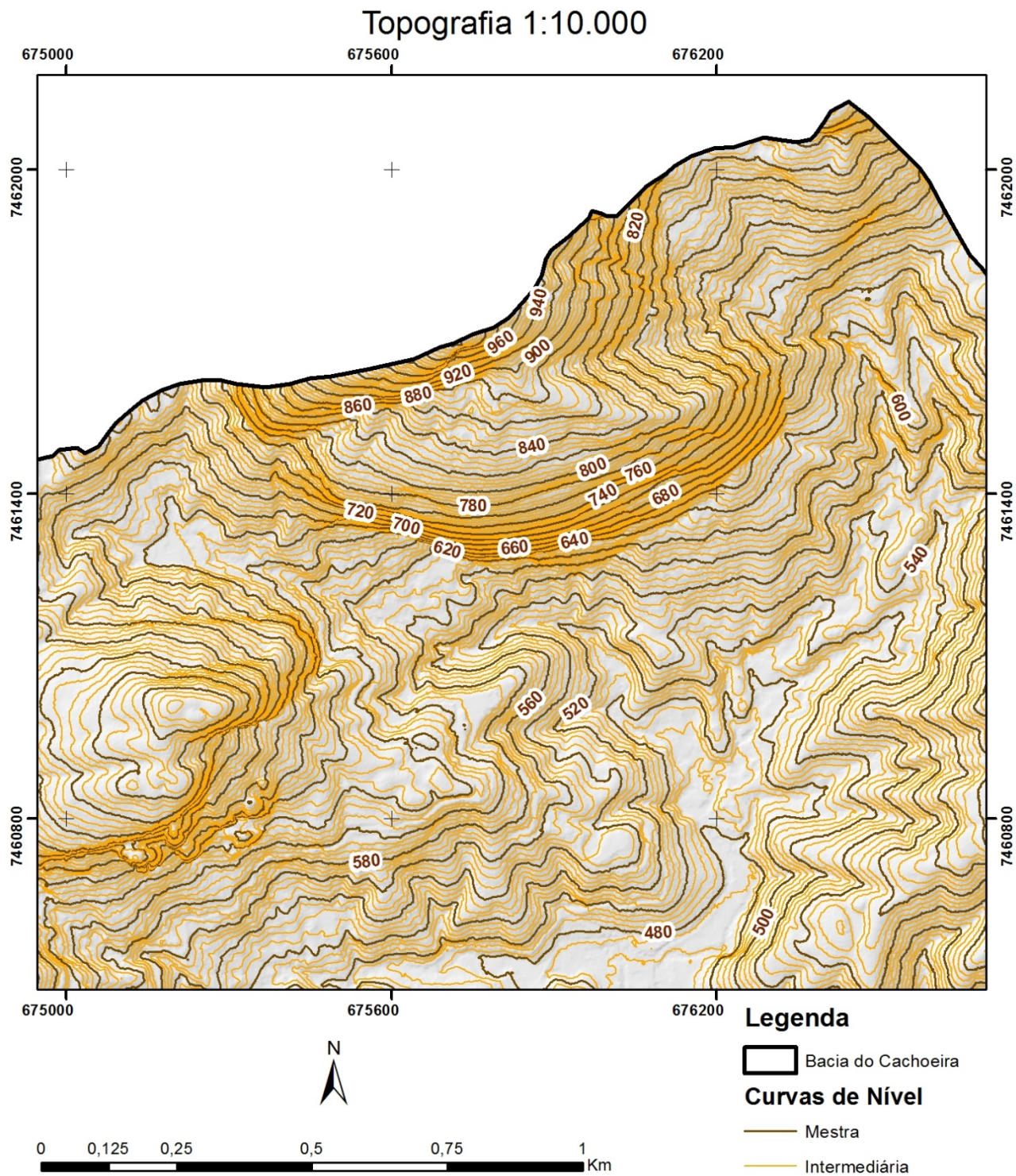


Figura 48 – Detalha da topografia 1:10.000 na parte Norte da bacia.



## Topografia 1:10.000

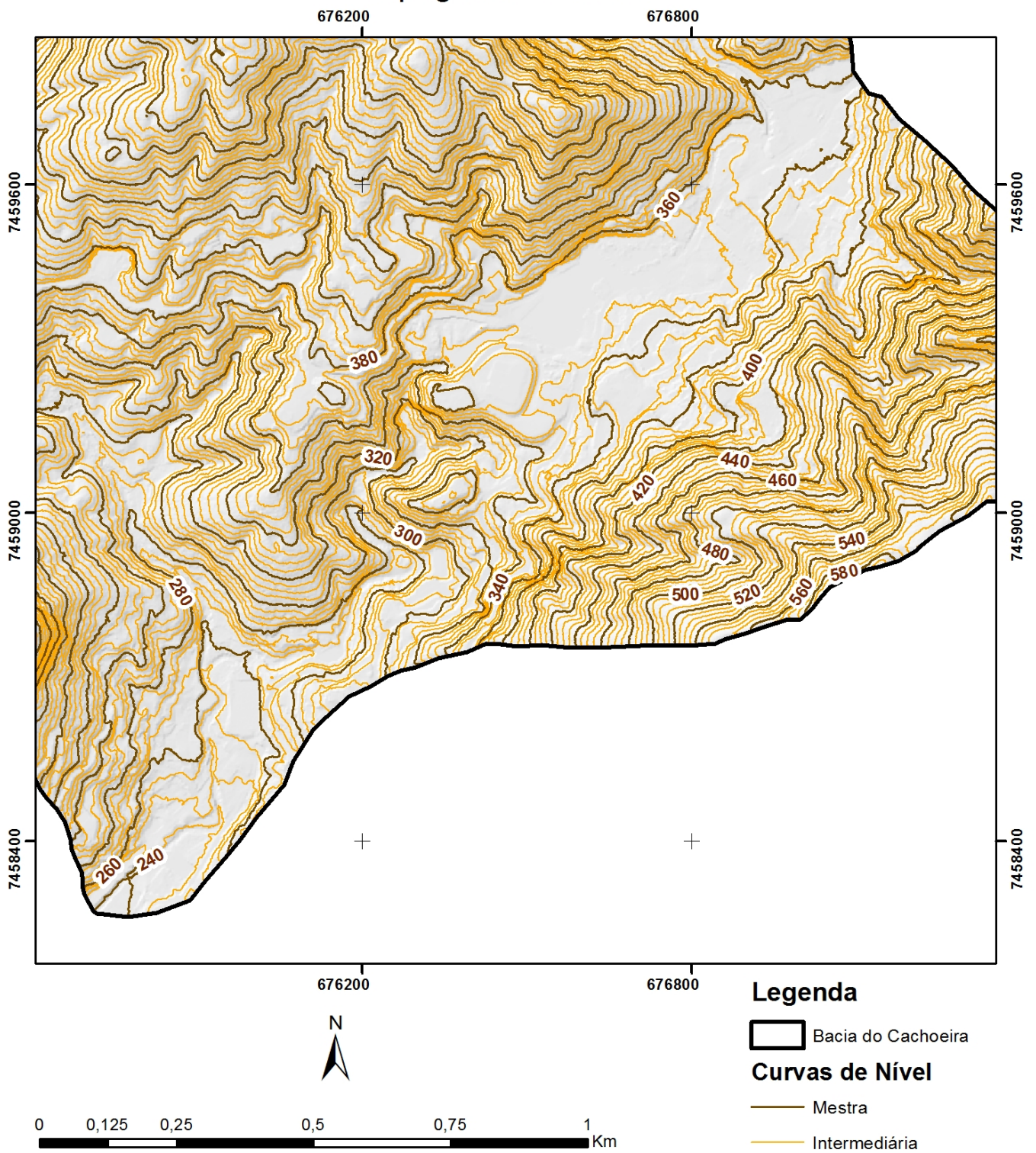


Figura 49 – Detalha da topografia 1:10.000 na parte Sul e mais urbanizada da bacia.

### 6.3.2 Declividade

A declividade gerada na ferramenta *Slope* (figura 50) conseguiu representar os afloramentos de modo bem marcados, assim como as estradas. Tais detalhes podem ser observados na figura 51.

### Mapa de Declividades

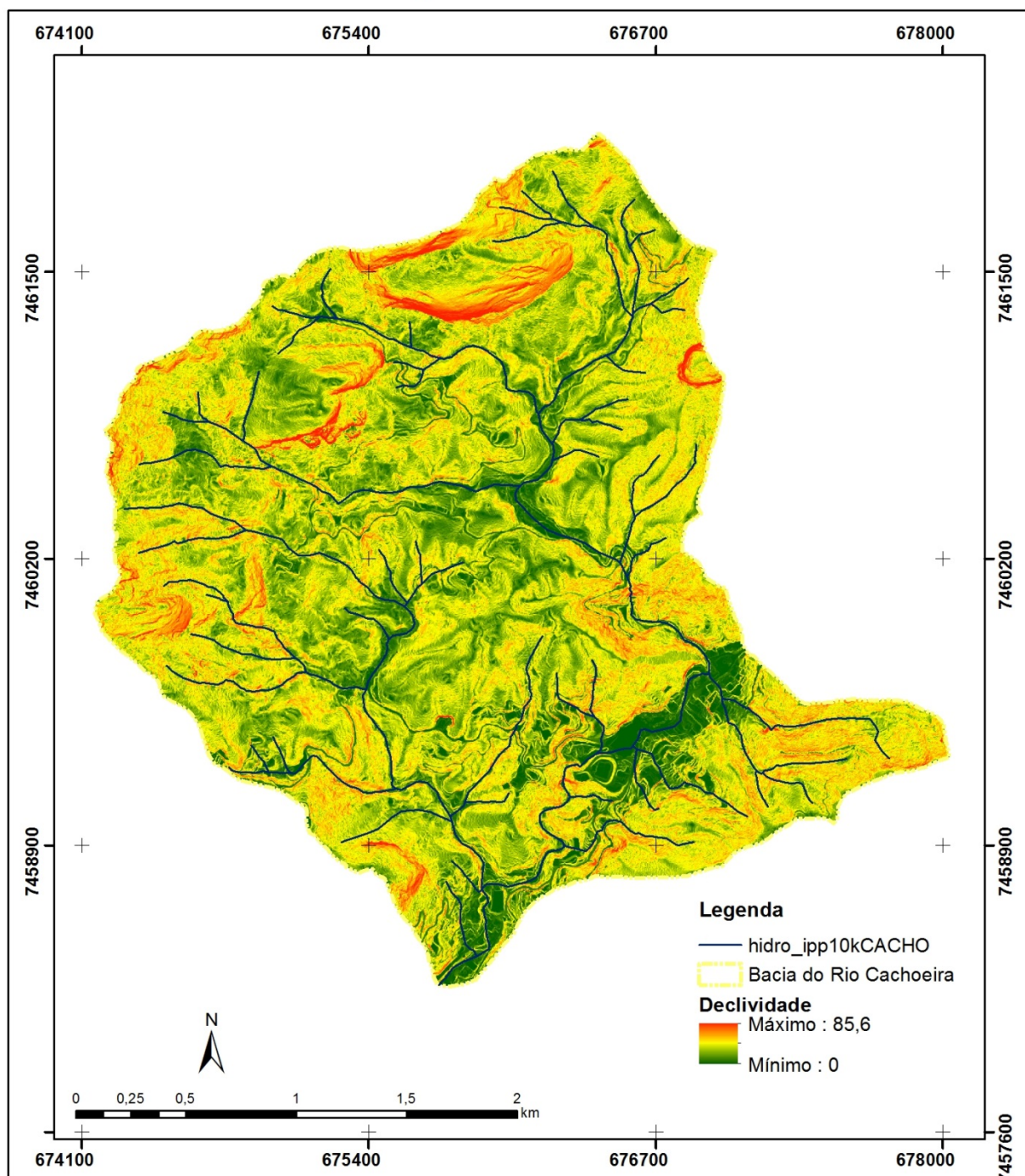


Figura 50 – Mapa de Declividades



A declividade gerada na escala 1:10.000 apresentou um nível de detalhe considerado bom, no qual foi possível identificar estradas e afloramentos visivelmente bem nítidos. Na figura 51 os corte de estrada estão bem delimitados assim como os afloramentos rochosos, mesmo em áreas com cobertura florestal densa, indicando que o levantamento LiDAR pode trazer um detalhamento maior para análises que utilizam parâmetros morfométricos como a declividade. Além disso, é um procedimento que pode facilitar o mapeamento de tais feições.

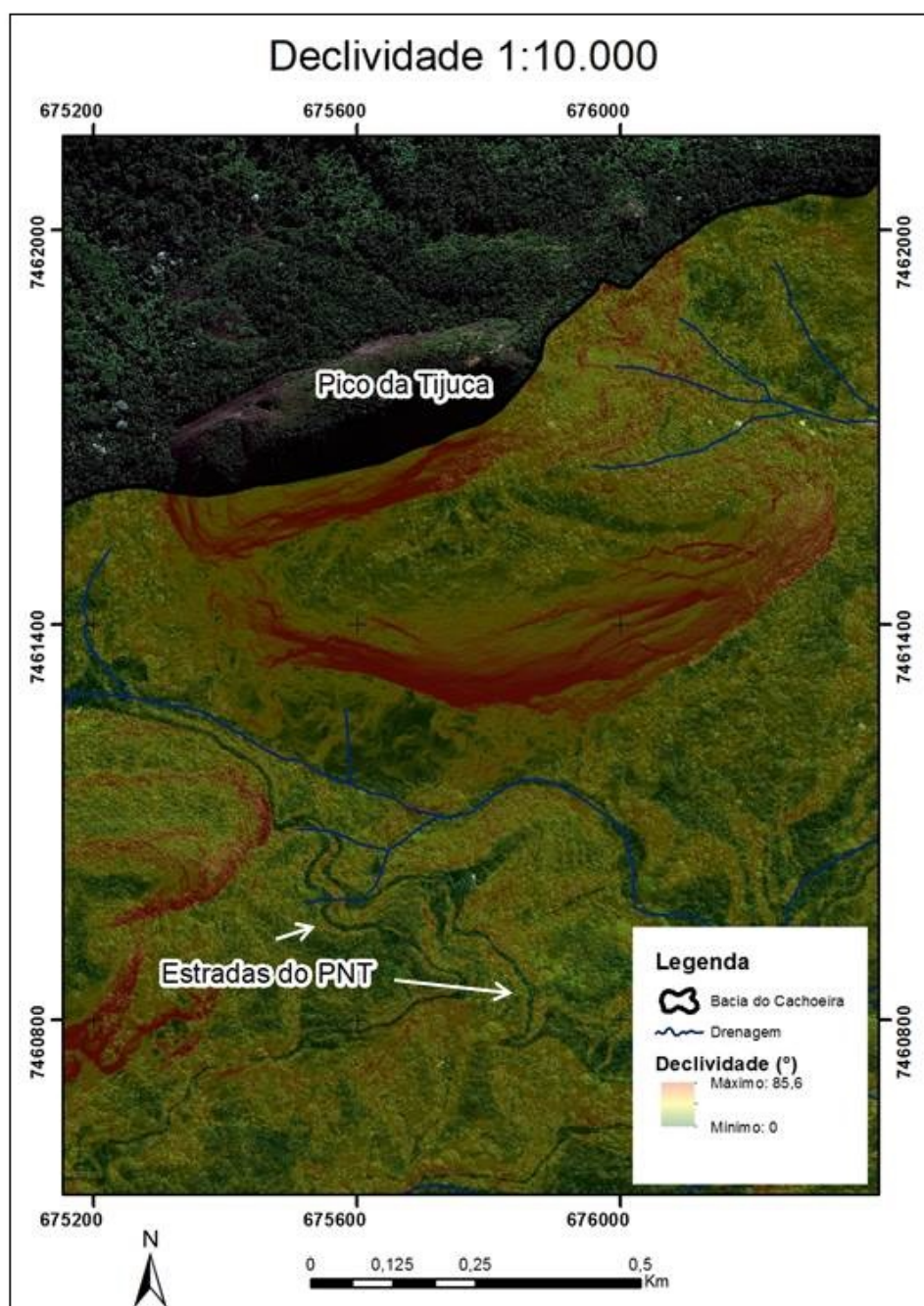


Figura 51 – Mapa com detalhe da declividade 1:10.000.

O *raster* de declividades criado foi reclassificado em classes de: 0 - 10°, 10 – 20°, 20 – 35° e maior que 35°, utilizando o critério de declividades críticas para movimentos de massa segundo Coelho Netto *et al.* (2007) e SEA/COPPETEC (2012), servindo ainda para a comparação com o estudo realizado por Martinez (2014) na mesma área. É possível observar na figura 52 que apenas as classes de 10 -20° e >35° obtiveram diferença significativa no mapeamento. Na figura 53 os dois mapeamentos podem ser comparados e a declividade apresentada nesse estudo apresentou um recorte e um detalhamento maior do que a declividade proveniente da base topográfica do IPP 1:10.000, que apresenta uma generalização maior frente à declividade proveniente do MDT 1:10.000 gerado pelo levantamento LiDAR.

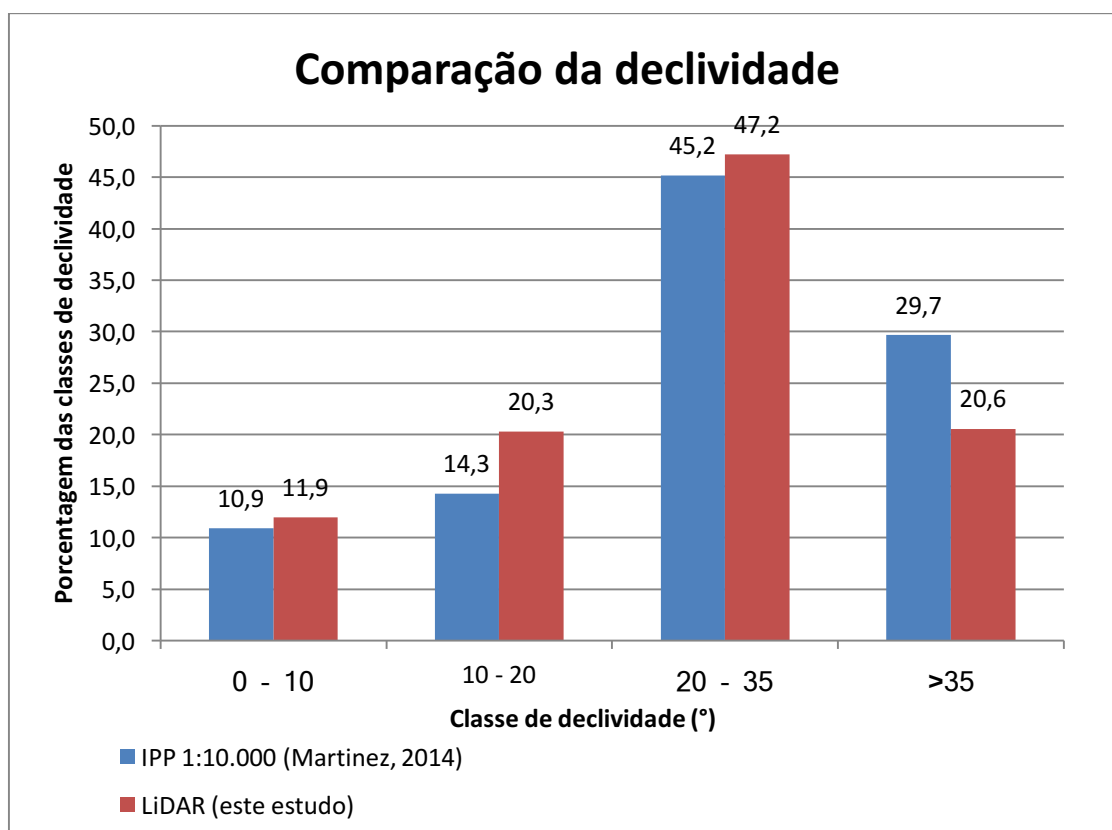


Figura 52 – Gráfico com o percentual as classes de declividades da área de estudo (IPP 1:10.000 e LiDAR).

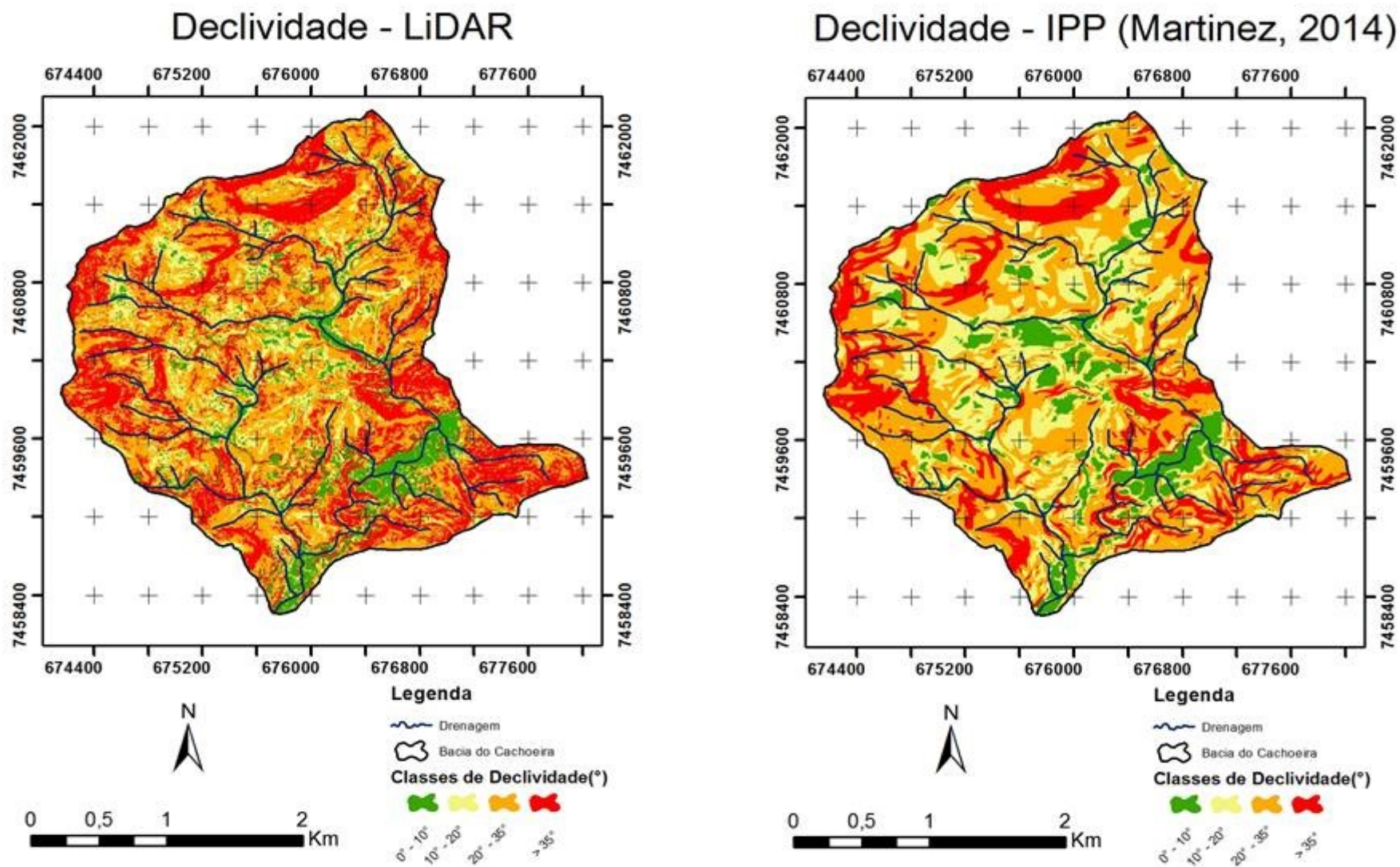


Figura 53 – Comparação dos mapeamentos de declividade LiDAR e IPP 1:10.000 (Martinez, 2014).



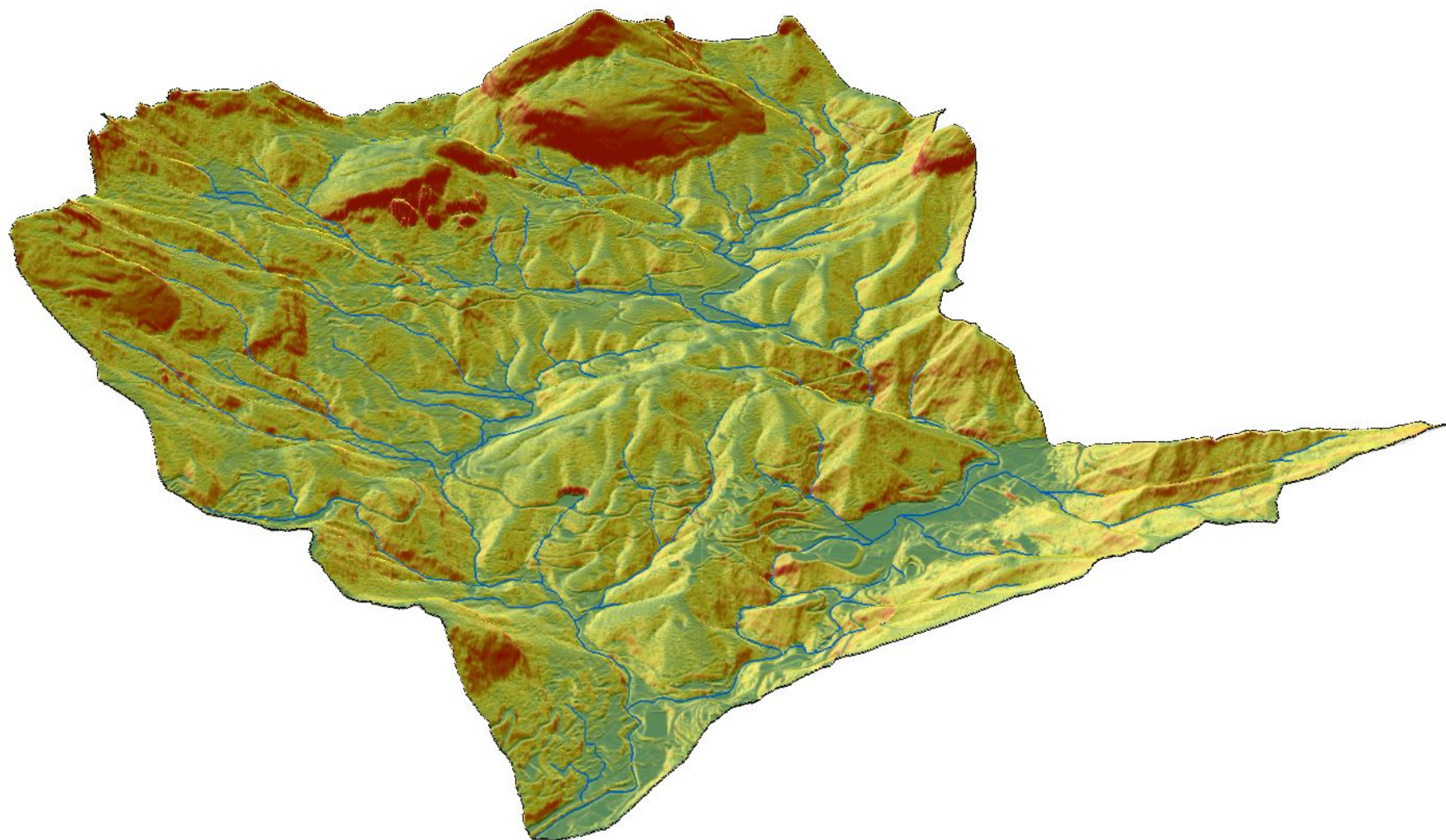


Figura 54 – Visualização 3D do mapeamento de declividade no *software* ArcScene 10.1.

### 6.3.3 Topographic Position Index - TPI

Os valores absolutos do TPI foram calculados para cada célula do MDT e apresentou resultados variando de -433 a 337. Os valores positivos indicam áreas de divergência de fluxos, ou seja, áreas convexas; enquanto os valores negativos implicam em áreas convergentes (côncavas) e; os valores nulos compreendem áreas planas. O mapeamento apresentado na figura 56 traz os valores absolutos, não os separando em classes.

Dias (2010) utilizou o TPI na bacia do Quitite (adjacente ao Rio Cachoeira) para a avaliação da produção de serapilheira em encostas sob diferentes domínios topográficos, compartimentando através do TPI o relevo do Maciço da Tijuca. Já os trabalhos de SEA/COPPETEC (2012) e Martinez (2014) utilizaram o TPI em mapeamentos de suscetibilidade a movimentos de massa para a identificação de áreas de convergência, divergência e transferência de fluxos. A maior dificuldade encontrada nesses trabalhos no uso do TPI está na separação em classes qualitativas desses valores, os mapeamentos não obtiveram continuidade nos topos (divisores) e nos fundos de vale, utilizando a rede de canais para a delimitação dos fundos de vale através de *buffer*.

A comparação entre os mapeamentos desse estudo e de Martinez (2014) pode ser observado na figura 55.

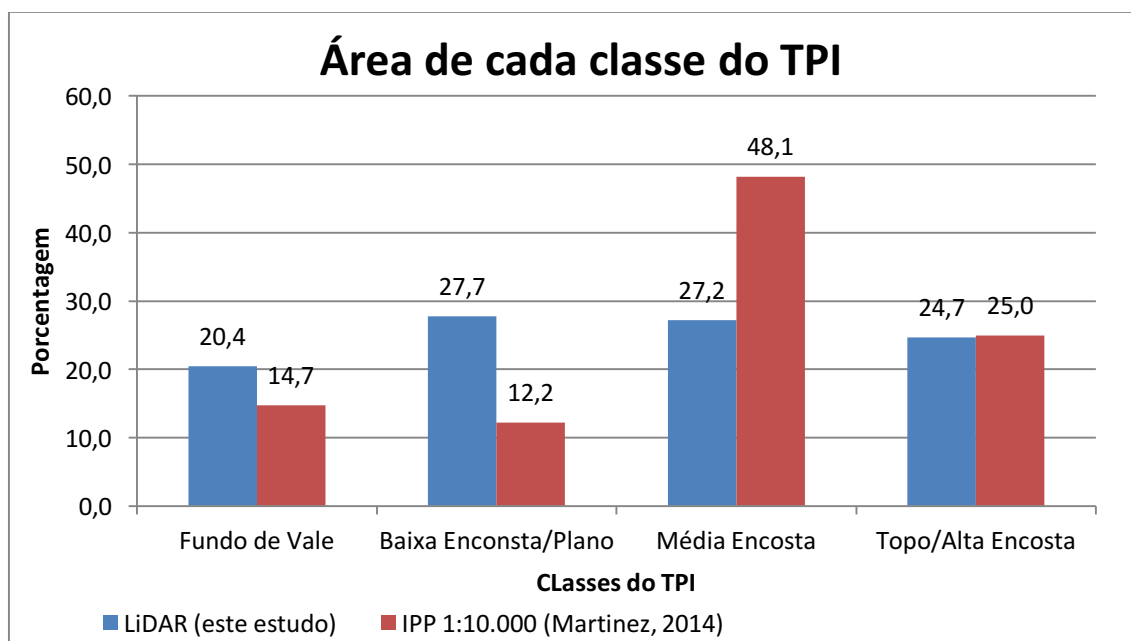


Figura 55 – Gráfico com o percentual de cada classe de TPI dos mapeamentos Lidar e Martinez (2014).

## Índice de Posicionamento Topográfico - TPI Value

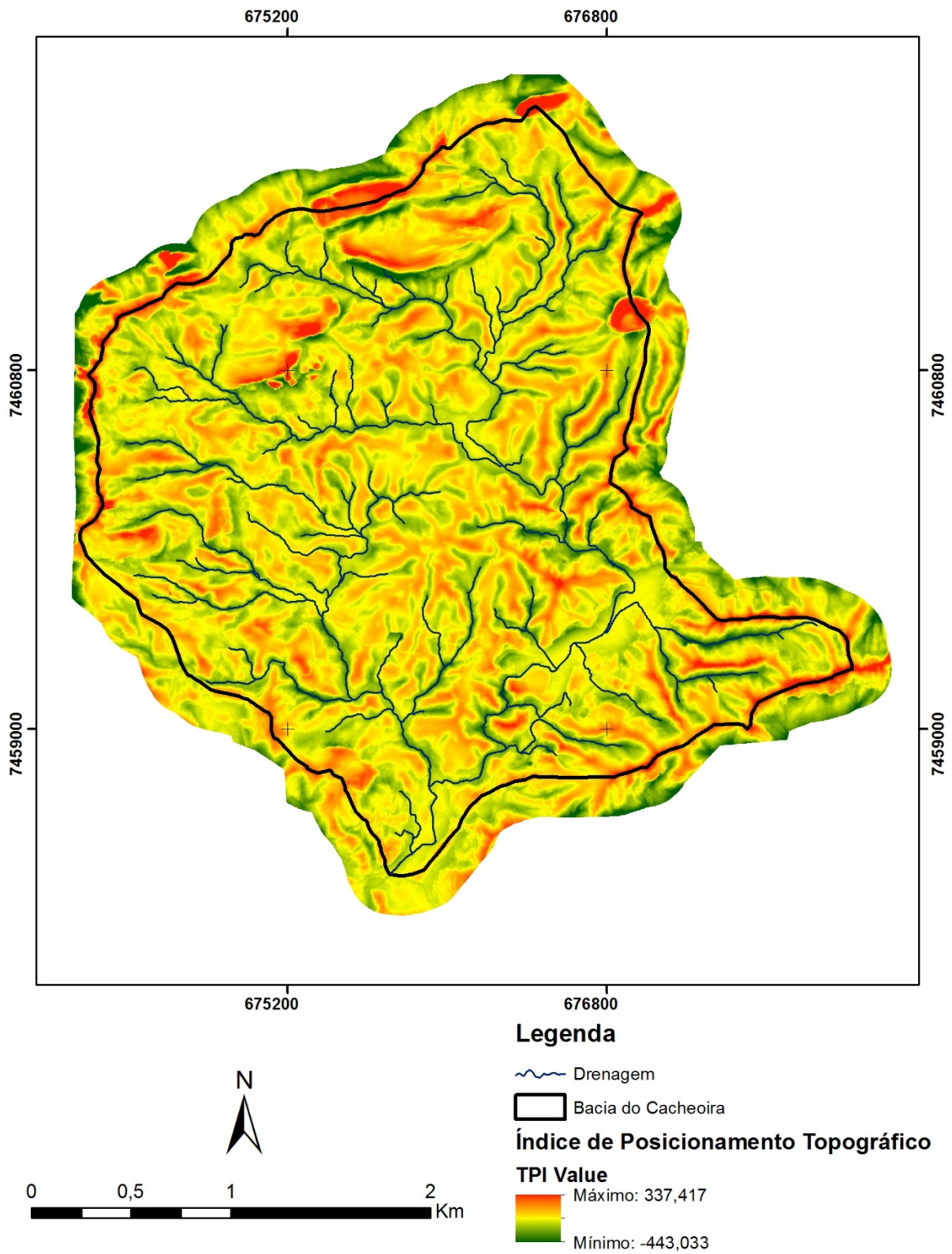


Figura 56 – Mapa com o valor de TPI (TPI Value).



O fundo de vale apresentou um aumento de 6%, podendo estar relacionado ao fato do fundo de vale mapeado por Martinez (2014) ter sido realizado através de um *buffer* da rede hidrográfica e as classes classificadas neste estudo foram realizadas através da classificação por *Quantiles*. A baixa encosta e áreas planas teve um aumento de 15% na nova classificação e a média encosta teve uma redução de cerca de 21%, devido ao mapeamento anterior ter aproximadamente a metade da área classificada como média encosta. Nas áreas de topo/alta encosta não teve diferença significativa no total classificado.

A maior diferença na classificação não está relacionada apenas à área classificada, mas sim na representação e distribuição espacial (figura 58). O TPI apresentou maior continuidade nos divisores e fundos de vale, além de apresentar maior quantidade de divisores entre canais de menor ordem e afloramentos. Segundo Reu *et al.* (2013) o relevo montanhoso acidentado traz a dificuldade de uma compartimentação mais contínua e quanto maior o raio mais áreas são classificadas como média encosta mesmo apresentando concavidades e convexidades acentuadas. Os resultados encontrados na utilização do TPI em regiões de relevo homogêneo e pouco acidentado apresenta classificação mais precisas (Weiss 2001 e Tagil & Janness 2008). Devido a isso, a classificação automática do TPI em áreas montanhosas é dificultada, apresentando classificação de média encosta e fundos de vale em divisores topográficos.

A figura 57 apresenta a relação da rede de drenagem gerada através do ArcHydro e a classe do TPI em qual ela se relaciona espacialmente. Um total de 73% do comprimento dos canais encontra-se na classe de fundo de vale, um acerto 9% maior do que o mapeamento feito através da base do IPP 1:10.000. Na classe de baixa encosta e área planas, o resultado obtido foi de 25%, mesmo essa classe sendo a que compreende a maior área (27,7%). Cabe ressaltar que na parte urbanizada no eixo da Estrada de Furnas a área tem declividade menor do que 10° e os canais são retificados, elevando a participação dessa classe frente ao fundo de vale. A média encosta apresentou apenas 2,4% do comprimento de canais gerados, resultado melhor frente ao mapeamento IPP 1:10.000. Apenas o mapeamento do IPP apresentou canais em áreas mapeadas como divisor (Topo/Alta Encosta).

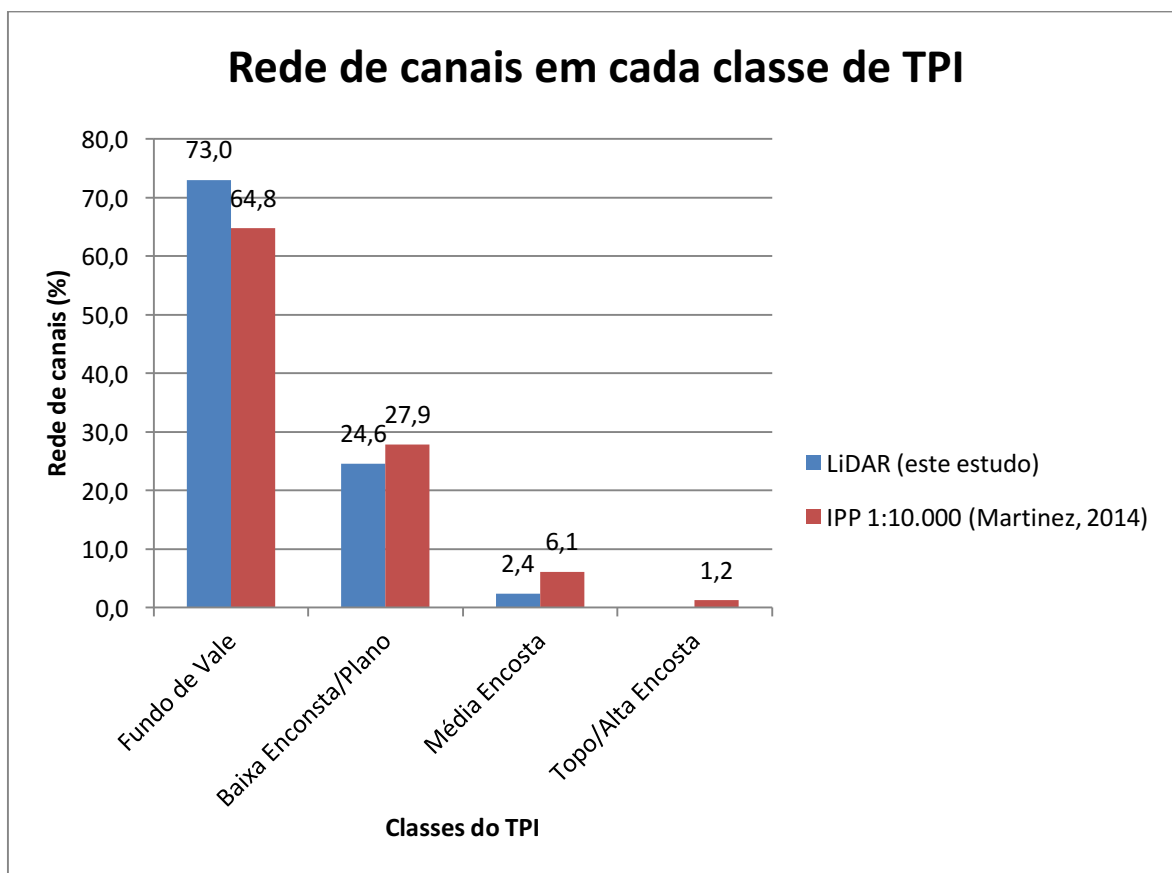


Figura 57 – Gráfico com o total de comprimento de canais inseridos em cada classe de TPI dos mapeamentos LiDAR e Martinez (2014).

Na figura 58 apresenta a comparação entre a classificação dos diferentes mapeamentos, o nível de detalhe fornecido pelo LiDAR para escala 1:10.000 torna a representação de mais divisores entre canais de pequena ordem e fundo de vales mais contínuos sem a utilização de um *buffer* da rede de drenagem. Porém, em áreas montanhosas com relevos heterogêneos e acidentados, as classes de TPI podem melhor expressar o comportamento hidrológico das encostas em bacias (COPPETEC-SEA/RJ, 2012; ELETROBRAS/COPPETEC 2012; Coelho Netto *et al* 2014; Martinez 2014):

- **Fundo de Vale:** concavidades e zonas de convergência de fluxos de água.
- **Baixa Encosta/Plano:** áreas adjacentes aos canais de drenagem, retilíneas ou planas.
- **Média Encosta:** áreas situadas entre o fundo de vale e os divisores; zona de transferência de fluxos de áreas convexas para côncavas.

- **Topo / Alta Encosta:** divisores (convexidades), áreas convexas ou retilíneas do relevo; zona de divergência de fluxos com presença de afloramentos.

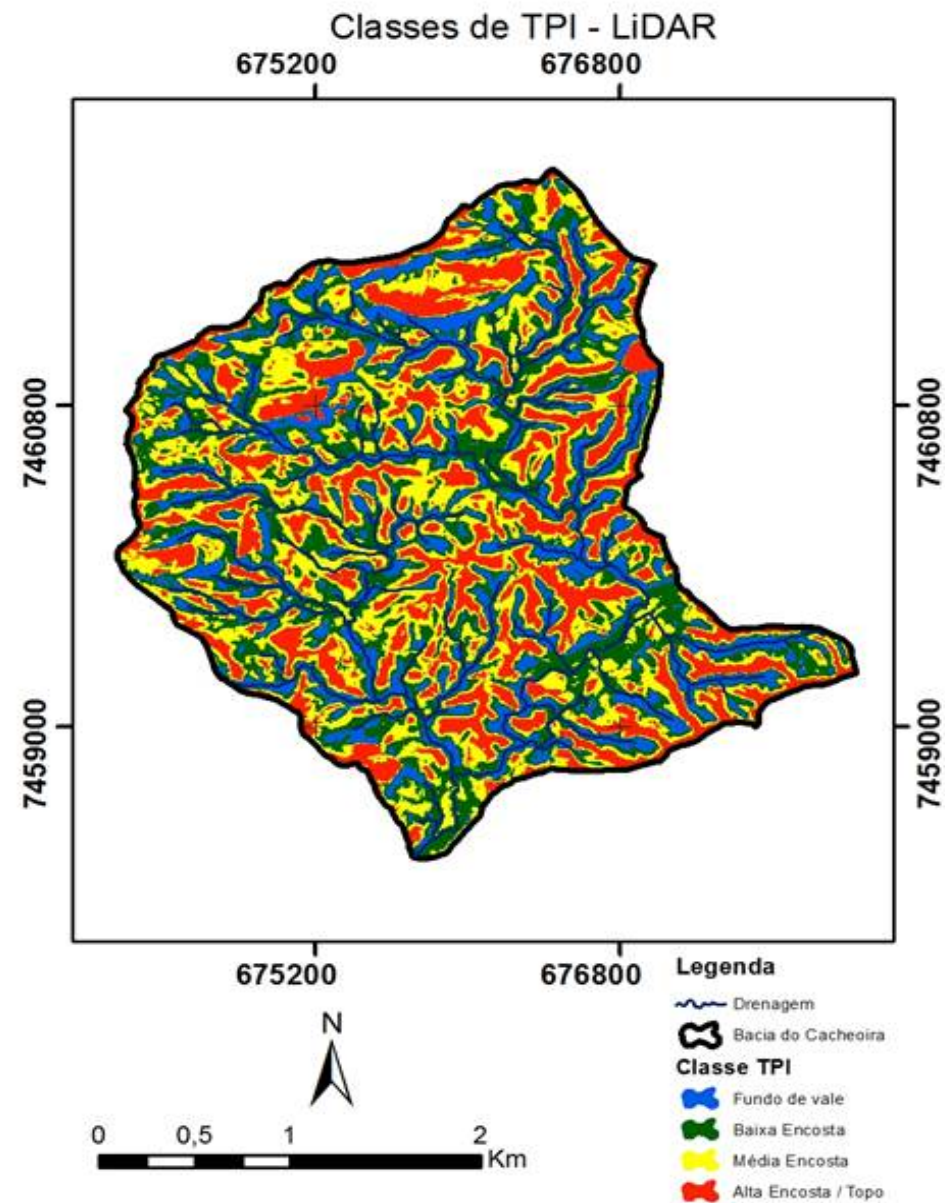
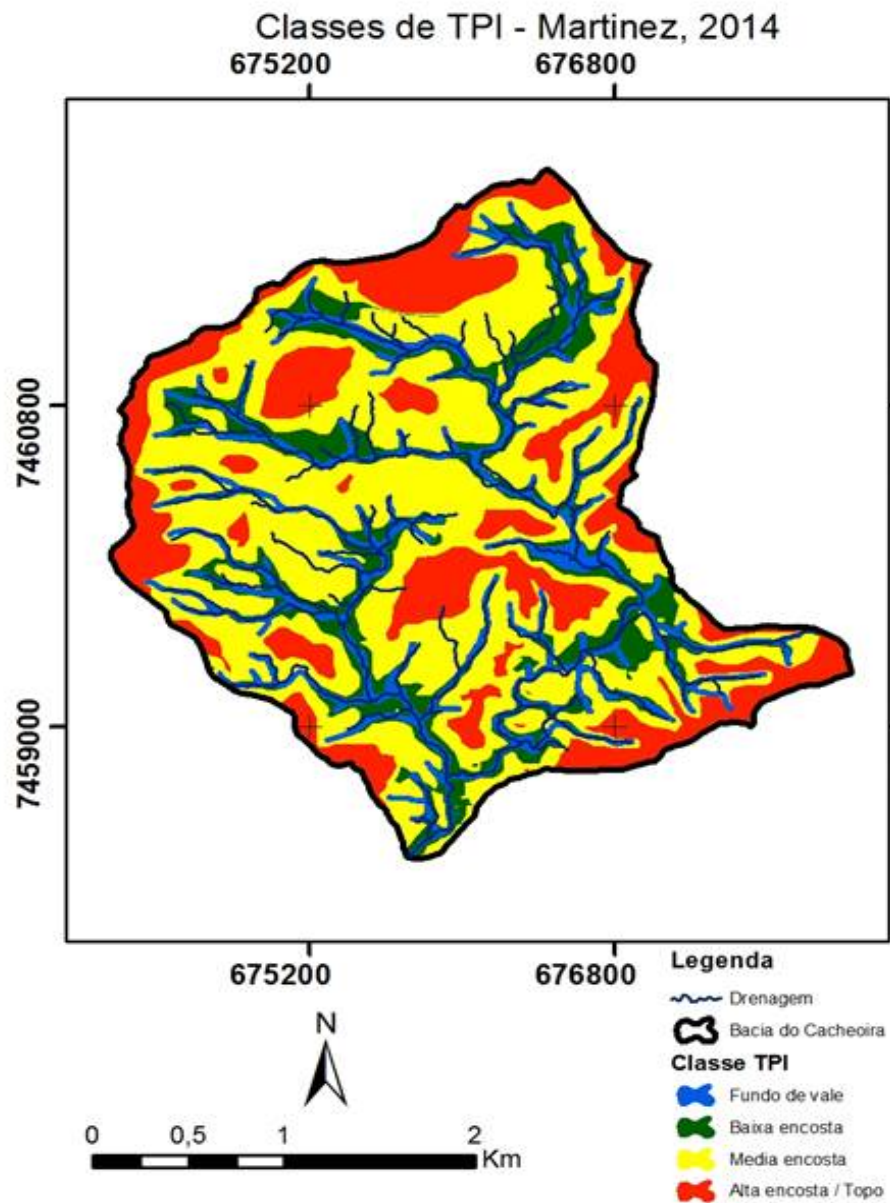


Figura 58 – Comparação dos mapeamentos de TPI do LiDAR e de Martinez (2014).

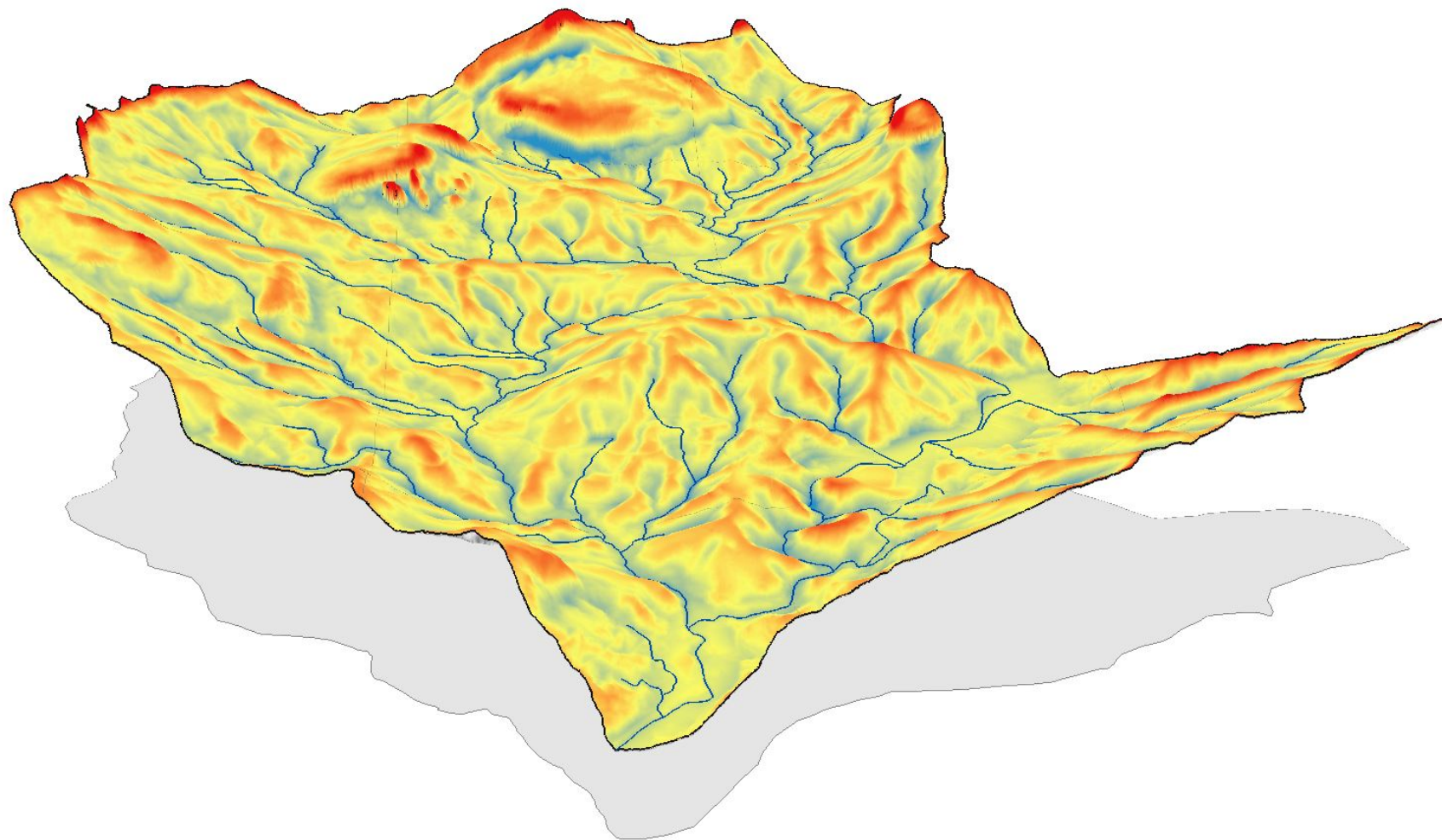


Figura 59 – Visualização 3D do valor do TPI (TPI Value)



### 6.3.4 Rede Hidrográfica

A rede hidrográfica produzida através da extensão ArcHydro 10.1 a partir do MDT tem como resultado a direção do fluxo (como visto no item 5.5) em formato *raster* com o valor da célula indicando à qual direção o fluxo superficial é encaminhado da célula de maior altimetria à adjacente de menor altimetria. Segundo Araujo (2013) a qualidade do mapa de direção de fluxos depende diretamente da qualidade do MDT, devido a isso, o MDT proveniente do levantamento LiDAR, pode possibilitar uma melhoria do mapeamento. As direções de fluxos são classificados quanto a direção como: Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste, Noroeste, Norte e Nordeste, e está representada na figura 60.

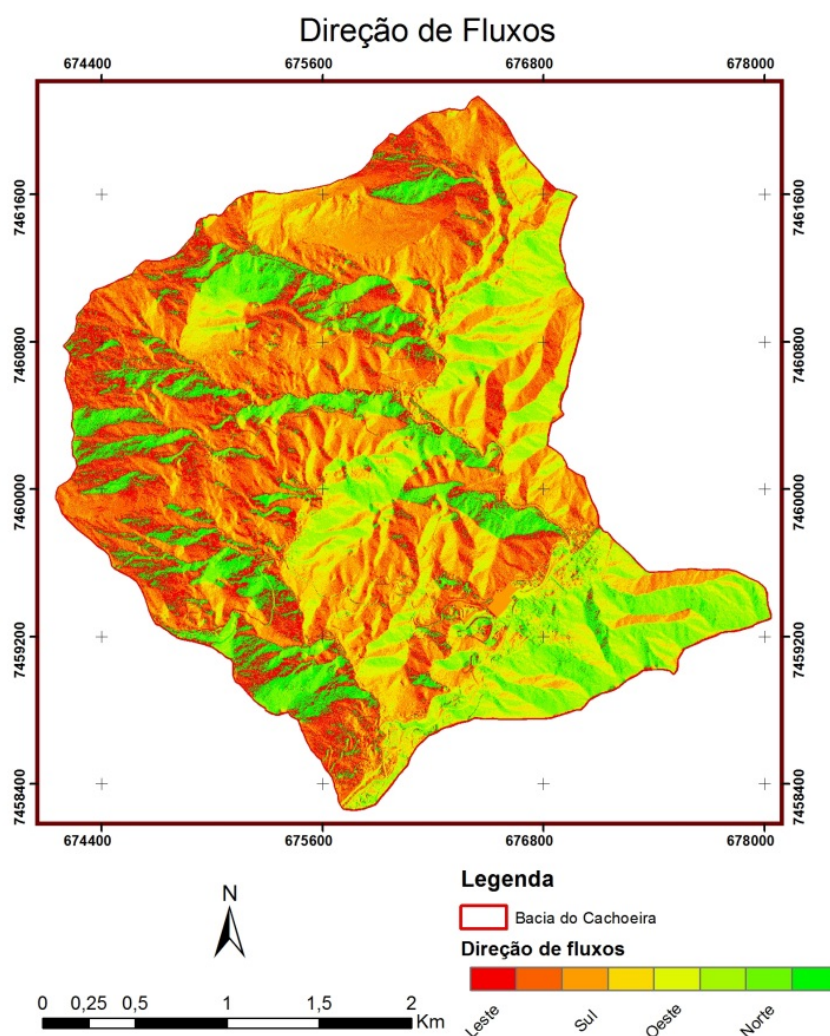


Figura 60 – Mapa da direção de fluxo no MDT 1:10.000

Após a elaboração do mapa de direção de fluxos, foi gerado o mapa de acumulação de fluxos com o resultado expresso em outra imagem *raster*. A partir da direção de fluxo, cada célula do grid contém o valor da soma de células à montante direcionadas e acumuladas. A figura 61 apresenta o resultado do acúmulo de fluxo que apresentou o maior valor de acúmulo na célula localizada na exutória da bacia, demonstrando que o mapeamento obteve bom resultado, além das áreas de maiores valores estarem espacialmente localizada nas áreas côncavas e fundo de vale, podendo indicar a presença de canais de drenagem e eixos de escoamento de fluxos superficiais.

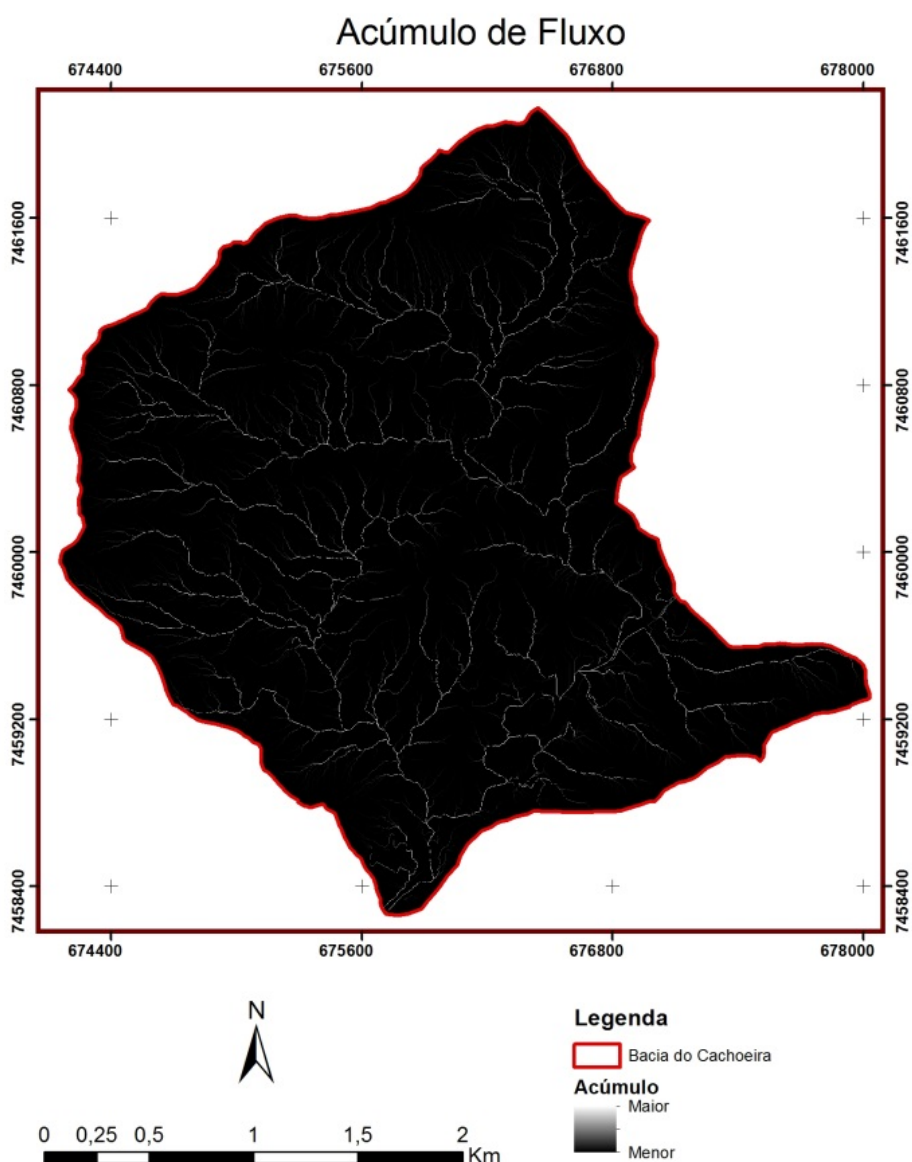


Figura 61– Mapa do acúmulo de fluxo no MDT 1:10.000

A definição das linhas da rede de drenagem (*stream definition*) é realizada com base no número de células (área de contribuição mínima) *raster* de acúmulo de fluxos para que o canal seja iniciado. O critério seguiu a proposta de Araujo (2013) utilizando 0,125% da área da bacia, tal como pode ser observado na figura 62 e demonstrou uma boa representação frente aos vales e concavidades, pois segundo Araujo (2013) uma bacia “com área semelhante e tendo a sua base cartográfica na escala 1:10.000, a utilização de 1/8 (0,125%) da área da bacia como área de contribuição para gerar um canal de drenagem mostrou-se satisfatória.”

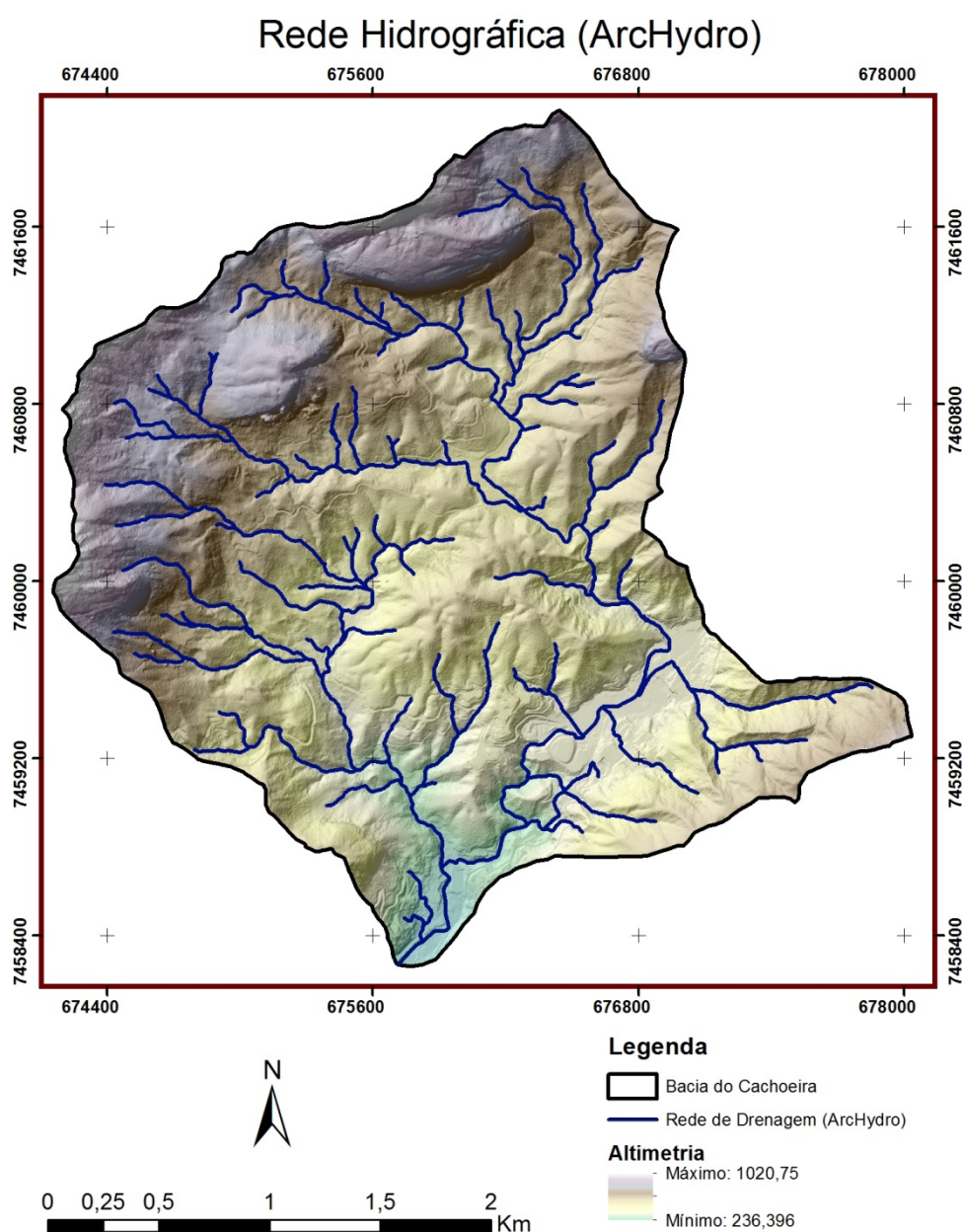


Figura 62 – Rede hidrográfica gerada automaticamente no ArcHydro 10.1.



O mapeamento da rede hidrográfica extraída de forma automática através do ArcHydro 10.1 a partir do MDT gerado, obteve um comprimento total de canais de 37,8 km e a hierarquização da bacia pelo método de Strahler (1952) configurou uma bacia de 5ª ordem, com 84 canais de primeira ordem e 46 bacias de segunda ordem.

A figura 65 (pág. 88) apresenta a representação da rede hidrográfica em detalhe. Na imagem A é possível observar a influência de afloramentos rochosos na definição de canais, ao todo cinco canais foram delimitados na base do Morro do Archer, que segundo Abreu (1992) e Coelho Netto (2009) o substrato rochoso fraturado presente no Maciço da Tijuca causa a recarga dos canais por meio do substrato rochoso, tal dinâmica (figura 63) não pode ser analisada pela abordagem do ArcHydro 10.1, demonstrando uma das principais limitações do modelo. Porém a impermeabilidade do afloramento rochoso em eventos de precipitação elevada pode gerar fluxos superficiais na base nesses afloramentos.

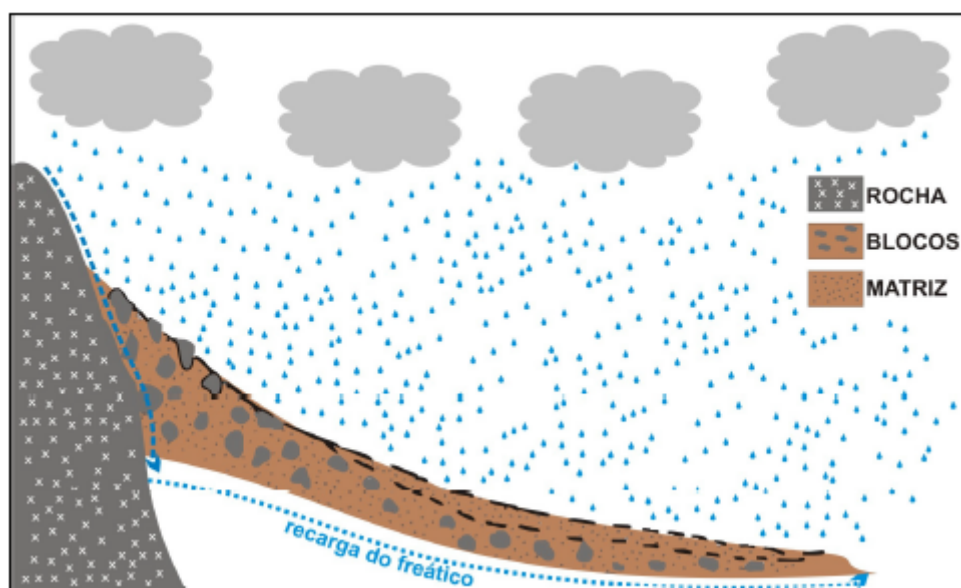


Figura 63 – Fluxo de recarga do lençol freático no Morro do Archer (Abreu 1992)

A imagem B apresenta a influência do corte de estradas na direção e acúmulo de fluxos. Tarolli *et al.* (2013) aponta a utilização de bases topográficas de alta resolução na análise e mitigação de problemas ambientais provenientes de cortes de estradas na paisagem como o risco de erosão por escoamentos superficial (figura 64). No MDT,

mesmo na escala 1:10.000, as estradas apresentaram influencia na direção dos fluxos, demonstrando o potencial em escala mais detalhadas para a análise do impacto de estradas na paisagem.

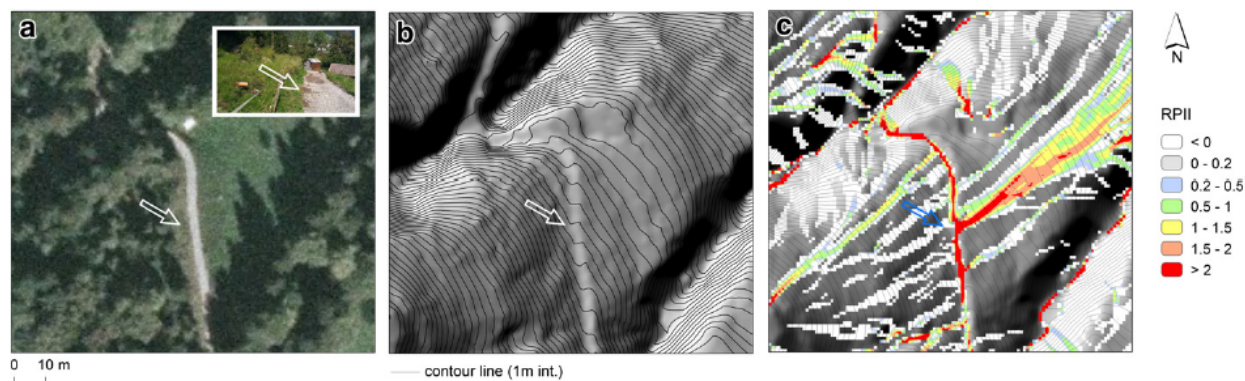


Figura 64 – (A) Evidência do fluxo superficial de água à jusante da estrada em ambiente florestal. (B) Curvas de nível com equidistância de 1m. (C) RPII (Relative Path Impact Index) Indicando em vermelhas as áreas com maior impacto das estradas. Fonte: Tarolli *et al.* (2013).

Na imagem C da figura 65, identificamos o canal principal ao passar pela área mais urbanizada da bacia, com presença de edificação, a Estrada de Furnas e a presença de retificações do canal. Essa área foi corrigida manualmente com base na estrada e nas edificações, devido ao modelo não ter um comportamento satisfatório em áreas totalmente planas ou com presença de retificações e canalizações.

A rede de canais extraída de forma automática mostra-se adequada para o comportamento do escoamento superficial, porém o modelo não leva em consideração a parcela de água infiltrada no solo e no substrato rochoso fraturado presente no maciço. Para escalas de maior detalhe, 1:2.000, e mesmo para a validação e melhoria dos resultados na escala 1:10.000, é necessário a checagem dos canais em campo e utilização de interpretação da paisagem através, por exemplo, de fotointerpretação com estereoscopia de fotografias aéreas (Lima, 2015).

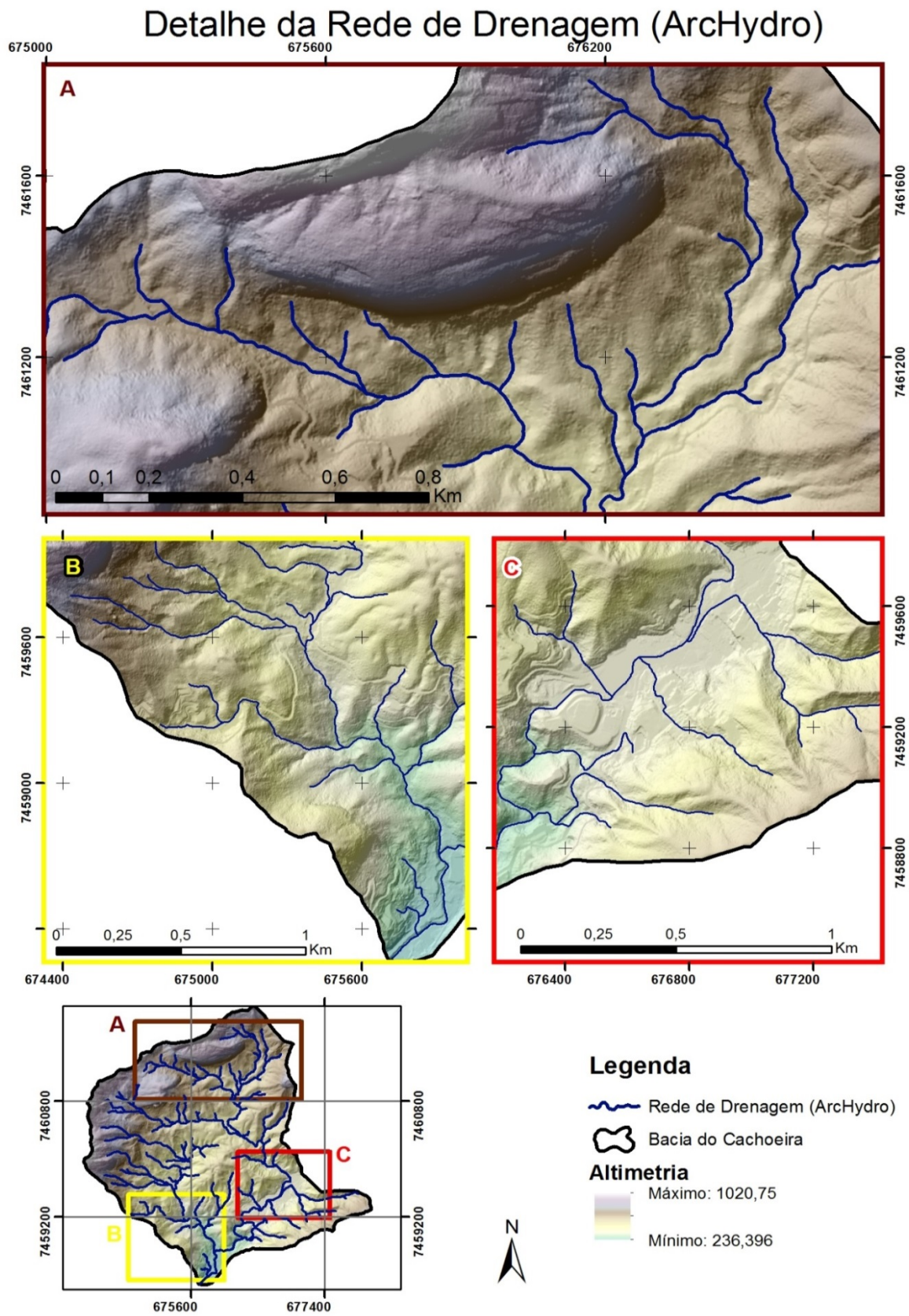


Figura 65 – Detalhe da rede hidrográfica gerada no ArcHydro 10.1. (A) Influência do Morro do Archer na gestão dos canais. (B) Resposta dos cortes de estrada no resultado da delimitação de canais. (C) Comportamento dos canais em áreas planas urbanizadas.

## 7 – Conclusões

Os resultados referentes aos arquivos .LAS, apontaram que o escaneamento a *laser* obteve grande densidade de pontos com média de mais de 11 milhões de pontos e densidade superior a 9 pts/m<sup>2</sup> como esperado para esse tipo de levantamento (Liu et al. 2007; Liu 2008; Asselen & Seijmonsbergen 2006). Devido a isso, as áreas com terreno exposto ao feixe de *laser* (afloramentos, área urbana, solo exposto, etc.) tiveram uma densidade de pontos alta, resultando na geração de um MDT de grande qualidade e detalhamento. As áreas florestadas, no entanto, devido à interferência da cobertura vegetal, mostrou resultados inferiores, onde a maior parte da área florestada teve menos de 0,5 pts/m<sup>2</sup>. Esse resultado demonstra que o levantamento LiDAR com finalidade de análise topográfica em áreas com densa vegetação florestal é prejudicado pela interferência do docel das árvores. Uma vez que a área estuda contém cerca de 90% de cobertura vegetal, e apenas 7% dos pontos foram classificados como *ground* neste domínio.

Os MDTs não demonstraram grande diferença a partir da escolha do critério de *Cell Assignment Type* para a área, por isso o método Average pode ser utilizado para a modelagem, ao utilizar o valor médio das altimetrias na célula. O estudo apenas utilizou o método de interpolação por *Natural Neighbor*, o que pode ter influenciado na diferença desprezível entre os *Cell Assignment Type*.

O MDT na escala 1:2.000 apresentou erros significativos que devem ser levados em conta para topografia de muito detalhe ,pois não atingiu a Classe C. Por isso, trabalhos nessa escala para a obtenção de parâmetros morfométricos e análise que necessitam de topografia bem ajustada podem ser prejudicados nas áreas com cobertura florestal. Apesar disso, nas áreas urbanas, o levantamento obteve boa densidade de pontos e a qualidade da topografia atende.

O MDT na escala 1:10.000 ficou com erros altimétricos próximo à classe C (85%) e EMQ na Classe A, possivelmente pelo fato da cobertura de pontos de controle ter mais pontos em áreas urbanas, a qual tem uma qualidade maior devido sua elevada densidade de pontos do scaneamento. O MDT na Classe 1:50.000 obteve PEC na Classe A e demonstrando ter alta qualidade para essa escala.

Este estudo avaliou os MDTs com a nuvem de pontos já classificada, uma das possibilidades de avanço na qualidade do MDT e extração de parâmetros morfométricos deve não apenas concentrar-se no emprego de outros interpoladores, mas também na melhoria da filtragem dos retornos do *laser* para que o MDT gerado tenha menos erros devido a pontos de vegetação e outras feições incorporados ao solo (Reutebuch et al 2003; Tang et al 2008; Wang & Glenn 2009; Polat & Uysal 2015).

A topografia gerada para a escala 1:10.000 obteve apenas 1 erro topológico, indicando a confiabilidade do mapeamento o que por vezes, a correção da topologia pode demandar tempo. A declividade apresentou um nível de detalhamento maior do que a declividade gerada através da topografia 1:10.000 do IPP. A topografia e declividade com maior detalhamento pode melhorar e avançar trabalhos como mapeamentos de suscetibilidade a movimentos de massa e geração de rede de canais (Coelho Netto *et al.* 2014, Araujo 2013).

O TPI apresentou uma boa correlação com a drenagem extraído automaticamente pelo ArcHydro 10.1, onde 73% do comprimento total dos canais estão na classe mapeada como fundo de vale e não apresentou canais em áreas de divisores. Problemas como a continuidade espacial das classes foram observadas, assim como em trabalhos anteriores de Dias (2011) e Martinez (2014), porém apresentou melhoras na identificação de divisores entre canais de primeira ordem.

O ArcHydro 10.1 apresentou comportamento esperado com base no mapeamento de Araujo (2013) e devido ao maior detalhamento do MDT observou a influência de cortes de estradas e afloramentos não observado pelo estudo anterior na mesma área, possibilitando o avanço no mapeamento de áreas grandes e de difícil acesso como o Maciço da Tijuca. É importante ressaltar que o mapeamento automático não pode ser considerado como final por não considerar fluxos subsuperficiais e subterrâneos presentes na área de estudo. As checagens em campo de canais acessíveis e em fotografias áreas com estereoscopia é fundamental para a adequação da rede de drenagem para a escala analisada, principalmente nos canais de primeira ordem (Lima 2015).

Importante ressaltar que o *software* ArcGis Desktop 10.1 demonstrou ter uma boa capacidade de tratamento e análise dos dados LiDAR no formato. LAS para a geração de MDT e parâmetros morfométricos analisados neste estudo, auxiliando os trabalhos nas áreas de pesquisa e afins que necessitam como base dados topográficos. Com o crescimento do uso e avanço dos sensores a *laser*, abre caminho para a avaliação de outros métodos e *softwares* com intenção de melhorar a qualidade do produto final.

## 7.1 Desdobramentos

A pesquisa com base na qualidade dos subprodutos extraídos do escaneamento a *laser* é de caráter inicial e avanços no tema precisão ser realizados a fim de melhoras a qualidade das bases topográficas utilizadas em pesquisas no Maciço da Tijuca:

- Levantamento mais extensivo dos valores altimetria em áreas de floresta através de trabalhos de campo com sensores DGPS de precisão para melhorar a avaliação dos mapeamentos nas escalas 1:2.000 e 1:10.000.
- Utilização de outros interpoladores para avaliar principalmente as áreas com baixa densidade de pontos levantados, como por exemplo a Krigagem e o Inverso do Quadrado da Distância (IQD) que expressão a forma do relevo de forma mais adequada (Valeriano 2008).
- Alterações na classificação do TPI como o uso do desvio padrão de elevação (DEV) proposto por Gallant & Wilson (2000) e Reu *et al* (2013) que podem apresentar melhores resultados para relevos heterogêneos e montanhosos.
- Validação da rede de drenagem com levantamentos em campo com sensor DGPS de precisão e utilização de fotografias aéreas.



## 8 – Referências Bibliográficas

- Abdul-Rahman, A.; Desa, G. (1996). Identification of developable land using TIN-based digital terrain modelling. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. XXXI, Part. B5, 7-11. Vienna, 1996.
- Akima, H.A. (1978) - A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. In: *ACM Transactions on Mathematical Software*, 4(2): 148-159.
- Albacete, A. S. J. (2011) – Procesamiento de datos LiDAR com ArcGIS Desktop 10. Dissertação de mestrado. Universidad Complutense De Madrid. Facultad de Geografía e Historia. Madrid, 111 p. 2011
- Andersen, H. E.; Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J. (2006) A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne LiDAR and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 32, n. 5, p. 355-366. 2006.
- Asselen S.; Seijmonsbergen, A. C. (2006) Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. In: *Geomorphology*. Vol. 78, Issues 3–4, 30 August 2006, Pages 309–320
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (1999). 199–214
- Câmara, G. (1996), *“Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica”*. Rio de Janeiro, p. 193, 1996, Disponível no site: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/livros/anatomia.pdf>
- Christofolletti, A (1999). *“Modelagem de Sistemas Ambientais”*. Edgard Blücher, 1999, 236p.
- Coelho Netto A. L. (1985) Surface hydrology and soil erosion in a tropical mountainous rainforest drainage basin, RJ, Phd thesis, Katholieke Univ. Leuven, Belgium, 181 p.
- Coelho Netto, A. L. (2009). Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia. In: *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*, Org.: Guerra, A. J. T.; Cunha, S.B. 9ª Edição. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2009. 474p.

- Coelho Netto, A.L. (2005) A INTERFACE FLORESTAL-URBANA E OS DESASTRES NATURAIS RELACIONADOS À ÁGUA NO MACIÇO DA TIJUCA: desafios ao planejamento urbano numa perspectiva sócio-ambiental. *Revista do Departamento de Geografia*, 16 (2005) 46-60.
- Coelho Netto, A.L.; Avelar, A.S.; Fernandes, M.C.; Lacerda, W.A. (2007): Landslide Susceptibility in a Mountainous Geocosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The Role of Morphometric Subdivision of the Terrain. *Geomorphology*. Amsterdam, 87(3): 120-131.
- Coelho Netto, A.N.; Avelar, A.S.; Sato, A.M.; Fernandes, M.C.; Oliveira, R.R.; Vinagre, R.; Barbosa, L.S.; Lima, P.H.M.; Lacerda, W.A. (2014) Landslide susceptibility and risk zoning at Agra do Reis, Rio de Janeiro State, SE Brazil: a quali-quantitative approach at 1:5.000 scale. In: Extreme rainfall induced landslides: an international perspective. Org.: Lacerda, W.A [et al.]. São Paulo, Oficina de Textos. 2014.
- COPPETEC-SEA/RJ (2012). Mapeamento (Escala 1:5 000) de Áreas de Riscos, Frente aos Deslizamentos de Encostas no Município de Angra Dos Reis, RJ. Laboratório de Geo-Hidroecologia/ UFRJ; Fundação COPPETEC; Secretaria de Estado de Ambiente – Governo do Estado do Rio de Janeiro.
- Coutinho B. H. (2015 - inédito) Indicadores Geo-Hidroecológicos de suscetibilidade das encostas frente a erosão e movimentos de massa em região montanhosa tropical úmida: suporte metodológico para zoneamentos de riscos em diferentes escalas de análise espacial. Relatório final de bolsa de Pós Doutorado. FAPERJ/UFRJ
- Cruz, C. B. M; Barros, R. S; Cardoso, P. V; Reis, R. B; Rosário, L. S; Barbosa, S. S; Rabaco, L. M. L; Lourenço, J. S. Q. Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfícies (MDS) e do terreno (MDT) obtidos do Lidar. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011



- Cobby, D. M.; Mason, D. C.; Davenport, I. J. "Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 56, no. 2, pp. 121–138, Dec. 2001.
- Dias, M. A. (2011), "*Influência da topografia na dinâmica de bordas floresta-gramínea em um relevo montanhoso – maciço da Tijuca, RJ*", 123 p. - Dissertação de mestrado – PPGG – UFRJ, 2011.
- Dubayah, R.; Knox, R.; Hofton, M.; Blair, J. B.; Drake, J. (2000) Land surface characterization using LiDAR sensing. In: Hill, M. J & Aspinall, R. J., *Spatial Information for land use management*. Amsterdam, 2000.
- ELETROBRAS/COPPETEC. (2012). Atualização do mapeamento Geológico-Geotécnico e avaliação dos elementos de estabilização das encostas da CNAAA, Angra dos Reis. Laboratório de Geo-Hidroecologia/ UFRJ; Fundação COPPETEC.
- Felgueiras, C.A (1999). "Modelagem Numérica do Terreno." In: *Introdução à Ciência da Geoinformação*, Cap. 7. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>
- Fernandes, M. C. (2004). Desenvolvimento de rotina de obtenção de observações em superfície real: uma aplicação em análises geológicas. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências – Programa de Pós-graduação em Geografia – PPGG/ UFRJ.
- Fernandes, M.C.; Laguéns, J.V.M.; Coelho Netto, A.L. O Processo de ocupação por favelas e sua relação com os eventos de deslizamentos no Maciço da Tijuca/RJ. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, Rio de Janeiro, v. 22, p. 45-59, 1999.*
- Fernandes, M.C.; Rosas, R.O.; Coelho Netto, A.L. Potencialidade de ocorrência de queimadas no maciço da tijuca/rj: uma abordagem utilizando geoprocessamento. *Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 537-548.*
- Figueiró, A.S. (2005) Mudanças ambientais na interface floresta-cidade e propagação de efeito de borda no Maciço da Tijuca – Rio de Janeiro, RJ. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geografia/UFRJ, 398p. 2005.

- Gallant, J.C., Wilson, J.P., 2000. Primary topographic attributes. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, pp. 51–85.
- Gatziolis, D.; Andersen, H. E. (2008). *A Guide to LIDAR Data Acquisition and Processing for the Forests of the Pacific Northwest*. General Technical Report PNW-GTR-768 Forest Service, United States Department of Agriculture. 2008.
- Giongo, M. ; Koehler, H. S. ; Machado, S.A. ; Kirchner, F. F. ; Marchetti, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 30, p. 231-244, 2010.
- Gonçalves-Seco, L.; Miranda, D.; Crecente, R.; Farto, J. (2006) Digital Terrain Model generation using airborne LiDAR in a forested area of Galicia, Spain. 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Edited by M. Caetano and M. Painho. 169-180
- Heritage, G.L.; Milan, D.J. (2009). Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravelbed river. *Geomorphology* 113, 4–11.
- Huang, H.; Link T.; Smith, A.; Chen, C. (2011) Accuracy of the LiDAR-derived DEM in dense shrub areas in mountainous NW US. *IEEE International Conference on Communications ICC2011*, p. 373-377. 2011
- Jenness, J.; Brost, B.; Beier, P. (2013). *Land Facet Corridor Designer*. *USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station McIntire-Stennis Cooperative Forestry Program Arizona Board of Forest Research*. 2013
- Lima, P. H. M. O índice de eficiência de drenagem como subsídio á análise espacial de áreas suscetíveis a ocorrência de movimentos de massa. *Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rio de Janeiro, 127p. 2015.*
- Liu, W. T. H (2006). *Aplicações de sensoriamento remoto*. Ed. UNIDERP, Campo Grande. Brasil. 908p. 2006

- Liu, X. (2008) Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. Progress in: Physical Geography-2008-Xiaoye Liu-31-49.
- Liu, X.; Zhang, Z.; Peterson, J.; Chandra, S. (2007) The effect of LiDAR data density on DEM accuracy. In: MODSIM07: International Congress on Modelling and Simulation: Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability, 10-13 Dec 2007, Christchurch, New Zealand.
- Maidment, D.R. (2002). "Arc Hydro: GIS for Water Resources", ESRI, p. 203, 2002.
- Martinez, M. I. (2014) - Avaliação Da Susceptibilidade De Terreno Para Deslizamentos Rasos: Maciço Da Tijuca - Rio De Janeiro. Dissertação de mestrado – PPGG – UFRJ, 127 p. 2014.
- Mongus, D.; Lukac, N.; Obrul, D.; Zalik, B. (2013). Detection of planar points for building extraction from LiDAR data based on differential morphological and attribute profiles. ISPRS Ann. Photogram. Rem. Sens. Spatial Inform. Sci. 2 (Part 3/W1), 21–26.
- Mongus, D.; Zalik, B. (2012). Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation. ISPRS J. Photogram. Rem. Sens. 67, 1–12.
- Mongus, D.; Zalik, B. (2014). Computationally efficient method for the generation of a digital terrain model from airborne LiDAR data using connected operators. IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Rem. Sens. 7 (1), 340–351.
- Moraes Novo, E. M. L. (2008) Sensirramento remoto: princípios e aplicações. São Paulo: Blucher, 363p. 2008.
- Nilson, M. (1996). Estimation of tree Heights and stand volume using airborne LiDAR system. Remote Sensing of Enviromental, v. 56, p. 1-7, 1996.
- Pacheco, A. P.; Centeno, J. A. S.; Assunção, M. G. T.; Botelho, M.F. (2011). *Classificação de pontos LIDAR para a geração do MDT*. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 17, no 3, p.417-438, jul-set, 2011.
- Packalén, P. (2009). Using airborne *laser* scanning data and digital aerial photographs to estimate growing stock by tree species. Tese de Doutorado. Faculty of Forest Sciences, University of Joensuu. 2009.

- Polat, N.; Uysal, M. (2015). Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. In: *Measurement* Vol. 63 (2015) 61–68.
- Rees, W. G. (2001). *Physical principles of remote sensing*. University Press, Cambridge. 2ª edição. 343p. 2001.
- Reu, J; Bourgeois, J; Bats, M.; Zwertvaegher, A.; Gelorini, V.; Smedt, P.; Chu, W.; Antrop, M.; Maeyer, P.; Finke, P.; Meirvenne, M; Verniers, J.; Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. In: *Geomorphology* 186 (2013) 39–49.
- Reutebuch, S. E.; McGaughey, R.J.; Andersen, H.E.; Carson W.W. (2003) Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. In: *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 29, No. 5, pp. 527–535, 2003.
- Schumann, A .H., Funke, R., Schultz, G.A (2000) ,”Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling”, *Journal of Hydrology*,240, p.45-61, 2000.
- Slatton, K.C.; Carter, W.E.; Shrestha, R.L.; Dietrich, W. (2007) Airborne Laser Swath Mapping: Achieving the resolution and accuracy required for geosurficial research. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L23S10, 2007.
- SMAC-RJ/COPPETEC. (2000). Diagnóstico/Prognóstico sobre a Qualidade Ambiental do Geocossistema do Maciço da Tijuca - subsídios à regulamentação da APARU do Alto da Boa Vista. Relatório Técnico. Laboratório de Geo-Hidroecologia/UFRJ; Fundação COPPETEC; Secretaria Municipal do Meio Ambiente; Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.
- Tagil, S., Jenness, J., 2008. GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences* 8, 910–921.
- Tang, F.F.; Liu, J.N.; Zhang, X.H.; Ruan, Z.M. (2008). Derivation of digital terrain model in forested area with airborne lidar data. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B3b. Beijing 2008.

- Tarolli, P. (2014) High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. In: *Geomorphology* Vol. 216, pp 295–312.
- Tarolli, P., Calligaro, S., Cazorzi, F., Dalla Fontana, G., (2013). Recognition of surface flow processes influenced by roads and trails in mountain areas using high-resolution topography. *Eur. J. Remote Sens.* Vol. 46, 176–197.
- Valeriano, M. de M. (2008) Dados topográficos. In: Florenzano, T. G. *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 3, p. 72-104.
- Valeriano, M. M. (2002) Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem. São José dos Campos: Inpe, 2002. Inpe-9364-RpQ/736.
- Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens.* 33 (Part B3/2), 935–942.
- Wang, C.; Glenn, N.F. Integrating LiDAR Intensity and Elevation Data for Terrain Characterization in a Forested Area. In: *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, Vol. 6, No. 3, 463-456 July 2009.
- Wang, C.K.; Tseng, Y.H. ; (2010). DEM generation from airborne LiDAR data by an adaptive dualdirectional slope filter. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spatial Inform. Sci.* 38 (Part 7B), 628–632.
- Wehr, A.; Lohr, U. (1999) Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. V 54, n. 2-3, p. 62-82, 1999.
- Weiss, A.D., (2001). Topographic position and landforms analysis. Poster Presentation, ESRI Users Conference, San Diego, CA.

## **Anexos**

**Anexo 1 - Decreto Nº89.817 de 20 de junho de 1984**

DECRETO Nº 89.817, DE 20 DE JUNHO DE 1984.

Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA , usando da atribuição que lhe confere o artigo 81, item III, da Constituição e tendo em vista o disposto no artigo 2º, nos incisos 4 e 5 do artigo 5º e no artigo 18 do Decreto-lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967,

DECRETA:

REGULADORAS DAS NORMAS TÉCNICAS DA CARTOGRAFIA NACIONAL

CAPÍTULO I

DISPOSIÇÕES INICIAIS

Art 1º - Este Decreto estabelece as normas a serem observadas por todas as entidades públicas e privadas produtoras e usuárias de serviços cartográficos, de natureza cartográfica e atividades correlatas, sob a denominação de Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

Art 2º - As Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional se destinam a estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de normas da Cartografia Nacional, bem como padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas.

Art 3º - As entidades responsáveis pelo estabelecimento de normas cartográficas, obedecidas as presentes Instruções, apresentarão suas normas à Comissão de Cartografia - COCAR para homologação e inclusão na Coletânea Brasileira de Normas Cartográficas.

Art 4º - As normas cartográficas, legalmente em vigor nesta data, serão homologadas como Normas Cartográficas, Brasileiras, após apresentação à COCAR e devido registro.

Art 5º Para efeito destas Instruções, define-se:

I - Em caráter geral:

1 - Serviço Cartográfico ou de Natureza Cartográfica - é toda operação de apresentação da superfície terrestre ou parte dela, através de imagens, cartas, plantas e outras formas de expressão afins, tais como definidas no art. 6º do DL 243/67 e seus parágrafos.

2 - Atividade Correlata - toda ação, operação ou trabalho destinado a apoiar ou implementar um serviço cartográfico ou de natureza cartográfica, tal como mencionada no parágrafo único do art.2º do Decreto-Lei nº 243/67.

II - Quanto à finalidade:

1 - Norma Cartográfica Brasileira - NCB-xx - denominação genérica atribuída a todo e qualquer documento normativo, homologado pela COCAR, integrando a Coletânea Brasileira de Normas Cartográficas

2 - Norma Técnica para Cartas Gerais - NCB - documento normativo elaborado pelos órgãos previstos nos incisos 1 e 2 do § 1º do artigo 15 do Decreto-Lei nº 243/67.

3 - Norma Técnica para Cartas Náuticas - NCB-NM - documento normativo elaborado pelo órgão competente do Ministério da Marinha, na forma do art.15 do DL 243/67.

4 - Norma Técnica para Cartas Aeronáuticas - NCB-AV - documento normativo elaborado pelo órgão competente do Ministério da Aeronáutica, na forma do art.15 do DL 243/67.

5 - Norma Técnica para Cartas Temáticas - NCB-Tx - documento normativo elaborado pelo órgão público federal interessado, conforme competência atribuída pelo art. 15 do DL 243/67.

6 - Norma Técnica para Cartas Especiais - NCB-Ex - documento normativo elaborado pelo órgão público federal interessado, conforme competência atribuída pelo art. 15 do DL 243/67.

7 - Norma Cartográfica Geral - NCB-Cx - documento normativo de caráter geral, não incluído na competência prevista no art.15 do DL 243/67, elaborado pela Comissão de Cartografia ou por integrante do Sistema Cartográfico Nacional, aprovado e homologado pela COCAR.

8 - Prática Recomendada pela COCAR - PRC-xx - especificação, procedimento ou trabalho decorrente de pesquisa, sem força de norma, porém considerado e homologado pela COCAR como útil e recomendável, contendo citação obrigatória da autoria, incluída na Coletânea Brasileira de Normas Cartográficas.

### III - Quanto à natureza:

1 - Norma Cartográfica de Padronização - documento normativo destinado ao estabelecimento de condições a serem satisfeitas, uniformizando as características físicas, geométricas e geográficas dos componentes, parâmetros e documentos cartográficos.

2 - Norma Cartográfica de Classificação - documento normativo destinado a designar, ordenar, distribuir ou subdividir conceitos ou objetos.

3 - Norma Cartográfica de Terminologia - documento normativo destinado a definir, relacionar ou conceituar termos e expressões técnicas, visando o estabelecimento de uma linguagem uniforme.

4 - Norma Cartográfica de Simbologia - documento normativo destinado a estabelecer símbolos e abreviaturas, para a representação gráfica de acidentes naturais e artificiais.

5 - Norma Cartográfica de Especificação - documento normativo destinado a estabelecer condições exigíveis para execução, aceitação ou recebimento de trabalhos cartográficos, observados os padrões de precisão exigidos.



6 - Norma Cartográfica de Procedimento - documento normativo destinado a estabelecer condições:

- a) para execução de projetos, serviços e cálculos;
- b) para emprego de instrumental, material e produtos decorrentes;
- c) para elaboração de documentos cartográficos;
- d) para segurança no uso de instrumental, instalações e execução, de projetos e serviços.

7 - Norma Cartográfica de Método de Ensaio ou Teste - documento normativo destinado a prescrever a maneira de verificar ou determinar características, condições ou requisitos exigidos de:

- a) material ou produto, segundo sua especificação;
- b) serviço cartográfico, obra, instalação, segundo o respectivo projeto;
- c) método ou área de teste ou padronização, segundo suas finalidades e especificações.

8 - Norma Geral - é a que, por sua natureza, abrange mais de um dos tipos anteriores.

Art 6º As Normas Cartográficas que não se enquadrem nas disposições do art.15 do DL 243/67, serão estabelecidas pela Comissão de Cartografia - COCAR, por proposta apresentada em Plenário ou através da Secretaria-Executiva da COCAR.

Art 7º - As cartas em escalas superiores a 1/25.000 terão articulação, formato e sistema de projeção regulados por norma própria, nos termos do art.15 do DL 243/67.

Único - Tratando-se de grandes áreas ou extensas regiões, as cartas de que trata o presente artigo terão tratamento sistemático, observadas as normas a respeito.

## CAPÍTULO II

### ESPECIFICAÇÕES GERAIS

#### SEÇÃO I

Classificação de uma Carta quanto à Exatidão.

Art 8º - As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - - PEC, seguinte o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico - estabelecido.

2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido.

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

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

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

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

## SEÇÃO II

### Classes de Cartas

Art 9º - As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

#### a - Classe A

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

#### b - Classe B

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala, da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

#### c - Classe C

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Art 10 - É obrigatória a indicação da Classe no rodapé da folha, ficando o produtor responsável pela fidelidade da classificação.

§ Único - Os documentos cartográficos, não enquadrados nas classes especificadas no artigo anterior, devem conter no rodapé da folha a indicação obrigatória do Erro-Padrão verificado no processo de elaboração.

Art 11 - Nenhuma folha de carta será produzida a partir da ampliação de qualquer documento cartográfico.

§ 1º - Excepcionalmente, quando isso se tornar absolutamente necessário, tal fato deverá constar explicitamente em cláusula contratual no termo de compromisso;

§ 2º - Uma carta nas condições deste artigo será sempre classificada com exatidão inferior à do original, devendo constar obrigatoriamente no rodapé a indicação: "Carta ampliada, a partir de ( ... documento cartográfico ) em escala (... tal)".

§ 3º - Não terá validade legal para fins de regularização fundiária ou de propriedade imóvel, a carta de que trata o " *caput* " do presente artigo.

### CAPÍTULO III

#### ELEMENTOS OBRIGATÓRIOS DE UMA CARTA

Art 12 - A folha de uma carta deve ser identificada pelo Índice de Nomenclatura e número do mapa-índice da série respectiva, bem como por um título correspondente ao topônimo representativo do acidente geográfico mais importante da área.

Art 13 - Cada carta deve apresentar, no rodapé ou campos marginais, uma legenda com símbolos e convenções cartográficas, de acordo com a norma respectiva.

§ Único - O rodapé e campos marginais devem conter as informações prescritas nas normas relativas à carta em questão, apresentando, no mínimo, os elementos prescritos nestas Instruções.

Art 14 - A escala numérica, bem como a escala gráfica da carta, devem ser apresentadas sempre, acompanhadas de indicação da equidistância entre as curvas-de-nível e escala de declividade, de acordo com a norma respectiva.

Art 15 - Os referenciais planimétrico e altimétrico do sistema de projeção utilizado devem ser citados, bem como as suas constantes, a convergência meridiana, a declinação magnética para o ano de edição e sua variação anual, de acordo com a norma respectiva.

Art 16 - O relevo deve ser apresentado por curvas-de-nível, ou hachuras, ou pontos-cotados, ou em curvas-de-nível com pontos-cotados, segundo as normas relativas à carta em questão, admitindo-se, quando for o caso, o relevo sombreado como elemento subsidiário.

Art 17- A quadriculação quilométrica ou sexagesimal, ou ambas, devem ser usadas, com apresentação das coordenadas geodésicas dos quatro cantos da folha, de acordo com a norma respectiva.

Art 18 - O esquema de articulação das folhas adjacentes, bem como um diagrama da situação da folha no Estado, na região ou no país, devem ser usados conforme a escala e de acordo com a norma respectiva.

Art 19 - É obrigatória a citação do ano de edição, bem como das datas de tomada de fotografias, trabalhos de campo e restituição, ou compilação, citando-se os órgãos executores das diversas fases.

§ Único - Nas cartas produzidas por compilação é obrigatória a citação da fonte e do órgão produtor dos documentos de natureza cartográfica, utilizados em sua elaboração.

Art 20 - Nas unidades de medida, deve ser adotado o Sistema Internacional de Unidades - SI, nos termos da Legislação Metrológica Brasileira.

§ Único - Em casos especiais e para atender compromissos internacionais, admite-se o uso de unidades de medida estrangeiras, devendo constar, neste caso, a unidade usada, em lugar bem visível e destacado na carta.

#### CAPÍTULO IV

##### DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO

~~Art 21 - Os referenciais planimétrico e altimétrico para a Cartografia Brasileira são aqueles que definem o Sistema Geodésico Brasileiro, conforme estabelecido nas "Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos - IBGE - 1983".~~

~~§ 1º - Segundo aquelas normas, o referencial planimétrico coincide com o Sistema Geodésico Sulamericano de 1969 (SAD-69).~~

~~§ 2º - O referencial altimétrico coincide com o nível médio do mar na baía de Imbituba, no Litoral de Santa Catarina.~~

Art. 21. Os referenciais planimétrico e altimétrico para a Cartografia Brasileira são aqueles que definem o Sistema Geodésico Brasileiro - SGB, conforme estabelecido pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, em suas especificações e normas. (Redação dada pelo Decreto nº 5.334, de 2005)

~~Art 22 - A título precário, admite-se documentação cartográfica à base do antigo Sistema Geodésico Córrego Alegre. (Revogado pelo Decreto nº 5.334, de 2005)~~

#### CAPÍTULO V

##### ESPECIFICAÇÕES GERAIS DAS NORMAS CARTOGRÁFICAS BRASILEIRAS

Art 23 - As entidades responsáveis pelo estabelecimento de normas cartográficas obedecerão, em sua apresentação, prescrito nestas Instruções Reguladoras.

§ Único - As entidades que, em virtude de acordo internacional ou norma interna específica, devam usar forma e estímulos próprios, poderão fazê-lo, obedecida a conceituação prevista nessas Instruções.

Art 24 - Uma Norma Cartográfica Brasileira será constituída de identificação, elementos preliminares, texto e informações complementares.

Art 25 - A identificação deve abranger: título e tipo, conforme definido no art.5º; identificação da instituição que elabora a norma; ano de publicação, classificação e numeração.

Art 26 - O título deve ser tão conciso quanto o permitam a clareza e distinção, observadas as diretrizes da Comissão de Cartografia - COCAR, estabelecidas através de Resolução.

Art 27 - O texto deve conter as prescrições da norma, apresentando-se subdividido em capítulos, seções e eventualmente alíneas e sub-alíneas, e incluindo, quando necessário, figuras, tabelas, notas e anexos.

§ Único - A Comissão de Cartografia - COCAR regulará, através de Resolução, a estrutura do texto das Normas Cartográficas Brasileiras, bem com sua capitulação e apresentação gráfica.

Art 28 - A redação de normas tem estilo próprio, linguisticamente correto, sem preocupações literárias e tanto quanto possível uniforme. A qualidade essencial é a clareza do texto, para evitar interpretações ambíguas.

Art 29 - As unidades e a grafia de números e símbolos a serem utilizadas nas normas serão as previstas na Legislação Metrológica Brasileira.

§ Único - As normas que, em virtude de acordo internacional, devam usar unidades estranhas à Legislação Metrológica Brasileira deverão fazê-las acompanhar, entre parênteses, das unidades legais brasileiras equivalentes.

## CAPÍTULO VI

### DISPOSIÇÕES FINAIS

Art 30 - O Sistema Cartográfico Nacional deverá adaptar-se, no prazo de um ano, aos padrões estabelecidos neste Decreto.

Art 31 - No prazo de um ano, a contar da publicação do presente Decreto, as entidades responsáveis pela elaboração de normas cartográficas deverão remetê-las à Comissão de Cartografia (COCAR).

Parágrafo único - O prazo de que trata este artigo poderá ser prorrogado, mediante resolução da COCAR, para atender pedido fundamentado de entidade interessada.

Art 32 - Este Decreto entra em vigor na data de sua publicação, revogadas as disposições em contrário.

Brasília, 20 de junho de 1984; 163º da Independência e 96ºda República.

JOÃO FIGUEIREDO

*Delfim Netto*



Table with 28 columns and approximately 1000 rows of numerical data. Each row contains a sequence of values, likely representing a time series or a set of related measurements across different categories. The values range from approximately -3.652 to 3.652.

Table with 20 columns of numerical data, ranging from approximately -0.729 to 0.111. The data is organized in a grid format with 20 columns and approximately 100 rows. Each row contains 20 numerical values, likely representing a time series or a set of related metrics for each column index.













936.31	932.141	4.167	932.136	4.172	932.143	4.165	932.147	4.161	931.868	4.440	931.265	5.043	931.894	4.414	932.143	4.165	929.318	6.990	926.469	9.839	929.381	6.927	930.118	6.190
936.31	930.406	5.902	930.405	5.903	930.405	5.903	930.405	5.903	930.315	5.993	930.305	6.003	930.315	5.993	930.308	6.000	929.204	7.104	921.664	14.644	929.221	7.087	928.396	7.912
945.55	951.586	-6.038	951.579	-6.031	951.587	-6.039	951.588	-6.040	951.302	-5.754	951.172	-5.624	951.272	-5.724	951.257	-5.709	949.297	-3.749	945.956	-0.408	948.585	-3.037	947.592	-2.044
955.91	956.875	-0.967	956.868	-0.960	956.876	-0.968	956.881	-0.973	956.826	-0.918	956.709	-0.801	956.855	-0.947	956.866	-0.958	955.708	0.200	949.459	6.449	955.615	0.293	955.240	0.668
963.18	963.350	-0.172	963.310	-0.132	963.359	-0.181	963.389	-0.211	963.744	-0.566	962.932	0.246	963.764	-0.586	963.717	-0.539	960.473	2.705	957.608	5.570	959.491	3.687	958.408	4.770
970.21	973.018	-2.808	972.979	-2.768	973.010	-2.800	972.979	-2.769	973.338	-3.128	973.257	-3.047	973.346	-3.136	973.408	-3.198	973.369	-3.159	971.544	-1.334	973.375	-3.165	973.279	-3.069
970.50	970.760	-0.260	970.754	-0.254	970.759	-0.259	970.754	-0.254	970.460	0.040	969.999	0.501	970.460	0.040	970.921	-0.421	970.176	0.324	967.335	3.165	970.379	0.121	971.091	-0.591
972.73	969.279	3.449	969.258	3.470	969.286	3.442	969.301	3.427	969.277	3.451	969.131	3.597	969.271	3.457	969.265	3.463	969.391	3.338	968.498	4.230	969.456	3.272	969.575	3.153
974.20	969.407	4.793	969.407	4.793	969.407	4.793	969.407	4.793	969.343	4.857	969.246	4.954	969.337	4.863	969.339	4.861	969.391	4.810	968.498	5.702	969.456	4.744	969.575	4.625
975.81	965.373	10.435	965.373	10.435	965.373	10.435	965.374	10.434	963.312	12.496	963.053	12.755	963.344	12.464	963.357	12.451	963.594	12.214	958.331	17.477	963.475	12.333	964.114	11.694
975.87	968.804	7.064	968.802	7.066	968.805	7.063	968.807	7.061	968.687	7.181	968.630	7.238	968.686	7.182	968.700	7.168	967.982	7.886	964.459	11.409	968.136	7.732	968.291	7.577
983.07	980.883	2.185	980.886	2.182	980.883	2.185	980.883	2.185	980.925	2.143	980.918	2.150	980.925	2.143	980.925	2.143	974.881	8.187	972.959	10.109	975.717	7.351	979.676	3.392
987.35	987.593	-0.245	987.583	-0.235	987.594	-0.246	987.598	-0.250	987.547	-0.199	987.276	0.072	987.566	-0.218	987.752	-0.404	981.885	5.463	964.488	22.860	981.531	5.817	980.164	7.184
990.73	990.982	-0.254	990.982	-0.254	990.982	-0.254	990.982	-0.254	990.863	-0.135	990.478	0.250	990.916	-0.188	990.978	-0.250	984.504	6.224	966.364	24.364	985.385	5.343	986.927	3.801
1021.18	1021.07	0.11	1021.07	0.11	1021.07	0.11	1021.07	0.11	1021.04	0.14	1020.84	0.34	1021.06	0.12	1021.09	0.09	1020.31	0.87	1019.50	1.68	1020.37	0.81	1020.57	0.61