

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE DADOS ALTIMÉTRICOS  
PARA MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES E  
ALAGAMENTOS NO DISTRITO FEDERAL (DF)**

**VICTÓRIA GOMES DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSC.**

**COORIENTADOR: ELEUDO ESTEVES DE ARAUJO SILVA JUNIOR,  
DSC.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: ISBN 978-90-833476-2-2**

**BRASÍLIA, DF: MARÇO – 2024**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE DADOS ALTIMÉTRICOS PARA  
MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS NO  
DISTRITO FEDERAL (DF)**

**VICTÓRIA GOMES DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOTECNICA.

APROVADO POR:

---

PROF. NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSC. (UNB) (ORIENTADOR)

---

PROF. ELEUDO ESTEVES JUNIOR, DSC. (UNB) (COORIENTADOR)

---

RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSC. (UNB)  
(EXAMINADOR INTERNO)

---

JUAN ANTONIO ALTAMIRANO FLORES, DSC. (UFSC)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

**DATA: BRASÍLIA/DF, 28 DE MARÇO DE 2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, VICTÓRIA GOMES DE

Avaliação comparativa entre dados altimétricos para mapeamento de suscetibilidade a inundações e alagamentos no Distrito Federal (DF) 2024.

xx, 154 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2024)

- |                     |   |
|---------------------|---|
| 1. Geoprocessamento | 3. Suscetibilidade a inundações e alagamentos |
| 2. Relevo           | 4. Uso e ocupação do solo                     |
| I. ENC/FT/UnB       | II. Mestre                                    |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, V. G. (2024) Avaliação comparativa entre dados altimétricos para mapeamento de suscetibilidade a inundações e alagamentos no Distrito Federal (DF), Publicação ISBN 978-90-833476-2-2/2023, departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Victória Gomes de Oliveira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação comparativa entre dados altimétricos para mapeamento de suscetibilidade a inundações e alagamentos no Distrito Federal (DF)

GRAU / ANO: Mestre / 2024

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Victória Gomes de Oliveira

Av. das Araucárias, 4150, Águas Claras, Brasília – DF. CEP: 71936-250

## DEDICATÓRIA

*À minha família*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Cláudia e Lucio agradeço por todos os ensinamentos sobre o valor do esforço, do trabalho e do estudo.

Ao meu companheiro Matheus por todo seu apoio e compreensão durante a minha jornada de estudos.

Agradeço aos docentes e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pela transferência de conhecimento, estrutura e oportunidade de realização desta pesquisa.

Agradeço aos colegas discentes por dividirem seus conhecimentos e esforços comigo e transformarem a experiência de fazer uma pós-graduação em sentimento de acolhimento.

Agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Em suma, expresso minha sincera gratidão àqueles que, mesmo não sendo mencionados explicitamente aqui, têm meu reconhecimento eterno por terem de alguma maneira colaborado com este trabalho.

Muito obrigada!

## RESUMO

No Brasil, inundações e alagamentos têm causado impactos significativos na sociedade, incluindo perdas de vidas, danos ao meio ambiente e prejuízos econômicos. No Distrito Federal, áreas urbanas foram estabelecidas em áreas de declividade suave a ondulada, o que, combinado com chuvas intensas e características de urbanização desordenada, tem resultado em desastres nas áreas urbanas. Nesse contexto, os estudos geotécnicos e a cartografia desempenham um papel crucial na tomada de decisões no planejamento territorial. Em relação aos mapas de suscetibilidade hidrológica, tradicionalmente gerados por modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, esses enfrentam desafios relacionados à falta de dados hidrológicos robustos e a necessidade de múltiplos conjuntos de dados, que podem não estar disponíveis ou ter baixa precisão. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi aplicar metodologias baseadas na análise de suscetibilidade hidrológica obtida com cruzamento de produtos de Modelos Digitais de Elevação de 5 metros e 1 metros: Declividade, Modelo HAND e Formas de Vertente para inundação e Declividade, Formas de Vertente e Uso e Cobertura do Solo para alagamento. As áreas de interesse foram escolhidas a partir de microbacias localizadas em compartimentos morfopedológicos com dados de alta precisão. A metodologia empregada baseou-se na aplicação da Álgebra de Mapas, atribuindo valores aos fatores e suas classes correspondentes. A classificação resultou em categorias de Altíssima Suscetibilidade, Alta Suscetibilidade, Média Suscetibilidade, Baixa Suscetibilidade e Baixíssima Suscetibilidade para as microbacias urbanas com variações percentuais de acordo com a exatidão cartográfica. Os resultados mostram que as microbacias selecionadas possuem baixa a muito baixa suscetibilidade à inundação com características hidrográficas de ocorrência de córregos e nascentes. As microbacias possuem mais propensão para ocorrência de alagamentos por possuírem grandes áreas urbanizadas e de declividade suave. As variações de escala de precisão apresentaram resultados finais similares, ainda que ocorram diferenças percentuais na análise.

## ABSTRACT

In Brazil, floods and inundations cause significant impacts in urban areas, including loss of lives, environmental damage, and economic losses. In Distrito Federal, urban areas have been established in gently to moderately sloping areas, which, combined with intense rainfall and the characteristics of uncontrolled urbanization, result in disasters in this areas. In this context, geotechnical studies and cartography play a crucial role in decision-making for territorial planning. In relation to hydrological susceptibility maps, traditionally generated by hydrological and hydrodynamic models, face challenges related to the lack of robust hydrological data and the need for multiple data sets, which may not be available or have low precision. This study's objective was to apply methodologies based on hydrological susceptibility analysis obtained by crossing products from Digital Elevation Models of 5 meters and 1 meters: Slope, HAND Model and Slope Forms for inundation and Slope, and Slope Forms and Land Use and Coverage for flooding. The areas of interest were chosen from microbasins located in morphopedological compartments with high precision data. The methodology used was based on the application of Map Algebra, assigning values to factors and their corresponding classes. The classification resulted in categories of Very High Susceptibility, High Susceptibility, Medium Susceptibility, Low Susceptibility and Very Low Susceptibility for urban watersheds with percentage variations according to cartographic accuracy. The results show that the selected microbasins have low to very low susceptibility to flooding with hydrographic characteristics of the occurrence of streams and springs. Microbasins are more prone to flooding because they have large urbanized areas and gentle slopes. The precision scale variations presented similar final results, although there were percentage differences in the analysis.

# ÍNDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....                                     | 21 |
| 1.1   | JUSTIFICATIVA .....                                 | 22 |
| 1.2   | OBJETIVOS .....                                     | 23 |
| 1.2.1 | OBJETIVO GERAL.....                                 | 23 |
| 1.2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                         | 23 |
| 1.3   | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....                       | 24 |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                         | 25 |
| 2.1   | CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA .....                        | 25 |
| 2.2   | GEOTECNOLOGIAS .....                                | 27 |
| 2.2.1 | GEOPROCESSAMENTO .....                              | 27 |
| 2.2.2 | SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG).....      | 28 |
| 2.3   | CARTOGRAFIA PARA ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE.....    | 29 |
| 2.4   | EVENTOS HIDROLÓGICOS .....                          | 30 |
| 2.5   | SUSCETIBILIDADE HIDROLÓGICA.....                    | 32 |
| 2.6   | MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE HAND ..... | 32 |
| 3     | MATERIAIS E MÉTODOS.....                            | 34 |
| 3.1   | DADOS CARTOGRÁFICOS .....                           | 34 |
| 3.2   | PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS .....           | 34 |
| 3.3   | COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOPEDOLÓGICA .....           | 40 |
| 3.4   | MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO .....                    | 41 |
| 3.5   | HIPSOMETRIA.....                                    | 41 |
| 3.6   | DECLIVIDADE .....                                   | 42 |
| 3.7   | CURVATURA DO TERRENO .....                          | 42 |
| 3.8   | MODELO HAND.....                                    | 44 |
| 3.9   | SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO .....                   | 47 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.10  | SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO.....                        | 48 |
| 4     | CARTAS BÁSICAS E CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO ..... | 50 |
| 4.1   | ÁREA 1 – MICROBACIA MP I.....                             | 50 |
| 4.1.1 | HIPSOMETRIA .....   | 50 |
| 4.1.2 | DECLIVIDADE .....   | 52 |
| 4.1.3 | FORMAS DE VERTENTE.....                                   | 54 |
| 4.1.4 | MODELO HAND .....   | 57 |
| 4.1.5 | USO E COBERTURA DO SOLO .....                             | 59 |
| 4.1.6 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO.....                | 61 |
| 4.1.7 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO.....              | 63 |
| 4.2   | ÁREA 2 – MICROBACIA MP II.....                            | 66 |
| 4.2.1 | HIPSOMETRIA .....   | 66 |
| 4.2.2 | DECLIVIDADE .....   | 68 |
| 4.2.3 | FORMAS DE VERTENTE.....                                   | 70 |
| 4.2.4 | MODELO HAND .....   | 73 |
| 4.2.5 | USO E COBERTURA DO SOLO .....                             | 75 |
| 4.2.6 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO.....                | 76 |
| 4.2.7 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO.....              | 79 |
| 4.3   | ÁREA 3 – MICROBACIA MP III-IV.....                        | 81 |
| 4.3.1 | HIPSOMETRIA .....   | 81 |
| 4.3.2 | DECLIVIDADE .....   | 84 |
| 4.3.3 | FORMAS DE VERTENTE.....                                   | 86 |
| 4.3.4 | MODELO HAND .....   | 89 |
| 4.3.5 | USO E COBERTURA DO SOLO .....                             | 91 |
| 4.3.6 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO.....                | 93 |
| 4.3.7 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO.....              | 95 |
| 4.4   | ÁREA 4 – MICROBACIA MP IV .....                           | 97 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.4.1 | HIPSOMETRIA .....                            | 97  |
| 4.4.2 | DECLIVIDADE .....                            | 100 |
| 4.4.3 | FORMAS DE VERTENTE.....                      | 102 |
| 4.4.4 | MODELO HAND .....                            | 105 |
| 4.4.5 | USO E COBERTURA DO SOLO .....                | 107 |
| 4.4.6 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO.....   | 109 |
| 4.4.7 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO..... | 111 |
| 4.5   | ÁREA 5 – MICROBACIA MP V .....               | 113 |
| 4.5.1 | HIPSOMETRIA .....                            | 113 |
| 4.5.2 | DECLIVIDADE .....                            | 116 |
| 4.5.3 | FORMAS DE VERTENTE.....                      | 118 |
| 4.5.4 | MODELO HAND .....                            | 121 |
| 4.5.5 | USO E COBERTURA DO SOLO .....                | 123 |
| 4.5.6 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO.....   | 125 |
| 4.5.7 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO..... | 127 |
| 4.6   | ÁREA 6 – MICROBACIA MP VI.....               | 129 |
| 4.6.1 | HIPSOMETRIA .....                            | 129 |
| 4.6.2 | DECLIVIDADE .....                            | 132 |
| 4.6.3 | FORMAS DE VERTENTE.....                      | 134 |
| 4.6.4 | MODELO HAND .....                            | 136 |
| 4.6.5 | USO E COBERTURA DO SOLO .....                | 138 |
| 4.6.6 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO.....   | 140 |
| 4.6.7 | CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO..... | 143 |
| 5     | CONCLUSÃO.....                               | 146 |
| 6     | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....       | 149 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....             | 150 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1 - Resumo dos dados compilados, escalas, formatos e fontes. ....   | 34 |
| Tabela 3.2 - Principais características dos compartimentos geomorfológicos das microbacias do estudo (adaptado de Arcaya, 2007). ....                              | 36 |
| Tabela 3.3 - Tamanho em hectares das microbacias do estudo. ....   | 39 |
| Tabela 3.4 - Etapas de execução da análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a inundações (adaptado de Lollo et al., 2013 e Silva et al., 2013). .... | 47 |
| Tabela 3.5 - Classificação da suscetibilidade a inundações de acordo com o valor atribuído. ....   | 48 |
| Tabela 3.6 - Etapas de execução da análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a alagamentos (adaptado de Lollo et al., 2013). ....                     | 49 |
| Tabela 3.7 - Classificação da suscetibilidade a alagamentos de acordo com o peso atribuído. ....   | 49 |
| Tabela 4.1 - Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP I. ....  | 50 |
| Tabela 4.2 – Classes de declividade da microbacia MP I. ....   | 53 |
| Tabela 4.3 - Classificação das formas de vertente para a microbacia MP I. ....   | 55 |
| Tabela 4.4 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP I e seus respectivos quantitativos. ....          | 58 |
| Tabela 4.5 - Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP I. ....  | 60 |
| Tabela 4.6 – Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP I. ....  | 61 |
| Tabela 4.7 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP I. ....   | 64 |
| Tabela 4.8 - Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP II. ....   | 66 |
| Tabela 4.9 – Classes de declividade da microbacia MP II. ....  | 68 |
| Tabela 4.10 - Classificação das formas de vertente para a microbacia MP II. ....   | 71 |
| Tabela 4.11 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP II e seus respectivos quantitativos. ....        | 73 |
| Tabela 4.12 - Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP II. ....  | 75 |
| Tabela 4.13 – Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP II. ....  | 77 |
| Tabela 4.14 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP II. ....   | 79 |
| Tabela 4.15 - Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP III-IV. ....  | 82 |
| Tabela 4.16 – Classes de declividade da microbacia MP III-IV. ....   | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.17 - Classificação das formas de vertente para a microbacia MP III-IV.....   | 87  |
| Tabela 4.18 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP III-IV e seus respectivos quantitativos. .... | 90  |
| Tabela 4.19- Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP III-IV. ....  | 92  |
| Tabela 4.20– Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP III-IV. ....  | 93  |
| Tabela 4.21 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP III-IV. ....  | 95  |
| Tabela 4.22 – Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP IV. ....   | 98  |
| Tabela 4.23 – Classes de declividade da microbacia MP IV. ....  | 100 |
| Tabela 4.24 – Classificação das formas de vertente para a microbacia MP IX. ....  | 103 |
| Tabela 4.25 – Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP IV e seus respectivos quantitativos. ....     | 106 |
| Tabela 4.26 – Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP IV. ....   | 108 |
| Tabela 4.27 – Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP IV. ....   | 109 |
| Tabela 4.28 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP IV. ....  | 111 |
| Tabela 4.29 – Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP V. ....  | 114 |
| Tabela 4.30 - Classes de declividade da microbacia MP V. ....   | 116 |
| Tabela 4.31 – Classificação das formas de vertente para a microbacia MP V. ....   | 119 |
| Tabela 4.32 – Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP V e seus respectivos quantitativos. ....      | 122 |
| Tabela 4.33 – Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP V. ....  | 124 |
| Tabela 4.34 – Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP V. ....  | 125 |
| Tabela 4.35 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP V. ....   | 128 |
| Tabela 4.36 – Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP VI. ....   | 130 |
| Tabela 4.37 – Classes de declividade da microbacia MP VI. ....  | 132 |
| Tabela 4.38 – Classificação das formas de vertente para a microbacia MP VI. ....  | 135 |
| Tabela 4.39 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP VI e seus respectivos quantitativos. ....     | 137 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.40 – Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP VI. .... | 139 |
| Tabela 4.41 - Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP VI. ....                     | 141 |
| Tabela 4.42 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP VI. ....                    | 144 |
| Tabela 5.1 - Quadro percentual de suscetibilidade hidrológica nas microbacias. ....                           | 147 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1- a) Chuva provoca enxurrada em Vicente Pires no DF. Fonte: Metr p les (2019) e b) Casas são inundadas após forte chuva no Varjão, DF Fonte: Bom Dia DF (2020).....   | 30 |
| Figura 2.2 - Distin o dos tipos de escoamentos e acúmulo superficial de  gua (Fonte: dscbcsp.blogspot.com.br e modificado de Batista (2014). ....   | 31 |
| Figura 3.1– Mapa geomorfopedol gico e microbacias urbanas do estudo, adaptado de Arcaya (2007). ....  | 35 |
| Figura 3.2 – Mapa de localiza o das Cartas em escala 1:1.000 no DF. ....  | 37 |
| Figura 3.3 – Mapa de localiza o e microbacias do estudo no DF. ....   | 37 |
| Figura 3.4 - Mapa de Regiões Administrativas e microbacias do estudo.....   | 38 |
| Figura 3.5 – Metodologia aplicada do mapeamento hidrológico. ....   | 39 |
| Figura 3.6- Mapas de localiza o das áreas de estudo. (a) Localiza o da microbacia MP I; (b) Localiza o da microbacia MP II; (c) Localiza o da microbacia MP III-IV; (d) Localiza o da microbacia MP IV; (e) Localiza o da microbacia MP V; e (f) Localiza o da microbacia MP VI. .... | 40 |
| Figura 3.7 - Curvatura vertical - Profile Curvature – (ESRI, 2019).....   | 43 |
| Figura 3.8 – Curvatura horizontal - Planform Curvature - (ESRI, 2019).....  | 43 |
| Figura 3.9 - Combina es das curvaturas e suas respectivas formas de relevo. Fonte: modificada de Ahualli (2019).....  | 44 |
| Figura 3.10 - Primeira etapa metodológica do modelo HAND. Fonte: Nobre et al. (2011). ...   | 45 |
| Figura 3.11 - Segunda etapa metodológica do modelo HAND. Fonte: Nobre et al. (2011). ...  | 45 |
| Figura 4.1 - Carta hipsométrica da microbacia MP I. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m. ....   | 50 |
| Figura 4.2 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP I. ....   | 51 |
| Figura 4.3 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP I. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m. ....  | 52 |
| Figura 4.4 - Carta de declividade da microbacia MP I. (a) Declividade do MDE de 5m e (b) Declividade do MDE de 1m. ....   | 52 |
| Figura 4.5 - Gráfico de distribui o da microbacia MP I em (%) por intervalos da declividade. ....   | 53 |
| Figura 4.6 - Cartas de formas de vertente da microbacia MP I. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m. ....   | 54 |
| Figura 4.7 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP I. ....   | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.8 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP I. ....   | 57 |
| Figura 4.9 - Carta do modelo HAND da microbacia MP I. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m. ....   | 57 |
| Figura 4.10 - Gráfico de distribuição da microbacia MP I por intervalos do HAND. ....   | 59 |
| Figura 4.11 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia MP I. ....   | 59 |
| Figura 4.12 – Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP I. (a) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 1m. ....                   | 61 |
| Figura 4.13 - Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP I. ....   | 62 |
| Figura 4.14 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP I. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m. ....              | 64 |
| Figura 4.15 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP I. ...  | 64 |
| Figura 4.16 - Carta hipsométrica da microbacia MP II. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m. ....   | 66 |
| Figura 4.17- Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP II. ....  | 67 |
| Figura 4.18 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP II. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m. ....  | 68 |
| Figura 4.19 - Carta de declividade da microbacia MP II. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m. ....  | 68 |
| Figura 4.20 - Gráfico de distribuição da microbacia MP II em (%) por intervalos da declividade. ....  | 69 |
| Figura 4.21 - Cartas de formas de vertente da microbacia MP II. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m. .... | 70 |
| Figura 4.22 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP II. ....   | 72 |
| Figura 4.23 - Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP II. ....   | 72 |
| Figura 4.24 - Carta do modelo HAND da microbacia MP II. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m. ....   | 73 |
| Figura 4.25 - Gráfico de distribuição da microbacia MP II por intervalos do HAND. ....  | 74 |
| Figura 4.26 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia MP II. ....  | 75 |
| Figura 4.27 - Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP II. (a) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 1m. ....                  | 77 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.28 - Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP II. ....  | 78 |
| Figura 4.29 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP II. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m. ....                 | 79 |
| Figura 4.30 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP II. ..  | 80 |
| Figura 4.31 - Carta hipsométrica da microbacia MP III-IV. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m. ....   | 82 |
| Figura 4.32 - Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP III-IV. ....   | 83 |
| Figura 4.33 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP III-IV. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m. ....  | 84 |
| Figura 4.34 - Carta de declividade da microbacia MP III-IV. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m. ....  | 84 |
| Figura 4.35 - Gráfico de distribuição da microbacia MP III-IV em (%) por intervalos da declividade. ....  | 85 |
| Figura 4.36 - Cartas de formas de vertente da microbacia MP III-IV. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m. .... | 86 |
| Figura 4.37 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP III-IV. ....   | 88 |
| Figura 4.38 - Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP III-IV. ....   | 89 |
| Figura 4.39 - Carta do modelo HAND da microbacia MP III-IV. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m. ....   | 89 |
| Figura 4.40 - Gráfico de distribuição da microbacia MP III-IV por intervalos do HAND. ....  | 91 |
| Figura 4.41 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia III-IV. ....   | 91 |
| Figura 4.42- Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP III-IV. (a) Classificação de suscetibilidade à inundações do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundações do MDE de 1m. ....                 | 93 |
| Figura 4.43 – Percentual de classes de suscetibilidade à inundações na microbacia MP III-IV. ....   | 94 |
| Figura 4.44 – Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP III-IV. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m. ....             | 95 |
| Figura 4.45 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP III-IV. ....  | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.46 – Carta hipsométrica da microbacia MP IV. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m. ....  | 98  |
| Figura 4.47 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP IV. ....  | 99  |
| Figura 4.48 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP IV. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m. ....   | 100 |
| Figura 4.49 – Carta de declividade da microbacia MP IV. (a) Declividade do MDE de 5m e (b) Declividade do MDE de 1m. ....  | 100 |
| Figura 4.50 – Gráfico de distribuição da área MP IV em (%) por intervalos da declividade. ....   | 101 |
| Figura 4.51 – Carta de formas de vertente da microbacia MP IV. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m. .... | 102 |
| Figura 4.52 – Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP IV. ....  | 104 |
| Figura 4.53 – Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP IV. ....  | 105 |
| Figura 4.54 – Carta do modelo HAND da microbacia MP IV. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m. ....  | 105 |
| Figura 4.55 – Gráfico de distribuição da área MP IV em (%) por intervalos do HAND. ....  | 107 |
| Figura 4.56 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia IV. ....  | 107 |
| Figura 4.57 – Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP IV. (a) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 1m. ....                 | 109 |
| Figura 4.58 – Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP IV. ....   | 110 |
| Figura 4.59 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP IV. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m. ....            | 111 |
| Figura 4.60 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP IV. ....   | 112 |
| Figura 4.61 – Carta hipsométrica da microbacia MP V. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m. ....   | 114 |
| Figura 4.62 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP V. ....   | 115 |
| Figura 4.63 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP V. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m. ....  | 116 |
| Figura 4.64 – Carta de declividade da microbacia MP V. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m. ....  | 116 |
| Figura 4.65 – Gráfico de distribuição da área MP V em (%) por intervalos da declividade. ....  | 118 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.66 – Cartas de formas de vertente da microbacia MP V. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m.....  | 118 |
| Figura 4.67 – Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP V.....  | 120 |
| Figura 4.68 – Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP V. ....   | 121 |
| Figura 4.69 – Carta do modelo HAND da microbacia MP V. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.....  | 121 |
| Figura 4.70 – Gráfico de distribuição da área MP V em (%) por intervalos do HAND. ....   | 123 |
| Figura 4.71 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia V. ....   | 123 |
| Figura 4.72 – Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP V. (a) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 1m. ....                  | 125 |
| Figura 4.73 – Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP V. ...   | 126 |
| Figura 4.74 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP V. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m.....              | 127 |
| Figura 4.75 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP V. ....  | 128 |
| Figura 4.76 – Carta hipsométrica da microbacia MP VI. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m.....   | 130 |
| Figura 4.77 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP VI. ....  | 131 |
| Figura 4.78 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP VI. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m. ....   | 132 |
| Figura 4.79 – Carta de declividade da microbacia MP VI. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m. ....   | 132 |
| Figura 4.80 – Gráfico de distribuição da área MP VI em (%) por intervalos da declividade. ....   | 133 |
| Figura 4.81 – Cartas de formas de vertente da microbacia MP VI. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m..... | 134 |
| Figura 4.82 – Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP VI.....   | 136 |
| Figura 4.83 – Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP VI.....   | 136 |
| Figura 4.84 – Cartas do modelo HAND da microbacia MP VI. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.....  | 137 |
| Figura 4.85 – Gráfico de distribuição da área MP VI em (%) por intervalos do HAND. ....  | 138 |
| Figura 4.86 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia VI. ....  | 139 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.87 - Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP VI. (a) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 1m. ....      | 141 |
| Figura 4.88 - Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP VI. ..  | 142 |
| Figura 4.89 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP VI. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m. .... | 143 |
| Figura 4.90 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP VI. ....  | 144 |
| Figura 5.1 – Gráfico de suscetibilidade à inundação comparativo percentual entre microbacias e escalas de precisão de 5m e 1m. ....   | 147 |
| Figura 5.2 – Gráfico de suscetibilidade ao alagamento comparativo percentual entre microbacias e escalas de precisão de 5m e 1m. ....   | 147 |

## LISTA DE ABREVIACÕES, NOMECLATURAS E SÍMBOLOS

| <b>Abreviações</b> | <b>Significado</b>  |
|--------------------|---|
| ACC                | <i>Accumulated Flow</i>   |
| CPRM               | Serviço Geológico do Brasil   |
| DF                 | Distrito Federal  |
| ESRI               | <i>Environmental Systems Research Institute</i>                                 |
| GIS                | <i>Geographical Information System</i>  |
| HAND               | <i>Height Above the Nearest Drainage</i> (Altura Sobre a Drenagem Mais Próxima) |
| IAEG               | <i>International Association of Engineering Geology</i>                         |
| IBGE               | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                                 |
| INPE               | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                                       |
| IPT                | Instituto de Pesquisas Tecnológicas   |
| ISBN               | <i>International Standard Book Number</i>                                       |
| LDD                | <i>Local Drain Directions</i>   |
| m                  | Metros  |
| MDE                | Modelo Digital de Elevação  |
| MP                 | Compartimento Geomorfopedológico  |
| PNPDEC             | Política Nacional de Proteção e Defesa Civil                                    |
| PUCE               | <i>Pattern, Unit, Component, Evaluation</i>                                     |
| QGIS               | Quantum GIS   |
| RA                 | Região Administrativa   |
| SICAD              | Sistema Cartográfico do Distrito Federal  |
| SIG                | Sistemas de Informação Geográfica   |
| UC                 | Uso e Cobertura do Solo   |
| UFSC               | Universidade de Santa Catarina  |
| UnB                | Universidade de Brasília  |

## 1 INTRODUÇÃO

A expansão das áreas urbanas e o modo como são ocupadas exercem influência nos impactos ambientais em locais suscetíveis a serem afetados por desastres naturais ou induzidos e vulneráveis à integridade física, perdas materiais e patrimoniais para os residentes dessas áreas (Carvalho et al., 2007). A compreensão e identificação desses processos são cruciais para entender as transformações rápidas na paisagem, especialmente em planícies inundáveis, fundos de vale e áreas de urbanização precarizada.

Em centros urbanos, alguns tipos de desastres estão diretamente relacionados com fenômenos hidrológicos tais como inundações e alagamentos. No caso de inundações, sua ocorrência se dá pelo extravasamento das águas da calha de um canal fluvial, quando a vazão é superior à capacidade de suporte do escoamento e é um processo que está associado a enchentes, que é o acréscimo na descarga de fluxo por um intervalo de tempo (Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998) *apud* Batista (2014)). Já no caso de alagamentos, conforme Carvalho et al. (2007), ocorre o acúmulo momentâneo de águas superficiais em determinada área, devido a características do meio físico, problemas no sistema de drenagem e escoamento e precipitações pluviométricas de alta intensidade em regiões não associadas à hidrografia da região, podendo ter ou não relação com processos de natureza fluvial.

Na avaliação desses eventos e seus impactos sobre a população, deve-se considerar os conceitos de suscetibilidade, vulnerabilidade e risco. Segundo Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos e Desastres (BRASIL, 2021), o risco de desastres é a relação entre a potencialidade de ocorrência (susceptibilidade) de um processo físico que gera danos e as consequências de seu impacto na vida de pessoas ou comunidades (vulnerabilidade).

Nesses casos, o mapeamento de áreas de risco é regulamentado em lei. A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), Lei nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012), possui como uma de suas diretrizes a prioridade às ações preventivas relacionadas à minimização de desastres. Para tal, o mapeamento de áreas suscetíveis à desastres, juntamente com estudos para identificar ameaças, vulnerabilidades e riscos, constitui um conjunto de ferramentas essenciais para prevenir e reduzir desastres, sendo atividades de responsabilidade de todos os entes federados.

A utilização de técnicas de geoprocessamento contribui para uma análise mais aprofundada e para a identificação não apenas das áreas suscetíveis a eventos hidrológicos, mas também para a caracterização de áreas passíveis ou não de ocupação pela população. Assim, cartas como a

carta de suscetibilidade são instrumentos que auxiliam os gestores e a sociedade na identificação e no diagnóstico dos locais suscetíveis a desastres, bem como orientam propostas para sua mitigação/redução. Assim, a elaboração de cartas relacionadas ao estudo de inundações e alagamentos é de extremamente relevante para uso no planejamento territorial, urbano e ambiental e nas tomadas de decisão governamentais.

Desta forma, este trabalho se propôs a analisar áreas de suscetibilidade a inundações e alagamentos em algumas microbacias urbanas do Distrito Federal utilizando de forma comparativa os MDE extraídos das curvas de nível de 5 metros (2009) e 1 metro (2016) disponibilizados pelo Geoportal-DF e características do relevo tais como declividade e curvatura. Foi feito o cruzamento dessas características com o modelo HAND (Rennó et al. (2008); Nobre et al., 2011) para análise de suscetibilidade à inundações e com o uso e cobertura do solo para análise de suscetibilidade ao alagamento das respectivas áreas de interesse.

Este trabalho tem como objetivo principal compreender os efeitos de escala de precisão do relevo na ocorrência e distribuição espacial de áreas de suscetibilidade hidrológica no Distrito Federal. Para alcançar esse propósito, foi empregada a metodologia de álgebra de mapas com cruzamento de produtos de suscetibilidade à inundações e ao alagamento com informações provenientes de base distrital e federal georreferenciadas.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Dados do último Censo Demográfico, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2022, mostram que as concentrações urbanas abrigavam 124,1 milhões de pessoas, embora o desenvolvimento estrutural no país não tenha ocorrido de forma homogênea regionalmente (IBGE, 2023). Arelado a isso, houve um aumento da suscetibilidade à potenciais desastres em centros urbanos, com ocorrência de acidentes envolvendo perdas humanas e econômicas devido ao processo de urbanização desenfreado e sem planejamento.

O presente projeto visou identificar e mapear parâmetros geomorfométricos e informações hidrológicas do meio físico no Distrito Federal (DF) e com isso fazer uma avaliação das condições geotécnicas que influenciam nas formas de uso e ocupação bem como na ocorrência de eventos hidrológicos danosos. Tais parâmetros são importantes para o conhecimento das características locais em áreas suscetíveis a alagamentos e inundações nas áreas urbanas e periurbanas do DF.

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, Lei nº 12.608/2012 (BRASIL, 2012) está integrada a políticas de ordenamento territorial, desenvolvimento urbano, meio ambiente, geologia, dentre outras. Entre instrumentos de análise, pode-se citar a carta geotécnica como uma ferramenta preventiva e de planejamento para uma urbanização mais segura e sustentável. Ela oferece aos administradores públicos dados essenciais para evitar a ocupação de áreas suscetíveis a eventos hidrológicos destrutivos. Além disso, fornece orientações sobre áreas prioritárias para ocupação e técnicas construtivas mais adequadas para áreas específicas.

O Distrito Federal possui uma base de dados de cartografia temática e de topografia bem documentada e disponibilizada no Geoportal-DF (<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>). A topografia possui curvas de nível de metro em metro atualizadas, possibilitando fazer uma análise em escala de precisão do relevo e do uso e ocupação da região. Com essas informações, é possível analisar a influência da geomorfometria no crescimento urbano, nos aspectos relacionados ao padrão construtivo e nas condições sociais.

A análise dos diferentes fatores que influenciam na ocorrência de eventos danosos tais como alagamento e inundação pode ser utilizada como subsídio para avaliações como a avaliação de risco em microbacias urbanas. Sendo assim, este trabalho justifica-se na necessidade de identificar e entender os principais fatores de que condicionam a suscetibilidade hidrológica para a população urbana do DF.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo principal deste trabalho é fazer uma análise comparativa entre dados de diferentes precisões altimétricas utilizados no mapeamento de suscetibilidade de eventos danosos tais como inundações e alagamentos, visando constatar se há melhorias na análise com o aumento de precisão dos dados utilizados.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- Fazer revisão dos conceitos relativos ao estudo de cartografia de suscetibilidade;

- Escolher áreas representativas para o desenvolvimento do trabalho com base no acervo de dados de precisão altimétrica e disponibilidade de demais informações;
- Coleta de informações quantitativas e qualitativas para elaboração de um banco de dados que dê suporte ao entendimento das condições de suscetibilidade hidrológica;
- Compilação e ajuste de escala de cartas do relevo e de uso e cobertura do solo para servirem de subsídios aos estudos de diagnóstico;
- Avaliar a melhora nas análises de suscetibilidade com a utilização de dados de precisão altimétrica de 5 metros para 1 metro.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está organizada em seis tópicos, descritos de forma sucinta a seguir:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução teórica sobre os conceitos gerais em torno dos temas tratados no presente trabalho, a justificativa, os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo aborda uma revisão bibliográfica abrangente dos subtemas e conceitos fundamentais para esta dissertação. Inclui uma análise sobre cartografia geotécnica, sensoriamento remoto e suas aplicações no planejamento urbano, bem como a suscetibilidade a eventos hidrológicos e suas características.

O terceiro capítulo aborda os materiais e métodos empregados na pesquisa, fornecendo informações sobre os dados compilados e detalhando a metodologia utilizada para a aquisição e tratamento dessas informações.

O quarto capítulo apresenta os mapas essenciais das áreas de interesse e realiza a caracterização da geomorfometria do ambiente físico e da ocupação urbana. Compreende cartas detalhadas da altimetria, declividade, curvaturas, modelo hidrológico HAND e suscetibilidade hidrológica em duas escalas de precisão.

O quinto capítulo traz as conclusões obtidas na pesquisa e o sexto capítulo propõe sugestões para pesquisas futuras. Por último, são listadas as referências empregadas ao longo da dissertação.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão revisados os princípios de cartografia geotécnica e sua aplicação em áreas urbanas, elaboração de cartas geotécnicas voltadas para suscetibilidade hidrológica, das técnicas de aquisição e interpretação de dados, dos métodos de investigação e Sistema de Informações Geográficas (SIG).

### **2.1 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA**

Como descrito por Santos (2014), a cartografia geotécnica caracteriza-se como uma abordagem multidisciplinar de diversas áreas do conhecimento. Diniz & Freitas (2013) destacam que o mapeamento geotécnico representa uma ferramenta crucial na administração e supervisão do uso do solo, possibilitando a redução dos impactos resultantes da ação antrópica sobre o meio ambiente.

Segundo Zuquette (1987), a cartografia geotécnica busca levantar, avaliar e analisar as características que compõem o ambiente físico. Essas informações são processadas por diferentes métodos e interpretadas de maneira a serem representadas em mapas, cartas e documentos descritivos, utilizados em engenharia, planejamento urbano, entre outras aplicações. A diversidade de usos das cartas geotécnicas abrange temas como suscetibilidade, risco, aptidão e vulnerabilidade, sendo analisados em diversas escalas de mapeamento.

Cerri (1990), Cerri et al. (1996) e Santos (2014) afirmam que a cartografia geotécnica consiste na representação das características do meio físico natural, englobando a distribuição espacial dos diversos tipos de solos e rochas, as formas de relevo, a dinâmica dos processos atuantes e possíveis alterações decorrentes da implementação de obras de engenharia, bem como das distintas formas de uso e ocupação do solo. O objetivo principal das cartas geotécnicas é subsidiar ações de planejamento e gestão do uso do solo, visando adaptar as diversas formas de ocupação territorial.

Zuquette & Gandolfi (2004) categorizam os documentos cartográficos com base no conteúdo (mapas fundamentais ou cartas interpretativas e derivadas) e na finalidade (cartas para uso múltiplo ou cartas para uso específico). Mapas fundamentais destinam-se ao registro de informações sobre os vários componentes do meio físico, enquanto as cartas são elaboradas a partir dos atributos registrados nos mapas fundamentais.

Santos (2014) destaca quatro tipos de documentos cartográficos: mapas de geodiversidade, mapas de suscetibilidade, cartas geotécnicas e cartas de risco, enfatizando a natureza preventiva da cartografia geotécnica como elemento fundamental do planejamento urbano. O autor ressalta que as cartas geotécnicas focam no perímetro urbano, permitindo a regulamentação geotécnica da urbanização. Conforme Cerri (1990), as cartas geotécnicas podem ser categorizadas como cartas clássicas, cartas de suscetibilidade e cartas de risco. Diniz (1998) classifica as cartas geotécnicas com base em sua finalidade, identificando três aplicações principais: cartas de aptidão à urbanização; cartas de suscetibilidade, perigo e riscos geológicos associados a processos do meio físico; e cartas geológico-geotécnicas para estudos de viabilidade e execução de projetos de infraestrutura.

Conforme Freitas & Campanha (2007), as cartas geotécnicas desempenham um papel significativo na interpretação técnica do município, sendo referências fundamentais na formulação de instrumentos de planejamento, como planos diretores e leis de uso do solo. Elas delinham as restrições, potencialidades e intervenções necessárias para a correta consolidação urbana.

Zuquette & Gandolfi (2004) examinam metodologias tradicionais da cartografia geotécnica adotadas em diversos países, destacando os trabalhos de mapeamento geológico-geotécnico apresentados por Dearman (1991), a Metodologia IAEG (*International Association of Engineering Geology*) e a Metodologia PUCE (*Pattern, Unit, Component, Evaluation*). No contexto brasileiro, ressaltam a relevância dos trabalhos desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Os resultados dessas iniciativas englobam cartas geotécnicas, cartas de risco, cartas de suscetibilidade e cartas de atributos ou parâmetros.

Segundo Zuquette & Gandolfi (2004), as formas de ocupação mais comuns no Brasil são agrupadas em três categorias principais: áreas urbanizadas, áreas regionais e áreas rurais. As distintas formas de uso e ocupação se relacionam com informações do meio físico, apresentando diferentes níveis de interação:

- Ocupação urbana: engloba uso residencial, industrial, comercial, áreas de recreação, serviços de utilidade pública (água, luz, telefone, transporte público), obras enterradas, entre outros exemplos;
- Ocupação regional: inclui uso para rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, barragens, mineração, turismo, polos industriais, entre outros;

- Ocupação rural: abrange uso agroindustrial, pecuária, agricultura, agrovilas e projetos de irrigação.

Vale salientar que os trabalhos desenvolvidos pelo IPT consideram as formas de ocupação do solo e as demandas sobre o meio físico como fatores fundamentais na determinação do desempenho dos terrenos (ZUQUETTE & GANDOLFI, 2004).

Segundo Santos (2014), os passos metodológicos fundamentais para a criação de cartas geotécnicas incluem a obtenção e/ou produção de mapas temáticos essenciais, identificação de características fisiográficas críticas, realização da compartimentação geotécnica (construção das cartas propriamente ditas) e a elaboração de documentação informativa que engloba tabelas, relatórios e um folheto técnico contendo diretrizes claras e didáticas para a ocupação urbana, destacando arranjos urbanísticos mais apropriados.

Xavier et al. (2015) enfatizam que a importância de investimentos no desenvolvimento e utilização da cartografia geotécnica foi ampliada com a promulgação das leis 12.340 de 2010 e 12.608 de 2012, que estabeleceram a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. Em conformidade com essas leis, o Governo Federal instituiu o cadastro nacional de municípios com áreas propensas a deslizamentos de grande impacto, inundações súbitas ou processos geológicos ou hidrológicos, determinando que os municípios listados devem desenvolver o mapeamento das áreas suscetíveis a esses processos geodinâmicos, além da elaboração da carta geotécnica de aptidão à urbanização.

## **2.2 GEOTECNOLOGIAS**

### **2.2.1 GEOPROCESSAMENTO**

O geoprocessamento é um conjunto de tecnologias dedicadas à coleta e processamento de informações espaciais para fins específicos (MOURA, 2003). As atividades relacionadas ao geoprocessamento são conduzidas por sistemas especializados, adaptados para cada aplicação, comumente conhecidos como Sistemas de Informação Geográfica - SIG. Um sistema de geoprocessamento, designado para o processamento de dados geograficamente referenciados ou georreferenciados, abrange desde a coleta inicial até a produção de saídas, como mapas convencionais, relatórios e arquivos digitais. Além disso, deve incorporar recursos para armazenamento, gerenciamento, manipulação e análise eficientes desses dados.

Segundo vários autores da literatura (SILVA, 2007; MOURA, 2003; CÂMARA ET AL., 2001), os procedimentos de análise espacial lidam com dados geográficos ou aqueles que possuem uma localização geográfica, expressa por coordenadas em um mapa, e atributos descritivos que podem ser representados em um banco de dados convencional, juntamente com seus inter-relacionamentos. Os dados geográficos não estão isolados no espaço; tão crucial quanto localizá-los é a identificação e representação das relações entre as diversas informações

Importante destacar o geoprocessamento é considerado como uma tecnologia interdisciplinar, que permite a convergência de diferentes áreas do conhecimento para o estudo de fenômenos ambientais e urbanos, uma vez que sociólogos, geólogos, urbanistas, geógrafos, engenheiros, dentre outros, buscam coletar e tratar informações espaciais para um objetivo específico (SILVA JUNIOR, 2019).

### **2.2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)**

Conforme Câmara et al. (2001) *apud* Silva Junior (2019), a principal ferramenta do geoprocessamento é o Sistema de Informação Geográfica (SIG), também conhecido como *Geographical Information System* (GIS). Qualquer SIG apresenta duas características principais: permite inserir e integrar, numa base única de dados (banco de dados), informações espaciais provenientes de diversas fontes, tais como: cartográficas, imagens de satélites, dados censitários, dados de cadastro rural e urbano, dados de redes e de MDE (Modelo Digital de Elevação); e oferece mecanismo para combinar várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, bem como de consulta, recuperação, visualização e plotagem do conteúdo dessa base de dados georreferenciados (MOREIRA, 2001).

Isso possibilita a combinação eficiente de diversas informações por meio de algoritmos de manipulação e análise, com o objetivo de consultar, recuperar, visualizar e gerar novos mapas e cartas a partir do conteúdo desse banco de dados.

Existem, pelo menos, três maneiras de utilizar o SIG (INPE, 2004):

- Como ferramenta para produção de mapas;
- Como suporte para análise espacial de fenômenos;
- Como um banco de dados geográfico, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

### **2.3 CARTOGRAFIA PARA ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE**

Mapas e cartas são importantes documentos que reúnem informações cartográficas de uma ou mais características do meio ambiente, seja do meio físico, biótico ou antrópico. A utilização desses documentos para registro dessas características é extremamente relevante para uso no planejamento territorial, urbano e ambiental e nas tomadas de decisão governamentais.

No caso de cartas de suscetibilidade hidrológica, o mapeamento técnico de possíveis eventos danosos permite a apresentação, distribuição e tipo do evento, bem como a classificação do território em termos do que pode ser feito no planejamento de expansão urbana e quais situações devem ser mitigadas para segurança populacional.

A construção da Carta de Suscetibilidade pode ser dividida em três fases distintas: a coleta de dados fundamentais do ambiente físico e humano; a execução de mapeamento de campo; e a criação da representação cartográfica, conforme descrito por Brito e Oliveira (1998). Ao retratar a suscetibilidade à processos geodinâmicos em regiões habitadas, essas cartas desempenham um papel crucial no planejamento de infraestrutura e na identificação de áreas que demandam uma intensificação nas iniciativas de orientação à população, conduzidas pelos agentes de Defesa Civil.

O detalhamento dos produtos cartográficos que envolvem a análise de suscetibilidade segue as escalas sugeridas por Diniz & Freitas (2013), as escalas para os produtos cartográficos destinados ao planejamento urbano, mais especificamente as cartas de suscetibilidade (1:25.000), vulnerabilidade (1:2.000) e risco (1:2.000). Conforme o Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos e Desastres (BRASIL, 2021), a carta de suscetibilidade subsidia a produção da carta de risco, instrumento no nível de detalhe que auxilia os gestores e a sociedade na identificação e no diagnóstico dos locais e graus de risco, bem como orientando propostas para sua mitigação/redução.

No caso de eventos hidrológicos, Barbosa (2006) pontua que mapas de inundação representam ferramentas altamente valiosas, pois viabilizam a espacialização das áreas de risco, proporcionando uma compreensão visual do ambiente urbano e do sistema de drenagem como um todo. A elaboração técnica desses mapas, aliada a uma linguagem acessível à população, desempenha um papel fundamental no apoio às políticas de prevenção e controle de inundações, facilitando a integração com programas de educação ambiental.

## 2.4 EVENTOS HIDROLÓGICOS

Os processos hidrológicos verificados em canais de escoamento, sejam rios ou sistemas de drenagem, são respostas às variações sazonais na vazão, que dependendo do regime fluvial, sempre associados a intensidade, magnitude, frequência e quantidade dos eventos pluviométricos. Tratam-se de fenômenos de alta complexidade, pois envolvem toda a rede de drenagem contribuinte, composta por cursos d'água com características distintas (profundidade, largura, declividades, etc.). Esses fenômenos são de caráter hidrometeorológicos, ou seja, de natureza meteorológica e hidrológica (AMARAL e RIBEIRO, 2011).

Desastres naturais relacionados a de eventos hidrológicos são caracterizados principalmente por enxurradas, inundações e alagamentos. Pode-se definir as enxurradas como o escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte (Figura 2.1 (a)), que pode ou não estar associado a áreas de domínio dos processos fluviais, sendo comum a ocorrência ao longo de vias implantadas sobre antigos cursos d'água com alto gradiente hidráulico e em terrenos com elevada declividade natural (BRASIL, 2021).

No caso de inundações, sua ocorrência se dá pelo extravasamento das águas da calha de um rio, quando a vazão é superior à capacidade de suporte do escoamento (Figura 2.1 (b)) e é um processo que está associado a enchentes, que é o acréscimo na descarga de fluxo por um intervalo de tempo (INFANTI JR. & FORNASARI FILHO (1998) *apud* BATISTA (2014)).



Figura 2.1- a) Chuva provoca enxurrada em Vicente Pires no DF. Fonte: Metr p les (2019) e b) Casas são inundadas após forte chuva no Varjão, DF Fonte: Bom Dia DF (2020).

Conforme destacado por Tucci (2004), as inunda es resultam da combina o de precipita es intensas com a incapacidade dos rios e canais de acomodarem a vazão em suas calhas de

drenagem, resultando em transbordamentos e, conseqüentemente, na inundação das áreas adjacentes. A Figura 2.2 proporciona uma ilustração e definição dos fenômenos de enchente (ou cheia), inundação e alagamento, representando as formas mais comuns de acumulação de água superficial.



Figura 2.2 - Distinção dos tipos de escoamentos e acúmulo superficial de água (Fonte: dscbcsp.blogspot.com.br e modificado de Batista (2014).

Segundo Carvalho *et al.* (2007) *apud* Batista (2014), os alagamentos são o acúmulo momentâneo de águas superficiais em determinada área, devido a características do meio físico, problemas no sistema de drenagem e escoamento e precipitações pluviométricas de alta intensidade em regiões não associadas à hidrografia da região, podendo ter ou não relação com processos de natureza fluvial.

Em áreas urbanas, as intervenções e impactos ambientais decorrentes da atividade humana, tais como o aumento de áreas impermeáveis, redução das superfícies de infiltração, canalizações, retificações e ocupação de áreas próximas a canais fluviais contribuem para o aumento do escoamento superficial e da velocidade dos fluxos nos canais durante eventos chuvosos. Esse fenômeno resulta no aumento de casos de alagamentos e inundações repentinas, caracterizadas por picos rápidos de vazão.

A correta gestão de processos hidrológicos em ambientes urbanos demanda abordagens integradas, abrangendo tanto a superfície quanto o subsolo, uma vez que as intervenções na superfície inevitavelmente envolvem áreas com diversos interesses e atores. Nesse contexto, a identificação dos elementos influentes nos processos de alagamento e inundação nas cidades

favorece a condução de pesquisas que contribuam para a tomada de decisões, reduzindo os riscos e as vulnerabilidades associados a esses processos (GONÇALVES; TEIXEIRA, 2021).

## **2.5 SUSCETIBILIDADE HIDROLÓGICA**

De acordo com Sobreira e Souza (2012), a suscetibilidade pode ser compreendida como a capacidade potencial de modificação do ambiente físico por processos geológicos e hidrológicos, podendo ou não ser influenciada pelas atividades humanas na região. Os autores exemplificam esses processos incluindo movimentos gravitacionais de massa, eventos de subsidência, colapsos, erosões e inundações, entre outros.

Compreende-se que o conceito de suscetibilidade está intimamente ligado à predisposição natural do ambiente físico para a ocorrência de eventos específicos. A suscetibilidade indica a potencialidade da manifestação de determinado processo, seja ele natural ou induzido, em uma área específica. Vale ressaltar que uma mesma área pode estar sujeita a mais de um tipo de processo, e a presença de atividades humanas pode influenciar no desencadeamento de eventos naturais.

Bitar et al. (2014) afirmam que as cartas de suscetibilidade têm o objetivo de identificar áreas propensas à ocorrência de fenômenos e processos no ambiente, cuja dinâmica pode resultar em desastres naturais. Segundo o autor, o conhecimento prévio da suscetibilidade do terreno à geração de fenômenos naturais é crucial para os municípios, permitindo a implementação de medidas restritivas adequadas à ocupação. Portanto, as cartas de suscetibilidade são ferramentas essenciais para capacitar as prefeituras municipais em suas iniciativas de planejamento territorial.

Quanto às escalas das cartas de suscetibilidade, elas se situam entre os níveis de detalhe e semidetalhe (SOBREIRA E SOUZA, 2012; DINIZ E FREITAS, 2013). Nessa escala, a precisão dos dados, incluindo modelos digitais, deve ser adequada ao propósito do mapa, caso contrário o resultado mapeado pode apresentar superestimação ou subdimensionamento das representações dos processos analisados.

## **2.6 MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE HAND**

O *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) ou altura acima da drenagem mais próxima é um modelo digital que caracteriza a superfície topográfica com base em potenciais gravitacionais relativos à rede de drenagem. Esse modelo é obtido por meio da aplicação de

técnicas de geoprocessamento combinadas com procedimentos hidrológicos sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE). Em essência, a altimetria do MDE em relação ao nível do mar é convertida na diferença de altura entre a superfície do terreno e o canal de drenagem mais próximo para cada célula da grade do modelo. (RENNÓ et al., 2008; NOBRE, A. et al., 2011).

O modelo HAND tem ganhado crescente reconhecimento devido à sua simplicidade e rapidez de implementação. O HAND desempenha um papel crucial em várias áreas de estudo incluindo a classificação de terrenos com base em propriedades do solo, declividade e regime hidrológico de acordo com a profundidade da água subterrânea. Além disso, tem contribuído para a obtenção de mapas do solo e da vegetação utilizados em modelos hidrológicos distribuídos, a modelagem de mapas de inundação e deslizamentos de terra, a detecção do uso e ocupação do solo, previsões futuras relacionadas à expansão urbana, análises dinâmicas de parâmetros químicos e biológicos, e suas interações com a topografia, entre outras aplicações (RENNÓ et al., 2008; NOBRE, A. et al., 2011; NOBRE, C. et al., 2011; CUARTAS et al., 2012).

No contexto da modelagem de áreas propensas a inundações e alagamentos, foco desta pesquisa, o modelo HAND destaca-se devido às suas sólidas bases conceituais físicas e hidrológicas relacionadas à topografia. O modelo topográfico estabelece a conexão entre o fluxo da água e a rede de drenagem local. Em outras palavras, o HAND desagrega o conceito da direção do fluxo da água do continente para o mar ao identificar trajetórias preferenciais locais para o escoamento da água em direção ao canal de drenagem, que serve como referência (zero) no modelo digital. Como resultado, pontos mais próximos da rede de drenagem indicarão elevações menores, indicando zonas saturadas e, conseqüentemente, áreas suscetíveis a inundação. Dessa forma, o modelo revela regiões propensas à acumulação de água durante as chuvas (NOBRE, A. et al., 2011).

Os desenvolvedores do HAND, Rennó et al. (2008) e Nobre et al. (2011), empregaram esse modelo na região da floresta amazônica para identificar as áreas sujeitas a inundação. Para esse propósito, utilizaram imagens SRTM com uma resolução horizontal de 90 m e vertical de 30 m para gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE), que por sua vez foi aplicado na formulação do HAND para a área do estudo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, processos e fontes de dados utilizados na presente pesquisa, bem como o processo metodológico delimitado para o cumprimento dos objetivos.

#### 3.1 DADOS CARTOGRÁFICOS

A Tabela 3.1 apresenta os dados compilados e utilizados nesta pesquisa com suas respectivas escalas, formatos e fontes.

Tabela 3.1 - Resumo dos dados compilados, escalas, formatos e fontes.

| <b>Tema</b>  | <b>Escala</b>       | <b>Formato</b> | <b>Fonte</b>                         |
|--|---------------------|----------------|--------------------------------------|
| <b>Base topográfica do DF (curvas de nível)</b>                                | 1:2.000<br>1:10.000 | Vetorial       | Geoportal (2016)<br>Geoportal (2009) |
| <b>Imagem Satélites GeoEye, WordView e WordView II de 14 de junho de 2021.</b> | 1:2.000             | Matricial      | Geoportal (2021)                     |
| <b>Compartimentos Morfopedológicos</b>   | 1:100.000           | Vetorial       | Arcaya (2007)                        |
| <b>Regiões Administrativas</b>   | 1:100.000           | Vetorial       | Geoportal (2023)                     |
| <b>Uso e Cobertura do Solo</b>   | 1:10.000            | Vetorial       | Geoportal (2019)                     |
| <b>Hidrografia</b>   | 1:10.000            | Vetorial       | Geoportal (2021)                     |

#### 3.2 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

Foram empregados os *softwares* QGIS 3.30 da *QGIS Development Team* e ArcGIS 10.8 da *Environmental Systems Research Institute (ESRI)* para a criação, manipulação e análise dos dados. Esses *softwares* viabilizam o processamento de imagens digitais, modelagem numérica de elevação, análises espaciais, compilação e consulta a bancos de dados espaciais, bem como análises estatísticas, elaboração de mapas cartográficos e a intersecção de informações.

O modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), descrito em Nobre et al. (2011) e fornecido gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi utilizado para obtenção da rede de drenagem normalizada, a delimitação de áreas de contribuição, obtenção de parâmetros morfométricas e a execução do descritor HAND, usado para identificação de áreas suscetíveis a inundação e alagamento.

Para a criação de planilhas eletrônicas e gerenciamento de dados computacionais, utilizou-se o programa Microsoft Excel 2016. Essas planilhas foram desenvolvidas a partir de dados compilados das plataformas de Sistema de Informação Cartográfica (SIG).

Em um primeiro momento nesta pesquisa, foram escolhidas microbacias urbanas delimitadas a partir do *software* QGIS 3.30 em conformidade com os compartimentos geomorfopedológicos definidos por Arcaya (2007). Para a análise de suscetibilidade de eventos hidrológicos, o território do Distrito Federal dispõe de base topográfica 1:2.000 com curvas de nível de metro em metro em áreas urbanas e seus entornos, o que permite uma elaboração de parâmetros geomorfométricos detalhados (Figura 3.1).

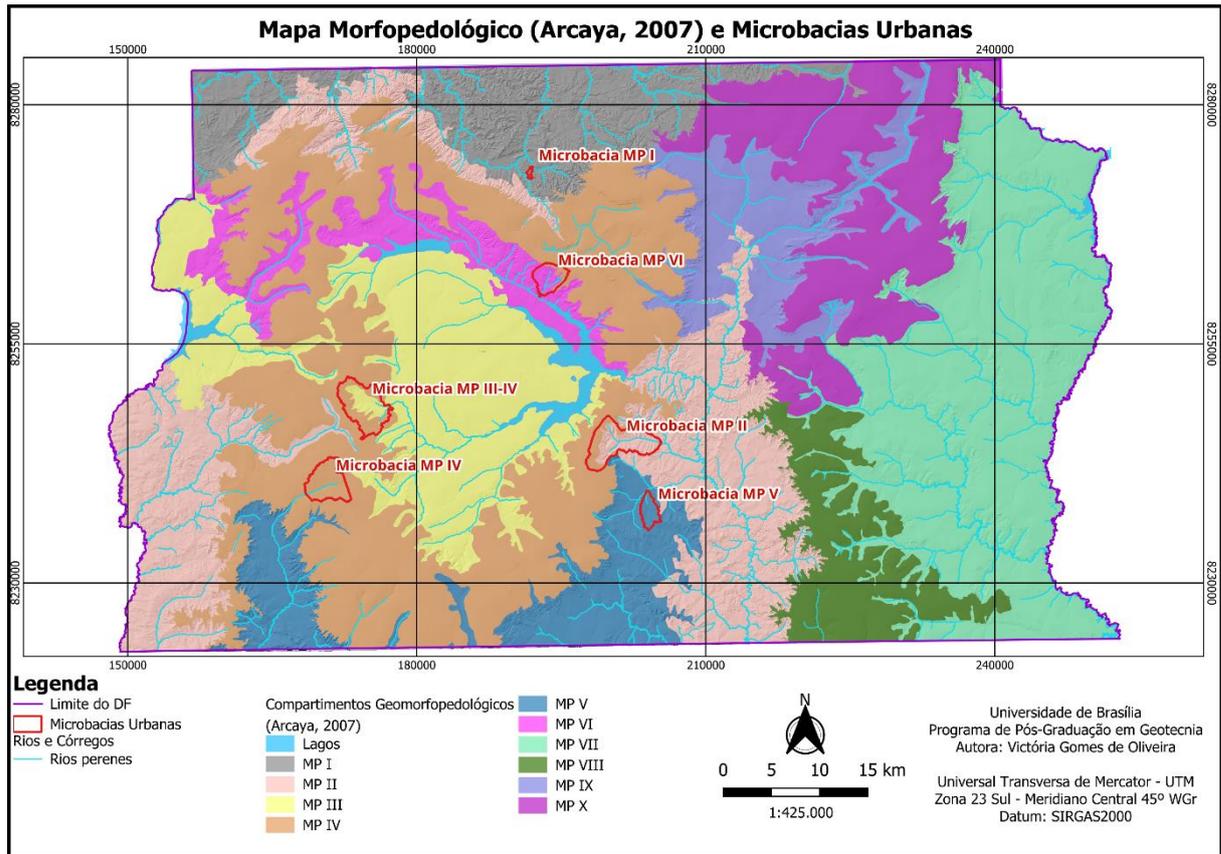


Figura 3.1– Mapa geomorfopedológico e microbacias urbanas do estudo, adaptado de Arcaya (2007).

Neste estudo, considerou-se os compartimentos geomorfopedológicos por apresentarem características singulares de formas de relevo, solos e formas de uso e ocupação do solo (Tabela 3.2). Dos dez compartimentos morfopedológicos definidos por Arcaya (2007), foram escolhidas áreas urbanas em seis, sendo representados pela sigla MP seguida do número em algarismo romano correspondente.

Tabela 3.2 - Principais características dos compartimentos geomorfopedológicos das microbacias do estudo (adaptado de Arcaya, 2007).

|  | <b>Características</b>  |   |                                       |
|--|-------------------------|---|---------------------------------------|
|  | <b>Formas de Relevo</b> | <b>Uso e cobertura de solo predominante</b>   | <b>Declividade Predominante</b>       |
| <b>Compartimentos Morfopedológicos</b> | <b>MP - I</b>           | Superfícies Dissecadas como relevo ondulado a fortemente ondulado   | Campo e mata > 20 %                   |
|  | <b>MP - II</b>          | Superfícies Dissecadas como relevo suave ondulado   | Campo > 20 %                          |
|  | <b>MP - III</b>         | Superfícies Deprimidas com relevo suave a suave ondulado  | Cerrado e campo 2 – 5 %               |
|  | <b>MP - IV</b>          | Região de Chapadas (Chapadas de Contagem, Brasília, Sobradinho e Etchplano do divisor Descoberto/Alagado), relevo plano a suave | Cerrado, campo e área urbana. 2 – 5 % |
|  | <b>MP - V</b>           | Superfícies Dissecadas com relevo ondulado  | Campo 5 – 10 % e > 20% (encostas)     |
|  | <b>MP - VI</b>          | Superfícies Deprimidas com relevo ondulado  | Cerrado e campo 5 – 10 %              |

A escolha das microbacias levou em consideração áreas urbanizadas que possuem dados de curvas de nível de 1 metro (Geoportal, 2016), com rede de drenagem fluvial documentada, sendo estes dados também obtidos do site Geoportal de cartas na escala 1:1.000 no DF (Figura 3.2). As cartas na escala de 1:1.000 foram desenvolvidas pelo Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD) e é referência oficial e obrigatória para todo e qualquer trabalho de topografia, cartografia, demarcação, estudos de engenharia e de urbanismo no DF (Decreto Distrital n.º 4.008/1977).

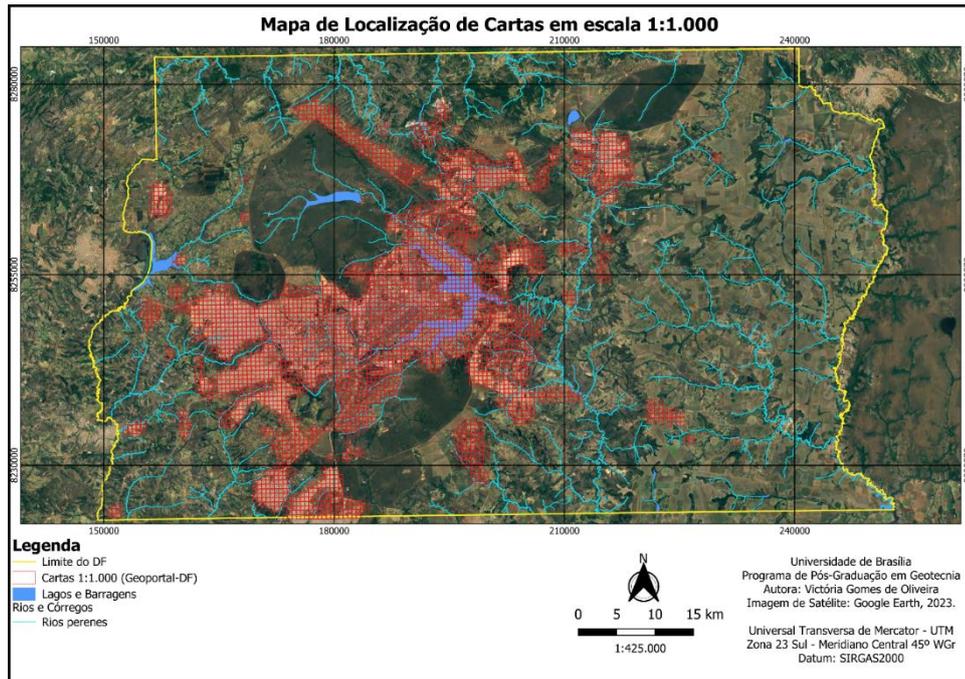


Figura 3.2 – Mapa de localização das Cartas em escala 1:1.000 no DF.

Além disso, optou-se por utilizar áreas que abrangem o maior número possível de compartimentos geomorfo-pedológicos para maior compreensão de suscetibilidade hidrológica, segundo as características geomorfométricas do relevo, de ocupação antrópica e localizadas em determinadas Regiões Administrativas do Distrito Federal (Figuras 3.3 e 3.4).

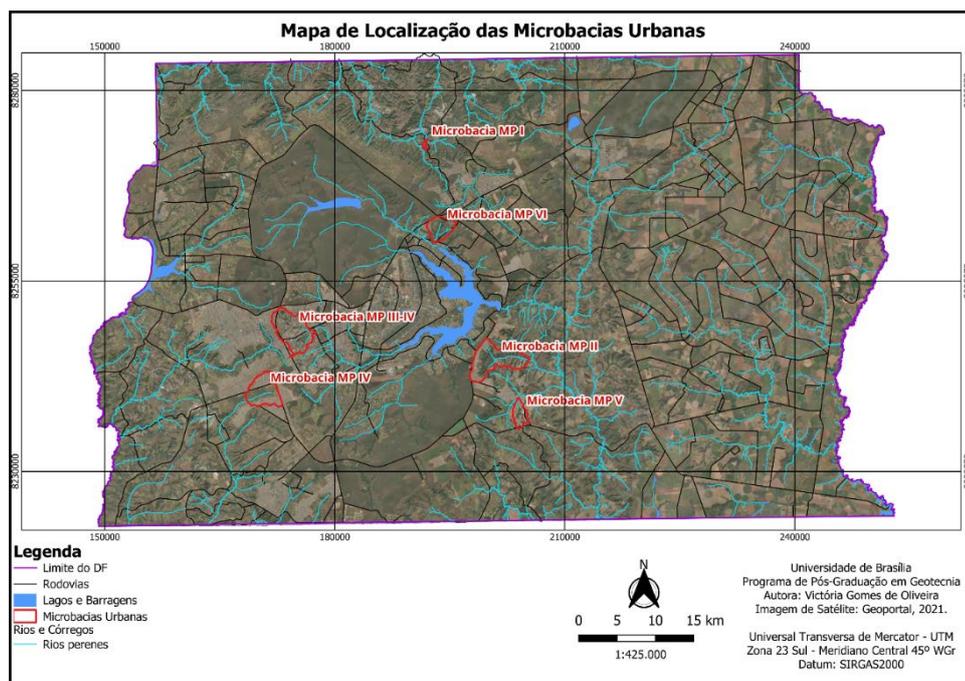


Figura 3.3 – Mapa de localização e microbacias do estudo no DF.

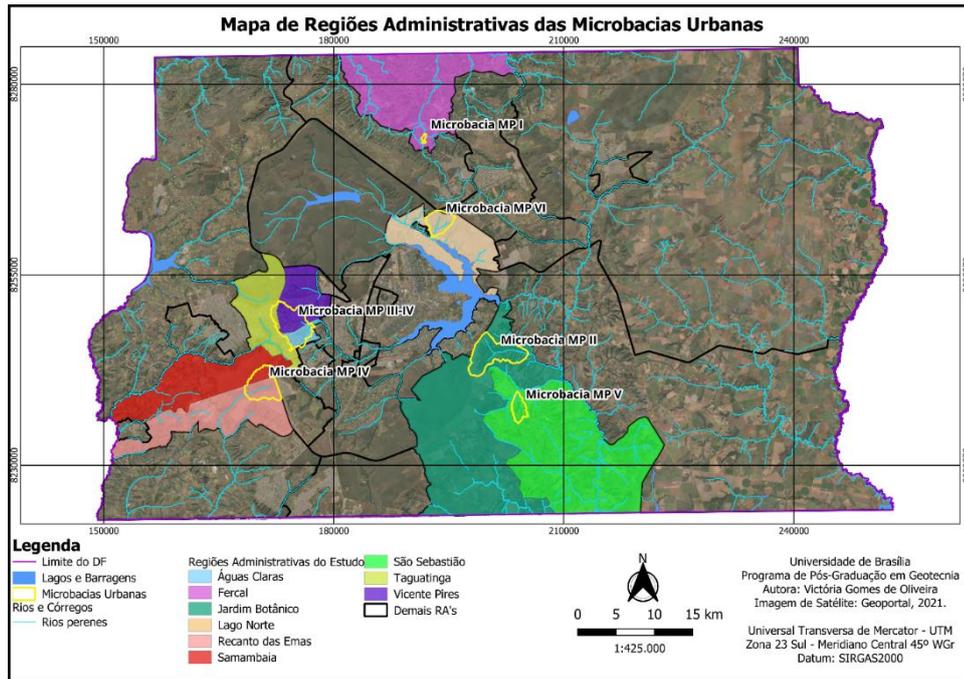


Figura 3.4 - Mapa de Regiões Administrativas e microbacias do estudo.

Assim, a metodologia aplicada seguiu as fases de levantamento de dados e diagnóstico hidrológico quanto ao uso e ocupação do solo das áreas analisadas, levando em consideração as orientações propostas pela Lei nº 12.608/2012, que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Silva Junior, 2019).

O fluxograma a seguir apresenta, de forma resumida, a representação esquemática da execução da metodologia nas etapas principais: montagem da base cartográfica, processamento de MDE, processamento de dados no modelo *HAND*, análise das curvaturas do relevo e operações cartográficas (Figura 3.5).

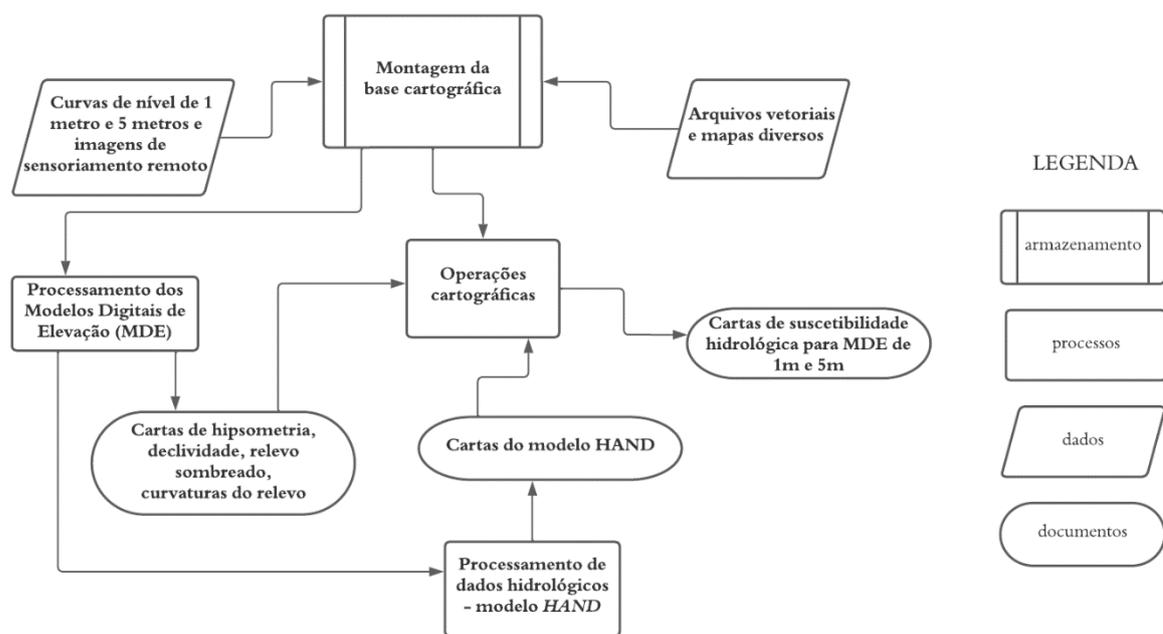


Figura 3.5 – Metodologia aplicada do mapeamento hidrológico.

A delimitação das microbacias foi feita no *software* QGIS 3.30 com o dado de entrada do Modelo Digital de Elevação (MDE) de 5 metros em duas etapas: foi utilizada a ferramenta GRASS *r.watershed*, acoplada ao *software* QGIS 3.30, para gerar dados *raster* como fluxo acumulado, meias-bacias, localização de cursos hídricos e a direção da drenagem das áreas em estudo e, selecionado o ponto para ser o exutório da bacia, a delimitação é gerada a partir da ferramenta GRASS *r.water.outlet*. Esse processo ocasionou as seguintes microbacias de análise (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Tamanho em hectares das microbacias do estudo.

|                    |                  | Área em hectares (ha) |
|--------------------|------------------|-----------------------|
| <b>Microbacias</b> | <b>MP I</b>      | 44,14                 |
|                    | <b>MP II</b>     | 2.181,97              |
|                    | <b>MP III-IV</b> | 2.016,98              |
|                    | <b>MP IV</b>     | 1.437,09              |
|                    | <b>MP V</b>      | 518,78                |
|                    | <b>MP VI</b>     | 842,32                |

Por tratarem-se de bacias com tamanhos visivelmente distintos, para melhor tradução dos resultados obtidos, foi feita também a análise percentual para fins de comparação. Os mapas das microbacias do estudo em escala aproximada seguem abaixo para visualização (Figura 3.6).

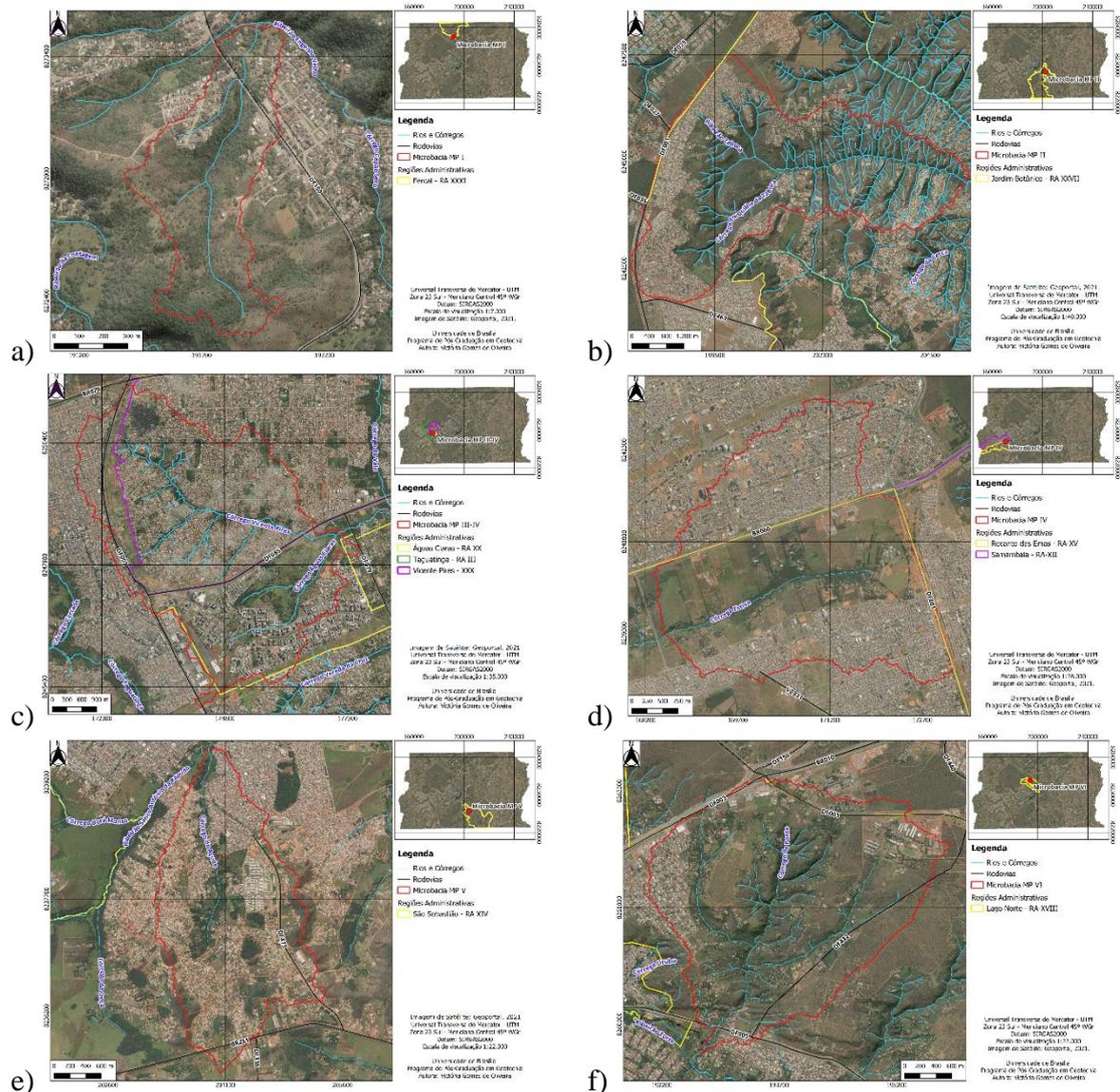


Figura 3.6- Mapas de localização das áreas de estudo. (a) Localização da microbacia MP I; (b) Localização da microbacia MP II; (c) Localização da microbacia MP III-IV; (d) Localização da microbacia MP IV; (e) Localização da microbacia MP V; e (f) Localização da microbacia MP VI.

### 3.3 COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOPEDOLÓGICA

Com base nas considerações descritas na revisão bibliográfica, utilizou-se da metodologia aplicada por Arcaya (2007) para escolha de áreas de interesse segundo a compartimentação geomorfopedológica do Distrito Federal na escala 1:100.000. Ao utilizar a abordagem geomorfopedológica, leva-se em consideração uma análise integrada do meio físico com características topográficas e de uso e ocupação do solo.

As áreas de estudo em diferentes compartimentos geomorfopedológicos diversifica a análise de suscetibilidade hidrológica ao considerar diversas características do meio físico, ao padrão de ocupação urbana e ao relevo.

### **3.4 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO**

Conforme Valeriano (2010) apud Ahualli (2019), os dados topográficos desempenham um papel fundamental na compreensão e descrição das características das unidades de paisagem. Essas informações são frequentemente requisitadas para análises ambientais e para apoiar a execução de projetos de engenharia. Isso ocorre porque esses projetos normalmente necessitam da medição e cartografia de parâmetros de relevo, como altitude, inclinação, curvaturas nas direções vertical e horizontal, bem como a orientação das vertentes, entre outros parâmetros. O processo de criação dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) a partir de curvas de nível, em sua essência, envolve a digitalização dos dados topográficos e sua subsequente interpolação, como indicado por Valeriano (2010).

Para elaboração dos modelos digitais de elevação das áreas, foram utilizados dados de curvas de nível de metro em metro (2016) e de 5 metros (2009). A partir da interpolação dos dados planimétricos por meio de interpolação ponderada pela distância inversa (IDW), foram gerados os MDE em formato TIFF (*raster*) no *software* ArcGIS 10.8 pela ferramenta *Topo to Raster*, da extensão *3D Analyst Tool*, com células de 1x1 metro e 5x5 metros respectivamente.

A função *Topo to Raster*, empregada para a obtenção dos MDEs, foi desenvolvida com base nos trabalhos de Hutchinson (1998, 1999). Essa técnica de interpolação permite a utilização de arquivos como curvas de nível, cursos de rios e delimitações de bacias, durante o processo de interpolação, o que reduz possíveis erros decorrentes do método. Assim, foi projetada com o objetivo específico de converter dados vetoriais em modelos hidrológicos de elevação do terreno precisos.

### **3.5 HIPSOMETRIA**

A hipsometria desempenha um papel crucial na avaliação geomorfológica da altitude do relevo e na compreensão de processos como alagamentos e inundações. Ela envolve a categorização do terreno em diferentes classes de elevação em relação ao nível do mar. O mapa hipsométrico é gerado a partir da reclassificação do Modelo Digital do Elevação (MDE).

### **3.6 DECLIVIDADE**

A declividade representa o ângulo de inclinação da superfície do relevo em relação ao plano horizontal. Esse atributo descreve a inclinação das encostas e vertentes, desempenhando um papel importante na regulação do equilíbrio entre o escoamento superficial e a infiltração no solo. Para calcular a inclinação, utilizou-se a ferramenta Declividade da Análise Raster no QGIS 3.30, a partir dos dados de elevação do Modelo Digital de Elevação (MDE) de 1m e 5m das áreas de estudo.

A declividade então foi classificada em classes de declividade de 0 a 2%; 2 a 5%, 5 a 8%, 8 a 15%, 15 a 30%, 30 a 50% e maior que 50% para facilitar inferências de zonas de acúmulo de águas superficiais e, conseqüentemente, áreas suscetíveis a inundação e alagamento. Estes intervalos foram definidos baseados em intervalos propostos por Da Silva e Carvalho (2006).

### **3.7 CURVATURA DO TERRENO**

Dentre os fatores ambientais que aumentam a suscetibilidade de inundações, conforme identificado por Bitar et al. (2014), encontra-se a curvatura do terreno. Essa característica é particularmente relevante devido à sua utilidade na identificação de padrões de drenagem, e na regulação do fluxo de água e aceleração/desaceleração do escoamento. De acordo com o autor, as curvaturas do terreno podem ser mapeadas por meio de técnicas de geoprocessamento usando MDE e a resolução dos modelos desempenha um papel fundamental nesse processo.

Conforme Batista (2014), a curvatura vertical é a observação da vertente ao longo da sua linha de fluxo, enquanto que a curvatura horizontal é observada nas mudanças da vertente ao longo das curvas de nível. Segundo a ESRI (2019), a curvatura vertical (perfil), apresentada na Figura 3.6, é calculada paralela a inclinação e descreve a direção do declive máximo, impactando a aceleração e desaceleração do fluxo na superfície. Valores negativos (A) indicam que a superfície é convexa, valores positivos (B) indicam que a célula é côncava e valores nulos (C) indicam que a superfície é retilínea.

Quanto à curvatura horizontal (plana), conforme mostrado na Figura 3.8, é determinada perpendicularmente à direção do declive máximo, influenciando a convergência e divergência dos fluxos na superfície. Um valor positivo (indicado por A) denota uma superfície divergente, enquanto um valor negativo (indicado por B) sinaliza uma superfície convergente. Quando o valor é nulo, isso significa que a superfície é planar naquela área (indicado por C). De acordo

com Valeriano e Albuquerque (2010) apud Batista (2014), a curvatura horizontal também está relacionada à orientação da encosta, pois é calculada com base nas direções dos declives adjacentes, desempenhando um papel crucial na compreensão de questões urbanas, como o posicionamento de infraestruturas de drenagem e no mapeamento de áreas suscetíveis a alagamentos.

Essas duas curvaturas foram obtidas por meio da ferramenta *Curvature* do *ArcToolBox*, que calcula a derivada segunda da superfície de entrada célula por célula. Os limiares de valores adotados para curvaturas planares e retilíneas foram estimados em torno do valor nulo com análise visual dos resultados.

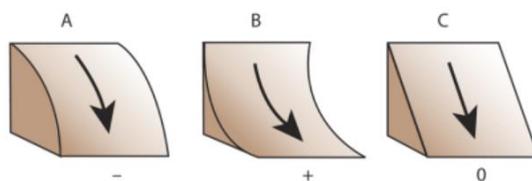


Figura 3.7 - Curvatura vertical - Profile Curvature – (ESRI, 2019).

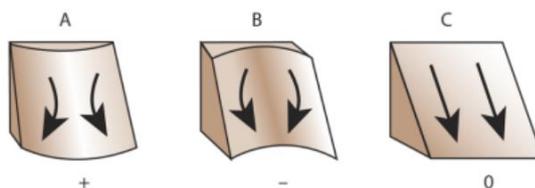


Figura 3.8 – Curvatura horizontal - Planform Curvature - (ESRI, 2019).

A Figura 3.9 apresenta a combinação das classes de curvatura que, de acordo com Valeriano (2008a), descrevem as formas de relevo e que influenciam a morfologia do terreno, características hidrológicas, pedológicas, o transporte de sedimentos e aspectos ecológicos. O autor identifica que os extremos das combinações indicam superfícies côncavas convergentes, onde ocorre a concentração máxima de fluxo e acumulação de água, resultando na maior suscetibilidade a alagamentos e inundações. Por outro lado, nas superfícies convexas divergentes, ocorre a dispersão máxima do fluxo, tornando-as mais propensas a movimentos de massa e enxurradas. As combinações intermediárias refletem características hidrológicas que dependem das interações entre os efeitos individuais em diferentes intensidades.

Curvatura da Vertente Horizontal (plano) – Ortogonal a curva de nível e ao declive

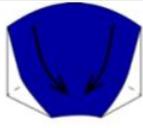
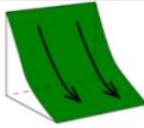
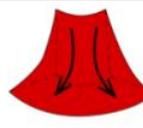
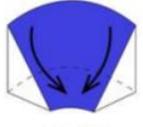
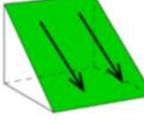
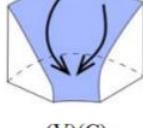
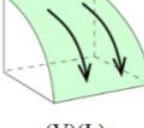
|                  | Convergente(-)(C)   | Planar (0)(L)  | Divergente (+)(V)   |
|------------------|---|--|---|
| Côncava(+)(C)    | <br>(CC)   | <br>(CL)   | <br>(+)(V) |
| Retilínea (0)(L) | <br>(L)(C) | <br>(L)(L) | <br>(L)(V) |
| Convexa (-)(V)   | <br>(V)(C) | <br>(V)(L) | <br>(V)(V) |

Figura 3.9 - Combinações das curvaturas e suas respectivas formas de relevo. Fonte: modificada de Ahualli (2019).

### 3.8 MODELO HAND

Como visto anteriormente o modelo HAND é um descritor de terreno representado por uma superfície altimétrica referenciada ao canal de drenagem mais próximo, após a normalização da elevação do Modelo Digital de Elevação (Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2011).

Conforme discutido por Nobre et al. (2015), a normalização tem o efeito de transformar o fluxo ao longo do rio em direção ao mar, representado no MDE, em fluxos laterais direcionados, alinhados com a topografia do modelo, orientando-os em direção aos rios como referência e tornando-os uniformes e fixados em zero. Quando se considera a aplicação do HAND na criação de mapas de inundação, é fundamental compreender que o modelo opera sob uma única condição: o equilíbrio de pressão hidrostática lateral e isso resulta em uma superfície virtual plana e horizontal.

A obtenção do modelo HAND envolve a aplicação de técnicas de geoprocessamento sobre o MDE, considerando aspectos matemáticos e hidrológicos. A construção do modelo é um processo que se divide em duas etapas, sendo que a primeira visa corrigir as inconsistências nos valores altimétricos da matriz topográfica, determinando as direções de escoamento e delimitando o canal de drenagem (Figura 3.10). Na segunda etapa, as alturas HAND são calculadas por meio do processamento dos produtos obtidos na primeira etapa (Figura 3.11).

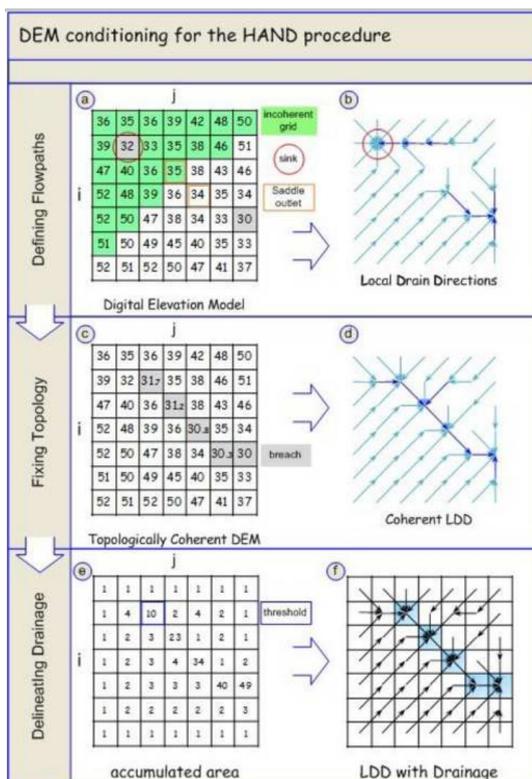


Figura 3.10 - Primeira etapa metodológica do modelo HAND. Fonte: Nobre et al. (2011).

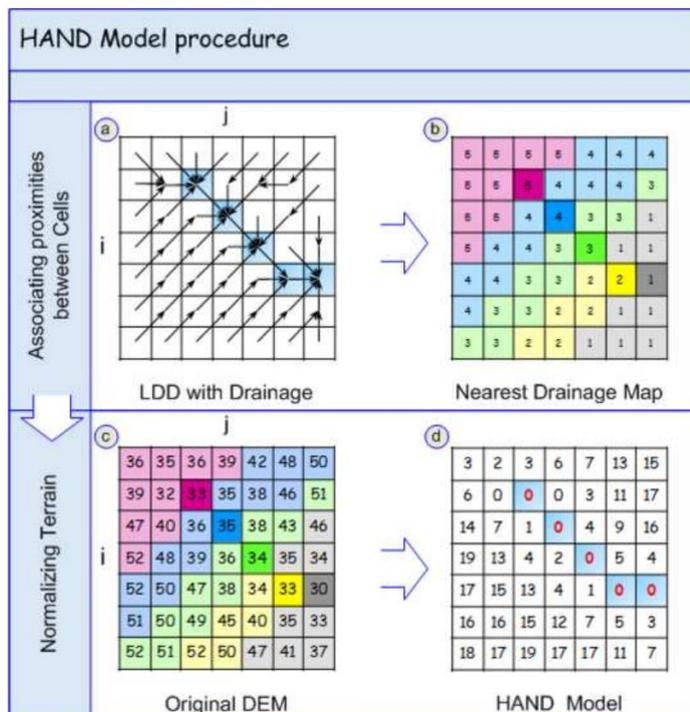


Figura 3.11 - Segunda etapa metodológica do modelo HAND. Fonte: Nobre et al. (2011).

De acordo com Nobre et al. (2011), o cerne da obtenção do modelo HAND reside na construção adequada dos canais de drenagem, que são derivados das direções do fluxo hidrológico. Essas

redes de escoamento desempenham um papel crucial na normalização das altitudes das células da grade em relação ao canal mais próximo. O processo começa por identificar áreas inconsistentes no MDE através de uma matriz de fluxo denominada *Local Drain Directions* (LDD), sendo a direção de fluxo, e essa metodologia atribui a cada célula da grade uma direção de fluxo, representando a rede de drenagem do modelo.

Uma vez que as áreas inconsistentes são identificadas, é feita a busca por possíveis candidatos, pixels geralmente localizados nas margens das áreas irregulares, que possam servir como pontos de saída para o fluxo de água. Entre os pixels, é escolhido aquele com a menor elevação (Figura 3.9a), representado pelos pixels em rosa (com altitudes de 35 e 34 metros).

Com a matriz de direção de fluxo (LDD) (Figura 3.9d), a rede de drenagem do MDT é definida usando o algoritmo *Accumulated Flow* (ACC), sendo o acúmulo de fluxo ou área de contribuição. Esse método calcula, para cada célula da matriz, quantas células direcionam o fluxo para a célula em questão, com base na LDD corrigida (Figura 3.9e). Isso significa que o fluxo se move em direção a células situadas em elevações mais baixas, acumulando mais pixels e formando uma superfície de contribuição de escoamento (Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2011).

A construção do modelo HAND se inicia quando a rede de drenagem (células em azul na Figura 3.9a) e o *raster* LDD (direções de fluxo na Figura 3.10a) são usados para atribuir espacialmente os pixels mais próximos às células representadas pelo canal. Em outras palavras, como mostrado na Figura 3.10b, os números dos pixels em tons claros indicam a célula do canal de drenagem (tons escuros) mais próxima.

Assim, ocorre a normalização das altitudes do terreno em relação ao MDE original e ao canal de drenagem estabelecido (Figura 3.10c). Para isso, as células correspondentes ao canal são atribuídas ao valor zero (Figura 3.10d), representando a referência do modelo HAND. Isso permite o cálculo das altitudes normalizadas para toda a grade. A altura HAND de cada célula é a elevação original do pixel subtraída da elevação original do pixel em relação ao canal de drenagem mais próximo (Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2011). Dessa forma, é obtida uma superfície que representa os potenciais gravitacionais em relação ao rio. De forma simplificada, as altitudes HAND indicam a possibilidade de inundação, sendo que células com elevações mais baixas estão mais susceptíveis a eventos hidrológicos, enquanto elevações mais altas

indicam uma suscetibilidade menor, devido à maior distância vertical em relação ao rio e, portanto, uma menor probabilidade de inundação.

### 3.9 SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO

A metodologia para avaliação da suscetibilidade à inundação consistiu na adaptação dos trabalhos de Lollo et al. (2013) e Silva et al. (2013). Assim, foi feita a combinação de quatro parâmetros: declividade, formas de vertente com análises individuais para curvatura horizontal vertical e distância vertical à drenagem mais próxima. Esta última dada pelo modelo normalizado de terreno, modelo HAND - *Height Above the Nearest Drainage* (Nobre et al. (2011); Nobre et al. (2015)).

Para a análise de suscetibilidade das formas do terreno ou vertente, as curvaturas vertical e horizontal foram obtidas com o auxílio da ferramenta *Curvature* no ArcGis 10.8. O produto final da associação da curvatura vertical (côncavo, retilíneo e convexo) e curvatura horizontal (convergente, planar e divergente) estabelece dez classes distintas para as formas do terreno (Valeriano, 2008a).

Os processos de modelagem, que compõe os mapas de suscetibilidade à inundação, contemplaram as seguintes etapas (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Etapas de execução da análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a inundações (adaptado de Lollo et al., 2013 e Silva et al., 2013).

| <b>Etapas da Modelagem de Inundação</b>    |  |  |   |
|--|--|--|---|
| <b>1. Classificação da Declividade</b>     | <b>2. Classificação das Formas de Vertente</b>   | <b>3. Classificação do HAND</b>  | <b>4. Integração dos Parâmetros</b>   |
| <b>Valor 5 – declividade menor que 2%.</b> | Para a curvatura vertical, a classificação ocorre com valor 3 para curvatura côncava, valor 2 para retilínea e valor 1 para convexa. | Valor 3 para até 5 m (inundação); valor 2 para o intervalo entre 5 e 15 m (transição), valor 1 para o intervalo entre 15 e 50 m (encostas) e valor 0 para mais de 50 m (topos de morro). | Os <i>rasters</i> são somados, resultando em um produto que indica áreas mais ou menos suscetíveis à inundação. |
| <b>Valor 4 - declividade entre 2 a 5%.</b> |  |  |   |
| <b>Valor 3 - declividade entre 5 a 8%.</b> | Para a curvatura horizontal, a classificação ocorre  |  |   |

| Etapas da Modelagem de Inundação     |  |                          |                              |
|--------------------------------------|--|--------------------------|------------------------------|
| 1. Classificação da Declividade      | 2. Classificação das Formas de Vertente  | 3. Classificação do HAND | 4. Integração dos Parâmetros |
| Valor 2 - declividade entre 8 a 15%. | com valor 3 para curvatura convergente, valor 2 para planar e valor 1 para divergente. |                          |                              |
| Valor 1 - declividade maior que 15%. |  |                          |                              |

Com auxílio do *software* QGIS 3.30, os *rasters* foram reclassificados de acordo com os valores estabelecidos de forma crescente para a suscetibilidade de ocorrência de processos de inundação. Após a reclassificação, as camadas são somadas por meio de Calculadora *Raster* no QGIS, gerando um intervalo de valores de 3 a 14 para a análise de suscetibilidade à inundação. A esses valores são atribuídas as classificações de suscetibilidade à inundação, como mostra a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Classificação da suscetibilidade a inundações de acordo com o valor atribuído.

| VALOR         | 3 a 6       | 7 e 8 | 9 e 10 | 11 e 12 | 13 e 14    |
|---------------|-------------|-------|--------|---------|------------|
| CLASSIFICAÇÃO | Muito Baixa | Baixa | Média  | Alta    | Muito Alta |

### 3.10 SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO

A metodologia para avaliação da suscetibilidade ao alagamento consistiu, assim como na suscetibilidade à inundação, na adaptação do trabalho de Lollo et al. (2013) atrelado aos padrões de ocupação e cobertura vegetal. Assim, foi feita a combinação de quatro parâmetros: declividade, formas de vertente com análises individuais para curvatura horizontal e vertical e uso e cobertura do solo, com dados disponibilizados pelo Geoportal DF.

Os processos de modelagem, que compõe os mapas de suscetibilidade ao alagamento, contemplaram as seguintes etapas (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Etapas de execução da análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a alagamentos (adaptado de Lollo et al., 2013).

| <b>Etapas da Modelagem de Alagamento</b>    |  |   |   |
|---|--|---|---|
| <b>1. Classificação da Declividade</b>      | <b>2. Classificação das Formas de Vertente</b>   | <b>3. Classificação do Uso e Cobertura do Solo</b>  | <b>4. Integração dos Parâmetros</b>   |
| <b>Valor 5 – declividade menor que 2%.</b>  | Para a curvatura vertical, a classificação ocorre com valor 3 para curvatura côncava, valor 2 para retilínea e valor 1 para convexa.       | Valor 3 para áreas construídas, sistema viário e focos de água.   | Os <i>rasters</i> são somados, resultando em um produto que indica áreas mais ou menos suscetíveis à inundação. |
| <b>Valor 4 - declividade entre 2 a 5%.</b>  |  | Valor 2 para áreas agrícolas e solo exposto.  |   |
| <b>Valor 3 - declividade entre 5 a 8%.</b>  | Para a curvatura horizontal, a classificação ocorre com valor 3 para curvatura convergente, valor 2 para planar e valor 1 para divergente. | Valor 1 para áreas com cobertura vegetal como formações campestre, florestal, savânica e reflorestamento. |   |
| <b>Valor 2 - declividade entre 8 a 15%.</b> |  |   |   |
| <b>Valor 1 - declividade maior que 15%.</b> |  |   |   |

Com auxílio do *software* QGIS 3.30, os *rasters* foram reclassificados de acordo com os valores estabelecidos de forma crescente para a suscetibilidade de ocorrência de processos de alagamento. Após a reclassificação, as camadas são somadas por meio de Calculadora *Raster* no QGIS, gerando um intervalo de valores de 4 a 14 para a análise de suscetibilidade ao alagamento. A esses valores são atribuídas as classificações de suscetibilidade à inundação, como mostra a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Classificação da suscetibilidade a alagamentos de acordo com o peso atribuído.

| <b>VALOR</b>         | <b>4 a 6</b> | <b>7 e 8</b> | <b>9 e 10</b> | <b>11 e 12</b> | <b>13 e 14</b> |
|----------------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>CLASSIFICAÇÃO</b> | Muito Baixa  | Baixa        | Média         | Alta           | Muito Alta     |

## 4 CARTAS BÁSICAS E CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Nesse capítulo será apresentada a caracterização das microbacias urbanas (áreas de estudo) quanto aos aspectos relevantes do meio físico e antrópico.

### 4.1 ÁREA 1 – MICROBACIA MP I

#### 4.1.1 HIPSOMETRIA

A Figura 4.1 apresenta as Cartas de Hipsometria da microbacia MP I para curvas de nível de 5m e 1m. É possível observar que as cotas altimétricas variam de 856 a 966 metros para o MDE 5m e variam de 858 a 966 metros para o MDE 1m, sendo fatiados em intervalos de 10 metros representados na Tabela 4.1.

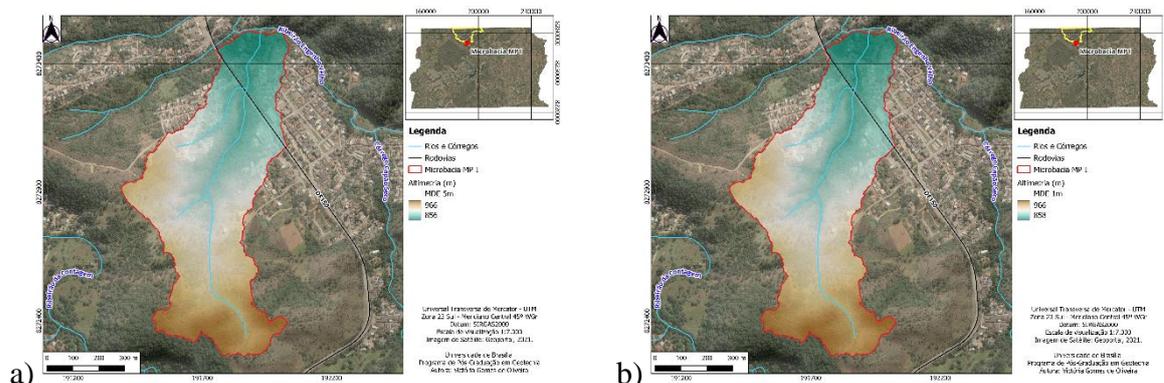


Figura 4.1 - Carta hipsométrica da microbacia MP I. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m.

Tabela 4.1 - Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP I.

| Altimetria<br>(m) | MDE 5m       |             | MDE 1m       |             | Diferença        |                 |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|
|                   | Área<br>(ha) | Porcentagem | Área<br>(ha) | Porcentagem | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| < 860             | 1,68         | 3,81%       | 1,50         | 3,40%       | 0,18             | -10,71%         |
| 860 - 870         | 1,78         | 4,03%       | 1,90         | 4,30%       | 0,12             | 6,74%           |
| 870 - 880         | 3,27         | 7,41%       | 3,44         | 7,79%       | 0,17             | 5,20%           |
| 880 - 890         | 4,16         | 9,42%       | 4,35         | 9,86%       | 0,19             | 4,57%           |
| 890 - 900         | 4,54         | 10,29%      | 4,17         | 9,45%       | 0,37             | -8,15%          |
| 900 - 910         | 5,37         | 12,17%      | 5,42         | 12,28%      | 0,05             | 0,93%           |
| 910 - 920         | 5,05         | 11,44%      | 5,05         | 11,44%      | 0                | 0,00%           |
| 920 - 930         | 5,95         | 13,48%      | 5,96         | 13,50%      | 0,01             | 0,17%           |
| 930 - 940         | 4,13         | 9,36%       | 4,11         | 9,31%       | 0,02             | -0,48%          |
| 940 - 950         | 2,91         | 6,59%       | 2,88         | 6,52%       | 0,03             | -1,03%          |
| 950 - 960         | 3,75         | 8,50%       | 3,88         | 8,79%       | 0,13             | 3,47%           |
| > 960             | 1,55         | 3,51%       | 1,48         | 3,35%       | 0,07             | -4,52%          |

| Altimetria<br>(m) | MDE 5m       |             | MDE 1m       |             | Diferença        |                 |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|
|                   | Área<br>(ha) | Porcentagem | Área<br>(ha) | Porcentagem | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| <b>Total</b>      | 44,14        | 100,00%     | 44,14        | 100,00%     | -                | -               |

A partir dos modelos de elevação gerados, foi realizado o processo de filtragem dos *rasters* utilizando a ferramenta *Filter*, em *Analyst Tool*, no ArcGIS, visando criar produtos mais consistentes e eliminar erros sistemáticos que poderiam resultar em variações abruptas nos dados topográficos. Uma das principais diferenças entre os MDEs da microbacia MP I é a delimitação mais precisa dos cursos d'água e a melhor visualização dos contornos topográficos, como morros e escarpas, no modelo de maior precisão.

Observam-se pequenas diferenças absolutas e relativas na comparação entre os MDEs 5m e 1m. Há uma retração de áreas nas extremidades da altimetria do MDE 5m para o MDE 1m, com pequenas variações ao longo da microbacia. Por se tratar de uma área com 44,14 hectares, nenhuma variação altimétrica ultrapassou 0,4 hectares, traduzindo pequenas variações em relação à área total da microbacia MP I. A Figura 4.2 apresenta os histogramas dos MDE 5m e 1m para melhor visualização do resultado percentual.

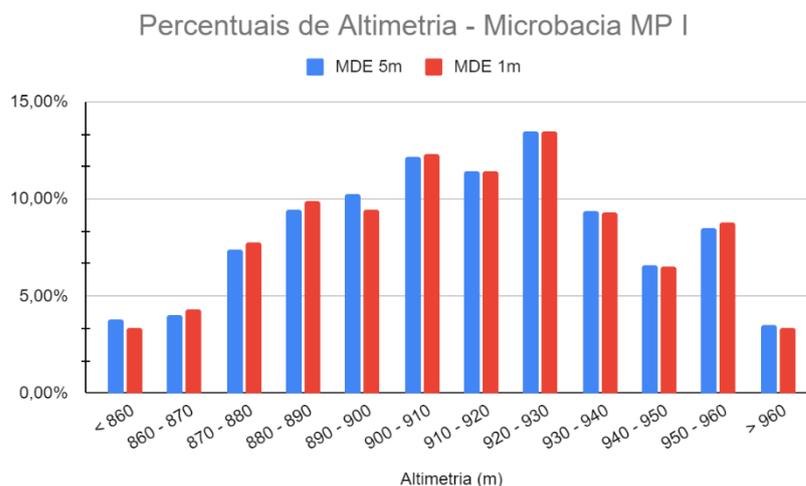


Figura 4.2 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP I.

O primeiro produto gerado a partir do modelo altimétrico é o *raster* de Relevô Sombreado. As Cartas de Relevô Sombreado (Figura 4.3), apresentam as diferenças visuais de nitidez entre o MDE 5m e o MDE 1m. Vale ressaltar que o Relevô Sombreado é uma técnica para visualizar o terreno com base em uma fonte de luz, levando em consideração a declividade e o aspecto da superfície de elevação. Por se tratar de um método qualitativo para a visualização da topografia,

forneceu subsídios para interpretação visual de resultados numéricos como declividade e curvatura.

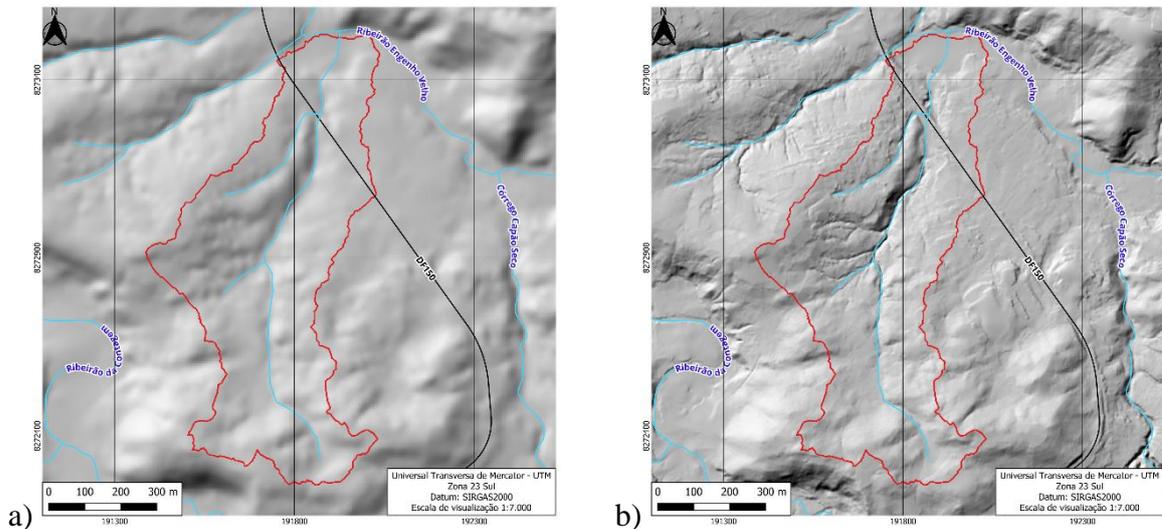


Figura 4.3 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP I. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m.

#### 4.1.2 DECLIVIDADE

A Figura 4.4 apresenta as Cartas de Declividade da microbacia MP I para curvas de nível de 5m e 1m conforme delimitado por Da Silva e Carvalho (2006). Também foi feito o gráfico quantitativo comparativo para cada um dos MDEs para identificar a distribuição de áreas e suas respectivas porcentagens na influência dos valores atribuídos para a análise de inundações e alagamentos, como observado na Tabela 4.2 e Figura 4.5.

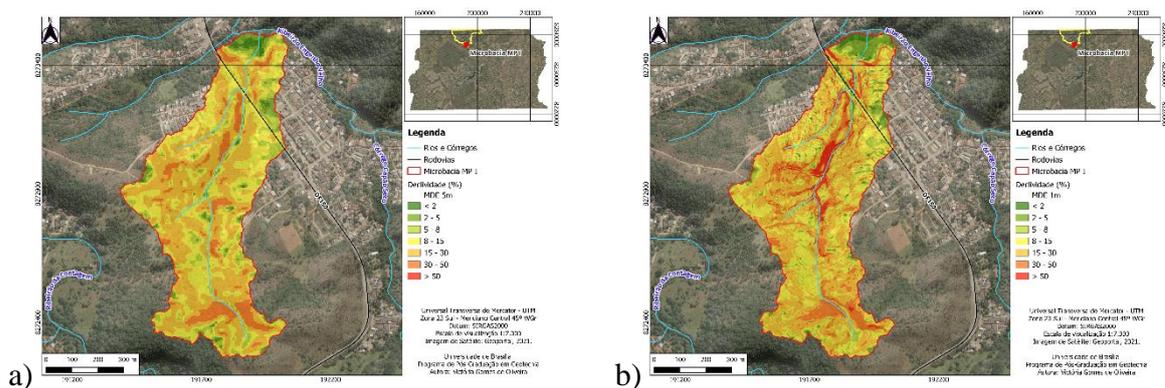


Figura 4.4 - Carta de declividade da microbacia MP I. (a) Declividade do MDE de 5m e (b) Declividade do MDE de 1m.

Tabela 4.2 – Classes de declividade da microbacia MP I.

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 2             | 0,57      | 1,29%       | 0,74      | 1,68%       | 0,17          | 29,82%       |
| 2 - 5           | 1,83      | 4,15%       | 2,40      | 5,44%       | 0,57          | 31,15%       |
| 5 - 8           | 3,95      | 8,95%       | 3,39      | 7,68%       | 0,56          | -14,18%      |
| 8 - 15          | 15,14     | 34,30%      | 12,57     | 28,48%      | 2,57          | -16,97%      |
| 15 - 30         | 18,67     | 42,30%      | 17,42     | 39,47%      | 1,25          | -6,70%       |
| 30 - 50         | 3,97      | 8,99%       | 5,99      | 13,57%      | 2,02          | 50,88%       |
| > 50            | 0,01      | 0,02%       | 1,63      | 3,69%       | 1,62          | 16200,00%    |
| <b>Total</b>    | 44,14     | 100,00%     | 44,14     | 100,00%     | -             | -            |

Para a microbacia MP I, as diferenças na declividade ocorrem, principalmente, na diminuição de áreas de declividades intermediárias (5 a 8%, 8 a 15% e 15 a 30%) e aumento significativo de declividades suaves (menores que 5%) e onduladas a fortes (maiores que 30%). Os resultados mostram que a precisão dos MDEs afeta diretamente a declividade do terreno para os modelos de elevação avaliados, ainda que as classes com maiores áreas ainda sejam de 8 a 15% (15,14 ha no MDE 5m e 12,57 ha no MDE 1m) e 15 a 30% (18,67 ha no MDE 5m e 17,42 ha no MDE 1m) para ambos MDEs.

Em termos absolutos, a diferença não ultrapassa 2,60 hectares, porém a diferença relativa apresenta porcentagens consideravelmente mais altas para os intervalos 30 a 50% e maior que 50% de declividade do MDE 1m em relação ao MDE 5m.

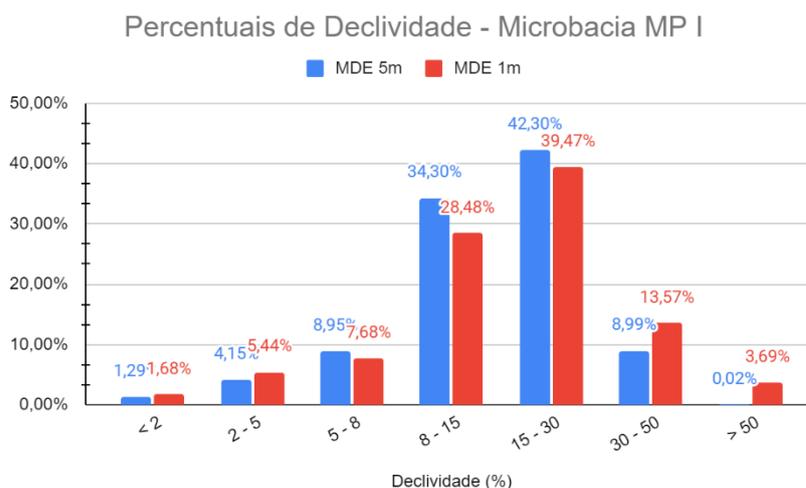


Figura 4.5 - Gráfico de distribuição da microbacia MP I em (%) por intervalos da declividade.



Como resultado, foram selecionados os intervalos de -0,20/m a +0,23/m para a classe de vertentes planares e -0,31/m a +0,35/m para a classe de vertentes retilíneas no MDE 5m. Já para o MDE 1m, foram selecionados os intervalos de -0,29/m a +0,29/m para a classe de vertentes planares e -0,31/m a +0,35/m para a classe de vertentes retilíneas.

Constatou-se o alargamento da faixa de limiars no MDE 1m com os testes de curvatura. Ao aplicar os mesmos limiars do MDE 5m, ocorre o aparecimento de *pixels* de curvatura divergente/convergente em áreas que, na análise visual, não correspondem à realidade. Contudo, esse procedimento acarreta em aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas. A Tabela 4.3 apresenta as áreas obtidas e seus respectivos percentuais para cada tipo de curvatura na microbacia MP I.

Tabela 4.3 - Classificação das formas de vertente para a microbacia MP I.

| Forma de Vertente    | MDE 5m      |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |         |
|----------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|---------|
|                      | Área (ha)   | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |         |
| Curvatura Horizontal | Divergente  | 15,95       | 36,14%    | 14,1        | 31,94%        | 1,85         | -11,60% |
|                      | Planar      | 15,91       | 36,04%    | 19,15       | 43,38%        | 3,24         | 20,36%  |
|                      | Convergente | 12,28       | 27,82%    | 10,89       | 24,67%        | 1,39         | -11,32% |
| <b>Total</b>         | 44,14       | 100,00%     | 44,14     | 100,00%     | -             | -            |         |
| Curvatura Vertical   | Convexa     | 11,77       | 26,67%    | 10,56       | 23,92%        | 1,21         | -10,28% |
|                      | Retilínea   | 20,91       | 47,37%    | 23,55       | 53,35%        | 2,64         | 12,63%  |
|                      | Côncava     | 11,46       | 25,96%    | 10,03       | 22,72%        | 1,43         | -12,48% |
| <b>Total</b>         | 44,14       | 100,00%     | 44,14     | 100,00%     | -             | -            |         |

A curvatura horizontal convergente foi observada em 27,82% da área do MDE 5m em comparação com 24,67% no MDE 1m. Já a curvatura vertical côncava foi observada em 25,96% da área do MDE 5m em comparação com 22,72% no MDE 1m. Essas áreas foram classificadas com suscetibilidade alta à inundação e ao alagamento (valor 3).

As formas de vertente planar e retilínea foram definidas como valor 2 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 36,04% da área do MDE 5m comparativamente à 43,38% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal planar, e em 47,37% da área do MDE 5m comparativamente à 53,35% da área do MDE 1m, para curvatura vertical retilínea.

Percebe-se que, para o MDE 1m, o modelo tem um aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas por apresentar mais trechos desse tipo de curvatura entre as classes convergentes e divergentes e as classes côncava e convexa, respectivamente. Isso provavelmente ocorre pelo tamanho original do *pixel*, uma vez que os *pixels* no MDE 1m são 25 vezes menores que no MDE 5m.

As formas de vertente divergente e convexa foram definidas como valor 1 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 36,14% da área do MDE 5m comparativamente à 31,94% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal divergente, e em 26,67% da área do MDE 5m comparativamente à 23,92% da área do MDE 1m, para curvatura vertical convexa. As Figuras 4.7 e 4.8 sintetizam de forma comparativa o percentual de curvatura horizontal e vertical, respectivamente, para a análise de formas de vertente nesta microbacia.

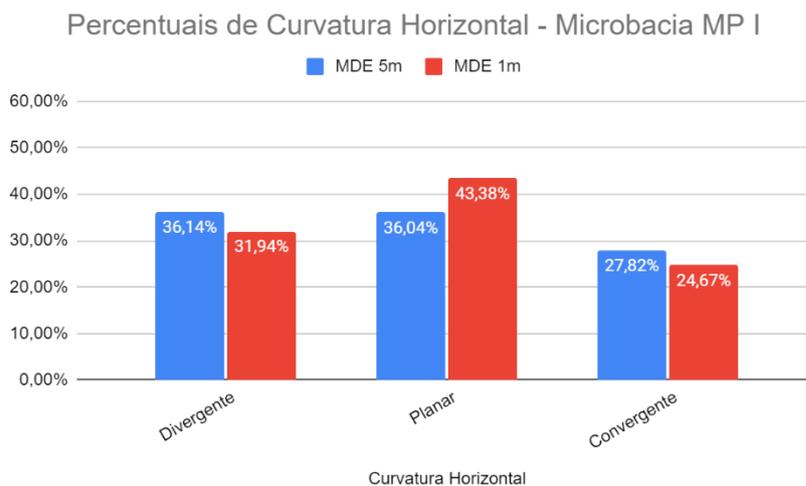


Figura 4.7 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP I.

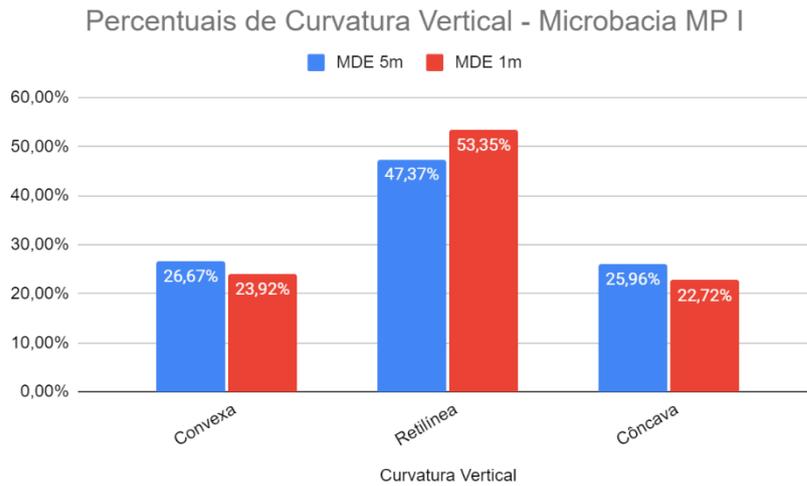


Figura 4.8 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP I.

#### 4.1.4 MODELO HAND

As Cartas do Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage - Altura Acima da Drenagem Mais Próxima*), Figura 4.9, evidenciam uma concentração de alturas mais próximas às drenagens associados ao córrego de maior extensão da microbacia MP I. Ocorre uma expressiva presença dessa característica na proximidade do exutório com o Ribeirão Engenho Velho, uma vez que a microbacia de estudo comporta um córrego afluente desse ribeirão.

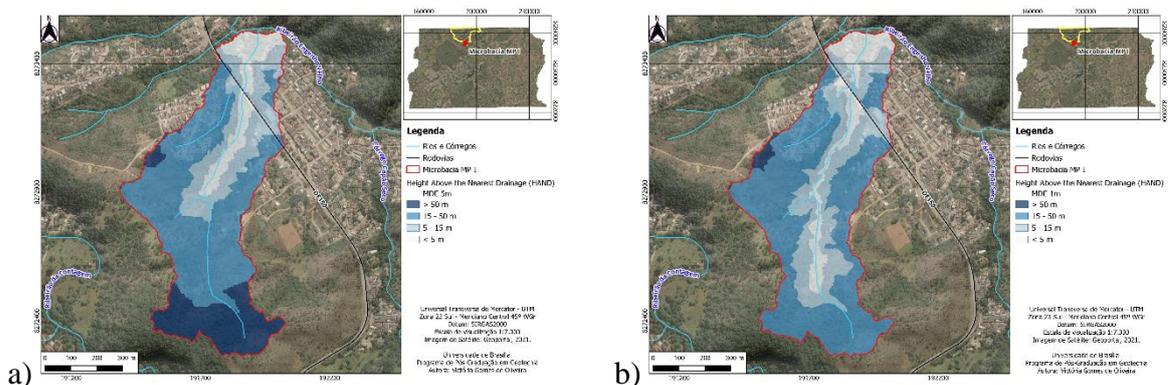


Figura 4.9 - Carta do modelo HAND da microbacia MP I. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.

A Tabela 4.4 apresenta as áreas em ha e em (%) da microbacia MP I dos intervalos de valor do HAND definidos por Silva et al. (2013). As divisões dos intervalos foram definidas baseando-se em quatro classes para o HAND: inundação (até 5 m), transição (de 5 m a 15 m), encostas (de 15 m a 50 m) e topos de morro (maior que 50 m), sendo classificados quanto a suscetibilidade a inundações e alagamentos de forma decrescente.

Tabela 4.4 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP I e seus respectivos quantitativos.

| Modelo<br>HAND (m) | MDE 5m       |             | MDE 1m       |             | Diferença        |                 |
|--------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|
|                    | Área<br>(ha) | Porcentagem | Área<br>(ha) | Porcentagem | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| < 5                | 4,77         | 10,81%      | 5,54         | 12,55%      | 0,77             | 16,14%          |
| 5 - 15             | 8,56         | 19,39%      | 11,52        | 26,10%      | 2,96             | 34,58%          |
| 15 - 50            | 23,61        | 53,49%      | 26,37        | 59,74%      | 2,76             | 11,69%          |
| > 50               | 7,20         | 16,31%      | 0,71         | 1,61%       | 6,49             | -90,14%         |
| <b>Total</b>       | 44,14        | 100,00%     | 44,14        | 100,00%     | -                | -               |

Foram feitos testes para obtenção da área de contribuição de acordo com a rede de drenagem obtida pelo HAND. Para estabelecer um resultado comparativo e representativo da área de inundação, os testes resultaram em áreas de contribuição distintas para cada MDE, sendo a área de contribuição do MDE 5m igual a 24,16 ha e do MDE 1m igual a 19,33 ha. Foi testado aplicar a área de contribuição do MDE 1m no modelo HAND de 5 metros, porém os resultados apresentados se mostram superestimados para a microbacia local.

Com o aumento de precisão do modelo digital, nota-se um aumento relativo de 16,14 % (HAND menor que 5m) na área inundável e um aumento da extensão do curso hídrico na microbacia MP I. Isso também favorece a redução de área de 6,49 ha do MDE 5m para o MDE 1m nas áreas de HAND menor que 50m.

O modelo HAND opera com base na diferença altimétrica entre o canal e as células adjacentes, uma vez que células com pouca variação altimétrica em relação ao canal e próximas a ele são mais suscetíveis à inundação. Portanto, as áreas com menor diferença altimétrica em relação ao córrego foram classificadas com alto valor de alta suscetibilidade enquanto que áreas consideradas topo de morro (HAND maior que 50 m) são consideradas não inundáveis.

A Figura 4.10 apresenta as informações da Tabela 4.4 de intervalos dos diferentes MDEs, visando proporcionar uma visualização mais eficaz dos dados. Destaca-se uma notável concentração de área no intervalo de 15 a 50 metros da drenagem mais próxima para ambos MDEs, correspondendo a 59,74% e 53,49% para os MDE 1m e 5m respectivamente.

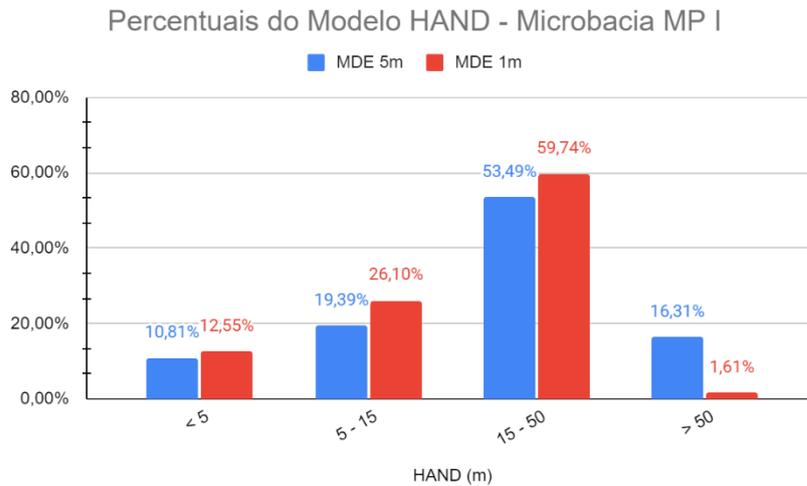


Figura 4.10 - Gráfico de distribuição da microbacia MP I por intervalos do HAND.

#### 4.1.5 USO E COBERTURA DO SOLO

A Carta de Uso e Cobertura da Solo (Figura 4.11) da microbacia MP I foi elaborada a partir de dados de uso e cobertura de 2019 disponibilizados no Geoportal na escala de 1:10.000, escala cartográfica com uma boa precisão para a análise da dinâmica de áreas suscetíveis. Para as áreas selecionadas, o sistema de classificação abrangeu as seguintes classes: Área construída, Formação campestre, Formação florestal, Formação savânica, Sistema viário e Solo exposto.

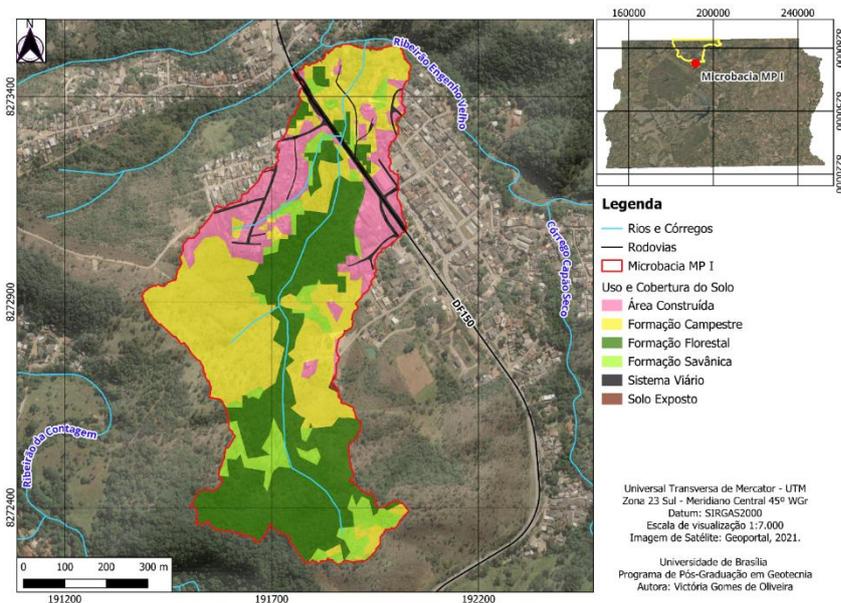


Figura 4.11 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia MP I.

Tabela 4.5 - Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP I.

| <b>Uso e Cobertura do Solo</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Porcentagem</b> |
|--------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Área construída</b>         | 6,61             | 14,98%             |
| <b>Formação campestre</b>      | 16,39            | 37,13%             |
| <b>Formação florestal</b>      | 15,66            | 35,48%             |
| <b>Formação savânica</b>       | 4,03             | 9,13%              |
| <b>Sistema viário</b>          | 1,41             | 3,19%              |
| <b>Solo exposto</b>            | 0,04             | 0,09%              |
| <b>Total</b>                   | 44,14            | 100,00%            |

Como visto na Tabela 4.5, a Formação Campestre (37,13%) e a Formação Florestal (35,48%) representam a maior porcentagem dessa microbacia, evidenciando a forte presença de cobertura natural intacta. Já classes Sistema Viário e Solo Exposto são menos expressivas por se tratar de uma microbacia com baixo índice de urbanização.

As áreas classificadas com valor 3 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, alta suscetibilidade, representam 8,02 ha ou 15,07% da totalidade da microbacia MP I. A distribuição concentra-se no baixo curso da bacia, excluindo-se as cabeceiras de drenagem com declividade mediana a alta e a área central da bacia na transição entre o médio e baixo curso. Essa ocupação abrange áreas com declividade até 15%. Essa categoria apresenta cobertura média a alta de impermeabilização que confere grande capacidade de escoamento superficial. Além disso, destaca-se a existência de superfícies proporcionalmente menores que permitem a permeabilidade (terrenos baldios, ruas sem calçamento, gramíneas etc.).

As áreas classificadas com valor 2 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, média suscetibilidade, são representadas pela classe de solo exposto nessa microbacia, com valor reduzido de área de 0,04 ha ou 0,09%. Assim, sua resposta hidrológica é baixa proporcionalmente à bacia.

As áreas classificadas com valor 1 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, baixa suscetibilidade, correspondem às classes de formações florestal, savânica e campestre e ocupam área de 36,08 ha ou 81,74% da bacia. A distribuição dessas categorias concentra-se no alto e médio curso, principalmente junto as cabeceiras de drenagem e recobre grande parte das encostas. O fato desses terrenos localizarem-se em encosta com trechos de declividade maiores que 15% favoreceu sua preservação e dificultou sua ocupação por outro tipo de uso.

#### 4.1.6 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO

A Figura 4.12 apresenta as cartas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP I, resultado da  lgebra de mapas das reclassifica es da Declividade, Formas de Vertente e Modelo HAND supracitados nos itens “4.1.2”, “4.1.3” e “4.1.4”.   perceptível que a maior parte das áreas de baixa declividade encontram-se em zonas com muito alta e alta suscetibilidade   inunda o, correspondente a 1,68% da área para o MDE 5m e 2,17% para o MDE 1m (Tabela 4.6).

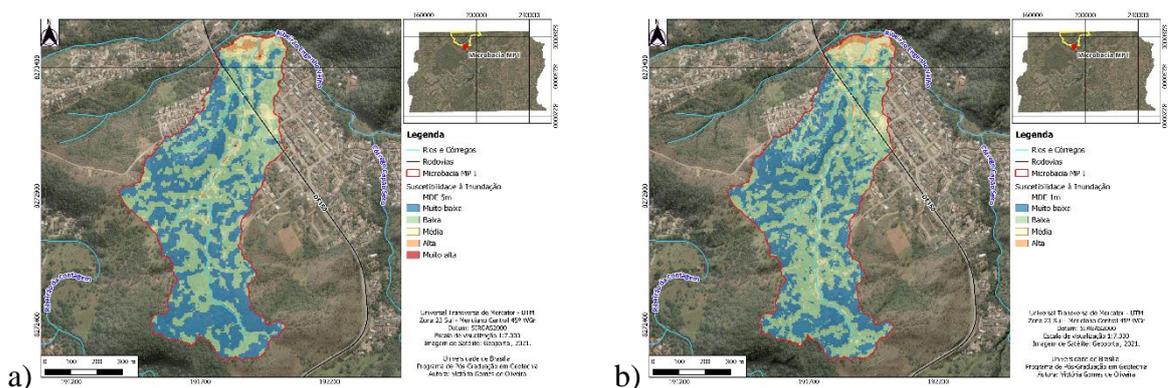


Figura 4.12 – Carta da suscetibilidade a inunda es da microbacia MP I. (a) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 5m e (b) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 1m.

Tabela 4.6 – Classifica o da suscetibilidade a inunda es para a microbacia MP I.

| Suscetibilidade   Inunda o | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|----------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                            |  rea (ha) | Porcentagem |  rea (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>         | 19,93     | 45,15%      | 17,73     | 40,17%      | 2,20          | -11,04%      |
| <b>Baixa</b>               | 20,32     | 46,04%      | 21,64     | 49,03%      | 1,32          | 6,50%        |
| <b>Média</b>               | 3,15      | 7,14%       | 3,81      | 8,63%       | 0,66          | 20,95%       |
| <b>Alta</b>                | 0,72      | 1,63%       | 0,96      | 2,17%       | 0,24          | 33,33%       |
| <b>Muito alta</b>          | 0,02      | 0,05%       | 0         | 0,00%       | 0,02          | -100,00%     |
| <b>Total</b>               | 44,14     | 100,00%     | 44,14     | 100,00%     | -             | -            |

  importante observar que, ao elaborar a carta de suscetibilidade   inunda o, não foi feita distin o entre áreas urbanas e rurais. Considerar toda região da microbacia MP I permite avaliar as áreas mais propensas a sofrer inunda es em caso de expansão urbana e outras possibilidades de uso, uma vez que utilizar fatores topográficos gerados a partir dos MDE 5m e 1m também avalia regiões propícias para ocupa o na microbacia MP I.

Para essa microbacia, a classe mais representativa de suscetibilidade a inunda es   a de baixa suscetibilidade para ambos MDEs, sendo ainda mais expressiva para o dado de maior precisão

(MDE 1m). A Figura 4.13 identifica de forma comparativa o percentual de áreas suscetíveis a inundação nesta microbacia.

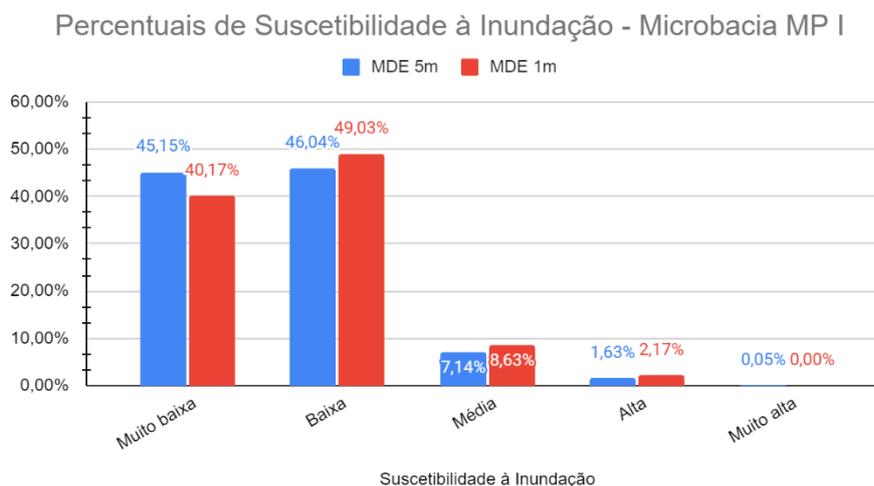


Figura 4.13 - Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP I.

Na categoria de Muito Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP I, ocorre a diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, correspondente à diferença relativa de 100,00%, uma vez que não há áreas dessa classe no MDE 1m. Identifica-se a predominância dessas áreas no leito do curso hídrico, áreas já passíveis de inundação e com densa cobertura vegetal de formação florestal e campestre, fator que amortece possíveis cheias devido a superfície de infiltração em áreas de cobertura natural.

Na categoria de Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP I, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, expresso na diferença relativa de 33,33% (0,24 ha). Essas áreas estão localizadas principalmente próximas ao exutório, em regiões de declividade plana suave (até 5%) e correspondentes majoritariamente às áreas no intervalo HAND menor que 5m. Ocorrem, também, em áreas de curvatura planar e retilínea, que configuram formas de vertente intermediárias para o acúmulo de água.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 7,14% da área do MDE 5m e 8,63% da área do MDE 1m, ou seja, um incremento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Essa diferença (0,66 ha em termos de diferença absoluta e 20,95% em diferença relativa) ocorre, principalmente, com aumento de áreas no intervalo de menor que 5 metros no modelo HAND no MDE 1m e o cruzamento de dados curvatura vertical côncava no curso hídrico. Há, provavelmente, uma superestimativa de média suscetibilidade

em áreas que são improváveis de ocorrer inundação como próximas à cabeceira da microbacia, áreas que podem possuir suscetibilidade de acúmulo de água pluvial por outros processos.

As áreas caracterizadas como Baixa Suscetibilidade correspondem à quase metade da microbacia MP I, com variação de área de 20,32 ha ou 46,04% no MDE 5m e área de 21,64 ha ou 49,03% no MDE 1m. Esse aumento de área em relação ao MDE de menor precisão ocorre, majoritariamente, pela redução de áreas de muito baixa suscetibilidade no MDE 1m. Por se tratar de uma bacia que abrange apenas um curso hídrico localizado em área densamente vegetada e muito declivosa, a predominância da classificação de baixa suscetibilidade se deve pelo aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas em detrimento de curvaturas convergentes e côncavas no MDE 5m, caso contrário ocorreriam mais áreas de Muito Baixa Suscetibilidade.

Por fim, as áreas classificadas como Muito Baixa Suscetibilidade são caracterizadas por superfícies majoritariamente convexas e divergentes de declividade maior que 15% e localizadas em zonas do HAND nos intervalos de 15 a 50m e maior que 50m. Correspondem segunda grande categoria de suscetibilidade em ambos MDEs, porém há uma diminuição relativa de 11,04% de área do MDE 1m em comparação com o MDE 5m, atrelado ao aumento supracitado de áreas de curvatura planar e/ou retilínea nesse mesmo modelo de elevação.

#### 4.1.7 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO

A Figura 4.14 apresenta as cartas de suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP I, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Uso e Cobertura do Solo supracitados nos itens “4.1.2”, “4.1.3” e “4.1.5”. É perceptível que a maior parte das áreas em zonas de muito alta e alta suscetibilidade ao alagamento se encontram justamente em áreas urbanizadas, correspondente a 2,29% da área para o MDE 5m e 2,95% para o MDE 1m (Tabela 4.7).

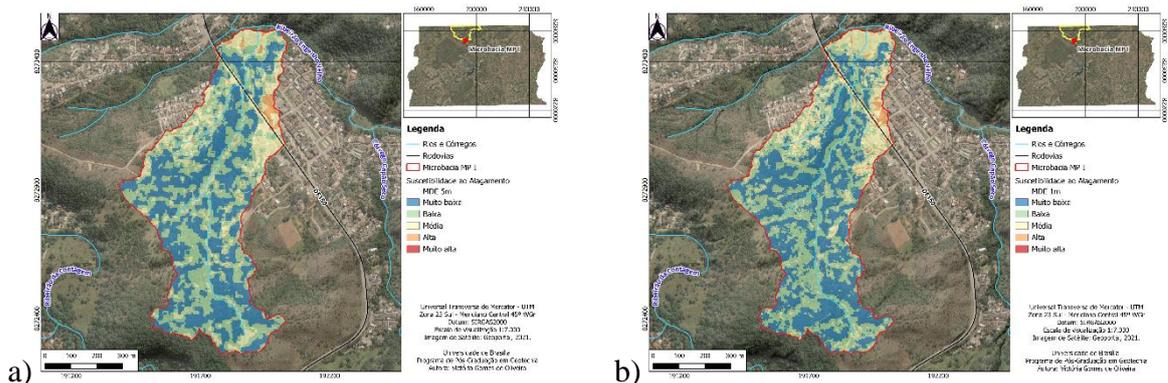


Figura 4.14 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP I. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m.

Tabela 4.7 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP I.

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>            | 17,62     | 39,92%      | 18,45     | 41,80%      | 0,83          | 4,71%        |
| <b>Baixa</b>                  | 17,90     | 40,55%      | 17,43     | 39,49%      | 0,47          | -2,63%       |
| <b>Média</b>                  | 7,61      | 17,24%      | 6,96      | 15,77%      | 0,65          | -8,54%       |
| <b>Alta</b>                   | 1,00      | 2,27%       | 1,27      | 2,88%       | 0,27          | 27,00%       |
| <b>Muito alta</b>             | 0,01      | 0,02%       | 0,03      | 0,07%       | 0,02          | 200,00%      |
| <b>Total</b>                  | 44,14     | 100,00%     | 44,14     | 100,00%     | -             | -            |

Assim como na suscetibilidade à inundação, a suscetibilidade ao alagamento possui as mesmas classes mais representativas para os diferentes MDEs. O aumento de precisão do dado topográfico (MDE 1m) possui aumento das classes de muito baixa suscetibilidade e alta suscetibilidade ao alagamento em relação ao MDE 5m. Isso, provavelmente, está relacionado ao aumento de áreas de maior declividade, visto que o dado de uso e ocupação do solo é o mesmo. A Figura 4.15 mostra de forma gráfica as comparações entre as mudanças de suscetibilidade a alagamentos.

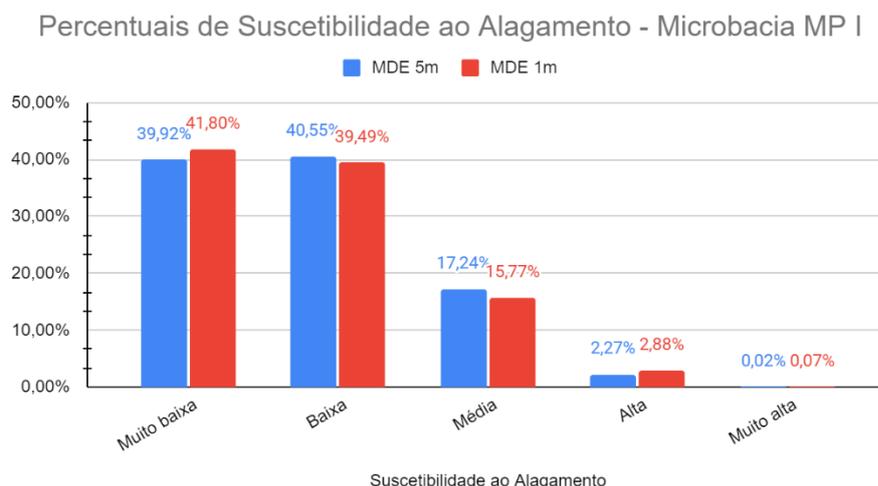


Figura 4.15 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP I.

Na classe de Muito Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP I, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 200,00%, ainda que em termos absolutos isso corresponda a 0,02 ha. Está associado ao cruzamento de áreas com

declividade plana a suave e curvaturas convergentes e/ou convexas em áreas urbanas, observadas como locais de acúmulo de água.

Na classe de Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP I, também ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 27,00%, correspondendo à 0,27 ha na diferença absoluta. Corresponde a uma classe de suscetibilidade pouco expressiva nesta microbacia para ambos MDEs (2,27% do MDE 5m e 2,88% do MDE 1m), por se tratar de uma região com baixo índice de ocupação antrópica e declividade predominante ondulada de 8% a 30%. Além disso, observa-se que o padrão de ocupação urbano é caracterizado por residências de baixo padrão estrutural, desprovidas de sistemas de esgoto e drenagem pluvial adequados, além de enfrentarem deficiências na infraestrutura viária.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 17,24% da área do MDE 5m e 15,77% da área do MDE 1m, ou seja, uma diminuição de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange áreas na cabeceira da microbacia com declividade até 15% associada a baixas taxas de ocupação urbana e formações florestal e campestre. A redução relativa (8,54%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de alta suscetibilidade em ocupações urbanas, uma vez que nessas áreas o MDE 1m apresenta regiões com declividades mais planas.

A região classificada como Baixa Suscetibilidade corresponde a 40,55% da área do MDE 5m e 39,49% da área do MDE 1m, ou seja, uma diminuição de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange boa parte das áreas de declividade maior que 15% na região associada a formação campestre e curvaturas diversas. A pequena redução relativa (2,63%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas em detrimento de outras curvaturas.

Na região classificada como Muito Baixa Suscetibilidade, predominam áreas de curvatura divergente e/ou convexa em áreas de cobertura vegetal e declividades onduladas a fortes (maiores que 15%). Há um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação e aumento de áreas com declividade maior que 30%, com 39,92% da área do MDE 5m e 41,80% da área do MDE 1m, sendo uma classe proporcionalmente muito expressiva nesta microbacia.

## 4.2 ÁREA 2 – MICROBACIA MP II

### 4.2.1 HIPSOMETRIA

A Figura 4.16 apresenta as Cartas de Hipsometria da microbacia MP II para curvas de nível de 5m e 1m. É possível observar que as cotas altimétricas variam de 885 a 1.165 metros para o MDE 5m e de 884 a 1.167 metros para o MDE 1m, sendo fatiados em intervalos de 20 metros representados na Tabela 4.8.

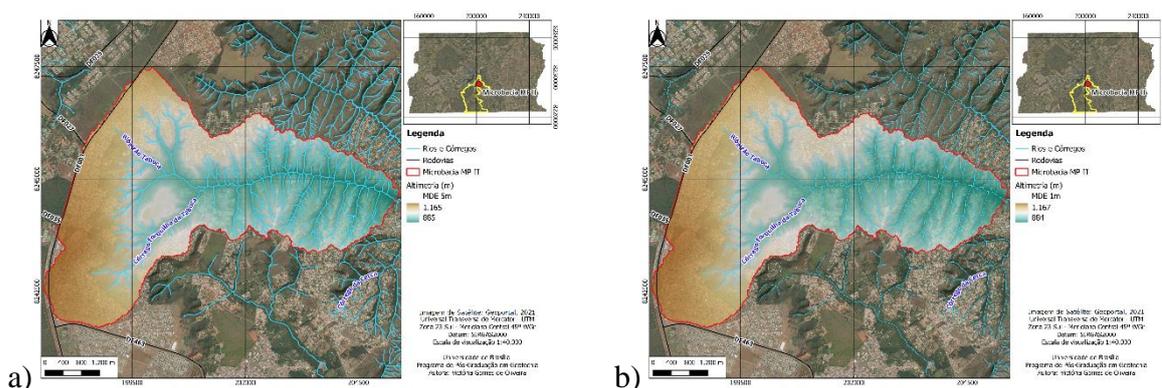


Figura 4.16 - Carta hipsométrica da microbacia MP II. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m.

Tabela 4.8 - Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP II.

| Altimetria (m) | MDE 5m         |                | MDE 1m         |                | Diferença     |              |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|
|                | Área (ha)      | Porcentagem    | Área (ha)      | Porcentagem    | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 910          | 58,04          | 2,66%          | 55,40          | 2,54%          | 2,64          | -4,55%       |
| 910 - 930      | 143,25         | 6,57%          | 144,93         | 6,64%          | 1,68          | 1,17%        |
| 930 - 950      | 225,78         | 10,35%         | 227,26         | 10,42%         | 1,48          | 0,66%        |
| 950 - 970      | 247,62         | 11,35%         | 248,76         | 11,40%         | 1,14          | 0,46%        |
| 970 - 990      | 223,34         | 10,24%         | 227,66         | 10,43%         | 4,32          | 1,93%        |
| 990 - 1010     | 145,84         | 6,68%          | 144,43         | 6,62%          | 1,41          | -0,97%       |
| 1010 - 1030    | 129,36         | 5,93%          | 128,73         | 5,90%          | 0,63          | -0,49%       |
| 1030 - 1050    | 221,06         | 10,13%         | 216,97         | 9,94%          | 4,09          | -1,85%       |
| 1050 - 1070    | 109,70         | 5,03%          | 110,88         | 5,08%          | 1,18          | 1,08%        |
| 1070 - 1090    | 129,11         | 5,92%          | 129,78         | 5,95%          | 0,67          | 0,52%        |
| 1090 - 1110    | 185,78         | 8,51%          | 185,03         | 8,48%          | 0,75          | -0,40%       |
| 1110 - 1130    | 161,50         | 7,40%          | 160,58         | 7,36%          | 0,92          | -0,57%       |
| 1130 - 1150    | 129,24         | 5,92%          | 129,16         | 5,92%          | 0,08          | -0,06%       |
| > 1150         | 72,35          | 3,32%          | 72,40          | 3,32%          | 0,05          | 0,07%        |
| <b>Total</b>   | <b>2181,97</b> | <b>100,00%</b> | <b>2181,97</b> | <b>100,00%</b> | -             | -            |

A partir dos modelos de elevação gerados, foi realizado o processo de filtragem dos *rasters* utilizando a ferramenta *Filter*, em *Analyst Tool*, no ArcGIS, visando criar produtos mais consistentes e eliminar erros sistemáticos que poderiam resultar em variações abruptas nos dados topográficos. Uma das principais diferenças entre os MDEs da microbacia MP II é a delimitação mais escarpada da hidrografia e melhor detalhamento dos pequenos cursos hídricos no modelo de maior precisão.

Observam-se pequenas diferenças absolutas e relativas na comparação entre os MDEs 5m e 1m, com destaque para os intervalos altimétricos de 970 a 990 m e 1030 a 1050 m com diferenças de área maiores que 4 hectares. Por se tratar da maior bacia deste estudo, com 2181,97 hectares, nenhuma variação altimétrica ultrapassou 0,2% da área total da microbacia MP II. A Figura 4.17 apresenta os histogramas dos MDE 5m e 1m para melhor visualização do resultado percentual.

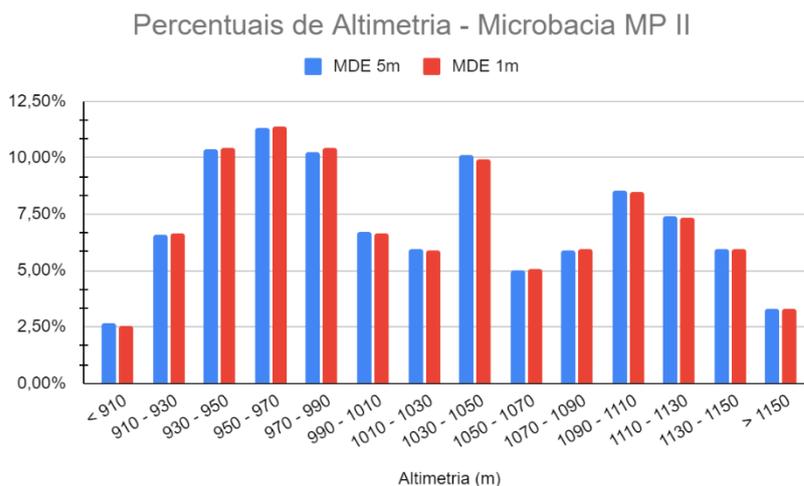


Figura 4.17- Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP II.

Com os modelos digitais de elevação, obteve-se o *raster* de Relevo Sombreado. As Cartas de Relevo Sombreado (Figura 4.18), apresentam as diferenças visuais entre o MDE 5m e o MDE 1m. A escala de visualização apresentada de 1:33.000 não faz jus à riqueza de detalhes do relevo sombreado do MDE 1m, uma vez que em escala de detalhe é visivelmente mais nítido do MDE 5m, devido ao tamanho dos *pixels*. Assim, os MDEs forneceram subsídios para interpretação visual de resultados numéricos como declividade e curvatura.

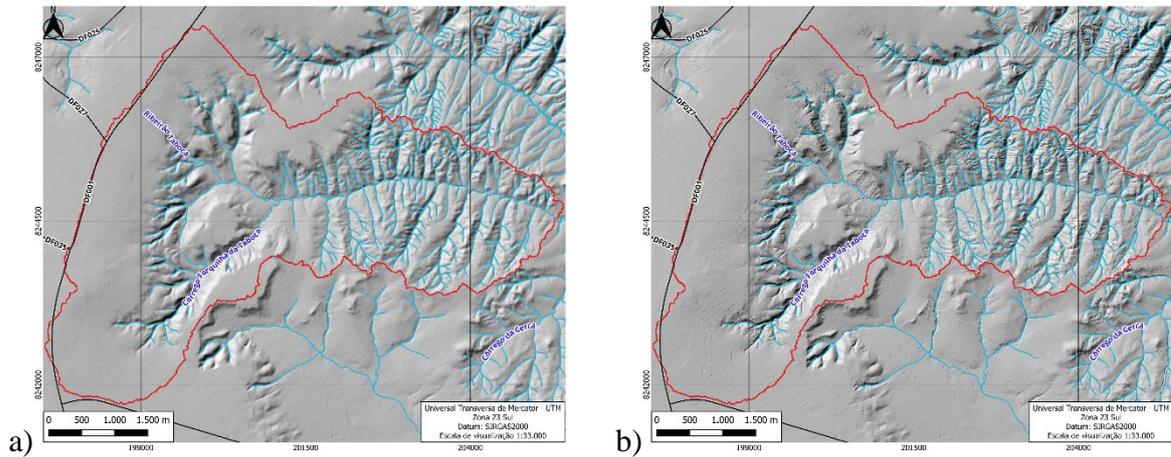


Figura 4.18 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP II. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m.

#### 4.2.2 DECLIVIDADE

A Figura 4.19 apresenta as Cartas de Declividade da microbacia MP II para curvas de nível de 5m e 1m conforme delimitado por Da Silva e Carvalho (2006). Também foi feito o gráfico quantitativo comparativo para cada um dos MDEs para identificar a distribuição de áreas e suas respectivas porcentagens na influência dos valores atribuídos para a análise de inundações e alargamentos, como observado na Tabela 4.9 e Figura 4.20.

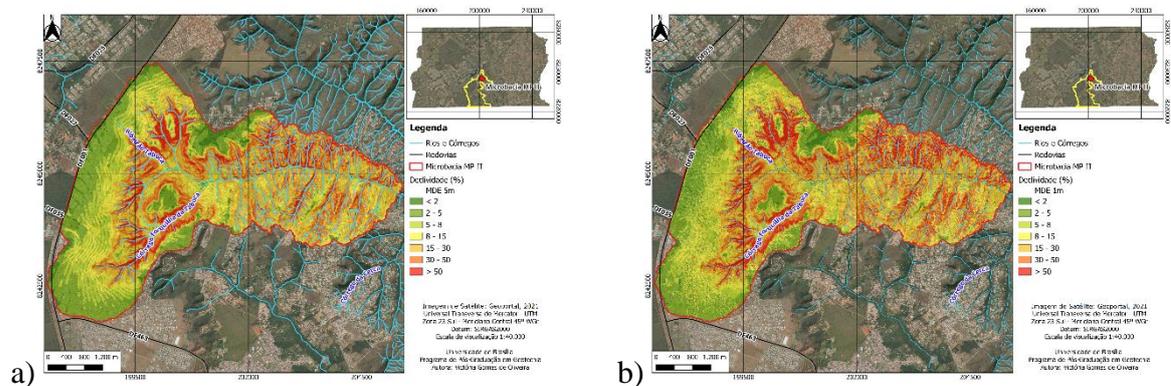


Figura 4.19 - Carta de declividade da microbacia MP II. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m

Tabela 4.9 – Classes de declividade da microbacia MP II.

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 2             | 82,28     | 3,77%       | 94,85     | 4,35%       | 12,57         | 15,28%       |
| 2 - 5           | 385,17    | 17,65%      | 339,77    | 15,57%      | 45,40         | -11,79%      |
| 5 - 8           | 270,95    | 12,42%      | 278,81    | 12,78%      | 7,86          | 2,90%        |
| 8 - 15          | 368,80    | 16,90%      | 360,24    | 16,51%      | 8,56          | -2,32%       |
| 15 - 30         | 545,31    | 24,99%      | 486,49    | 22,30%      | 58,82         | -10,79%      |

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>30 - 50</b>  | 382,98    | 17,55%      | 376,20    | 17,24%      | 6,78          | -1,77%       |
| <b>&gt; 50</b>  | 146,48    | 6,71%       | 245,61    | 11,26%      | 99,13         | 67,67%       |
| <b>Total</b>    | 2181,97   | 100,00%     | 2181,97   | 100,00%     | -             | -            |

Para a microbacia MP II, as diferenças na declividade ocorrem, principalmente, na diminuição de áreas de declividade de 2 a 5% e 15 a 30% e aumento significativo de declividades suaves (menores que 2%) e onduladas a fortes (maiores que 50%). Os resultados mostram que a precisão dos MDEs afeta diretamente a declividade do terreno para os modelos de elevação avaliados, ainda que as classes com maiores áreas ainda sejam de 15 a 30% (545,31 ha no MDE 5m e 486,49 ha no MDE 1m) e 30 a 50% (382,98 ha no MDE 5m e 376,20 ha no MDE 1m) para ambos MDEs.

Em termos absolutos, nenhuma diferença absoluta ultrapassa 100 hectares, ou seja, todas as diferenças de declividade correspondem a menos de 5% da área total da microbacia MP II. Contudo, a diferença relativa apresenta porcentagens consideravelmente mais altas para o intervalo maior que 50% de declividade do MDE 1m em relação ao MDE 5m.

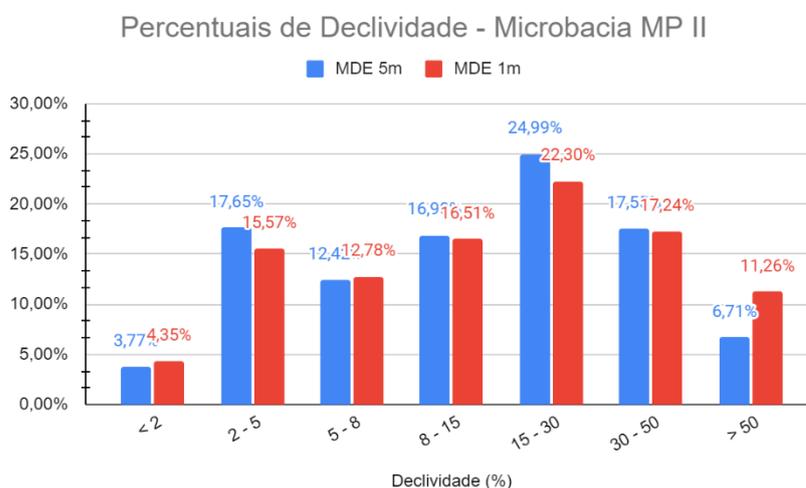


Figura 4.20 - Gráfico de distribuição da microbacia MP II em (%) por intervalos da declividade.

A Figura 4.20 apresenta graficamente a distribuição da porcentagem de microbacia MP II por faixa de declividade. Observa-se que mais de 49% da microbacia apresenta declividades menores que 15%, ou seja, favoráveis à ocupação segundo a Lei nº 6.766/79 (BRASIL, 1979).

Além disso, 24,26% (MDE 5m) a 28,50% (MDE 1m) da microbacia apresenta declividades maiores que 30%, áreas que possuem impedimento legal para ocupação.

#### 4.2.3 FORMAS DE VERTENTE

Como visto nas Cartas de Forma de Vertente da microbacia MP II (Figura 4.21), há uma visível diferença nas curvaturas horizontais (convergente, planar e divergente) e nas curvaturas verticais (côncavo, retilíneo e convexo) com a mudança do dado de precisão do MDE.

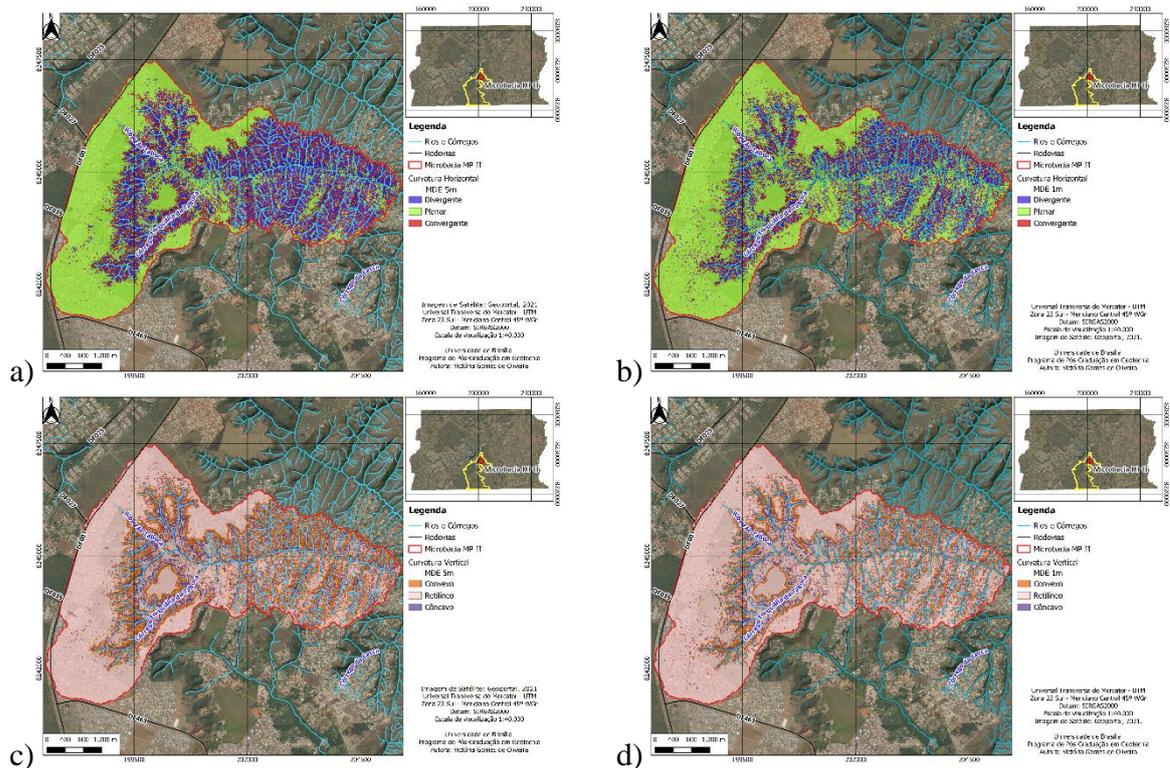


Figura 4.21 - Cartas de formas de vertente da microbacia MP II. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m.

Foram feitos vários de testes conjuntos nos MDE para determinar de forma arbitrária os limiares das vertentes retilíneas na microbacia MP II, visando gerar mapas relacionados aos tipos de relevo da microbacia. Esses testes incluíram a utilização de mapas comparativos de relevo sombreado com as cartas de curvatura horizontal e vertical, a observação padronizada de perfis de vertentes representativas e ajuste da variação estatística fornecida pelo *software* ArcGIS.

Como resultado, foram selecionados os intervalos de -0,20/m a +0,23/m para a classe de vertentes planares e -0,31/m a +0,35/m para a classe de vertentes retilíneas no MDE 5m. Já para o MDE 1m, foram selecionados os intervalos de -0,42/m a +0,45/m para a classe de vertentes planares e -0,45/m a +0,42/m para a classe de vertentes retilíneas.

Constatou-se o alargamento da faixa de limiães no MDE 1m com os testes de curvatura. Ao aplicar os mesmos limiães do MDE 5m, ocorre o aparecimento de *pixels* de curvatura divergente/convergente ou convexa/côncava em áreas que, na análise visual, não correspondem à realidade. Contudo, esse procedimento acarreta em aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas. Os testes e limiães estabelecidos na microbacia MP II foram comparados com outras bacias de características similares como a microbacia MP VI. A Tabela 4.10 apresenta as áreas obtidas e seus respectivos percentuais para cada tipo de curvatura na microbacia MP II.

Tabela 4.10 - Classificação das formas de vertente para a microbacia MP II.

| Forma de Vertente           | MDE 5m             |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |         |
|-----------------------------|--------------------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|---------|
|                             | Área (ha)          | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |         |
| <b>Curvatura Horizontal</b> | <b>Divergente</b>  | 604,22      | 27,69%    | 463,51      | 21,24%        | 140,71       | -23,29% |
|                             | <b>Planar</b>      | 1156,31     | 52,99%    | 1372,81     | 62,92%        | 216,50       | 18,72%  |
|                             | <b>Convergente</b> | 421,44      | 19,31%    | 345,65      | 15,84%        | 75,79        | -17,98% |
| <b>Total</b>                | 2181,97            | 100,00%     | 2181,97   | 100,00%     | -             | -            |         |
| <b>Curvatura Vertical</b>   | <b>Convexa</b>     | 504,35      | 23,11%    | 399,45      | 18,31%        | 104,90       | -20,80% |
|                             | <b>Retilínea</b>   | 1281,74     | 58,74%    | 1471,47     | 67,44%        | 189,73       | 14,80%  |
|                             | <b>Côncava</b>     | 395,88      | 18,14%    | 311,05      | 14,26%        | 84,83        | -21,43% |
| <b>Total</b>                | 2181,97            | 100,00%     | 2181,97   | 100,00%     | -             | -            |         |

A curvatura horizontal convergente foi observada em 19,31% da área do MDE 5m em comparação com 15,84% no MDE 1m. Já a curvatura vertical côncava foi observada em 18,14% da área do MDE 5m em comparação com 14,26% no MDE 1m. Essas áreas foram classificadas com suscetibilidade alta à inundação e ao alagamento (valor 3).

As formas de vertente planar e retilínea foram definidas como valor 2 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 52,99% da área do MDE 5m comparativamente à 62,92% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal planar, e em 58,74% da área do MDE 5m comparativamente à 67,44% da área do MDE 1m, para curvatura vertical retilínea.

Percebe-se que, para o MDE 1m, o modelo tem um aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas por apresentar mais trechos desse tipo de curvatura entre as classes convergentes e divergentes e as classes côncava e convexa, respectivamente. Isso provavelmente ocorre pelo

tamanho original do *pixel*, uma vez que os *pixels* no MDE 1m são 25 vezes menores que no MDE 5m.

Já as formas de vertente divergente e convexa foram definidas como valor 1 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 27,69% da área do MDE 5m comparativamente à 21,24% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal divergente, e em 23,11% da área do MDE 5m comparativamente à 18,31% da área do MDE 1m, para curvatura vertical convexa. As Figuras 4.22 e 4.23 sintetizam de forma comparativa o percentual de curvatura horizontal e vertical, respectivamente, para a análise de formas de vertente nesta microbacia.

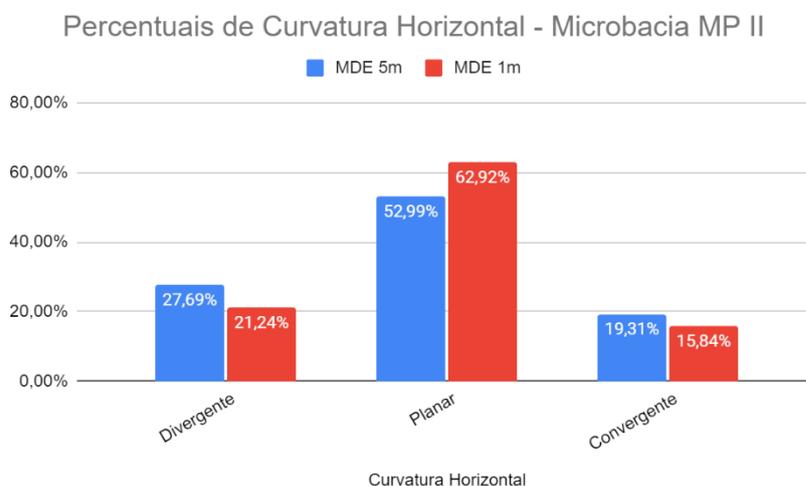


Figura 4.22 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP II.

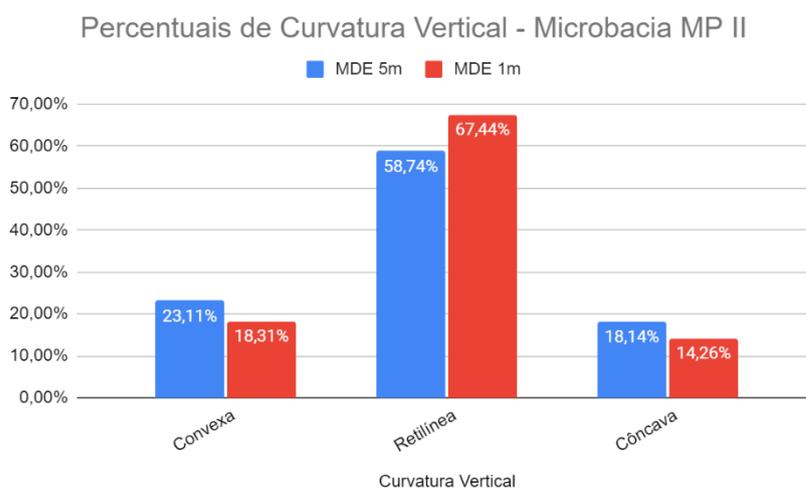


Figura 4.23 - Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP II.

#### 4.2.4 MODELO HAND

As Cartas do Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage - Altura Acima da Drenagem Mais Próxima*), Figura 4.24, evidenciam uma concentração de alturas mais próximas às drenagens associados a hidrografia já existente ou canais de escoamento superficiais da microbacia MP II. Observa-se, ainda, uma expressiva presença dessas características nas proximidades de drenagens principais como Ribeirão Taboca e Córrego Forquilha da Taboca.

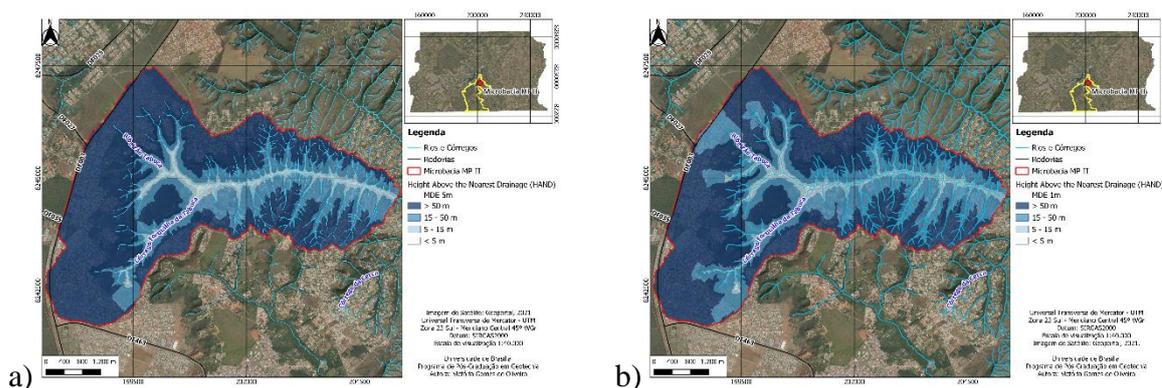


Figura 4.24 - Carta do modelo HAND da microbacia MP II. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.

A Tabela 4.11 apresenta as áreas em ha e em (%) da microbacia MP II dos intervalos de valor do HAND definidos por Silva et al. (2013). As divisões dos intervalos foram definidas baseando-se em quatro classes para o HAND: inundação (até 5 m), transição (de 5 m a 15 m), encostas (de 15 m a 50 m) e topos de morro (maior que 50 m), sendo classificados quanto a suscetibilidade a inundações e alagamentos de forma decrescente.

Tabela 4.11 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP II e seus respectivos quantitativos.

| Modelo<br>HAND (m) | MDE 5m         |                | MDE 1m         |                | Diferença     |              |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|
|                    | Área (ha)      | Porcentagem    | Área (ha)      | Porcentagem    | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 5                | 58,95          | 2,70%          | 59,55          | 2,73%          | 0,60          | 1,02%        |
| 5 - 15             | 114,6          | 5,25%          | 141,66         | 6,49%          | 27,06         | 23,61%       |
| 15 - 50            | 516,52         | 23,67%         | 683,58         | 31,33%         | 167,06        | 32,34%       |
| > 50               | 1491,9         | 68,37%         | 1297,18        | 59,45%         | 194,72        | -13,05%      |
| <b>Total</b>       | <b>2181,97</b> | <b>100,00%</b> | <b>2181,97</b> | <b>100,00%</b> |               |              |

Os testes feitos para obtenção da área de contribuição de acordo com a rede de drenagem obtida pelo HAND, para a microbacia MP II, resultaram em áreas de contribuição distintas para cada MDE, sendo a área de contribuição do MDE 5m igual a 96,55 ha e do MDE 1m igual a 48,29

ha. Foi testado aplicar a área de contribuição do MDE 1m no modelo HAND de 5 metros, porém os resultados apresentados se mostram superestimados para a microbacia local.

Com o aumento de precisão do modelo digital, nota-se um aumento relativo de 1,02 % (HAND menor que 5m) na área inundável e um aumento na extensão dos cursos hídricos na microbacia MP II, principalmente nos cursos principais do Ribeirão Taboca e Córrego Forquilha da Taboca. Isso também favorece a redução de área de 194,72 ha do MDE 5m para o MDE 1m nas áreas de HAND menor que 50m, com resultados menos conservadores das áreas de drenagem.

A drenagem obtida pela modelagem HAND e utilizada neste trabalho visou adequar, de maneira fidedigna, a realidade de todas as microbacias, especialmente as de alta densidade hidrográfica como as microbacias MP II, III-IV e VI. Observa-se que nos dois modelos da microbacia MP II, córregos no médio a baixo curso da bacia possuem nascentes em topos de morro e isso é verificado nos mapas já apresentados de hipsometria e declividade. Diversas áreas nas extremidades da bacia são, portanto, consideradas não inundáveis (HAND maior que 50m).

A Figura 4.25 apresenta as informações da Tabela 4.11 de intervalos dos diferentes MDEs, visando proporcionar uma visualização mais eficaz dos dados. Destaca-se que o intervalo maior que 50 metros possui a maior área nos dos modelos HAND, correspondendo a 68,37% e 59,45% para os MDE 5m e MDE 1m respectivamente.

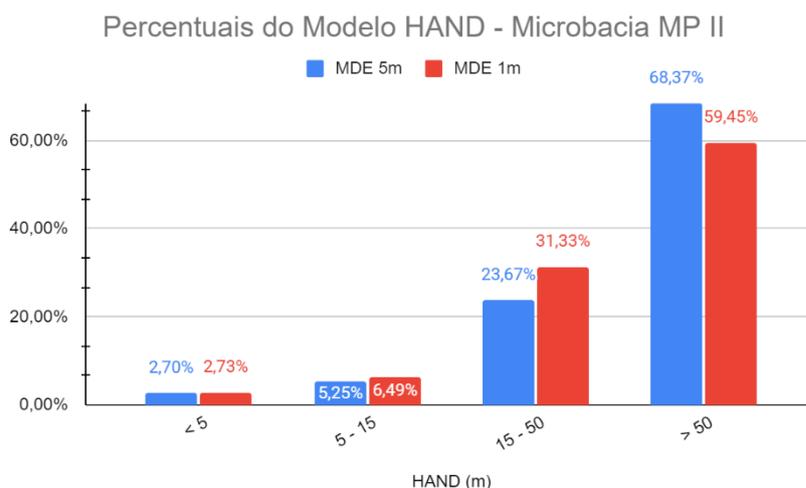


Figura 4.25 - Gráfico de distribuição da microbacia MP II por intervalos do HAND.

#### 4.2.5 USO E COBERTURA DO SOLO

A Carta de Uso e Cobertura da Solo (Figura 4.26) da microbacia MP II foi elaborada a partir de dados de uso e cobertura de 2019 disponibilizados no Geoportal na escala de 1:10.000, escala cartográfica com uma boa precisão para a análise da dinâmica de áreas suscetíveis. Para as áreas selecionadas, o sistema de classificação abrangeu as seguintes classes: Água, Área construída, Formação campestre, Formação florestal, Formação savânica, Sistema viário e Solo exposto.

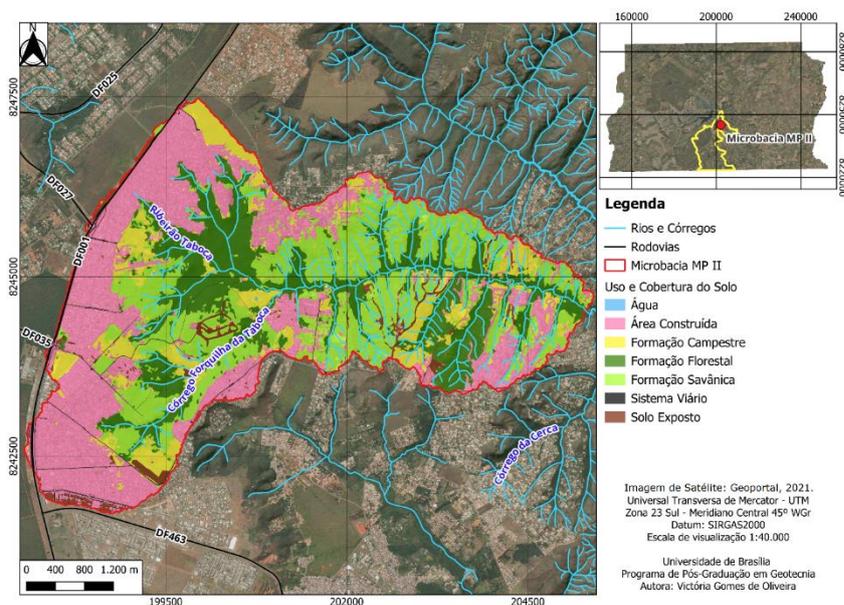


Figura 4.26 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia MP II.

Tabela 4.12 - Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP II.

| Uso e Cobertura do Solo | Área (ha)      | Porcentagem    |
|-------------------------|----------------|----------------|
| Água                    | 0,51           | 0,02%          |
| Área construída         | 728,00         | 33,36%         |
| Formação campestre      | 242,55         | 11,12%         |
| Formação florestal      | 506,64         | 23,22%         |
| Formação savânica       | 625,01         | 28,64%         |
| Sistema viário          | 29,77          | 1,36%          |
| Solo exposto            | 49,49          | 2,27%          |
| <b>Total</b>            | <b>2181,97</b> | <b>100,00%</b> |

Como visto na Tabela 4.12, a Área Construída (33,36%) e a Formação Savânica (28,64%) representam a maior porcentagem dessa microbacia, com áreas de urbanização localizadas nas áreas de declividade suave nesta microbacia. Já classes Água e Sistema Viário são menos

expressivas, provavelmente por se tratar de uma microbacia em fase de expansão da urbanização.

As áreas classificadas com valor 3 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, alta suscetibilidade, representam 758,28 ha ou 34,74% da totalidade da microbacia MP II. A ocupação urbana apresenta valores expressivos de área e percentual. A distribuição concentra-se, principalmente, no alto curso da bacia, por corresponderem também a áreas de declividade até 15%. Essa classe apresenta cobertura média a alta de impermeabilização que confere grande capacidade de escoamento superficial potencializando tempos menores de resposta e picos de vazão. Vale destacar que nessas áreas proporcionalmente menores que permitem a permeabilidade como áreas verdes. Esse tipo de superfície promove alta capacidade de escoamento superficial com reduzido tempo de resposta, ou seja, converte e transmite rápidos volumes precipitados em vazão efetiva nos canais promovendo picos de vazão.

As áreas classificadas com valor 2 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, média suscetibilidade, são representadas pela classe de solo exposto em áreas antropizadas nessa microbacia, com valores de área de 49,49 ha ou 2,27%. Assim, sua resposta hidrológica é baixa proporcionalmente à bacia.

As áreas classificadas com valor 1 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, baixa suscetibilidade, correspondem às classes de formações florestal, savânica e campestre e ocupam área de 1374,20 ha ou 62,98% da bacia. A distribuição dessa categoria concentra-se no médio a baixo curso, principalmente junto aos cursos hídricos e recobre praticamente toda a parte de encostas e hidrografia. O fato dessa classe estar localizada em encostas com declividade maior que 15% e recobrindo os córregos e nascentes da microbacia indica limitações topográficas de ocupação urbana e favorece a preservação de áreas protegidas pela legislação.

#### **4.2.6 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO**

A Figura 4.27 apresenta as cartas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP II, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Modelo HAND supracitados nos itens “4.2.2”, “4.2.3” e “4.2.4”. É perceptível que a maior parte da região se encontra em zonas de muito baixa e baixa suscetibilidade à inundação e estão, também, em áreas de alta declividade, uma vez que essa microbacia possui diversos córregos e nascentes. A Tabela 4.13 traz o compilado de áreas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP II.

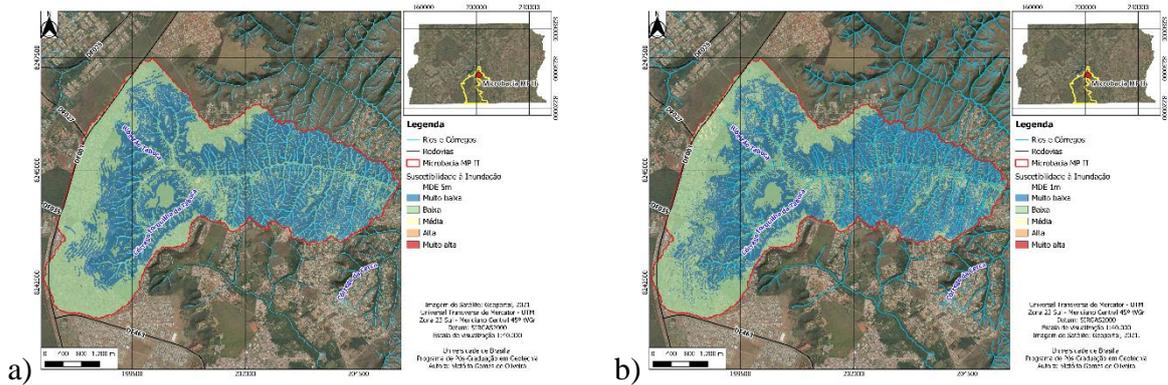


Figura 4.27 - Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP II. (a) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 1m.

Tabela 4.13 – Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP II.

| Suscetibilidade à Inundação | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                             | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>          | 1055,54   | 48,38%      | 1051,12   | 48,17%      | 4,42          | -0,42%       |
| <b>Baixa</b>                | 1087,90   | 49,86%      | 1086,53   | 49,80%      | 1,37          | -0,13%       |
| <b>Média</b>                | 30,60     | 1,40%       | 40,43     | 1,85%       | 9,83          | 32,12%       |
| <b>Alta</b>                 | 7,41      | 0,34%       | 3,66      | 0,17%       | 3,75          | -50,61%      |
| <b>Muito alta</b>           | 0,52      | 0,02%       | 0,23      | 0,01%       | 0,29          | -55,77%      |
| <b>Total</b>                | 2181,97   | 100,00%     | 2181,97   | 100,00%     | -             | -            |

A região da microbacia MP II possui a particularidade de ser uma região de alta densidade hidrográfica, com diversos afluentes do Ribeirão Taboca e é uma região que vem sofrendo uma intensa pressão para parcelamento de solo. A análise de suscetibilidade à inundação possibilita uma análise mais cautelosa em caso de expansão urbana em áreas ainda não ocupadas. A Figura 4.28 identifica de forma comparativa o percentual de áreas suscetíveis à inundação nesta microbacia.

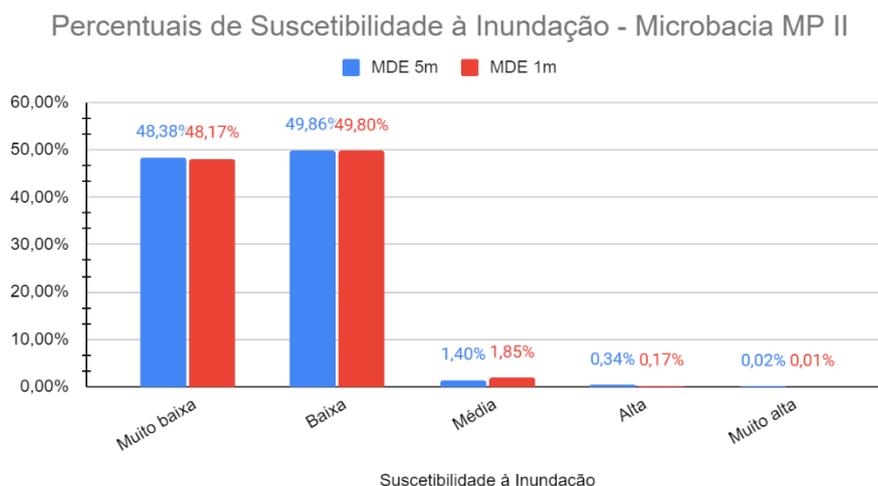


Figura 4.28 - Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP II.

Nas categorias de Muito Alta e Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP II, ocorre uma redução de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, perceptível nas diferenças relativas de 55,77% e 50,61%, respectivamente. Identifica-se a predominância dessas áreas nos leitos dos cursos hídricos, em especial no Córrego Forquilha da Taboca e no Ribeirão Taboca, áreas já inundadas e com densa cobertura vegetal de formação florestal e savânica, favorecendo o amortecimento de cheias devido a superfície de infiltração em áreas de cobertura natural não antropizada.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 1,40% da área do MDE 5m e 1,85% da área do MDE 1m, ou seja, um incremento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Essa diferença (9,83 ha em termos de diferença absoluta) ocorre, principalmente, com aumento de áreas no intervalo de 15 a 50 metros no modelo HAND no MDE 1m e o cruzamento de dados de declividade plana (até 2%) na cabeceira da microbacia. Dessa forma, há uma superestimativa de média suscetibilidade em áreas que são improváveis de ocorrer inundação, áreas que podem possuir suscetibilidade de acúmulo de água pluvial por outros processos.

As áreas caracterizadas como Baixa Suscetibilidade correspondem à quase metade da microbacia MP II, com variação de área de 1087,90 ha ou 49,86% no MDE 5m e área de 1086,53 ha ou 49,80% no MDE 1m. Por se tratar de uma bacia que abrange diversos cursos hídricos perenes e intermitentes localizados em área densamente vegetada, o restante da microbacia se encontra em áreas urbanizadas mais afastadas dos córregos e em cotas intermediárias a elevadas do terreno. A predominância da classificação de baixa suscetibilidade

se deve pela grande área de declividade plana a suave ondulada (até 8%) em áreas de HAND maior que 50 m e curvatura planar retilínea.

Por fim, as áreas classificadas como Muito Baixa Suscetibilidade são caracterizadas por superfícies majoritariamente convexas e divergentes de declividade maior que 8% e localizadas em zonas do HAND nos intervalos de 15 a 50m e maior que 50m. Correspondem a grandes áreas em ambos MDEs (48,38% no MDE 5m e 48,17% no MDE 1m), com redução relativa de 0,42% de área do MDE 1m em comparação com o MDE 5m.

#### 4.2.7 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO

A Figura 4.29 apresenta as cartas de suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP II, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Uso e Cobertura do Solo supracitados nos itens “4.2.2”, “4.2.3” e “4.2.5”. É perceptível que a maior parte das áreas em zonas de muito alta e alta suscetibilidade ao alagamento se encontram justamente em áreas urbanizadas, correspondente a 16,60% da área para o MDE 5m e 15,15% para o MDE 1m (Tabela 4.14).

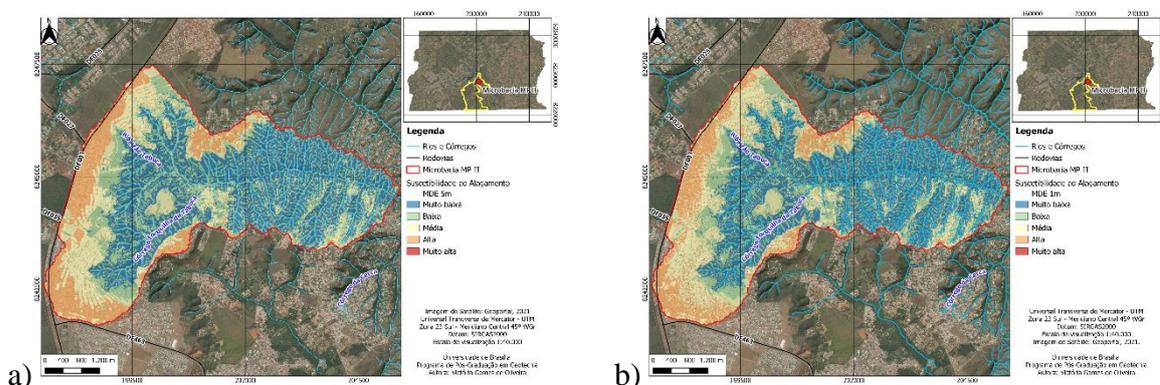


Figura 4.29 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP II. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m.

Tabela 4.14 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP II.

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| Muito baixa                   | 755,72    | 34,63%      | 750,95    | 34,42%      | 4,77          | -0,63%       |
| Baixa                         | 638,02    | 29,24%      | 665,72    | 30,51%      | 27,70         | 4,34%        |
| Média                         | 425,97    | 19,52%      | 437,92    | 20,07%      | 11,95         | 2,81%        |
| Alta                          | 361,86    | 16,58%      | 325,96    | 14,94%      | 35,90         | -9,92%       |

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| Muito alta                    | 0,40      | 0,02%       | 1,42      | 0,07%       | 1,02          | 255,00%      |
| <b>Total</b>                  | 2181,97   | 100,00%     | 2181,97   | 100,00%     | -             | -            |

Assim como a suscetibilidade à inundação, as classes de suscetibilidade ao alagamento com as maiores áreas são as mesmas, sendo as classes de baixa e muito baixa suscetibilidade. O aumento de precisão do dado topográfico (MDE 1m) possui aumento expressivo das classes de baixa suscetibilidade e média suscetibilidade ao alagamento em relação ao MDE 5m. Isso, provavelmente, está relacionado ao aumento de áreas de maior declividade e de áreas com curvaturas planares e retilíneas. A Figura 4.30 apresenta de forma gráfica as comparações entre as mudanças de suscetibilidade a alagamentos.

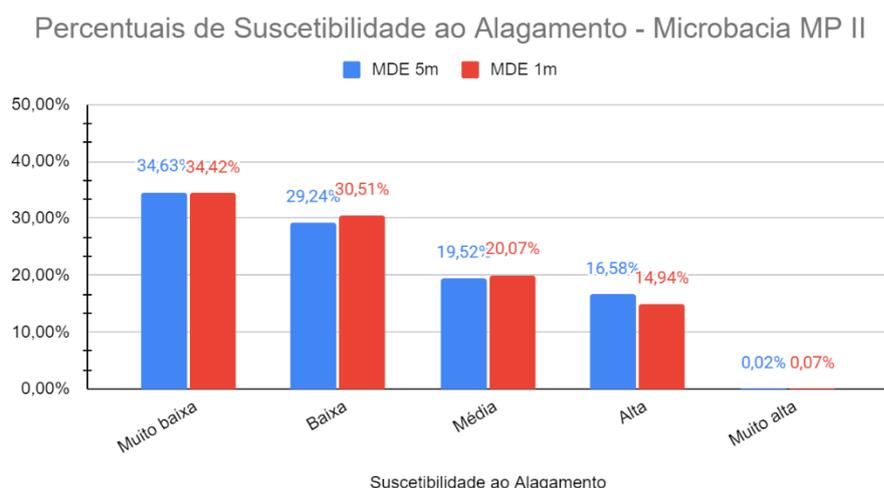


Figura 4.30 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP II.

Na classe de Muito Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP II, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 255,00%, ainda que em termos absolutos isso corresponda a 1,02 ha. Está associado ao cruzamento de áreas com declividade plana a suave e curvaturas convergentes e/ou convexas em áreas urbanas, observadas como locais de acúmulo de água.

Na classe de Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP II, ocorre uma diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, representada na diferença relativa de 9,92% e correspondente à 35,90 ha na diferença absoluta. Corresponde a uma classe de suscetibilidade medianamente expressiva nesta microbacia para ambos MDEs (16,58% do MDE 5m e 14,94%

do MDE 1m), por se tratar de uma região com alto índice de ocupação antrópica em declividades, predominantemente, de 8% na cabeceira da microbacia. Além disso, observa-se que o padrão de ocupação urbano é caracterizado predominantemente por residências e condomínios de alto padrão e muitas áreas arborizadas, características que normalmente inibem o acúmulo de água em escala local.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 19,52% da área do MDE 5m e 20,07% da área do MDE 1m, ou seja, um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange áreas próximas à cabeceira da microbacia com declividade entre 8 e 15% associadas a altas taxas de ocupação urbana. O aumento relativo (2,81%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado à redução de áreas de alta suscetibilidade em ocupações urbanas, uma vez que nessas áreas o MDE 1m apresenta regiões com declividades mais declivosas.

A região classificada como Baixa Suscetibilidade corresponde a 29,24% da área do MDE 5m e 30,51% da área do MDE 1m, ou seja, um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange boa parte das áreas de declividade maior que 15% na região associada a parte da formação savânica e curvaturas planares e retilíneas. O pequeno incremento relativo (4,34%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas em detrimento de outras curvaturas.

Na região classificada como Muito Baixa Suscetibilidade, predominam áreas de curvatura divergente e/ou convexa em áreas de cobertura vegetal e declividades onduladas a fortes (maiores que 15%). Há uma redução de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação e diminuição de áreas de curvatura divergente convexa, com 34,63% da área do MDE 5m e 34,42% da área do MDE 1m, sendo a classe proporcionalmente mais expressiva nesta microbacia.

### **4.3 ÁREA 3 – MICROBACIA MP III-IV**

#### **4.3.1 HIPSOMETRIA**

A Figura 4.31 apresenta as Cartas de Hipsometria da microbacia MP III-IV para curvas de nível de 5m e 1m. É possível observar que as cotas altimétricas variam de 1.079 a 1.245 metros para

o MDE 5m e de 1.078 a 1.244 metros para o MDE 1m, sendo fatiados em intervalos de 10 metros representados na Tabela 4.15.

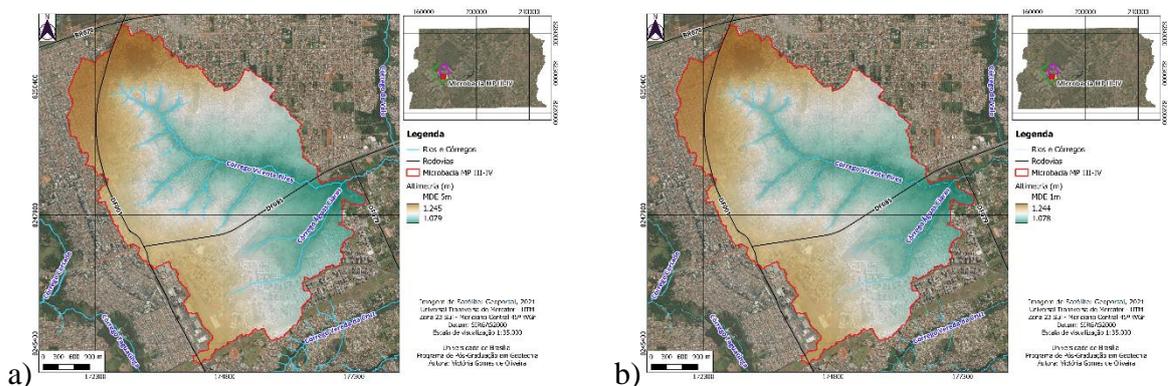


Figura 4.31 - Carta hipsométrica da microbacia MP III-IV. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m.

Tabela 4.15 - Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP III-IV.

| Altimetria<br>(m) | MDE 5m         |                | MDE 1m         |                | Diferença        |                 |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|
|                   | Área<br>(ha)   | Porcentagem    | Área<br>(ha)   | Porcentagem    | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| < 1080            | 0,86           | 0,04%          | 1,21           | 0,06%          | 0,35             | 40,70%          |
| 1080 - 1090       | 34,84          | 1,73%          | 36,29          | 1,80%          | 1,45             | 4,16%           |
| 1090 - 1100       | 56,87          | 2,82%          | 59,57          | 2,95%          | 2,70             | 4,75%           |
| 1100 - 1110       | 88,85          | 4,41%          | 97,75          | 4,85%          | 8,90             | 10,02%          |
| 1110 - 1120       | 136,94         | 6,79%          | 136,22         | 6,75%          | 0,72             | -0,53%          |
| 1120 - 1130       | 153,40         | 7,61%          | 156,90         | 7,78%          | 3,50             | 2,28%           |
| 1130 - 1140       | 159,77         | 7,92%          | 159,92         | 7,93%          | 0,15             | 0,09%           |
| 1140 - 1150       | 173,98         | 8,63%          | 175,60         | 8,71%          | 1,62             | 0,93%           |
| 1150 - 1160       | 171,19         | 8,49%          | 167,91         | 8,32%          | 3,28             | -1,92%          |
| 1160 - 1170       | 155,03         | 7,69%          | 156,53         | 7,76%          | 1,50             | 0,97%           |
| 1170 - 1180       | 147,25         | 7,30%          | 141,39         | 7,01%          | 5,86             | -3,98%          |
| 1180 - 1190       | 125,86         | 6,24%          | 127,48         | 6,32%          | 1,62             | 1,29%           |
| 1190 - 1200       | 163,94         | 8,13%          | 166,31         | 8,25%          | 2,37             | 1,45%           |
| 1200 - 1210       | 163,99         | 8,13%          | 165,89         | 8,22%          | 1,90             | 1,16%           |
| 1210 - 1220       | 84,55          | 4,19%          | 76,76          | 3,81%          | 7,79             | -9,21%          |
| 1220 - 1230       | 74,16          | 3,68%          | 76,49          | 3,79%          | 2,33             | 3,14%           |
| 1230 - 1240       | 95,33          | 4,73%          | 90,03          | 4,46%          | 5,30             | -5,56%          |
| > 1240            | 30,17          | 1,50%          | 24,73          | 1,23%          | 5,44             | -18,03%         |
| <b>Total</b>      | <b>2016,98</b> | <b>100,00%</b> | <b>2016,98</b> | <b>100,00%</b> | -                | -               |

A partir dos modelos de elevação gerados com a ferramenta *Topo do Raster*, foi realizado o processo de filtragem dos *rasters* utilizando a ferramenta *Filter*, em *Analyst Tool*, no ArcGIS,

visando criar produtos mais consistentes e eliminar erros sistemáticos que poderiam resultar distorções nos dados topográficos. As principais diferenças entre os MDEs da microbacia MP III-IV são a delimitação mais precisa dos cursos d'água, uma melhor visualização dos contornos topográficos e maior presença de contornos urbanos como vias e edificações nas curvas de nível de metro em metro.

Observam-se diferenças relativas expressivas nas cotas altimétricas das extremidades: aumento de área da cota mais baixa (menor que 1080 m) em 40,70% e diminuição de área da cota mais alta (maior que 1240 m) em 18,03% na comparação entre os MDEs 5m e 1m, além de pequenas variações ao longo da microbacia. Por se tratar de uma área com 2016,98 hectares, nenhuma variação altimétrica ultrapassou 9 hectares, traduzindo pequenas variações em relação à área total da microbacia MP III-IV. A Figura 4.32 apresenta os histogramas dos MDE 5m e 1m para melhor visualização do resultado percentual.

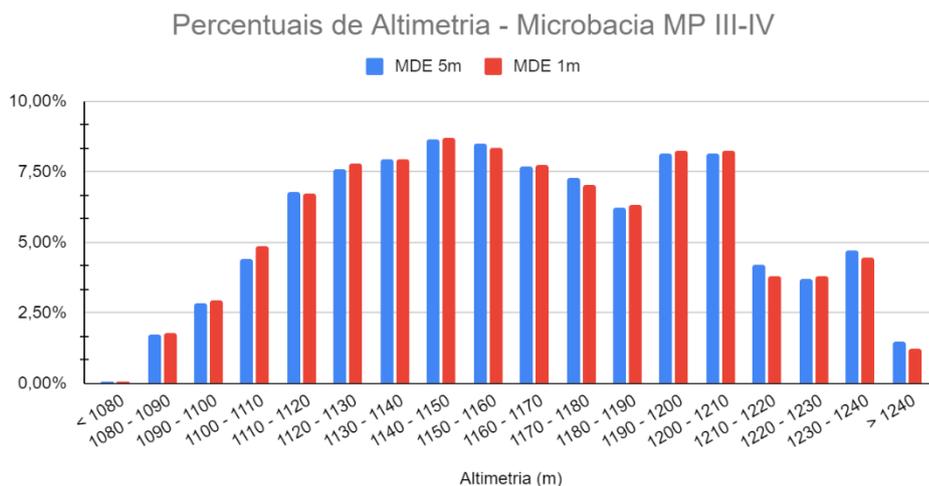


Figura 4.32 - Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP III-IV.

A partir dos MDEs, obtém-se é a *raster* de Relevô Sombreado. As Cartas de Relevô Sombreado (Figura 4.33), apresentam as diferenças visuais entre o MDE 5m e o MDE 1m. Observa-se que a interpolação direta das curvas de nível ocasiona a formação de ondulações, principalmente em área de declividade plana a suave no MDE 5m, enquanto que contornos urbanísticos de vias e edificações são mais visíveis no MDE 1m. Assim, a análise visual das características topográficas da microbacia MP III-IV forneceu subsídios para interpretação visual de resultados numéricos como declividade e curvatura.

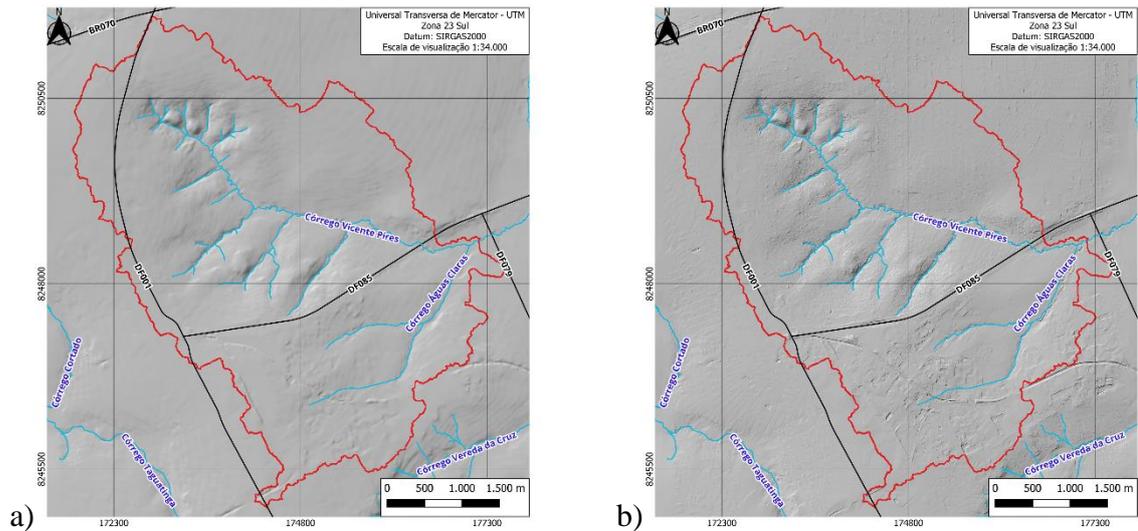


Figura 4.33 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP III-IV. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m.

### 4.3.2 DECLIVIDADE

A Figura 4.34 apresenta as Cartas de Declividade da microbacia MP III-IV para curvas de nível de 5m e 1m conforme delimitado por Da Silva e Carvalho (2006). Também foi feito o gráfico quantitativo comparativo para cada um dos MDEs para identificar a distribuição de áreas e suas respectivas porcentagens na influência dos valores atribuídos para a análise de inundações e alagamentos, como observado na Tabela 4.16 e Figura 4.35.

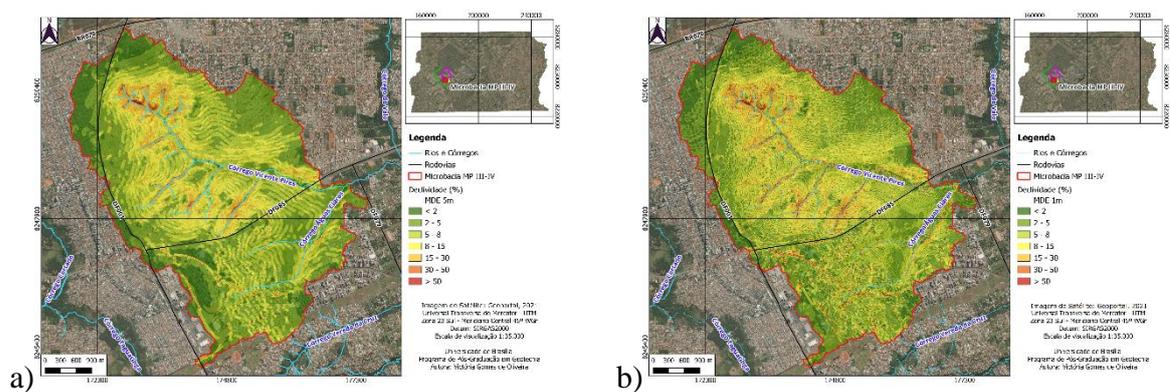


Figura 4.34 - Carta de declividade da microbacia MP III-IV. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m.

Tabela 4.16 – Classes de declividade da microbacia MP III-IV.

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 2             | 232,88    | 11,55%      | 224,59    | 11,13%      | 8,29          | -3,56%       |
| 2 - 5           | 700,05    | 34,71%      | 649,23    | 32,19%      | 50,82         | -7,26%       |

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| 5 - 8           | 554,35    | 27,48%      | 515,25    | 25,55%      | 39,10         | -7,05%       |
| 8 - 15          | 393,34    | 19,50%      | 416,74    | 20,66%      | 23,40         | 5,95%        |
| 15 - 30         | 122,12    | 6,05%       | 152,02    | 7,54%       | 29,90         | 24,48%       |
| 30 - 50         | 13,44     | 0,67%       | 41,79     | 2,07%       | 28,35         | 210,94%      |
| > 50            | 0,80      | 0,04%       | 17,36     | 0,86%       | 16,56         | 2070,00%     |
| <b>Total</b>    | 2016,98   | 100,00%     | 2016,98   | 100,00%     | -             | -            |

Para a microbacia MP III-IV, as diferenças na declividade ocorrem, principalmente, na diminuição de áreas de declividade plana a suave ondulada (até 8%) e aumento significativo de declividades onduladas a fortes (intervalos de 30 a 50% e maior que 50%) do MDE 5m para o MDE 1m. Os resultados mostram que a precisão dos MDEs afeta diretamente a declividade do terreno para os modelos de elevação avaliados, sendo que as classes com maiores áreas permanecem as mesmas para ambos MDEs nos intervalos de 2 a 5% (700,05 ha no MDE 5m e 649,23 ha no MDE 1m) e 5 a 8% (554,35 ha no MDE 5m e 515,25 ha no MDE 1m).

Em termos absolutos, nenhuma diferença absoluta ultrapassa 51 hectares, ou seja, todas as diferenças de declividade correspondem a menos de 3% da área total da microbacia MP III-IV. Contudo, a diferença relativa apresenta porcentagens consideravelmente mais altas para os intervalos de 30 a 50% (aumento de área em 210,94%) e maior que 50% (aumento de área em 2070,00%) de declividade do MDE 1m em relação ao MDE 5m.

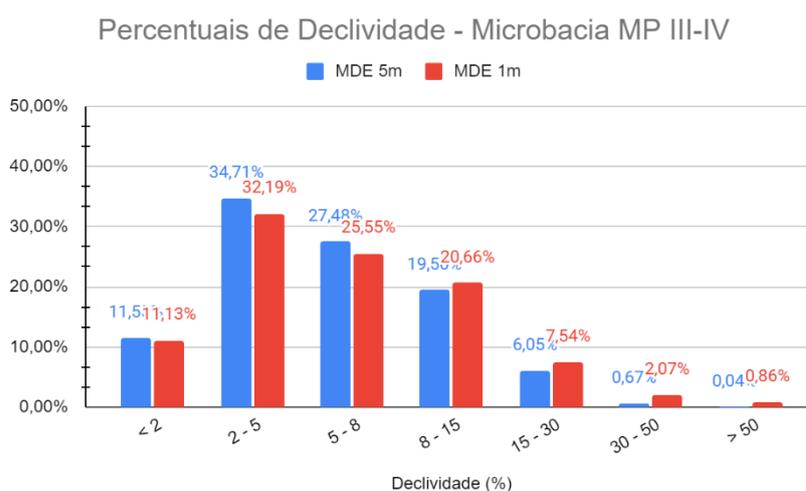


Figura 4.35 - Gráfico de distribuição da microbacia MP III-IV em (%) por intervalos da declividade.

A Figura 4.35 apresenta graficamente a distribuição da porcentagem de microbacia MP III-IV por faixa de declividade. Observa-se que mais de 89% da microbacia apresenta declividades menores que 15%, possuindo um alto percentual de áreas ocupáveis. O percentual de áreas impossibilitadas para ocupação possui o maior valor com 2,93% da área no MDE 1m e 0,71% no MDE 5m.

### 4.3.3 FORMAS DE VERTENTE

Como visto nas Cartas de Forma de Vertente da microbacia MP III-IV (Figura 4.36), há um maior espaçamento nas curvaturas horizontais (convergente, planar e divergente) e nas curvaturas verticais (côncavo, retilíneo e convexo) do MDE 5m para o MDE 1m.

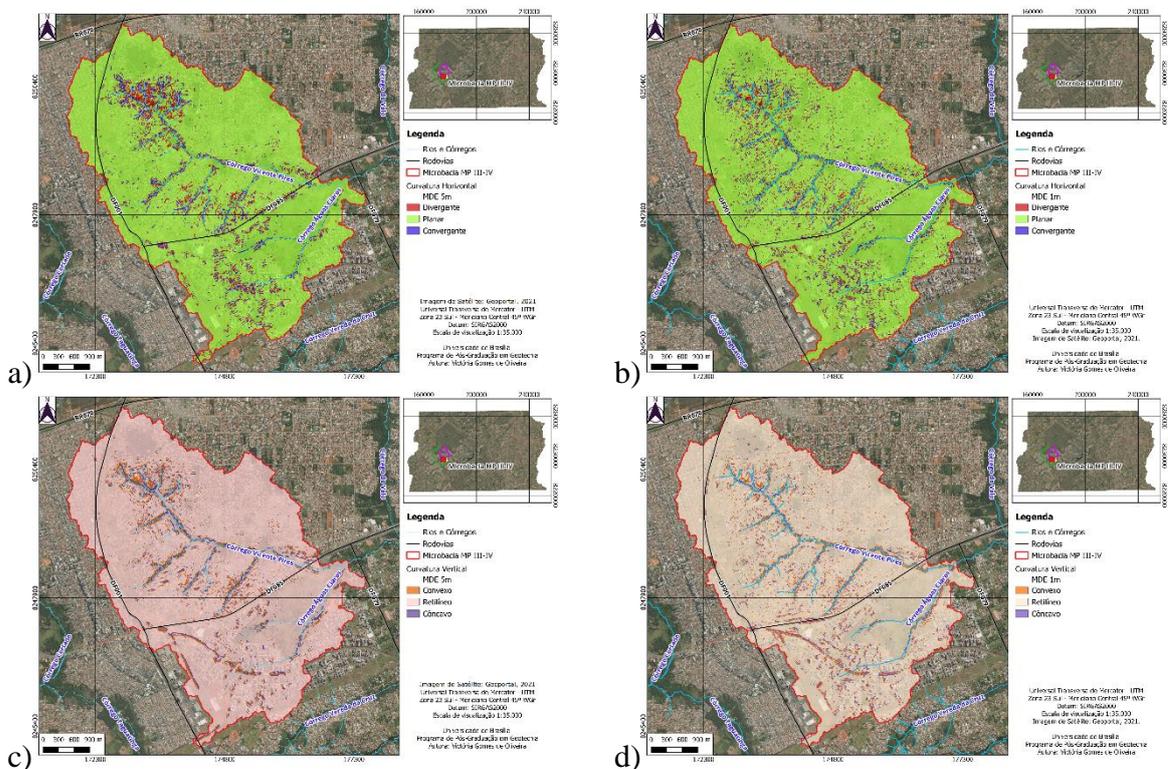


Figura 4.36 - Cartas de formas de vertente da microbacia MP III-IV. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m.

Foram feitos vários de testes conjuntos nos MDE para determinar de forma arbitrária os limiares das vertentes retilíneas na microbacia MP III-IV, visando gerar mapas relacionados aos tipos de relevo da microbacia. Esses testes incluíram a utilização de mapas comparativos de relevo sombreado com as cartas de curvatura horizontal e vertical, a observação padronizada de perfis de vertentes representativas e ajuste da variação estatística fornecida pelo *software* ArcGIS.

Como resultado, foram selecionados os intervalos de -0,24/m a +0,30/m para a classe de vertentes planares e -0,34/m a +0,30/m para a classe de vertentes retilíneas no MDE 5m. Já para o MDE 1m, foram selecionados os intervalos de -0,30/m a +0,33/m para a classe de vertentes planares e -0,48/m a +0,45/m para a classe de vertentes retilíneas.

Constatou-se o alargamento da faixa de limiaries no MDE 1m com os testes de curvatura. Ao aplicar os mesmos limiaries do MDE 5m, ocorre o aparecimento de *pixels* de curvatura divergente/convergente ou convexa/côncava em áreas que, na análise visual, não correspondem à realidade. A Tabela 4.17 apresenta as áreas obtidas e seus respectivos percentuais para cada tipo de curvatura na microbacia MP III-IV.

Tabela 4.17 - Classificação das formas de vertente para a microbacia MP III-IV.

| Forma de Vertente    | MDE 5m      |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |        |
|----------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|--------|
|                      | Área (ha)   | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |        |
| Curvatura Horizontal | Divergente  | 97,13       | 4,82%     | 99,66       | 4,94%         | 2,53         | 2,60%  |
|                      | Planar      | 1819,69     | 90,22%    | 1815,01     | 89,99%        | 4,68         | -0,26% |
|                      | Convergente | 100,16      | 4,97%     | 102,31      | 5,07%         | 2,15         | 2,15%  |
| <b>Total</b>         | 2016,98     | 100,00%     | 2016,98   | 100,00%     | -             | -            |        |
| Curvatura Vertical   | Convexa     | 98,00       | 4,86%     | 102,24      | 5,07%         | 4,24         | 4,33%  |
|                      | Retilínea   | 1829,72     | 90,72%    | 1823,7      | 90,42%        | 6,02         | -0,33% |
|                      | Côncava     | 89,26       | 4,43%     | 91,04       | 4,51%         | 1,78         | 1,99%  |
| <b>Total</b>         | 2016,98     | 100,00%     | 2016,98   | 100,00%     | -             | -            |        |

A curvatura horizontal convergente foi observada em 4,97% da área do MDE 5m em comparação com 5,07% no MDE 1m. Já a curvatura vertical côncava foi observada em 4,43% da área do MDE 5m em comparação com 4,51% no MDE 1m. Essas áreas foram classificadas com suscetibilidade alta à inundação e ao alagamento (valor 3).

As formas de vertente planar e retilínea foram definidas como valor 2 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 90,22% da área do MDE 5m comparativamente à 89,99% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal planar, e em 90,72% da área do MDE 5m comparativamente à 90,42% da área do MDE 1m, para curvatura vertical retilínea.

Percebe-se que, para o MDE 1m, o modelo tem uma pequena redução de áreas de curvaturas planares e retilíneas. No caso da microbacia MP III-IV, curvaturas das classes convergentes e

divergentes (horizontais) e as classes cônica e convexa (verticais) se apresentam esparsadas para os limiares adotados, devido à dificuldade de uma caracterização mais adequada. O aumento do limiar descaracteriza a ocorrência dos corpos hídricos na região, como constatou-se com os testes.

Para as formas de vertente divergente e convexa, definidas como valor 1 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento, essas classes são verificadas em 4,82% da área do MDE 5m comparativamente à 4,94% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal divergente, e em 4,86% da área do MDE 5m comparativamente à 5,07% da área do MDE 1m, para curvatura vertical convexa. As Figuras 4.37 e 4.38 sintetizam de forma comparativa o percentual de curvatura horizontal e vertical, respectivamente, para a análise de formas de vertente nesta microbacia.

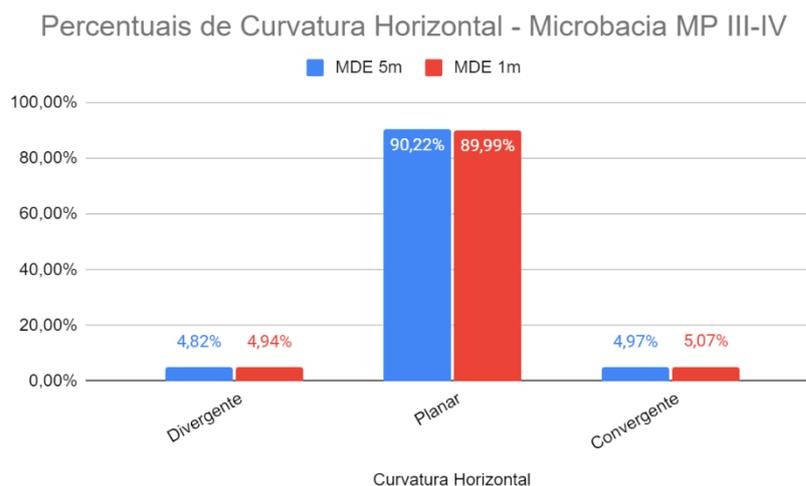


Figura 4.37 - Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP III-IV.

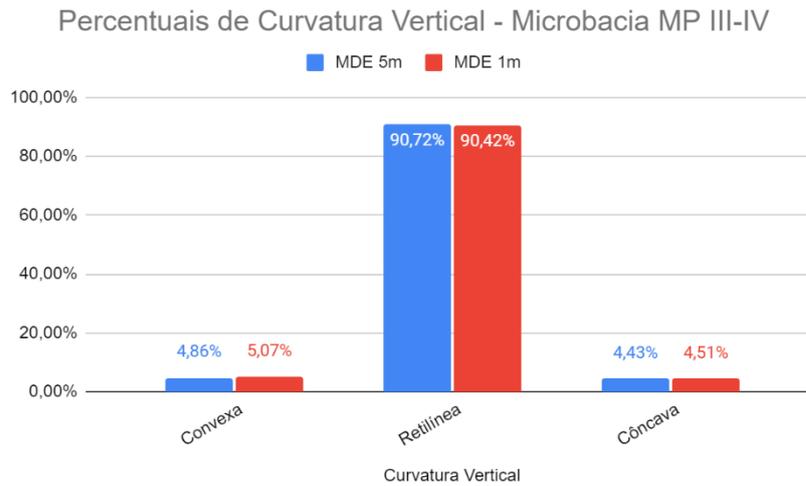


Figura 4.38 - Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP III-IV.

#### 4.3.4 MODELO HAND

As Cartas do Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage* - Altura Acima da Drenagem Mais Próxima), Figura 4.39, evidenciam uma concentração de alturas mais próximas às drenagens associados a hidrografia já existente ou canais de escoamento superficiais da microbacia MP III-IV como nos córregos Vicente Pires e Águas Claras.

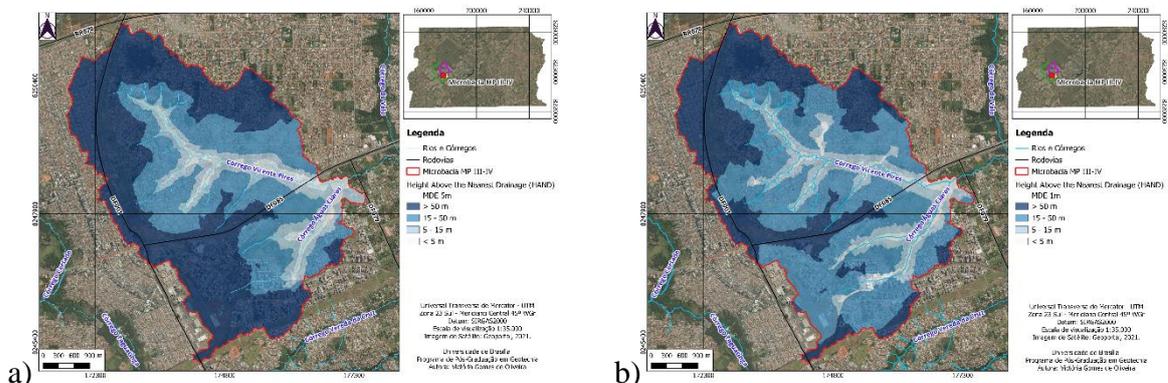


Figura 4.39 - Carta do modelo HAND da microbacia MP III-IV. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.

A Tabela 4.18 apresenta as áreas em ha e em (%) da microbacia MP III-IV dos intervalos de valor do HAND definidos por Silva et al. (2013). As divisões dos intervalos foram definidas baseando-se em quatro classes para o HAND: inundação (até 5 m), transição (de 5 m a 15 m), encostas (de 15 m a 50 m) e topos de morro (maior que 50 m), sendo classificados quanto a suscetibilidade a inundações e alagamentos de forma decrescente.

Tabela 4.18 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP III-IV e seus respectivos quantitativos.

| Modelo<br>HAND (m) | MDE 5m    |             | MDE 1m       |             | Diferença        |                 |
|--------------------|-----------|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|
|                    | Área (ha) | Porcentagem | Área<br>(ha) | Porcentagem | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| < 5                | 106,15    | 5,26%       | 102,17       | 5,07%       | 3,98             | -3,75%          |
| 5 - 15             | 206,64    | 10,25%      | 259,22       | 12,85%      | 52,58            | 25,45%          |
| 15 - 50            | 646,81    | 32,07%      | 953,60       | 47,28%      | 306,79           | 47,43%          |
| > 50               | 1057,38   | 52,42%      | 701,99       | 34,80%      | 355,39           | -33,61%         |
| <b>Total</b>       | 2016,98   | 100,00%     | 2016,98      | 100,00%     | -                | -               |

Os testes feitos para obtenção da área de contribuição de acordo com a rede de drenagem obtida pelo HAND, para a microbacia MP II, resultaram em áreas de contribuição distintas para cada MDE, sendo a área de contribuição do MDE 5m igual a 96,55 ha e do MDE 1m igual a 77,23 ha. Foi testado aplicar a área de contribuição do MDE 1m no modelo HAND de 5 metros, porém os resultados apresentados se mostram superestimados para a microbacia local.

Com o aumento de precisão do modelo digital, nota-se uma diminuição relativa de 3,75% (HAND menor que 5m) na área inundável, com maior concentração de áreas inundáveis próximas ao exutório para o MDE 5m, e um aumento na extensão dos cursos hídricos na microbacia MP III-IV no MDE 1m, principalmente no curso principal do Córrego Águas Claras. Observam-se, também, diversas áreas drenantes localizadas em áreas de urbanização consolidada, provavelmente relacionadas às nascentes soterradas na expansão urbana das Regiões Administrativas de Águas Claras e Vicente Pires.

A drenagem obtida pela modelagem HAND e utilizada neste trabalho visou adequar, de maneira fidedigna, a realidade de todas as microbacias, especialmente as de alta densidade hidrográfica como as microbacias MP II, III-IV e VI. Observa-se que no modelo MDE 5m da microbacia MP III-IV, optou-se por utilizar um resultado mais conservador sendo diversas áreas nas extremidades da bacia, portanto, consideradas não inundáveis (HAND maior que 50m).

A Figura 4.40 apresenta as informações da Tabela 4.22 em intervalos agrupados por área de interesse, visando proporcionar uma visualização mais eficaz dos dados. Destaca-se uma notável diminuição de áreas de baixo valor de HAND (intervalos menor que 5m e maior que 50m) do MDE 5m para o MDE 1m. O modelo HAND do MDE 1m superestima dados de fluxo preferencial, visto que alguns córregos e nascentes da região foram densamente ocupados entre

o período da obtenção dos dados topográficos (2009 para curvas de 5 metros e 2016 para curvas de 1 metro).

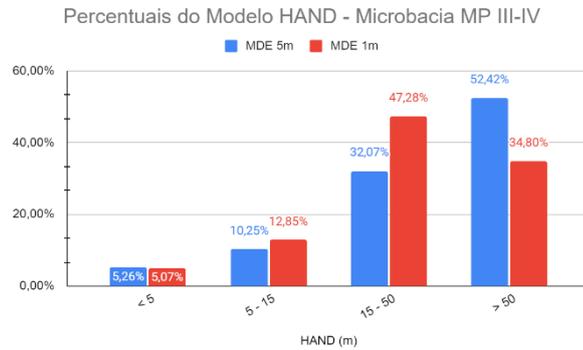


Figura 4.40 - Gráfico de distribuição da microbacia MP III-IV por intervalos do HAND.

### 4.3.5 USO E COBERTURA DO SOLO

A Carta de Uso e Cobertura da Solo (Figura 4.41) da microbacia MP III-IV foi elaborada a partir de dados de uso e cobertura de 2019 disponibilizados no Geoportal na escala de 1:10.000. Para as áreas selecionadas, o sistema de classificação abrangeu as seguintes classes: Agricultura, Água, Área construída, Formação campestre, Formação florestal, Formação savânica, Sistema viário e Solo exposto.

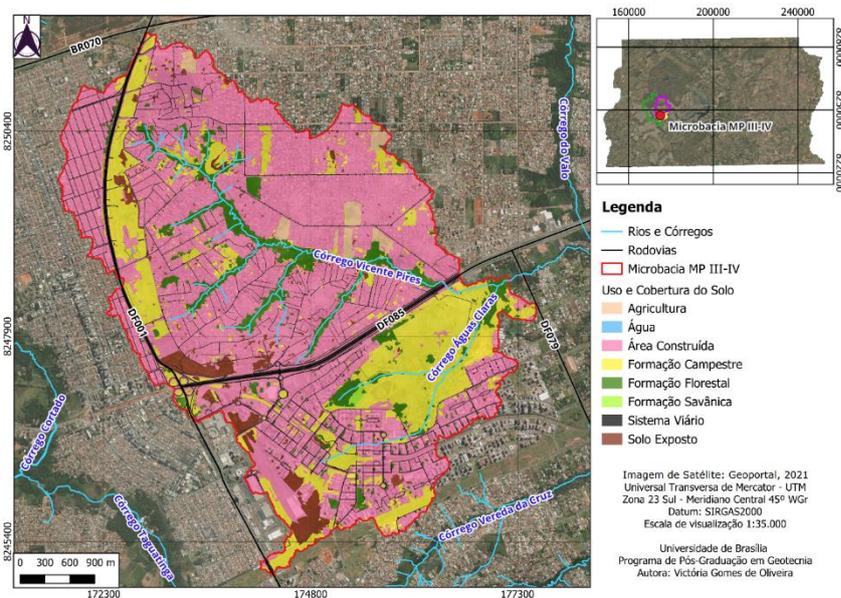


Figura 4.41 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia III-IV.

Tabela 4.19- Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP III-IV.

| <b>Uso e Cobertura do Solo</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Porcentagem</b> |
|--------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Agricultura</b>             | 27,41            | 1,36%              |
| <b>Água</b>                    | 0,17             | 0,01%              |
| <b>Área construída</b>         | 1230,43          | 61,00%             |
| <b>Formação campestre</b>      | 405,62           | 20,11%             |
| <b>Formação florestal</b>      | 154,66           | 7,67%              |
| <b>Formação savânica</b>       | 2,66             | 0,13%              |
| <b>Sistema viário</b>          | 123,99           | 6,15%              |
| <b>Solo exposto</b>            | 72,04            | 3,57%              |
| <b>Total</b>                   | 2016,98          | 100,00%            |

Como visto na Tabela 4.19, a Área Construída (61,00%) e Formação Campestre (20,11%) representam a maior porcentagem dessa microbacia, evidenciando um grau de urbanização acentuado e de grande atividade antrópica, além de uma malha viária expressiva em 6,15% da área e atividades agrícolas em 1,36% da área da microbacia.

As áreas classificadas com valor 3 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, alta suscetibilidade, representam 1354,59 ha ou 67,16% da totalidade da microbacia MP III-IV. A ocupação urbana representa áreas de valores mais expressivos com distribuição ao longo da bacia inteira e correspondem, também, a áreas de declividade até 15%. Essa classe apresenta cobertura alta de impermeabilização que confere grande capacidade de escoamento superficial potencializando tempos menores de resposta e picos de vazão. A ocupação antrópica caracteriza-se como densamente urbanizada e promove alta capacidade de escoamento superficial com reduzido tempo de resposta.

As áreas classificadas com valor 2 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, média suscetibilidade, são representadas pela classe de solo exposto em áreas antropizadas e agricultura nessa microbacia, com valores de área de 99,45 ha ou 4,93%. Correspondem à áreas esparsas e sua resposta hidrológica é baixa proporcionalmente à bacia.

As áreas classificadas com valor 1 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, baixa suscetibilidade, correspondem às classes de formações florestal, savânica e campestre e ocupam área de 562,94 ha ou 27,91% da bacia. A distribuição dessa categoria concentra-se principalmente junto aos cursos hídricos e em áreas de parque urbano (Parque de Águas Claras e Taguaparque). O fato dessa classe estar localizada em áreas com declividade menores que 8%

e recobrando os córregos e algumas nascentes da microbacia evidencia o processo de urbanização desorganizada e tentativa de preservação de áreas de cobertura vegetal remanescentes.

#### 4.3.6 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO

A Figura 4.42 apresenta as cartas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP III-IV, resultado da  lgebra de mapas das reclassifica es da Declividade, Formas de Vertente e Modelo HAND supracitados nos itens “4.3.2”, “4.3.3” e “4.3.4”. Pode-se concluir que, nesta microbacia, a característica predominante na análise de áreas com muito alta e alta suscetibilidade   inunda o está relacionada com regiões de fluxo preferencial obtidas no modelo HAND e próximas aos cursos hídricos, correspondendo a 0,75% da área para o MDE 5m e 0,49% para o MDE 1m (Tabela 4.20).

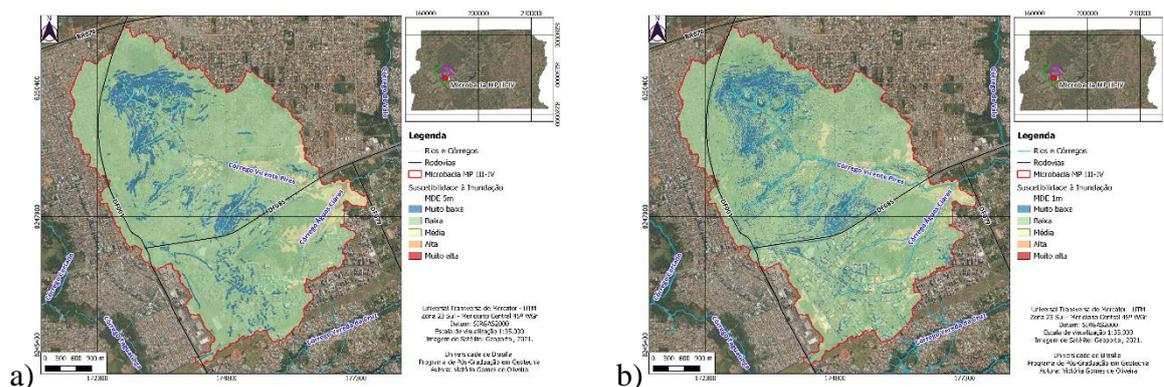


Figura 4.42- Carta da suscetibilidade a inunda es da microbacia MP III-IV. (a) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 5m e (b) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 1m.

Tabela 4.20– Classifica o da suscetibilidade a inunda es para a microbacia MP III-IV.

| Suscetibilidade   Inunda o | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|----------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                            |  rea (ha) | Porcentagem |  rea (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>         | 237,01    | 11,75%      | 255,46    | 12,67%      | 18,45         | 7,78%        |
| <b>Baixa</b>               | 1627,49   | 80,69%      | 1552,30   | 76,96%      | 75,19         | -4,62%       |
| <b>Média</b>               | 137,28    | 6,81%       | 199,26    | 9,88%       | 61,98         | 45,15%       |
| <b>Alta</b>                | 14,90     | 0,74%       | 9,72      | 0,48%       | 5,18          | -34,77%      |
| <b>Muito alta</b>          | 0,30      | 0,01%       | 0,24      | 0,01%       | 0,06          | -20,00%      |
| <b>Total</b>               | 2016,98   | 100,00%     | 2016,98   | 100,00%     | -             | -            |

Devido ao relevo muito acentuado nas proximidades dos córregos e ocupa es mais planas afastadas dos cursos hídricos, essa microbacia possui uma baixa suscetibilidade a inunda es.

A Figura 4.43 identifica de forma comparativa o percentual de áreas suscetíveis a inundação nesta microbacia.

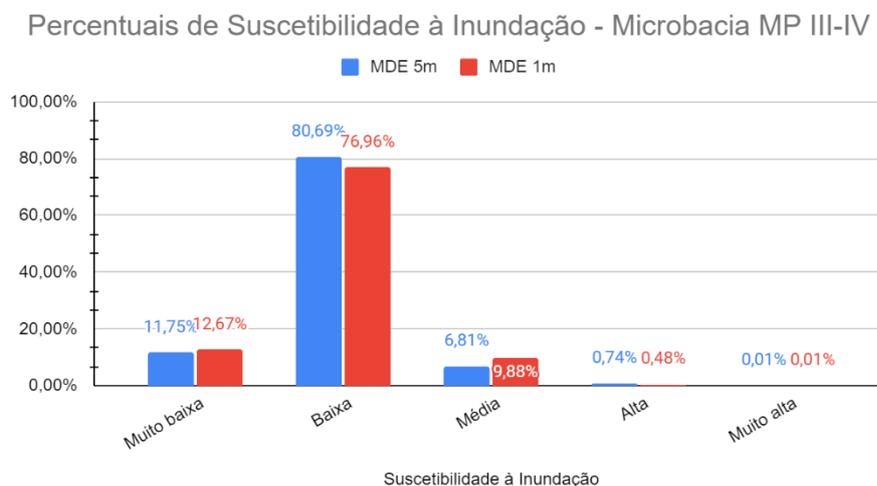


Figura 4.43 – Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP III-IV.

Nas categorias de Muito Alta e Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP III-IV, ocorre a diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível nas diferenças relativas de 20,00% e 34,77%, respectivamente. Identifica-se a predominância dessas áreas no leito dos Córregos Vicente Pires e Águas Claras, áreas já inundadas e com cobertura vegetal de formação florestal e campestre.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 6,81% da área do MDE 5m e 9,88% da área do MDE 1m, ou seja, um incremento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Essa diferença (61,98 ha em termos de diferença absoluta) ocorre, principalmente, com aumento de áreas no intervalo de 5 a 15 e 15 a 50 metros no modelo HAND no MDE 1m e o cruzamento de dados de declividade plana suave (até 5%) nas extremidades da microbacia. Dessa forma, há uma superestimativa de média suscetibilidade em áreas que são improváveis de ocorrer inundação, áreas que podem possuir suscetibilidade de acúmulo de água pluvial por outros processos.

As áreas caracterizadas como Baixa Suscetibilidade correspondem à maior parte da microbacia MP III-IV, com variação de área de 1627,49 ha ou 80,69% no MDE 5m e área de 1552,30 ha ou 76,96% no MDE 1m. Por se tratar de uma bacia que abrange diversos cursos hídricos perenes e intermitentes localizados em área vegetada e densamente urbanizada, a maior parte da microbacia está em áreas de baixa probabilidade de inundações em cotas intermediárias a elevadas do terreno. A predominância da classificação de baixa suscetibilidade se deve pela

grande área de declividade plana a suave ondulada (até 8%) em áreas de HAND maiores que 15 m e curvatura planar retilínea.

Por fim, as áreas classificadas como Muito Baixa Suscetibilidade são caracterizadas por superfícies majoritariamente convexas e divergentes de declividade maior que 8% e localizadas em zonas do HAND, predominantemente, maiores que 50m. Correspondem a segunda maior classe de suscetibilidade para ambos MDEs (11,75% no MDE 5m e 12,67% no MDE 1m), com aumento relativo de 7,78% de área do MDE 1m em comparação com o MDE 5m.

#### 4.3.7 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO

A Figura 4.44 apresenta as cartas de suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP III-IV, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Uso e Cobertura do Solo supracitados nos itens “4.3.2”, “4.3.3” e “4.3.5”. É perceptível que a maior parte das áreas em zonas de muito alta e alta suscetibilidade ao alagamento se encontram justamente em áreas urbanizadas com declividade até 5%, correspondente a 32,71% da área para o MDE 5m e 30,07% para o MDE 1m (Tabela 4.21).

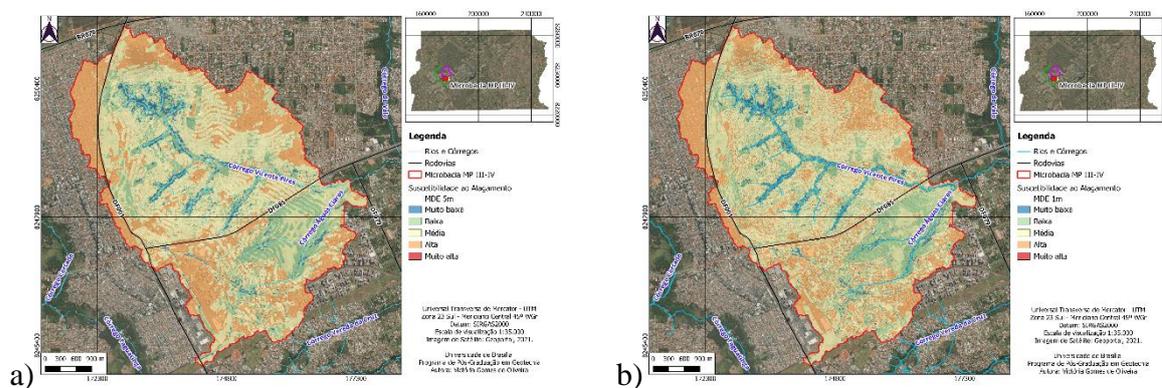


Figura 4.44 – Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP III-IV. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m.

Tabela 4.21 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP III-IV.

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>            | 62,84     | 3,12%       | 73,45     | 3,64%       | 10,61         | 16,88%       |
| <b>Baixa</b>                  | 360,69    | 17,88%      | 419,6     | 20,80%      | 58,91         | 16,33%       |
| <b>Média</b>                  | 933,61    | 46,29%      | 917,47    | 45,49%      | 16,14         | -1,73%       |
| <b>Alta</b>                   | 656,93    | 32,57%      | 601,58    | 29,83%      | 55,35         | -8,43%       |

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| Muito alta                    | 2,91      | 0,14%       | 4,88      | 0,24%       | 1,97          | 67,70%       |
| <b>Total</b>                  | 2016,98   | 100,00%     | 2016,98   | 100,00%     | -             | -            |

Diferentemente da suscetibilidade à inundação, classes de média e alta suscetibilidade ao alagamento são muito expressivas nessa microbacia para ambos MDEs. Porém, o dado de maior precisão topográfica (MDE 1m) possui aumento das classes de muito baixa e baixa suscetibilidade a alagamento em relação ao MDE 5m. Isso, provavelmente, está relacionado ao aumento de áreas de maior declividade. A Figura 4.45 apresenta de forma gráfica as comparações entre as mudanças de suscetibilidade a alagamentos.

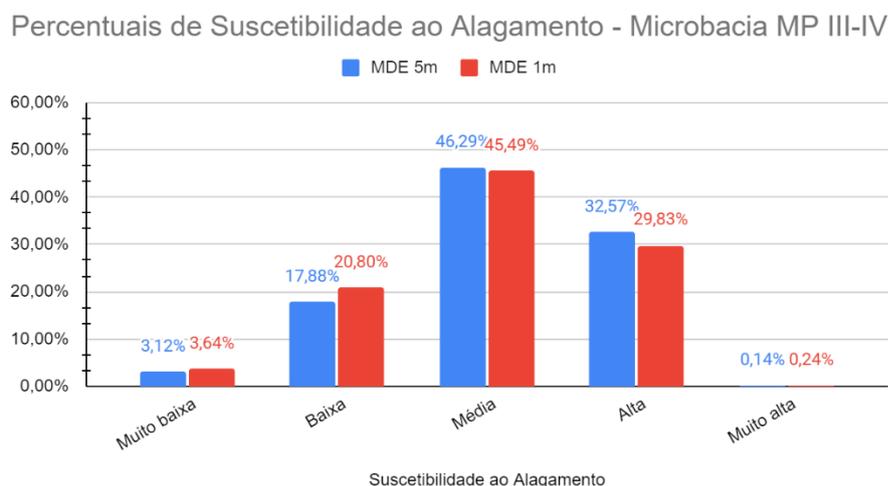


Figura 4.45 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP III-IV.

Na classe de Muito Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP III-IV, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 67,70%, ainda que em termos absolutos isso corresponda a 1,97 ha. Está associado ao cruzamento de áreas com declividade plana a suave e curvaturas convergentes e/ou convexas em áreas urbanas, observadas como locais de acúmulo de água.

Na classe de Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP III-IV, ocorre uma diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, representada na diferença relativa de 8,43% e correspondente à 55,35 ha na diferença absoluta. Corresponde à segunda classe de suscetibilidade mais expressiva nesta microbacia para ambos MDEs (32,57% do MDE 5m e 29,83% do MDE 1m), por se tratar de uma região com alto índice de ocupação antrópica com

áreas de declividades de até 8% nas extremidades da microbacia. Além disso, observa-se que o padrão de ocupação urbano é caracterizado variadamente por residências e edificações e alta taxa de impermeabilização do solo, característica que favorece e potencializa o acúmulo de água em escala local.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 46,29% da área do MDE 5m e 45,49% da área do MDE 1m, ou seja, uma diminuição de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange áreas ao longo de toda a microbacia com declividade entre 5 e 15% associadas a altas taxas de ocupação urbana e curvatura planar retilínea. A pequena diminuição relativa (1,73%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de baixa suscetibilidade em ocupações urbanas, uma vez que nessas áreas o MDE 1m apresenta regiões com declividades mais declivosas.

A região classificada como Baixa Suscetibilidade corresponde a 17,88% da área do MDE 5m e 20,80% da área do MDE 1m, ou seja, um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange boa parte das áreas de declividade maior que 5% na região associada a parte da formação florestal e campestre e curvaturas planares e retilíneas. O incremento relativo (20,80%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de declividades maiores que 8% em detrimento de declividades mais suaves.

Na região classificada como Muito Baixa Suscetibilidade, predominam áreas de curvatura divergente e/ou convexa em áreas de cobertura vegetal e declividades onduladas a fortes (maiores que 30%). Há um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação, com 3,12% da área do MDE 5m e 3,64% da área do MDE 1m, sendo a segunda classe proporcionalmente menos expressiva nesta microbacia.

#### **4.4 ÁREA 4 – MICROBACIA MP IV**

##### **4.4.1 HIPSOMETRIA**

A Figura 4.46 apresenta as Cartas de Hipsometria da microbacia MP IV para curvas de nível de 5m e 1m. É possível observar que as cotas altimétricas variam de 1.135 a 1.260 metros para o MDE 5m e de 1.127 a 1.262 metros para o MDE 1m, sendo fatiados em intervalos de 10 metros representados na Tabela 4.22.

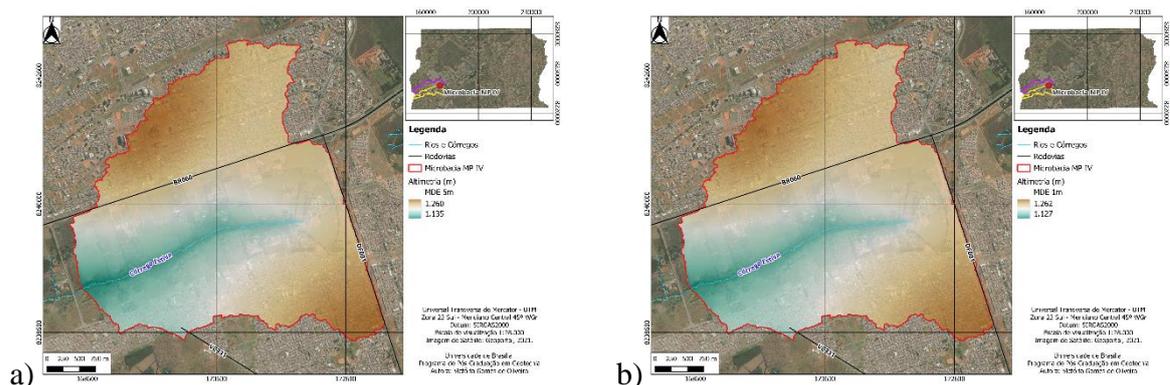


Figura 4.46 – Carta hipsométrica da microbacia MP IV. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m.

Tabela 4.22 – Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP IV.

| Altimetria (m) | MDE 5m         |                | MDE 1m         |                | Diferença     |              |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|
|                | Área (ha)      | Porcentagem    | Área (ha)      | Porcentagem    | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 1140         | 6,74           | 0,47%          | 8,13           | 0,57%          | 1,39          | 20,62%       |
| 1140 - 1150    | 23,11          | 1,61%          | 25,52          | 1,78%          | 2,41          | 10,43%       |
| 1150 - 1160    | 47,46          | 3,30%          | 50,52          | 3,52%          | 3,06          | 6,45%        |
| 1160 - 1170    | 82,48          | 5,74%          | 83,77          | 5,83%          | 1,29          | 1,56%        |
| 1170 - 1180    | 119,01         | 8,28%          | 120,77         | 8,40%          | 1,76          | 1,48%        |
| 1180 - 1190    | 110,25         | 7,67%          | 110,14         | 7,66%          | 0,11          | -0,10%       |
| 1190 - 1200    | 107,49         | 7,48%          | 110,75         | 7,71%          | 3,26          | 3,03%        |
| 1200 - 1210    | 128,23         | 8,92%          | 133,57         | 9,29%          | 5,34          | 4,16%        |
| 1210 - 1220    | 189,91         | 13,21%         | 200,62         | 13,96%         | 10,71         | 5,64%        |
| 1220 - 1230    | 264,22         | 18,39%         | 246,41         | 17,15%         | 17,81         | -6,74%       |
| 1230 - 1240    | 133,65         | 9,30%          | 133,08         | 9,26%          | 0,57          | -0,43%       |
| 1240 - 1250    | 100,38         | 6,98%          | 101,39         | 7,06%          | 1,01          | 1,01%        |
| 1250 - 1260    | 94,10          | 6,55%          | 99,20          | 6,90%          | 5,10          | 5,42%        |
| > 1260         | 30,06          | 2,09%          | 13,22          | 0,92%          | 16,84         | -56,02%      |
| <b>Total</b>   | <b>1437,09</b> | <b>100,00%</b> | <b>1437,09</b> | <b>100,00%</b> | -             | -            |

A partir dos modelos de elevação gerados com a ferramenta *Topo do Raster*, foi realizado o processo de filtragem dos *rasters* utilizando a ferramenta *Filter*, em *Analyst Tool*, no ArcGIS, visando criar produtos mais consistentes e eliminar erros sistemáticos que poderiam resultar distorções nos dados topográficos. Há poucas diferenças visuais entre os MDEs da microbacia MP IV, provavelmente por se tratar de uma microbacia grande com baixa variação altimétrica comparativamente com outras bacias deste estudo, além das redistribuições de áreas nas cotas altimétricas.

Observam-se diferenças relativas expressivas nas cotas altimétricas das extremidades: aumento de área da cota mais baixa (menor que 1140 m) em 20,62% e diminuição de área da cota mais alta (maior que 1260 m) em 56,02% na comparação entre os MDEs 5m e 1m, além de pequenas variações ao longo da microbacia. Por se tratar de uma área com 1437,09 hectares, nenhuma variação altimétrica ultrapassou 18 hectares, apresentando variações menores que 1,3% em relação à área total da microbacia MP IV. A Figura 4.47 apresenta os histogramas dos MDE 5m e 1m para melhor visualização do resultado percentual.

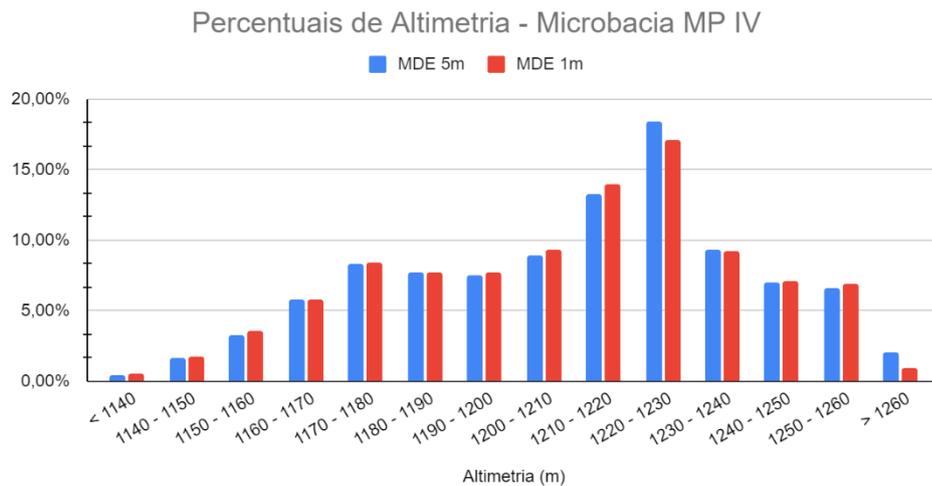


Figura 4.47 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP IV.

Com a obtenção dos MDEs de 5m e 1m, são processados os *rasters* de Relevo Sombreado. As Cartas de Relevo Sombreado (Figura 4.48), apresentam as diferenças visuais entre o MDE 5m e o MDE 1m. Assim como na microbacia MP III-IV, observa-se que a interpolação direta das curvas de nível ocasiona a formação de ondulações, principalmente em área de declividade plana a suave no MDE 5m, enquanto que contornos topográficos de vias e do Córrego Estiva são mais visíveis no MDE 1m. Assim, a análise visual das características topográficas da microbacia MP IV forneceu subsídios para interpretação visual de resultados numéricos como declividade e curvatura.

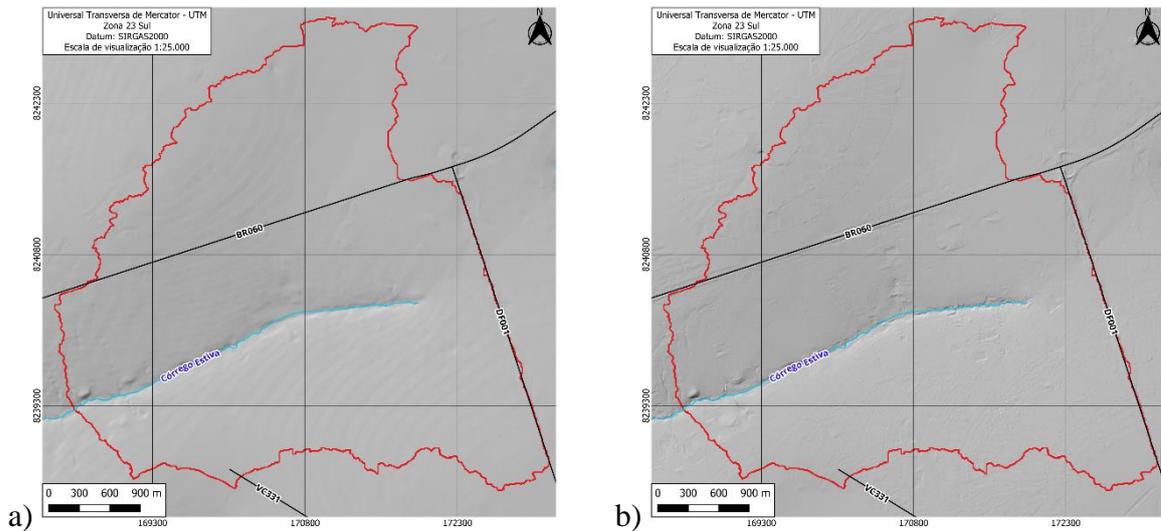


Figura 4.48 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP IV. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m.

#### 4.4.2 DECLIVIDADE

A Figura 4.49 apresenta as Cartas de Declividade da microbacia MP IV para curvas de nível de 5m e 1m conforme delimitado por Da Silva e Carvalho (2006). Também foi feito o gráfico quantitativo comparativo para cada um dos MDEs para identificar a distribuição de áreas e suas respectivas porcentagens na influência dos valores atribuídos para a análise de inundações e alagamentos, como observado na Tabela 4.23 e Figura 4.50.

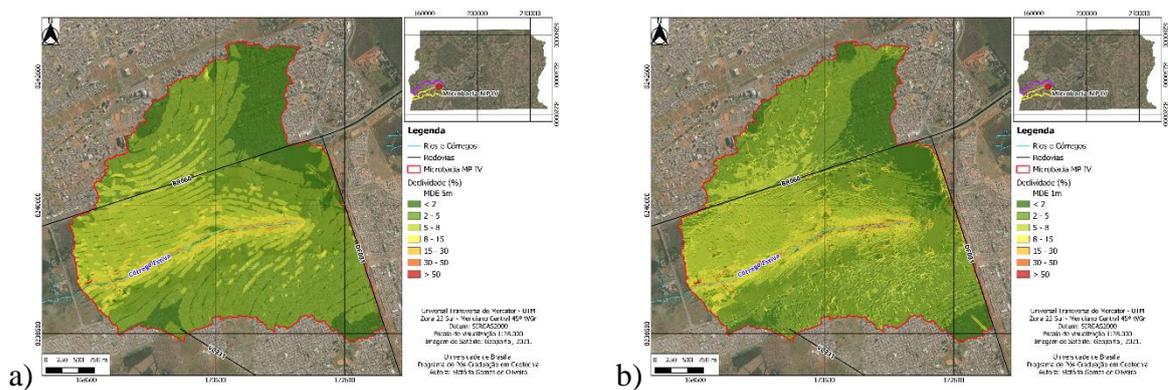


Figura 4.49 – Carta de declividade da microbacia MP IV. (a) Declividade do MDE de 5m e (b) Declividade do MDE de 1m

Tabela 4.23 – Classes de declividade da microbacia MP IV.

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (há) | Porcentagem | Área (há) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 2             | 275,12    | 19,14%      | 250,12    | 17,40%      | 25,00         | -9,09%       |
| 2 – 5           | 710,01    | 49,41%      | 676,76    | 47,09%      | 33,25         | -4,68%       |
| 5 – 8           | 343,90    | 23,93%      | 374,02    | 26,03%      | 30,12         | 8,76%        |

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (há) | Porcentagem | Área (há) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>8 – 15</b>   | 93,37     | 6,50%       | 110,68    | 7,70%       | 17,31         | 18,54%       |
| <b>15 – 30</b>  | 14,17     | 0,99%       | 21,39     | 1,49%       | 7,22          | 50,95%       |
| <b>30 – 50</b>  | 0,48      | 0,03%       | 3,60      | 0,25%       | 3,12          | 650,00%      |
| <b>&gt; 50</b>  | 0,04      | < 0,01%     | 0,52      | 0,04%       | 0,48          | 1200,00%     |
| <b>Total</b>    | 1437,09   | 100,00%     | 1437,09   | 100,00%     | -             | -            |

Para a microbacia MP IV, as diferenças na declividade ocorrem, principalmente, na diminuição de áreas de declividade plana a suave (até 5%) e aumento de áreas declividades maiores que 5% do MDE 5m para o MDE 1m. Em termos absolutos, o maior aumento ocorre no intervalo de 5 a 8%, com aumentos relativos expressivos nas declividades onduladas a fortes (intervalos de 30 a 50% e maior que 50%). Por se tratar de uma bacia em localidade predominantemente plana suave, as classes com maiores áreas permanecem as mesmas para ambos MDEs nos intervalos de 2 a 5% (710,01 ha no MDE 5m e 676,76 ha no MDE 1m) e 5 a 8% (343,90 ha no MDE 5m e 374,02 ha no MDE 1m).

Em termos absolutos, nenhuma diferença absoluta ultrapassa 34 hectares, ou seja, todas as diferenças de declividade correspondem a menos de 3% da área total da microbacia MP IV. Contudo, a diferença relativa apresenta porcentagens consideravelmente mais altas para os intervalos de 30 a 50% (aumento de área em 650,00%) e maior que 50% (aumento de área em 1200,00%) de declividade do MDE 1m em relação ao MDE 5m.

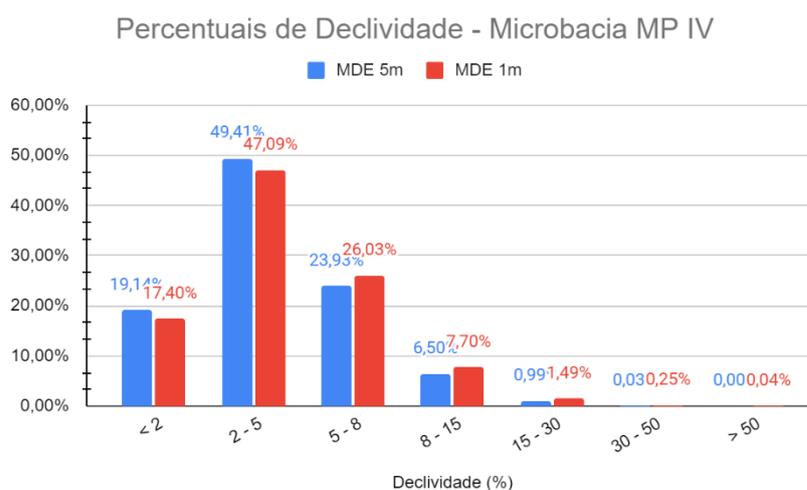


Figura 4.50 – Gráfico de distribuição da área MP IV em (%) por intervalos da declividade.

A Figura 4.50 apresenta graficamente a distribuição da porcentagem de microbacia MP IV por faixa de declividade. Observa-se que ultrapassa 98% da microbacia regiões com declividades menores que 15%, com destaque para o intervalo de 2 a 5% de declividade. A faixa não urbanizável com declividades maiores que 30% corresponde de 0,03% (MDE 5m) a 0,29% (MDE 1m) da microbacia MP VI.

#### 4.4.3 FORMAS DE VERTENTE

Como visto nas Cartas de Forma de Vertente da microbacia MP IV (Figura 4.51), há uma grande similaridade dos dados de curvatura, tanto horizontais quanto verticais, do MDE 5m para o MDE 1m.

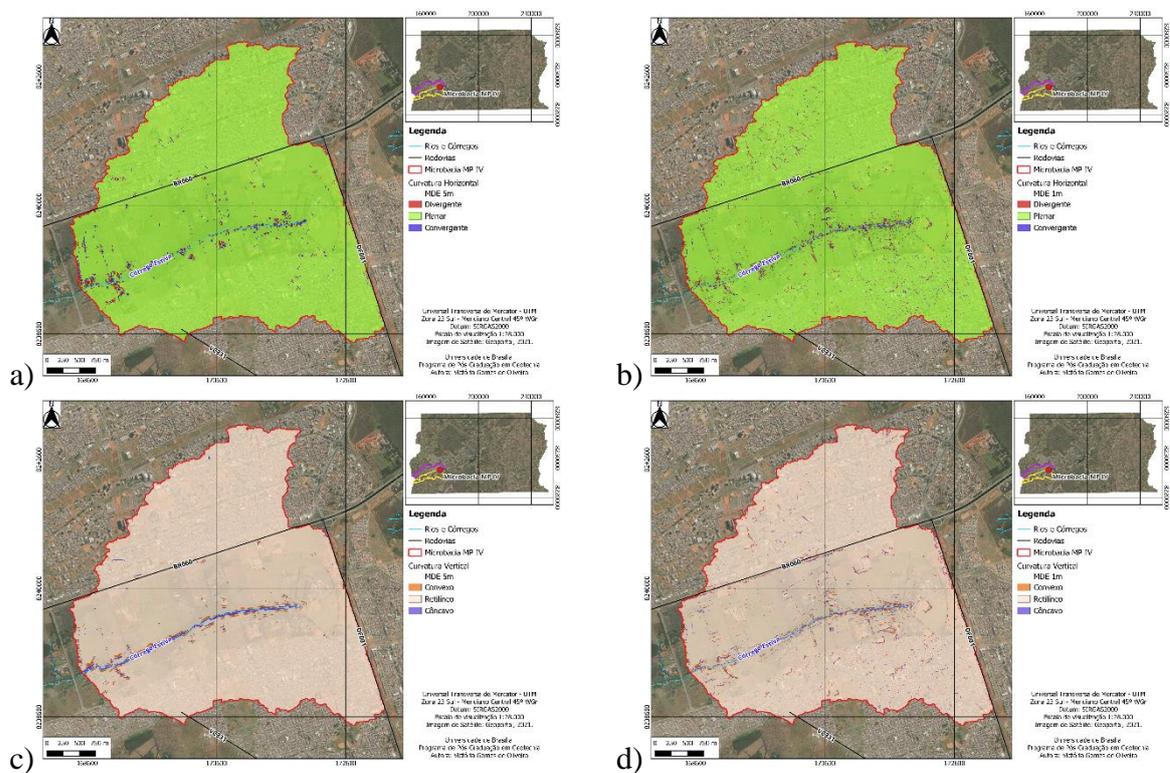


Figura 4.51 – Carta de formas de vertente da microbacia MP IV. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m.

Foram feitos vários de testes conjuntos nos MDE para determinar de forma arbitrária os limiaries das vertentes retilíneas na microbacia MP IV, visando gerar mapas relacionados aos tipos de relevo da microbacia. Esses testes incluíram a utilização de mapas comparativos de relevo sombreado com as cartas de curvatura horizontal e vertical, a observação padronizada de perfis de vertentes representativas e ajuste da variação estatística fornecida pelo *software* ArcGIS.

Como resultado, foram selecionados os intervalos de -0,24/m a +0,15/m para a classe de vertentes planares e -0,29/m a +0,34/m para a classe de vertentes retilíneas no MDE 5m. Já para o MDE 1m, foram selecionados os intervalos de -0,40/m a +0,38/m para a classe de vertentes planares e -0,35/m a +0,39/m para a classe de vertentes retilíneas.

Constatou-se o alargamento da faixa de limiaries no MDE 1m com os testes de curvatura. Ao aplicar os mesmos limiaries do MDE 5m, ocorre o aparecimento de *pixels* de curvatura divergente/convergente ou convexa/côncava em áreas que, na análise visual, não correspondem à realidade. A Tabela 4.24 apresenta as áreas obtidas e seus respectivos percentuais para cada tipo de curvatura na microbacia MP IV.

Tabela 4.24 – Classificação das formas de vertente para a microbacia MP IX.

| Forma de Vertente    | MDE 5m      |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |         |
|----------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|---------|
|                      | Área (ha)   | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |         |
| Curvatura Horizontal | Divergente  | 10,25       | 0,71%     | 19,10       | 1,33%         | 8,85         | 86,34%  |
|                      | Planar      | 1411,22     | 98,20%    | 1396,57     | 97,18%        | 14,65        | -1,04%  |
|                      | Convergente | 15,62       | 1,09%     | 21,42       | 1,49%         | 5,80         | 37,13%  |
| <b>Total</b>         | 1437,09     | 100,00%     | 1437,09   | 100,00%     | -             | -            |         |
| Curvatura Vertical   | Convexa     | 12,07       | 0,84%     | 27,54       | 1,92%         | 15,47        | 128,17% |
|                      | Retilínea   | 1409,28     | 98,06%    | 1385,28     | 96,39%        | 24,00        | -1,70%  |
|                      | Côncava     | 15,74       | 1,10%     | 24,27       | 1,69%         | 8,53         | 54,19%  |
| <b>Total</b>         | 1437,09     | 100,00%     | 1437,09   | 100,00%     | -             | -            |         |

A curvatura horizontal convergente foi observada em 1,09% da área do MDE 5m em comparação com 1,49% no MDE 1m. Já a curvatura vertical côncava foi observada em 1,10% da área do MDE 5m em comparação com 1,69% no MDE 1m. Essas áreas foram classificadas com suscetibilidade alta à inundação e ao alagamento (valor 3) e correspondem, principalmente, às áreas de abrangência do Córrego Estiva.

As formas de vertente planar e retilínea foram definidas como valor 2 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 98,20% da área do MDE 5m comparativamente à 97,18% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal planar, e em 98,06% da área do MDE 5m comparativamente à 96,39% da área do MDE 1m, para curvatura vertical retilínea.

Percebe-se que, para o MDE 1m, o modelo tem uma redução de áreas de curvaturas planares (14,65 ha em diferença absoluta) e retilíneas (24,00 ha em diferença absoluta). No caso da microbacia MP IV, curvaturas das classes convergentes e divergentes (horizontais) e as classes côncava e convexa (verticais) se apresentam esparsadas para os limiares adotados, devido à dificuldade de uma caracterização mais adequada por se tratar de uma bacia muito aplainada. O aumento do limiar descaracteriza o leito do Córrego Estiva, comprometendo a análise como constatou-se com os testes dos limiares.

Para as formas de vertente divergente e convexa, definidas como valor 1 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento, essas classes são verificadas em 0,71% da área do MDE 5m comparativamente à 1,33% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal divergente, e em 0,84% da área do MDE 5m comparativamente à 1,92% da área do MDE 1m, para curvatura vertical convexa. As Figuras 4.52 e 4.53 sintetizam de forma comparativa o percentual de curvatura horizontal e vertical, respectivamente, para a análise de formas de vertente nesta microbacia.

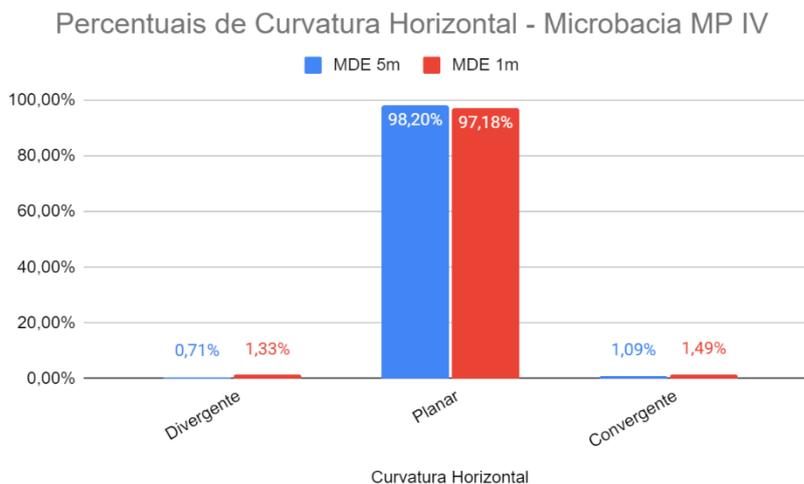


Figura 4.52 – Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP IV.

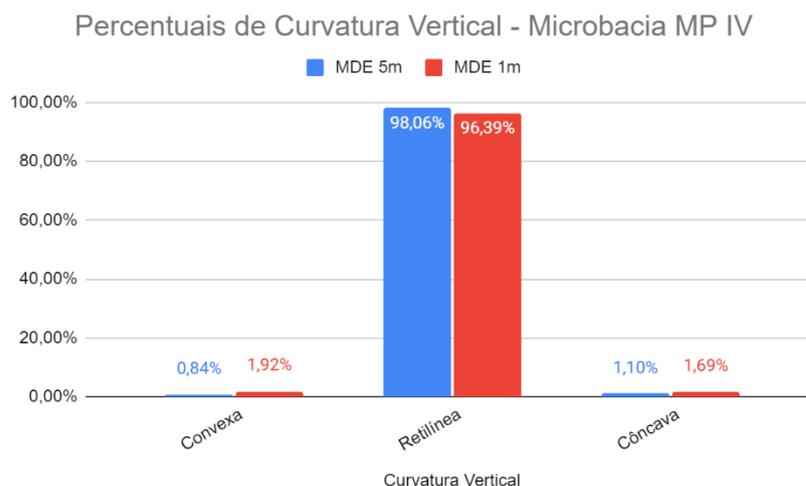


Figura 4.53 – Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP IV.

#### 4.4.4 MODELO HAND

As Cartas do Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage* – Altura Acima da Drenagem Mais Próxima), Figura 4.54, evidenciam uma concentração de alturas mais próximas às drenagens associados ao Córrego Estiva da microbacia MP IV. Contudo, é possível visualizar no modelo HAND do MDE 1m um caminho de fluxo preferencial da cabeceira da bacia até o córrego, característica marcante no dado de maior precisão topográfica.

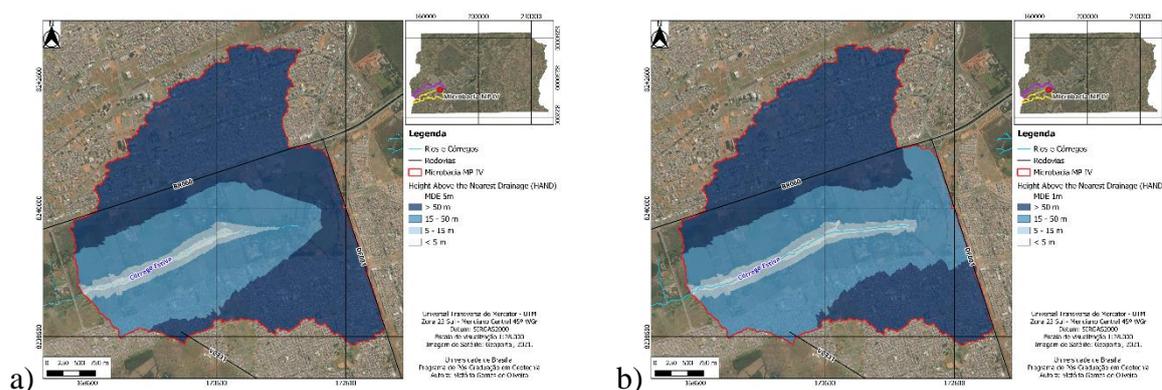


Figura 4.54 – Carta do modelo HAND da microbacia MP IV. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.

A Tabela 4.25 apresenta as áreas em ha e em (%) da microbacia MP IV dos intervalos de valor do HAND definidos por Silva et al. (2013). As divisões dos intervalos foram definidas baseando-se em quatro classes para o HAND: inundação (até 5 m), transição (de 5 m a 15 m), encostas (de 15 m a 50 m) e topos de morro (maior que 50 m), sendo classificados quanto a suscetibilidade a inundações e alagamentos de forma decrescente.

Tabela 4.25 – Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP IV e seus respectivos quantitativos.

| <b>Modelo<br/>HAND (m)</b> | <b>MDE 5m</b>    |                    | <b>MDE 1m</b>        |                    | <b>Diferença</b>         |                         |
|----------------------------|------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
|                            | <b>Área (ha)</b> | <b>Porcentagem</b> | <b>Área<br/>(ha)</b> | <b>Porcentagem</b> | <b>Absoluta<br/>(ha)</b> | <b>Relativa<br/>(%)</b> |
| <b>&lt; 5</b>              | 21,57            | 1,50%              | 27,44                | 1,91%              | 5,87                     | 27,21%                  |
| <b>5 – 15</b>              | 59,1             | 4,11%              | 69,25                | 4,82%              | 10,15                    | 17,17%                  |
| <b>15 – 50</b>             | 449,14           | 31,25%             | 577,1                | 40,16%             | 127,96                   | 28,49%                  |
| <b>&gt; 50</b>             | 907,28           | 63,13%             | 763,3                | 53,11%             | 143,98                   | -15,87%                 |
| <b>Total</b>               | 1437,09          | 100,00%            | 1437,09              | 100,00%            | -                        | -                       |

Foram feitos testes para obtenção da área de contribuição de acordo com a rede de drenagem obtida pelo HAND. Para estabelecer um resultado comparativo e representativo da área de inundação, os testes resultaram em áreas de contribuição distintas para cada MDE, sendo a área de contribuição do MDE 5m igual a 168,82 ha e do MDE 1m igual a 67,54 ha. Foi testado aplicar a área de contribuição do MDE 1m no modelo HAND de 5 metros, porém os resultados apresentados se mostram superestimados para a microbacia local.

Com o aumento de precisão do modelo digital, nota-se um aumento relativo de 27,21 % (HAND menor que 5m) na área inundável, um aumento da extensão do curso hídrico na microbacia MP IV e de áreas de encosta (HAND entre 15 e 50m) na cabeceira da microbacia. Isso também favorece a redução de área de 143,98 ha do MDE 5m para o MDE 1m nas áreas de HAND menor que 50m.

Destaca-se a notável mudança de concentração de área no intervalo maior que 50 metros do MDE 5m para o MDE 1m, uma vez que no modelo HAND deste ocorre um incremento expressivo no intervalo entre 15 e 50 metros. É possível visualizar as diferenças percentuais dos dois modelos na Figura 4.55.

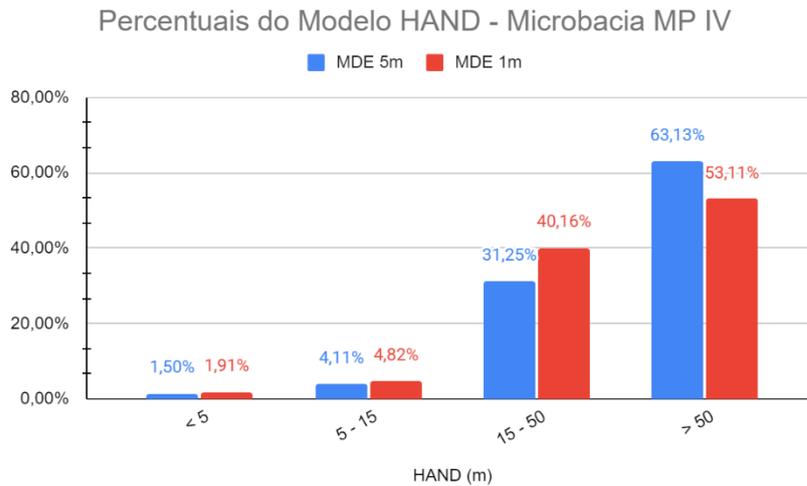


Figura 4.55 – Gráfico de distribuição da área MP IV em (%) por intervalos do HAND.

#### 4.4.5 USO E COBERTURA DO SOLO

A Carta de Uso e Cobertura da Solo (Figura 4.56) da microbacia MP IV foi elaborada a partir de dados de uso e cobertura de 2019 disponibilizados no Geoportal na escala de 1:10.000. Para as áreas selecionadas, o sistema de classificação abrangeu as seguintes classes: Água, Área construída, Formação campestre, Formação florestal, Sistema viário e Solo exposto.

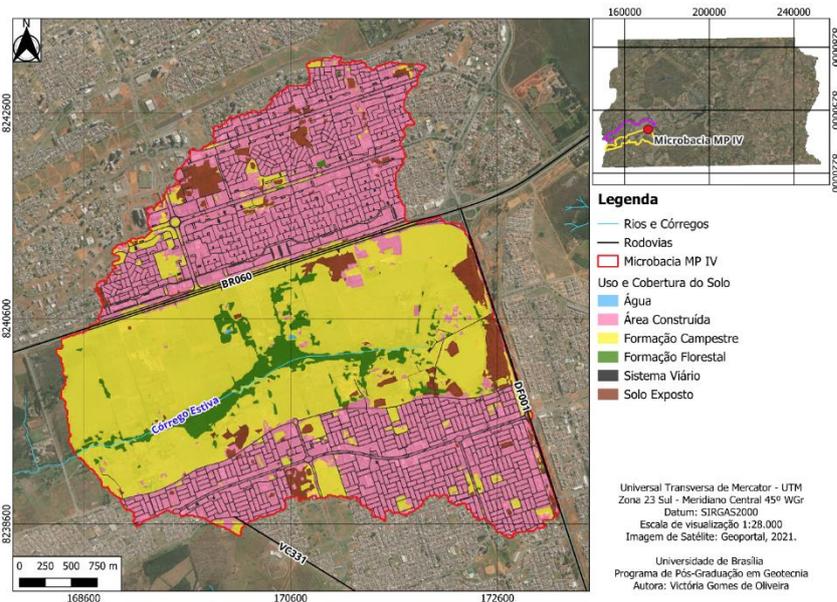


Figura 4.56 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia IV.

Tabela 4.26 – Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP IV.

| <b>Uso e Cobertura do Solo</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Porcentagem</b> |
|--------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Água</b>                    | 0,46             | 0,03%              |
| <b>Área construída</b>         | 499,68           | 34,77%             |
| <b>Formação campestre</b>      | 649,36           | 45,19%             |
| <b>Formação florestal</b>      | 67,94            | 4,73%              |
| <b>Sistema viário</b>          | 148,43           | 10,33%             |
| <b>Solo exposto</b>            | 71,22            | 4,96%              |
| <b>Total</b>                   | 1437,09          | 100,00%            |

Como visto na Tabela 4.26, A Formação Campestre (45,19%) e Área Construída (34,77%) representam a maior porcentagem dessa microbacia, evidenciando um grau de urbanização em expansão e áreas antropizada, além de uma malha viária expressiva em 6,15% da área e solo exposto em 4,96% da microbacia.

As áreas classificadas com valor 3 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, alta suscetibilidade, representam 648,57 ha ou 45,13% da totalidade da microbacia MP IV. A distribuição concentra-se, principalmente, nas extremidades norte e sul da bacia por corresponderem, principalmente, a áreas de declividade até 5%. Essa classe apresenta cobertura alta de impermeabilização, conferindo grande capacidade de escoamento superficial e potencializando tempos menores de resposta e picos de vazão. Destaca-se que essas áreas já se encontram densamente urbanizadas, bastante impermeabilizadas por asfaltamento e concretagem, além de grande densidade de construções.

As áreas classificadas com valor 2 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, média suscetibilidade, são representadas pela classe de solo exposto em áreas antropizadas nessa microbacia, com valores de área de 71,22 ha ou 4,96%. A distribuição se concentra na cabeceira da bacia em áreas de declividade plana a suave, indicando processos de ação antrópica.

As áreas classificadas com valor 1 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, baixa suscetibilidade, correspondem às classes de formações florestal e campestre e ocupam área de 717,30 ha ou 49,92% da bacia. A distribuição dessa categoria concentra-se na parte central de toda a bacia, com ênfase em coberturas vegetais mais arbóreas junto ao Córrego Estiva. Essa classe está localizada em áreas de diversas declividades, de declividades planas na cabeceira da bacia até declividades onduladas no leito do curso hídrico.

#### 4.4.6 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO

A Figura 4.57 apresenta as cartas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP IV, resultado da  lgebra de mapas das reclassifica es da Declividade, Formas de Vertente e Modelo HAND supracitados nos itens “4.4.2”, “4.4.3” e “4.4.4”. Ainda que a região possua declividade predominantemente suave a suave ondulada e altimetria mais baixa próxima ao curso hídrico, nota-se que a maior parte da microbacia possui baixa suscetibilidade   inunda o e que o caminho de fluxo preferencial obtido pelo modelo HAND do MDE 1m aumenta as áreas de suscetibilidade a inunda es nesse caso (Tabela 4.27).

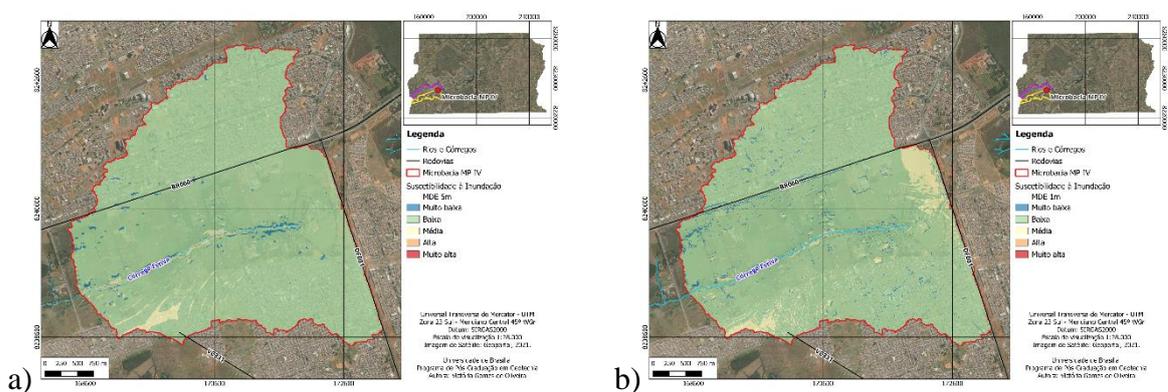


Figura 4.57 – Carta da suscetibilidade a inunda es da microbacia MP IV. (a) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 5m e (b) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 1m.

Tabela 4.27 – Classifica o da suscetibilidade a inunda es para a microbacia MP IV.

| Suscetibilidade   Inunda o | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|----------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                            |  rea (ha) | Porcentagem |  rea (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>         | 15,64     | 1,09%       | 32,45     | 2,26%       | 16,81         | 107,48%      |
| <b>Baixa</b>               | 1385,77   | 96,43%      | 1321,01   | 91,92%      | 64,76         | -4,67%       |
| <b>Média</b>               | 32,08     | 2,23%       | 82,08     | 5,71%       | 50,00         | 155,86%      |
| <b>Alta</b>                | 3,47      | 0,24%       | 1,49      | 0,10%       | 1,98          | -57,06%      |
| <b>Muito alta</b>          | 0,13      | 0,01%       | 0,06      | < 0,01%     | 0,07          | -53,85%      |
| <b>Total</b>               | 1437,09   | 100,00%     | 1437,09   | 100,00%     | -             | -            |

O relevo e características topográficas da microbacia MP IV indicam uma tendência de acúmulo de fluxo no Córrego Estiva, possuindo poucas áreas propensas   inunda o. A Figura 4.58 identifica de forma comparativa o percentual de áreas suscetíveis a inunda o nesta microbacia.

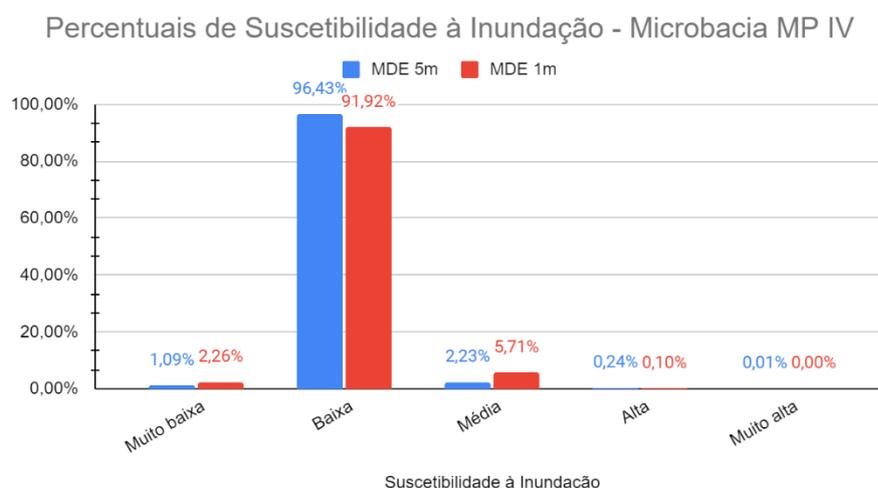


Figura 4.58 – Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP IV.

Nas categorias de Muito Alta e Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP IV, ocorre a diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível nas diferenças relativas de 53,85% e 57,06%, respectivamente. Identifica-se a predominância dessas áreas no leito do Córrego Estiva, áreas já inundadas e com densa cobertura vegetal de formação florestal e campestre, fator que amortece possíveis cheias devido a superfície de infiltração em áreas de cobertura natural.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 2,23% da área do MDE 5m e 5,71% da área do MDE 1m, ou seja, um incremento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Essa diferença (50,00 ha em termos de diferença absoluta) ocorre, principalmente, com aumento de áreas no intervalo de 15 a 50 metros no modelo HAND no MDE 1m e o cruzamento de dados de declividade plana (até 2%) na cabeceira da microbacia. Dessa forma, há uma superestimativa de média suscetibilidade em áreas que são improváveis de ocorrer inundação, áreas que podem possuir suscetibilidade de acúmulo de água pluvial por outros processos.

As áreas caracterizadas como Baixa Suscetibilidade correspondem à maior parte da microbacia MP IV, com variação de área de 1385,77 ha ou 96,43% no MDE 5m e área de 1321,01 ha ou 91,92% no MDE 1m. Essa redução de área em relação ao MDE de menor precisão ocorre, majoritariamente, pelo aumento de áreas de média suscetibilidade no MDE 1m. Por se tratar de uma bacia que abrange apenas um curso hídrico localizado em área densamente vegetada, o restante da microbacia se encontra em áreas urbanizadas mais afastadas do curso hídrico e em cotas mais elevadas do terreno. A predominância da classificação de baixa suscetibilidade se

deve pela grande área de declividade plana a suave ondulada (até 8%), caso contrário ocorreriam mais áreas de Muito Baixa Suscetibilidade.

Por fim, as áreas classificadas como Muito Baixa Suscetibilidade são caracterizadas por superfícies majoritariamente convexas de declividade maior que 8% e localizadas em zonas do HAND nos intervalos de 15 a 50m e maior que 50m. Correspondem a áreas pequenas e esparsas em ambos MDEs, porém há um aumento relativo significativo de 107,48% de área do MDE 1m em comparação com o MDE 5m, atrelado ao aumento supracitado de áreas de declividade nesse mesmo modelo de elevação.

#### 4.4.7 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO

A Figura 4.59 apresenta as cartas de suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP IV, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Uso e Cobertura do Solo supracitados nos itens “4.4.2”, “4.4.3” e “4.4.5”. É perceptível que a maior parte das áreas em zonas de muito alta e alta suscetibilidade ao alagamento se encontram justamente em áreas urbanizadas com declividade até 5%, correspondente a 45,38% da área para o MDE 5m e 41,63% para o MDE 1m (Tabela 4.28).

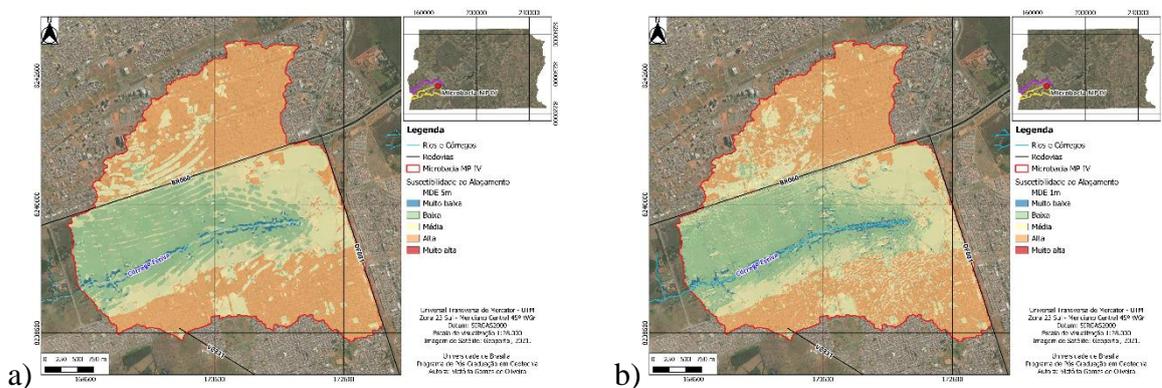


Figura 4.59 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP IV. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m.

Tabela 4.28 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP IV.

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| Muito baixa                   | 18,18     | 1,27%       | 27,02     | 1,88%       | 8,84          | 48,62%       |
| Baixa                         | 357,74    | 24,89%      | 363,81    | 25,32%      | 6,07          | 1,70%        |
| Média                         | 409,10    | 28,47%      | 447,98    | 31,17%      | 38,88         | 9,50%        |

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Alta</b>                   | 651,80    | 45,36%      | 597,09    | 41,55%      | 54,71         | -8,39%       |
| <b>Muito alta</b>             | 0,27      | 0,02%       | 1,19      | 0,08%       | 0,92          | 340,74%      |
| <b>Total</b>                  | 1437,09   | 100,00%     | 1437,09   | 100,00%     | -             | -            |

Diferentemente da suscetibilidade à inundação, classes de média e alta suscetibilidade ao alagamento são muito expressivas nessa microbacia para ambos MDEs. Porém, o dado de maior precisão topográfica (MDE 1m) possui aumento visível da classe de média suscetibilidade a alagamento e diminuição da classe de alta suscetibilidade em relação ao MDE 5m. Isso, provavelmente, está relacionado ao aumento de áreas de declividade intermediária (entre 5 e 15%). A Figura 4.60 apresenta de forma gráfica as comparações entre as mudanças de suscetibilidade a alagamentos.

Percentuais de Suscetibilidade ao Alagamento - Microbacia MP III-IV

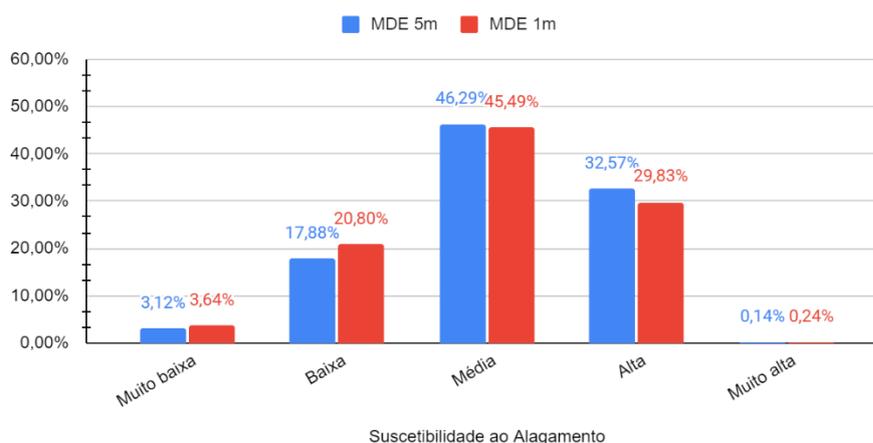


Figura 4.60 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP IV.

Na classe de Muito Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP IV, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 340,74%, ainda que em termos absolutos isso corresponda a 0,92 ha. Está associado ao cruzamento de áreas com declividade plana a suave e curvaturas convergentes e/ou convexas em áreas urbanas, observadas como locais de acúmulo de água.

Na classe de Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP IV, ocorre a diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 8,39%, correspondendo à 54,71 ha na diferença absoluta. Corresponde à classe de suscetibilidade mais expressiva desta

microbacia para ambos MDEs (45,36% do MDE 5m e 41,55% do MDE 1m), por se tratar de uma região com alto índice de ocupação antrópica e declividade predominante até 8%. Além disso, observa-se que o padrão de ocupação urbano é caracterizado predominantemente por residências de baixo padrão estrutural, podendo acarretar em áreas de risco hidrológico à população.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 28,47% da área do MDE 5m e 31,17% da área do MDE 1m, ou seja, um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange áreas na cabeceira da microbacia com declividade até 5% associada a baixas taxas de ocupação urbana, formação campestre e áreas de solo exposto. O aumento relativo (9,50%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado a diminuição de áreas de alta suscetibilidade em ocupações urbanas, uma vez que nessas áreas o MDE 1m apresenta regiões com declividades menos planas.

A região classificada como Baixa Suscetibilidade corresponde a 24,89% da área do MDE 5m e 25,32% da área do MDE 1m, ou seja, um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange boa parte das áreas de declividade de suave ondulada da região associada a baixas taxas de ocupação urbana e formação campestre. O pequeno aumento relativo (1,70%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de declividade nos intervalos 5 a 8% e 8 a 15%.

Na região classificada como Muito Baixa Suscetibilidade, predominam áreas de curvatura divergente e/ou convexa em áreas de cobertura vegetal e declividades onduladas a fortes (maiores que 15%). Há um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação, com 1,27% da área do MDE 5m e 1,88% da área do MDE 1m, classe proporcionalmente pouco expressiva nesta microbacia.

## **4.5 ÁREA 5 – MICROBACIA MP V**

### **4.5.1 HIPSOMETRIA**

A Figura 4.61 apresenta as Cartas de Hipsometria da microbacia MP V para curvas de nível de 5m e 1m. É possível observar que as cotas altimétricas variam de 900 a 1.035 metros para o MDE 5m e de 899 a 1.035 metros para o MDE 1m, sendo fatiados em intervalos de 10 metros representados na Tabela 4.29.

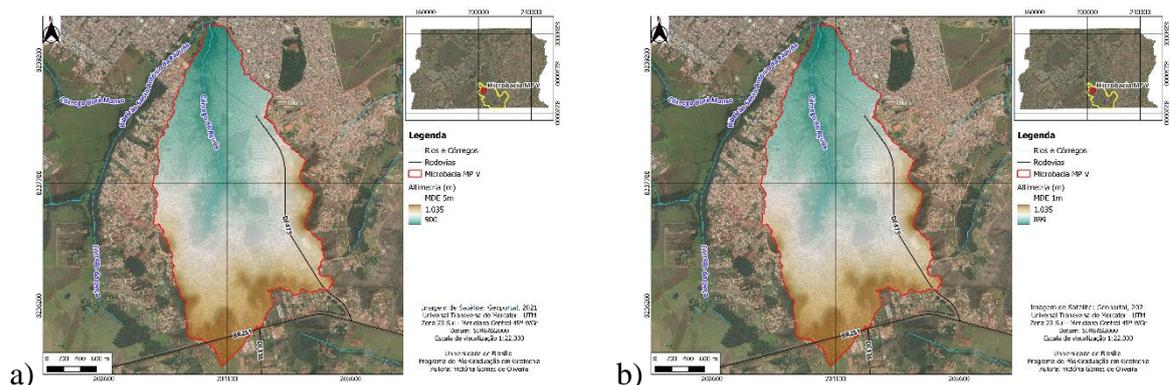


Figura 4.61 – Carta hipsométrica da microbacia MP V. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m.

Tabela 4.29 – Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP V.

| Altimetria (m) | MDE 5m        |                | MDE 1m        |                | Diferença     |              |
|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|--------------|
|                | Área (ha)     | Porcentagem    | Área (ha)     | Porcentagem    | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 900          | 0,44          | 0,08%          | 0,25          | 0,05%          | 0,19          | -43,18%      |
| 900 - 910      | 14,06         | 2,71%          | 14,12         | 2,72%          | 0,06          | 0,43%        |
| 910 - 920      | 29,92         | 5,77%          | 29,49         | 5,68%          | 0,43          | -1,44%       |
| 920 - 930      | 46,36         | 8,94%          | 45,41         | 8,75%          | 0,95          | -2,05%       |
| 930 - 940      | 49,94         | 9,63%          | 51,47         | 9,92%          | 1,53          | 3,06%        |
| 940 - 950      | 50,90         | 9,81%          | 50,47         | 9,73%          | 0,43          | -0,84%       |
| 950 - 960      | 50,99         | 9,83%          | 50,09         | 9,66%          | 0,90          | -1,77%       |
| 960 - 970      | 58,93         | 11,36%         | 59,69         | 11,51%         | 0,76          | 1,29%        |
| 970 - 980      | 53,23         | 10,26%         | 53,32         | 10,28%         | 0,09          | 0,17%        |
| 980 - 990      | 43,80         | 8,44%          | 44,07         | 8,49%          | 0,27          | 0,62%        |
| 990 - 1000     | 27,83         | 5,36%          | 27,20         | 5,24%          | 0,63          | -2,26%       |
| 1000 - 1010    | 24,60         | 4,74%          | 25,33         | 4,88%          | 0,73          | 2,97%        |
| 1010 - 1020    | 23,77         | 4,58%          | 26,94         | 5,19%          | 3,17          | 13,34%       |
| 1020 - 1030    | 31,50         | 6,07%          | 28,42         | 5,48%          | 3,08          | -9,78%       |
| > 1030         | 12,51         | 2,41%          | 12,51         | 2,41%          | 0             | 0,00%        |
| <b>Total</b>   | <b>518,78</b> | <b>100,00%</b> | <b>518,78</b> | <b>100,00%</b> | -             | -            |

A partir dos modelos de elevação interpolados, foi realizado o processo de filtragem dos *rasters* utilizando a ferramenta *Filter*, em *Analyst Tool*, no ArcGIS, visando criar produtos mais consistentes e eliminar erros sistemáticos que poderiam resultar em variações abruptas nos dados topográficos. Há poucas diferenças visuais entre os MDEs da microbacia MP V, porém pode-se observar um aplainamento de topos de morro e escarpas nas bordas da microbacia, além das redistribuições de áreas nas cotas altimétricas.

Observa-se uma diferença relativa significativa na menor cota altimétrica (menor que 900 m) com redução de área em 43,18% na comparação do MDE 1m em relação ao MDEs 5m. Ocorre também a igualação de áreas na maior cota altimétrica (maior que 1030 m) sem nenhuma diferença de área. Por se tratar de uma área com 518,78 hectares, nenhuma variação altimétrica ultrapassou 4 hectares, apresentando variações menores que 0,8% em relação à área total da microbacia MP V. A Figura 4.62 apresenta os histogramas dos MDE 5m e 1m para melhor visualização do resultado percentual.

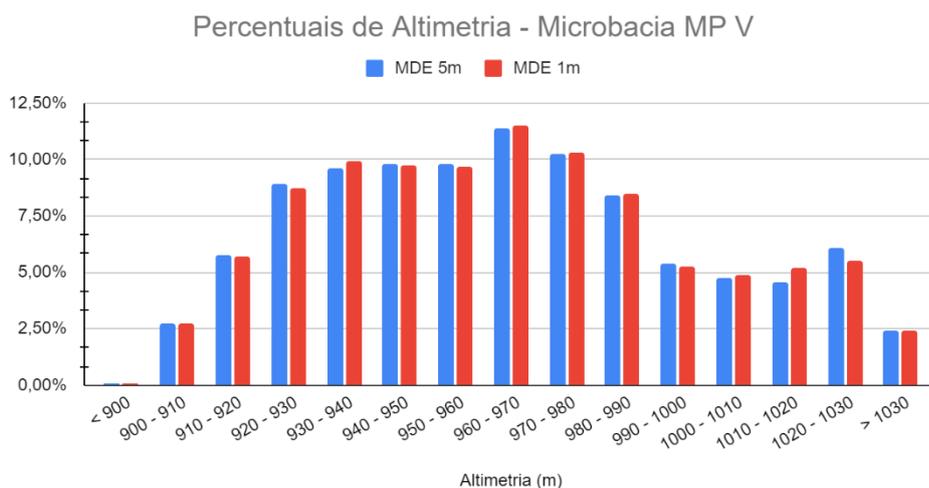


Figura 4.62 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP V.

Com a obtenção dos MDEs de 5m e 1m, são processados os *rasters* de Relevo Sombreado. As Cartas de Relevo Sombreado (Figura 4.63), apresentam as diferenças visuais entre o MDE 5m e o MDE 1m. Assim como nas microbacias MP III-IV e MP IV, observa-se que a interpolação direta das curvas de nível ocasiona a formação de ondulações, principalmente em área de declividade plana a suave no MDE 5m, enquanto que contornos topográficos de escarpas e topos de morro são visualmente mais detalhados no MDE 1m. Assim, a análise visual das características topográficas da microbacia MP V forneceu subsídios para interpretação visual de resultados numéricos como declividade e curvatura.

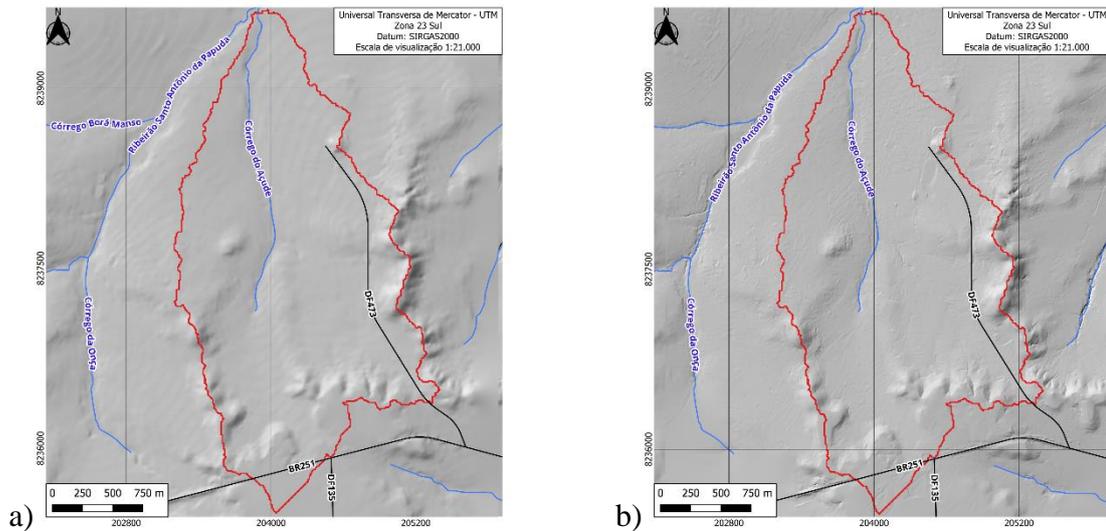


Figura 4.63 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP V. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m.

#### 4.5.2 DECLIVIDADE

A Figura 4.64 apresenta as Cartas de Declividade da microbacia MP V para curvas de nível de 5m e 1m conforme delimitado por Da Silva e Carvalho (2006). Também foi feito o gráfico quantitativo comparativo para cada um dos MDEs para identificar a distribuição de áreas e suas respectivas porcentagens na influência dos valores atribuídos para a análise de inundações e alagamentos, como observado na Tabela 4.30 e Figura 4.65.

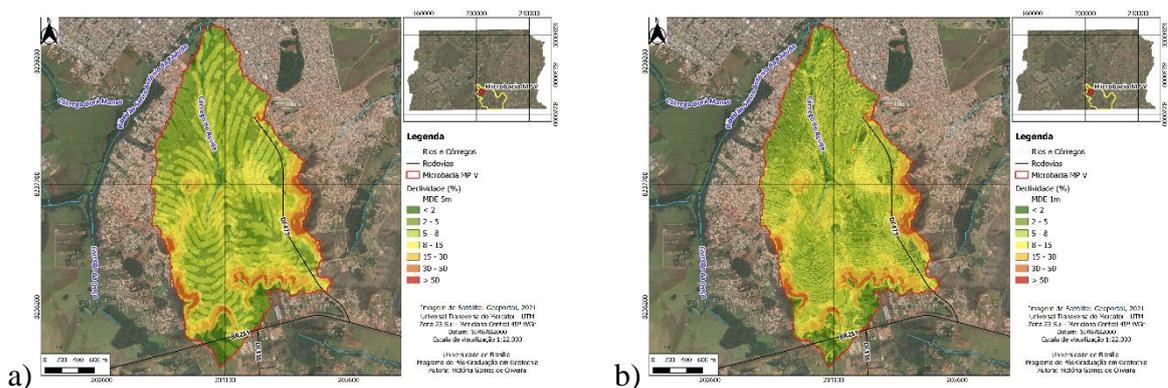


Figura 4.64 – Carta de declividade da microbacia MP V. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m.

Tabela 4.30 - Classes de declividade da microbacia MP V.

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 2             | 19,39     | 3,74%       | 23,58     | 4,55%       | 4,19          | 21,61%       |
| 2 - 5           | 155,78    | 30,03%      | 137,32    | 26,47%      | 18,46         | -11,85%      |
| 5 - 8           | 194,25    | 37,44%      | 194,32    | 37,46%      | 0,07          | 0,04%        |

| Declividade<br>(%) | MDE 5m       |             | MDE 1m       |             | Diferença        |                 |
|--------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|
|                    | Área<br>(ha) | Porcentagem | Área<br>(ha) | Porcentagem | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| <b>8 - 15</b>      | 88,58        | 17,07%      | 99,85        | 19,25%      | 11,27            | 12,72%          |
| <b>15 - 30</b>     | 45,19        | 8,71%       | 47,69        | 9,19%       | 2,50             | 5,53%           |
| <b>30 - 50</b>     | 15,57        | 3,00%       | 15,78        | 3,04%       | 0,21             | 1,35%           |
| <b>&gt; 50</b>     | 0,02         | < 0,01%     | 0,24         | 0,05%       | 0,22             | 1100,00%        |
| <b>Total</b>       | 518,78       | 100,00%     | 518,78       | 100,00%     | -                | -               |

Para a microbacia MP V, as diferenças na declividade ocorrem na diminuição do intervalo de declividade plana a suave (2 a 5%) e aumento de áreas dos demais intervalos do MDE 5m para o MDE 1m. Em termos absolutos, o maior aumento ocorre no intervalo de 8 a 15%, além do aumento relativo expressivo no intervalo de declividade forte (maior que 50%). Por se tratar de uma bacia em localidade predominantemente suave ondulada, as classes com maiores áreas permanecem as mesmas para ambos MDEs nos intervalos de 2 a 5% (155,78 ha no MDE 5m e 137,32 ha no MDE 1m) e 5 a 8% (194,25 ha no MDE 5m e 194,32 ha no MDE 1m).

Em termos absolutos, nenhuma diferença absoluta ultrapassa 19 hectares, ou seja, todas as diferenças de declividade correspondem a menos de 4% da área total da microbacia MP V. A diferença relativa apresenta porcentagem consideravelmente mais alta para o intervalo maior que 50% (aumento de área em 1100,00%) de declividade do MDE 1m em relação ao MDE 5m. Nota-se que as diferenças relativas para declividades fortes são bem expressivas em bacias menos escarpadas, como ocorre nas microbacias MP III-IV, IV e V.

A Figura 4.65 apresenta graficamente a distribuição da porcentagem de microbacia MP V por faixa de declividade. Observa-se que mais de 87% da microbacia apresenta declividades menores que 15%, com destaque para o intervalo de 5 a 8% de declividade. A faixa não urbanizável com declividades maiores que 30% corresponde de 3,00% (MDE 5m) a 3,09% (MDE 1m) da microbacia MP V.

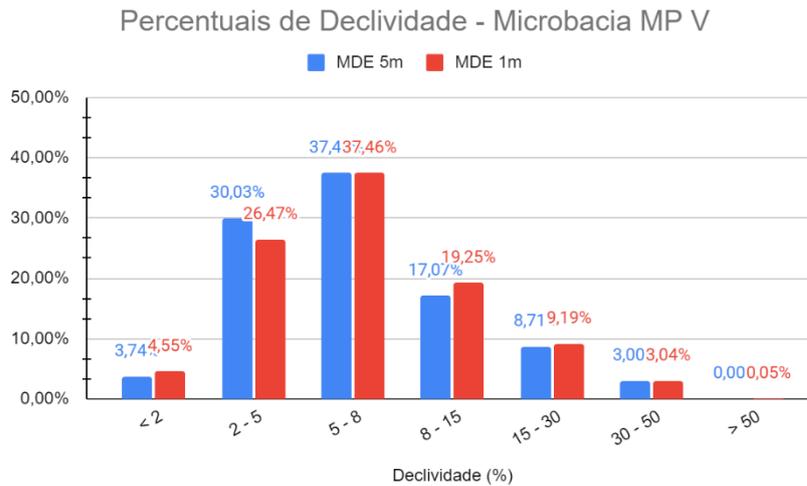


Figura 4.65 – Gráfico de distribuição da área MP V em (%) por intervalos da declividade.

### 4.5.3 FORMAS DE VERTENTE

Como visto nas Cartas de Forma de Vertente da microbacia MP V (Figura 4.66), há uma pequena diferença dos dados de curvatura, tanto horizontais quanto verticais, do MDE 5m para o MDE 1m.

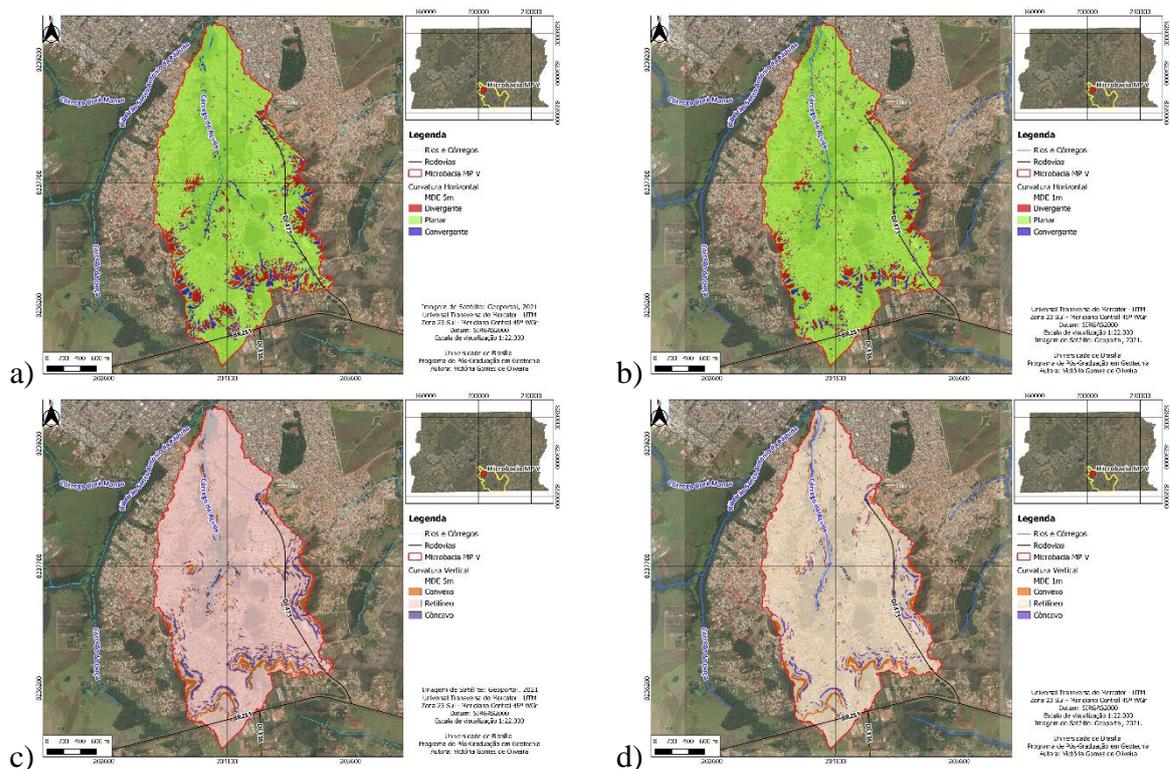


Figura 4.66 – Cartas de formas de vertente da microbacia MP V. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m.

Foram feitos vários de testes conjuntos nos MDE para determinar de forma arbitrária os limiaries das vertentes retilíneas na microbacia MP V, visando gerar mapas relacionados aos tipos de relevo da microbacia. Esses testes incluíram a utilização de mapas comparativos de relevo sombreado com as cartas de curvatura horizontal e vertical, a observação padronizada de perfis de vertentes representativas e ajuste da variação estatística fornecida pelo *software* ArcGIS.

Como resultado, foram selecionados os intervalos de -0,24/m a +0,30/m para a classe de vertentes planares e -0,34/m a +0,30/m para a classe de vertentes retilíneas no MDE 5m. Já para o MDE 1m, foram selecionados os intervalos de -0,27/m a +0,33/m para a classe de vertentes planares e -0,38/m a +0,35/m para a classe de vertentes retilíneas.

Constatou-se o alargamento da faixa de limiaries no MDE 1m com os testes de curvatura. Ao aplicar os mesmos limiaries do MDE 5m, ocorre o aparecimento de *pixels* de curvatura divergente/convergente ou convexa/côncava em áreas que, na análise visual, não correspondem à realidade. Contudo, esse procedimento acarreta em aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas. A Tabela 4.31 apresenta as áreas obtidas e seus respectivos percentuais para cada tipo de curvatura na microbacia MP V.

Tabela 4.31 – Classificação das formas de vertente para a microbacia MP V.

| Forma de Vertente    | MDE 5m      |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |         |
|----------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|---------|
|                      | Área (ha)   | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |         |
| Curvatura Horizontal | Divergente  | 41,35       | 7,97%     | 27,76       | 5,35%         | 13,59        | -32,87% |
|                      | Planar      | 446,76      | 86,12%    | 472,81      | 91,14%        | 26,05        | 5,83%   |
|                      | Convergente | 30,67       | 5,91%     | 18,21       | 3,51%         | 12,46        | -40,63% |
| <b>Total</b>         | 518,78      | 100,00%     | 518,78    | 100,00%     | -             | -            |         |
| Curvatura Vertical   | Convexa     | 26,08       | 5,03%     | 20,82       | 4,01%         | 5,26         | -20,17% |
|                      | Retilínea   | 459,95      | 88,66%    | 473,73      | 91,32%        | 13,78        | 3,00%   |
|                      | Côncava     | 32,75       | 6,31%     | 24,23       | 4,67%         | 8,52         | -26,02% |
| <b>Total</b>         | 518,78      | 100,00%     | 518,78    | 100,00%     | -             | -            |         |

A curvatura horizontal convergente foi observada em 5,91% da área do MDE 5m em comparação com 3,51% no MDE 1m. Já a curvatura vertical côncava foi observada em 6,31% da área do MDE 5m em comparação com 4,67% no MDE 1m. Essas áreas foram classificadas com suscetibilidade alta à inundação e ao alagamento (valor 3).

As formas de vertente planar e retilínea foram definidas como valor 2 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 86,12% da área do MDE 5m comparativamente à 91,14% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal planar, e em 88,66% da área do MDE 5m comparativamente à 91,32% da área do MDE 1m, para curvatura vertical retilínea.

Percebe-se que, para o MDE 1m, o modelo tem um aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas por apresentar mais trechos desse tipo de curvatura entre as classes convergentes e divergentes e as classes côncava e convexa, respectivamente. Isso provavelmente ocorre pelo tamanho original do *pixel*, uma vez que os *pixels* no MDE 1m são 25 vezes menores que no MDE 5m.

Já as formas de vertente divergente e convexa foram definidas como valor 1 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 7,97% da área do MDE 5m comparativamente à 5,35% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal divergente, e em 5,03% da área do MDE 5m comparativamente à 4,01% da área do MDE 1m, para curvatura vertical convexa. As Figuras 4.67 e 4.68 sintetizam de forma comparativa o percentual de curvatura horizontal e vertical, respectivamente, para a análise de formas de vertente nesta microbacia.

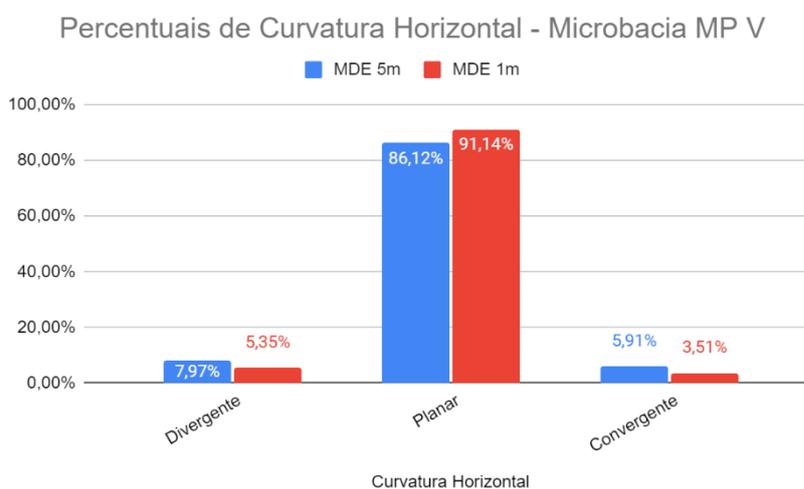


Figura 4.67 – Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP V.

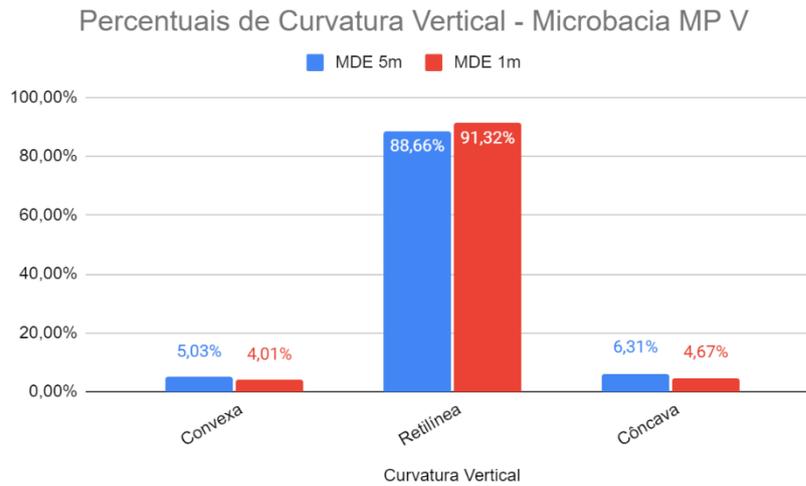


Figura 4.68 – Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP V.

#### 4.5.4 MODELO HAND

As Cartas do Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage* – Altura Acima da Drenagem Mais Próxima), Figura 4.69, evidenciam uma concentração de alturas mais próximas às drenagens associadas ao Córrego Açude ou canais de escoamento superficiais da microbacia MP V.

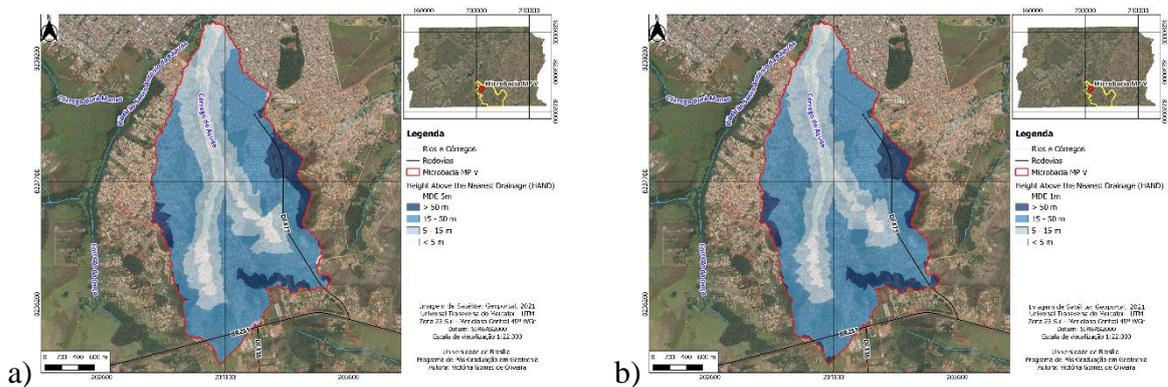


Figura 4.69 – Carta do modelo HAND da microbacia MP V. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.

A Tabela 4.32 apresenta as áreas em há e em (%) da microbacia MP V dos intervalos de valor do HAND por Silva et al. (2013). As divisões dos intervalos foram definidas baseando-se em quatro classes para o HAND: inundação (até 5 m), transição (de 5 m a 15 m), encostas (de 15 m a 50 m) e topos de morro (maior que 50 m), sendo classificados quanto a suscetibilidade a inundações e alagamentos de forma decrescente.

Tabela 4.32 – Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP V e seus respectivos quantitativos.

| Modelo<br>HAND (m) | MDE 5m       |             | MDE 1m       |             | Diferença        |                 |
|--------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|
|                    | Área<br>(ha) | Porcentagem | Área<br>(ha) | Porcentagem | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| < 5                | 61,56        | 11,87%      | 52,24        | 10,07%      | 9,32             | -15,14%         |
| 5 - 15             | 128,07       | 24,69%      | 123,75       | 23,85%      | 4,32             | -3,37%          |
| 15 - 50            | 283,10       | 54,57%      | 294,03       | 56,68%      | 10,93            | 3,86%           |
| > 50               | 46,05        | 8,88%       | 48,76        | 9,40%       | 2,71             | 5,88%           |
| <b>Total</b>       | 518,78       | 100,00%     | 518,78       | 100,00%     | -                | -               |

Os testes feitos para obtenção da área de contribuição, de acordo com a rede de drenagem obtida pelo HAND, resultaram em áreas de contribuição distintas para cada MDE, sendo a área de contribuição do MDE 5m igual a 81,54 ha e do MDE 1m igual a 48,27 ha. Foi testado aplicar a área de contribuição do MDE 1m no modelo HAND de 5 metros, porém os resultados apresentados se mostram superestimados para a microbacia local.

Com o aumento de precisão do modelo digital, nota-se diminuições relativas de 15,14 % e 3,37% na área inundável (HAND menor que 5m) e nas áreas de transição (HAND entre 5 e 15m), respectivamente. Essas alterações na modelagem também favoreceram o aumento de áreas de escarpa e topo de morro do MDE 5m para o MDE 1m.

Visualmente, a modelagem do HAND na microbacia MP V se assemelha bastante para os dois MDEs. As principais diferenças são observadas nas extremidades da bacia com as mudanças locais de classes de suscetibilidade à inundação. Os dois modelos apresentaram áreas inundáveis em ramificação do Córrego Açude, área que possivelmente contribui como afluente para este curso hídrico.

A Figura 4.70 apresenta as informações da Tabela 4.32 de intervalos dos diferentes MDEs, visando proporcionar uma visualização mais eficaz dos dados. Destaca-se uma notável concentração de área no intervalo de 15 a 50 metros da drenagem mais próxima para MDE 1m em relação ao intervalo maior que 50 metros, correspondendo a 56,68% e 9,40% respectivamente. A disparidade se repete no MDE 5m, já que os intervalos de 15 a 50 metros e 50 metros correspondendo a 54,57% e 8,88% respectivamente. Ocorre um aumento de áreas de encostas e topos de morro no MDE 1m em relação ao MDE 5m, reforçando uma topografia mais escarpada para o dado de maior precisão.

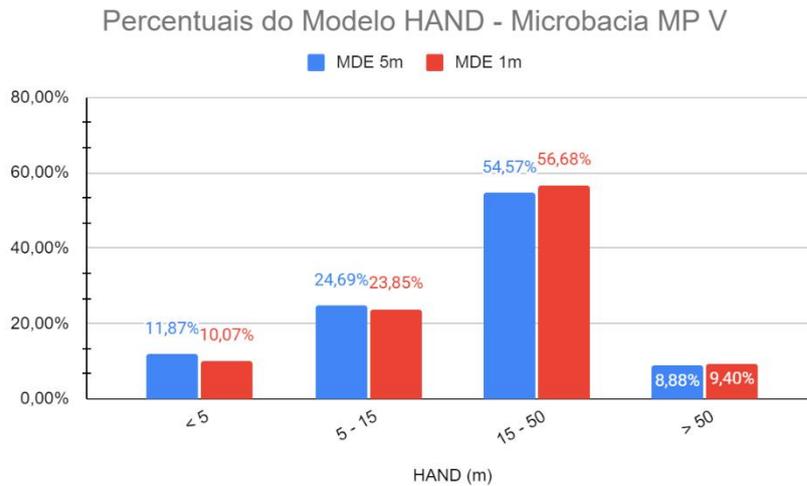


Figura 4.70 – Gráfico de distribuição da área MP V em (%) por intervalos do HAND.

#### 4.5.5 USO E COBERTURA DO SOLO

A Carta de Uso e Cobertura da Solo (Figura 4.71) da microbacia MP V foi elaborada a partir de dados de uso e cobertura de 2019 disponibilizados no Geoportal na escala de 1:10.000. Para as áreas selecionadas, o sistema de classificação abrangeu as seguintes classes: Agricultura, Água, Área construída, Formação campestre, Formação florestal, Formação savânica, Reflorestamento, Sistema viário e Solo exposto.

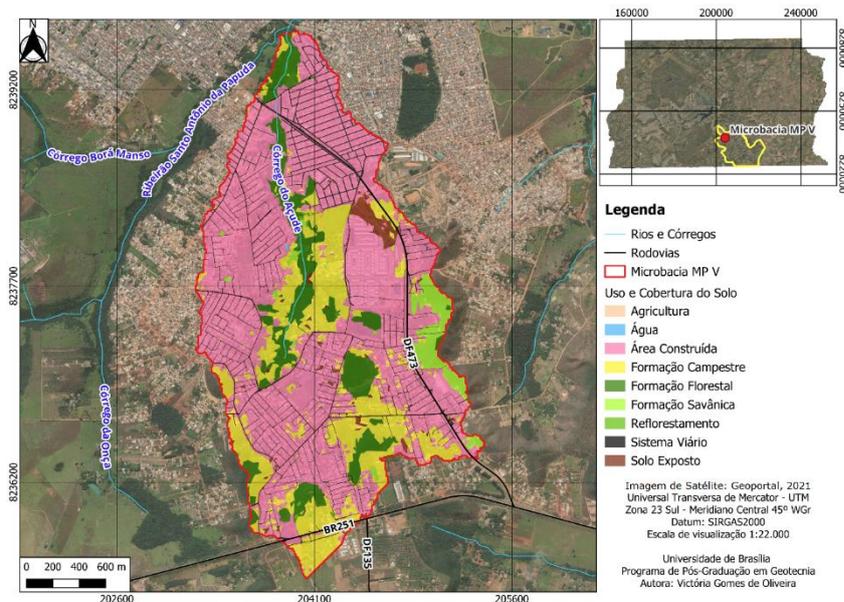


Figura 4.71 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia V.

Tabela 4.33 – Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP V.

| <b>Uso e Cobertura do Solo</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Porcentagem</b> |
|--------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Agricultura</b>             | 0,10             | 0,02%              |
| <b>Água</b>                    | 0,09             | 0,02%              |
| <b>Área construída</b>         | 295,39           | 56,94%             |
| <b>Formação campestre</b>      | 103,91           | 20,03%             |
| <b>Formação florestal</b>      | 53,51            | 10,31%             |
| <b>Formação savânica</b>       | 18,01            | 3,47%              |
| <b>Reflorestamento</b>         | 0,55             | 0,11%              |
| <b>Sistema viário</b>          | 38,65            | 7,45%              |
| <b>Solo exposto</b>            | 8,57             | 1,65%              |
| <b>Total</b>                   | 518,78           | 100,00%            |

Como visto na Tabela 4.33, a Área Construída (56,94%) e Formação Campestre (20,03%) representam a maior porcentagem dessa microbacia, evidenciando um grau de urbanização acentuado e de grande atividade antrópica, além de uma malha viária expressiva e presença de solo exposto na área da microbacia.

As áreas classificadas com valor 3 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, alta suscetibilidade, representam 334,13 ha ou 64,41% da totalidade da microbacia MP V. A ocupação urbana apresenta valores expressivos de área e percentual. A distribuição concentra-se, principalmente, ao longo da microbacia, por corresponderem também a áreas de declividade até 8%. Essa classe apresenta cobertura média a alta de impermeabilização que confere grande capacidade de escoamento superficial potencializando tempos menores de resposta e picos de vazão. Além disso, destaca-se a existência de superfícies proporcionalmente menores que permitem a permeabilidade (terrenos baldios, ruas sem calcamento, gramíneas etc.).

As áreas classificadas com valor 2 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, média suscetibilidade, são representadas pelas classes de solo expostos em áreas antropizadas e agricultura nessa microbacia, com valores de área de 8,67 ha ou 1,67%. Assim, sua resposta hidrológica é baixa proporcionalmente à bacia.

As áreas classificadas com valor 1 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, baixa suscetibilidade, correspondem às classes de formações florestal, savânica, campestre e reflorestamento e ocupam área de 175,98 ha ou 33,92% da bacia. A distribuição dessa categoria concentra-se em porções esparsas, principalmente junto ao Çórrego Açude e recobre

praticamente toda a parte de encostas. O fato dessa classe estar localizada em encostas com declividade maior que 15% e recobrimdo áreas de hidrografia da microbacia indica limitações topográficas de ocupação urbana e favorece a preservação de áreas protegidas pela legislação.

#### 4.5.6 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO

A Figura 4.72 apresenta as cartas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP V, resultado da  lgebra de mapas das reclassifica es da Declividade, Formas de Vertente e Modelo HAND supracitados nos itens “4.5.2”, “4.5.3” e “4.5.4”. Por se tratar de uma região com declividade predominantemente suave ondulada, nota-se que a maior parte das áreas de baixa declividade e próximas de cursos hídricos encontram-se em zonas com média suscetibilidade   inunda o, correspondente a 22,72% da área para o MDE 5m e 18,79% para o MDE 1m (Tabela 4.34).

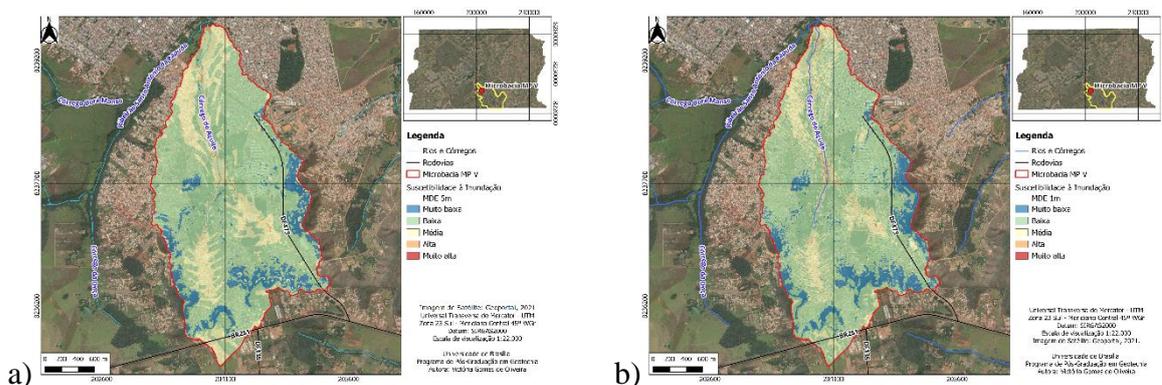


Figura 4.72 – Carta da suscetibilidade a inunda es da microbacia MP V. (a) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 5m e (b) Classifica o de suscetibilidade   inunda o do MDE de 1m.

Tabela 4.34 – Classifica o da suscetibilidade a inunda es para a microbacia MP V.

| Suscetibilidade   Inunda o | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|----------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                            |  rea (ha) | Porcentagem |  rea (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>         | 58,16     | 11,21%      | 65,84     | 12,69%      | 7,68          | 13,20%       |
| <b>Baixa</b>               | 337,96    | 65,15%      | 349,39    | 67,35%      | 11,43         | 3,38%        |
| <b>Média</b>               | 117,85    | 22,72%      | 97,46     | 18,79%      | 20,39         | -17,30%      |
| <b>Alta</b>                | 4,78      | 0,92%       | 5,93      | 1,14%       | 1,15          | 24,06%       |
| <b>Muito alta</b>          | 0,03      | 0,01%       | 0,16      | 0,03%       | 0,13          | 433,33%      |
| <b>Total</b>               | 518,78    | 100,00%     | 518,78    | 100,00%     | -             | -            |

Com características de curvatura mais planares e retilíneas e o Córrego Açude como um curso hídrico de pequeno porte, essa microbacia possui uma baixa suscetibilidade a inunda es (de

65,15% a 67,35% para os MDE 5m e 1m, respectivamente). A Figura 4.73 identifica de forma comparativa o percentual de áreas suscetíveis a inundação nesta microbacia.

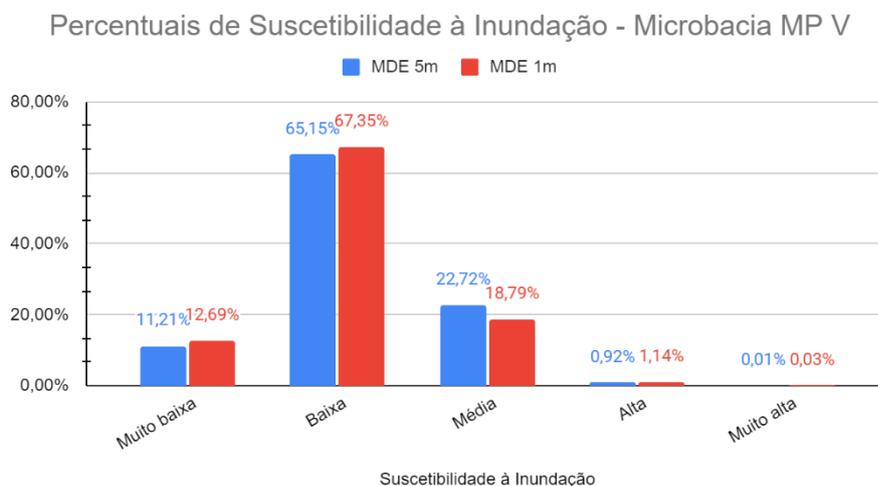


Figura 4.73 – Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP V.

Nas categorias de Muito Alta e Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP V, ocorre um incremento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível nas diferenças relativas de 433,33% e 24,06%, respectivamente. Identifica-se a predominância dessas áreas no leito do Córrego Açude, áreas já inundadas e com densa cobertura vegetal de formação florestal, favorecendo o amortecimento de cheias devido a superfície de infiltração em áreas de cobertura natural não antropizada.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 22,72% da área do MDE 5m e 18,79% da área do MDE 1m, ou seja, uma redução de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Essa diferença (20,39 ha em termos de diferença absoluta e 17,30% em diferença relativa) ocorre, principalmente, com aumento de áreas no intervalo de 15 a 50 metros no modelo HAND bem como aumento de áreas de declividade entre 5 e 15% no MDE 1m. Ainda que ocorra essa redução, há uma superestimativa de áreas de média suscetibilidade próximas à cabeceira da bacia para o modelo adotado. Tais áreas são improváveis de ocorrer inundação, podendo estar relacionadas à suscetibilidade de acúmulo de água pluvial por outros processos.

As áreas caracterizadas como Baixa Suscetibilidade correspondem à mais da metade da microbacia MP V, com variação de área de 337,96 ha ou 65,15% no MDE 5m e área de 349,39 ha ou 67,35% no MDE 1m. Esse aumento de área em relação ao MDE de menor precisão corresponde a parte da diminuição de áreas de média suscetibilidade no MDE 1m. Por se tratar

de uma bacia que abrange apenas um curso hídrico localizado em área vegetada e forte pressão antrópica nas proximidades desse curso hídrico, o restante da microbacia corresponde a áreas urbanizadas mais afastadas e em cotas mais elevadas do terreno. A predominância da classificação de baixa suscetibilidade se deve pela grande área de declividade plana a suave ondulada (2 a 8%) e curvaturas planares retilíneas.

Por fim, as áreas classificadas como Muito Baixa Suscetibilidade são caracterizadas por superfícies majoritariamente convexas e divergentes de declividade maior que 15% e localizadas em zonas do HAND nos intervalos de 15 a 50m e maior que 50m. Correspondem a áreas de 11,21% (MDE 5m) e 12,69% (MDE 1m), com um aumento relativo de 13,20% de área do MDE 1m em comparação com o MDE 5m, atrelado principalmente ao aumento de áreas afastadas do curso hídrico no modelo HAND.

#### 4.5.7 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO

A Figura 4.74 apresenta as cartas de suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP V, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Uso e Cobertura do Solo supracitados nos itens “4.5.2”, “4.5.3” e “4.5.5”. É perceptível que a maior parte das áreas em zonas de muito alta e alta suscetibilidade ao alagamento se encontram justamente em áreas urbanizadas com declividade até 5%, correspondente a 25,22% da área para o MDE 5m e 23,47% para o MDE 1m (Tabela 4.35).

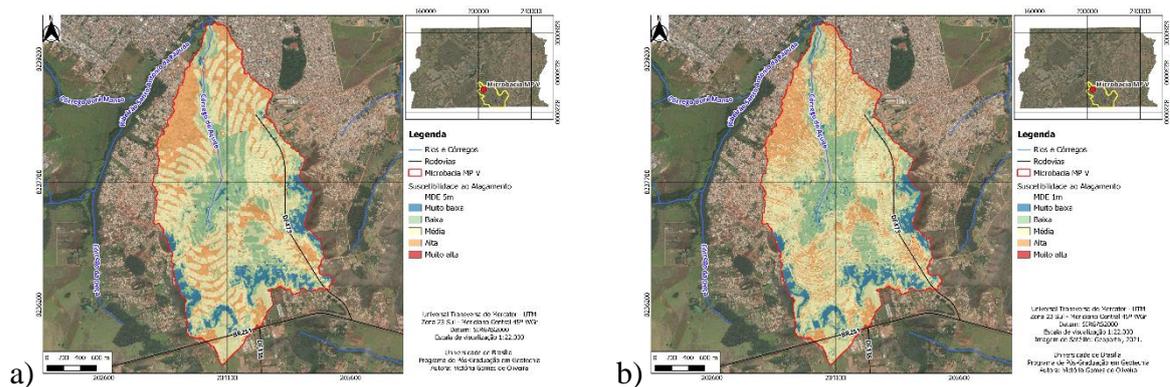


Figura 4.74 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP V. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m.

Tabela 4.35 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP V.

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>            | 38,08     | 7,34%       | 39,32     | 7,58%       | 1,24          | 3,26%        |
| <b>Baixa</b>                  | 110,10    | 21,22%      | 119,29    | 22,99%      | 9,19          | 8,35%        |
| <b>Média</b>                  | 239,73    | 46,21%      | 238,41    | 45,96%      | 1,32          | -0,55%       |
| <b>Alta</b>                   | 130,49    | 25,15%      | 119,98    | 23,13%      | 10,51         | -8,05%       |
| <b>Muito alta</b>             | 0,38      | 0,07%       | 1,78      | 0,34%       | 1,40          | 368,42%      |
| <b>Total</b>                  | 518,78    | 100,00%     | 518,78    | 100,00%     | -             | -            |

Diferentemente da suscetibilidade à inundação, classes de média e alta suscetibilidade ao alagamento são muito expressivas nessa microbacia para ambos MDEs. Porém, o dado de maior precisão topográfica (MDE 1m) possui, predominantemente, diminuição da classe de alta suscetibilidade em relação ao MDE 5m e redistribuição de áreas para outras classes. Isso, provavelmente, está relacionado ao aumento de áreas de declividade intermediária (entre 8 e 30%). A Figura 4.75 apresenta de forma gráfica as comparações entre as mudanças de suscetibilidade a alagamentos.

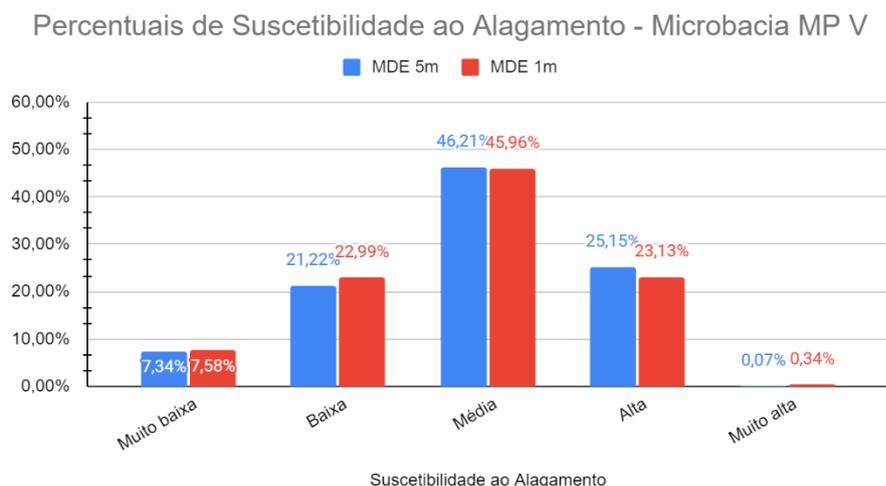


Figura 4.75 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP V.

Na classe de Muito Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP V, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 368,42%, ainda que em termos absolutos isso corresponda a 1,40 ha. Está associado ao cruzamento de áreas com declividade plana (até 2%) e convergentes e/ou convexas em áreas urbanas, observadas como locais de acúmulo de água.

Na classe de Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP V, ocorre a diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 8,05%, correspondendo à 10,51 ha na diferença absoluta. Corresponde à segunda classe de suscetibilidade mais expressiva desta microbacia para ambos MDEs (25,15% do MDE 5m e 23,13% do MDE 1m), por se tratar de uma região com alto índice de ocupação antrópica e declividade predominante até 8%. Além disso, observa-se que o padrão de ocupação urbano é caracterizado predominantemente por residências de baixo padrão, podendo acarretar em áreas de risco hidrológico à população.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 46,21% da área do MDE 5m e 45,96% da área do MDE 1m, ou seja, uma pequena diminuição de áreas (diferença absoluta de 1,32 ha) nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange áreas espalhadas por toda a microbacia com declividade entre 5% e 15% associada a altas taxas de ocupação urbana e áreas de solo exposto.

A região classificada como Baixa Suscetibilidade corresponde a 21,22% da área do MDE 5m e 22,99% da área do MDE 1m, ou seja, um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange boa parte das áreas de declividade de suave ondulada (até 8%) da região associada a baixas taxas de ocupação urbana e formações florestal e campestre. O aumento relativo (8,35%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de declividade no intervalo de 8 a 15%.

Na região classificada como Muito Baixa Suscetibilidade, predominam áreas de curvatura divergente e/ou convexa em áreas de cobertura vegetal e declividades onduladas a fortes (maiores que 15%). Há um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação, com 7,34% da área do MDE 5m e 7,58% da área do MDE 1m, com diferenças absoluta e relativa iguais a, respectivamente, 1,24 ha e 3,26%.

## **4.6 ÁREA 6 – MICROBACIA MP VI**

### **4.6.1 HIPSOMETRIA**

A Figura 4.76 apresenta as Cartas de Hipsometria da microbacia MP VI para curvas de nível de 5m e 1m. É possível observar que as cotas altimétricas variam de 1.006 a 1.220 metros para ambos MDEs, tanto o MDE 5m quanto o MDE 1m, sendo fatiados em intervalos de 10 metros representados na Tabela 4.36.

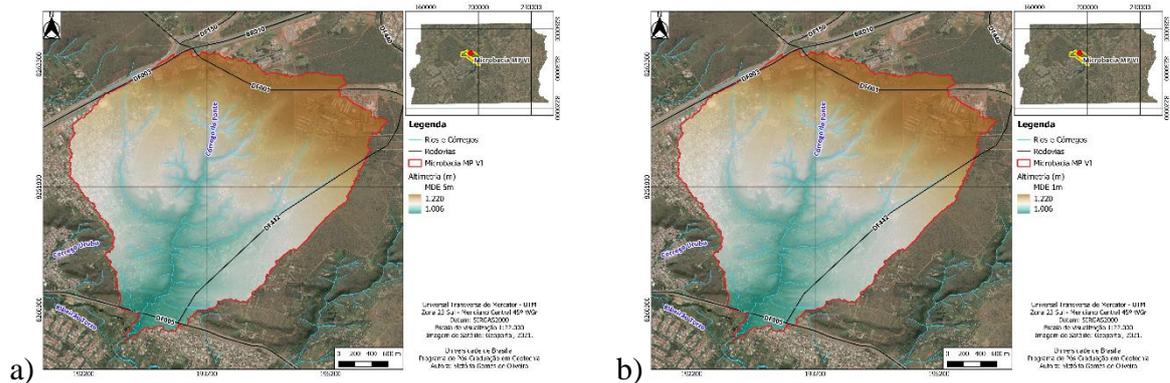


Figura 4.76 – Carta hipsométrica da microbacia MP VI. (a) Altimetria do MDE de 5m e (b) Altimetria do MDE de 1m.

Tabela 4.36 – Fatiamento da altimetria em hectares e seus percentuais para a microbacia MP VI.

| Altimetria (m) | MDE 5m        |                | MDE 1m        |                | Diferença     |              |
|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|--------------|
|                | Área (ha)     | Porcentagem    | Área (ha)     | Porcentagem    | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 1010         | 1,60          | 0,19%          | 1,77          | 0,21%          | 0,17          | 10,63%       |
| 1010 - 1020    | 9,17          | 1,09%          | 9,21          | 1,09%          | 0,04          | 0,44%        |
| 1020 - 1030    | 14,25         | 1,69%          | 14,46         | 1,72%          | 0,21          | 1,47%        |
| 1030 - 1040    | 16,39         | 1,95%          | 16,47         | 1,96%          | 0,08          | 0,49%        |
| 1040 - 1050    | 18,09         | 2,15%          | 17,77         | 2,11%          | 0,32          | -1,77%       |
| 1050 - 1060    | 24,15         | 2,87%          | 23,90         | 2,84%          | 0,25          | -1,04%       |
| 1060 - 1070    | 32,43         | 3,85%          | 32,40         | 3,85%          | 0,03          | -0,09%       |
| 1070 - 1080    | 40,42         | 4,80%          | 41,58         | 4,94%          | 1,16          | 2,87%        |
| 1080 - 1090    | 44,23         | 5,25%          | 43,60         | 5,18%          | 0,63          | -1,42%       |
| 1090 - 1100    | 55,94         | 6,64%          | 56,55         | 6,71%          | 0,61          | 1,09%        |
| 1100 - 1110    | 67,03         | 7,96%          | 67,65         | 8,03%          | 0,62          | 0,92%        |
| 1110 - 1120    | 64,93         | 7,71%          | 63,76         | 7,57%          | 1,17          | -1,80%       |
| 1120 - 1130    | 62,82         | 7,46%          | 61,94         | 7,35%          | 0,88          | -1,40%       |
| 1130 - 1140    | 59,29         | 7,04%          | 60,99         | 7,24%          | 1,70          | 2,87%        |
| 1140 - 1150    | 51,82         | 6,15%          | 51,21         | 6,08%          | 0,61          | -1,18%       |
| 1150 - 1160    | 39,01         | 4,63%          | 38,74         | 4,60%          | 0,27          | -0,69%       |
| 1160 - 1170    | 29,45         | 3,50%          | 29,63         | 3,52%          | 0,18          | 0,61%        |
| 1170 - 1180    | 24,86         | 2,95%          | 24,57         | 2,92%          | 0,29          | -1,17%       |
| 1180 - 1190    | 25,77         | 3,06%          | 26,30         | 3,12%          | 0,53          | 2,06%        |
| 1190 - 1200    | 30,39         | 3,61%          | 29,70         | 3,53%          | 0,69          | -2,27%       |
| 1200 - 1210    | 45,23         | 5,37%          | 45,39         | 5,39%          | 0,16          | 0,35%        |
| > 1210         | 85,05         | 10,10%         | 84,73         | 10,06%         | 0,32          | -0,38%       |
| <b>Total</b>   | <b>842,32</b> | <b>100,00%</b> | <b>842,32</b> | <b>100,00%</b> | -             | -            |

A partir dos modelos de elevação gerados, foi realizado o processo de filtragem dos *rasters* utilizando a ferramenta *Filter*, em *Analyst Tool*, no ArcGIS, visando criar produtos mais consistentes e eliminar erros sistemáticos que poderiam resultar em variações abruptas nos dados topográficos. Uma das principais diferenças entre os MDEs da microbacia MP VI é a delimitação mais escarpada da hidrografia e melhor detalhamento dos pequenos cursos hídricos no modelo de maior precisão.

Observam-se pequenas diferenças absolutas e relativas na comparação entre os MDEs 5m e 1m, com destaque para o intervalo de menor cota altimétrica (menor que 1010 m) com diferença relativa de 10,63% com aumento de área no MDE 1m em relação ao MDE 5m. Em relação a outras bacias deste estudo, apresentou as menores variações de áreas em hectares na comparação dos MDEs, sendo que nenhuma variação altimétrica ultrapassou 2 hectares, ou seja, menos de 0,3% da área total da microbacia MP VI. A Figura 4.77 apresenta os histogramas dos MDE 5m e 1m para melhor visualização do resultado percentual.

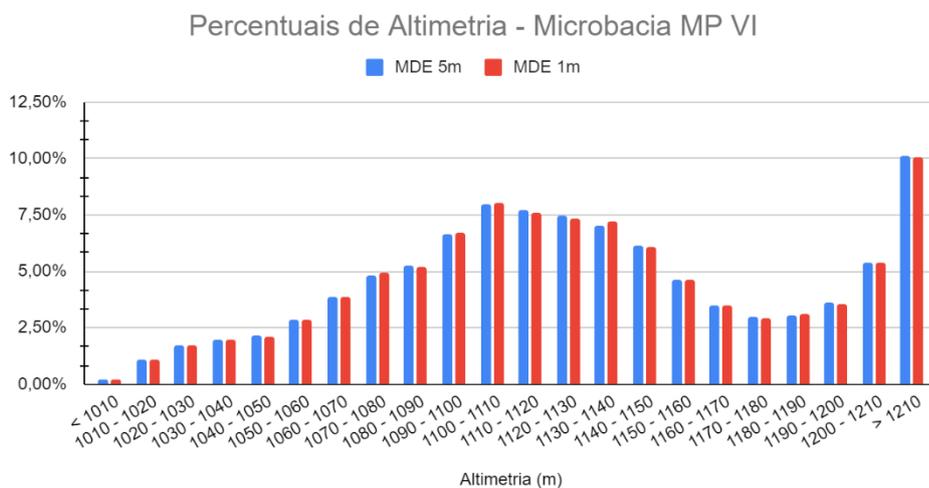


Figura 4.77 – Histograma das cotas altimétricas na microbacia MP VI.

Com os modelos digitais de elevação, foram obtidos os *rasters* de Relevô Sombreado. As Cartas de Relevô Sombreado (Figura 4.78), apresentam as diferenças visuais entre o MDE 5m e o MDE 1m. É perceptível a maior riqueza de detalhes do relevô sombreado do MDE 1m, uma vez que com *pixels* menores a imagem se torna mais nítida. Assim, os MDEs forneceram subsídios para interpretação visual de resultados numéricos como declividade e curvatura.

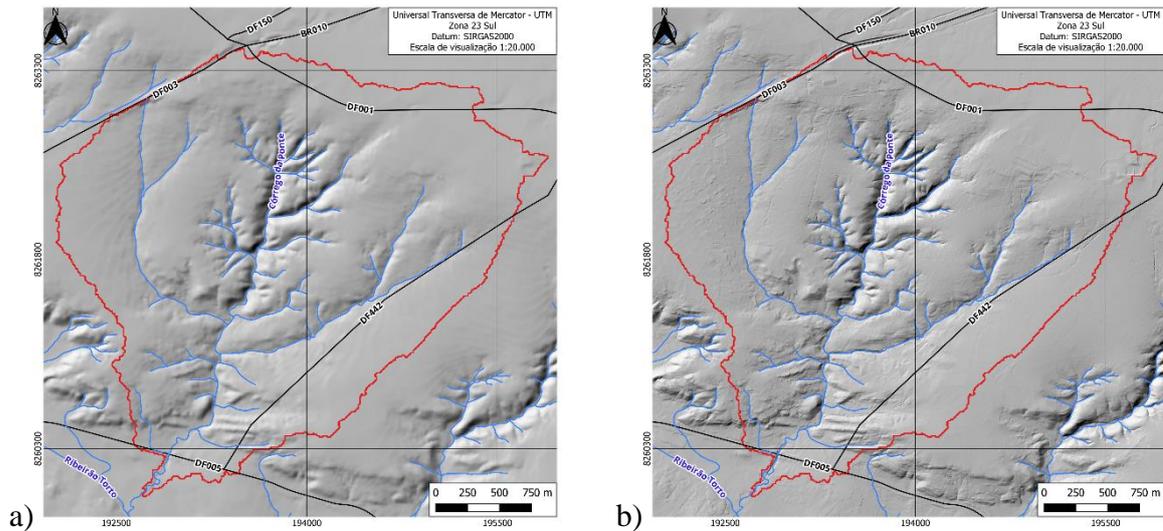


Figura 4.78 – Carta de relevo sombreado da microbacia MP VI. (a) Relevo Sombreado do MDE de 5m e (b) Relevo Sombreado do MDE de 1m.

#### 4.6.2 DECLIVIDADE

A Figura 4.79 apresenta as Cartas de Declividade da microbacia MP VI para curvas de nível de 5m e 1m conforme delimitado por Da Silva e Carvalho (2006). Também foi feito o gráfico quantitativo comparativo para cada um dos MDEs para identificar a distribuição de áreas e suas respectivas porcentagens na influência dos valores atribuídos para a análise de inundações e alagamentos, como observado na Tabela 4.37 e Figura 4.80.

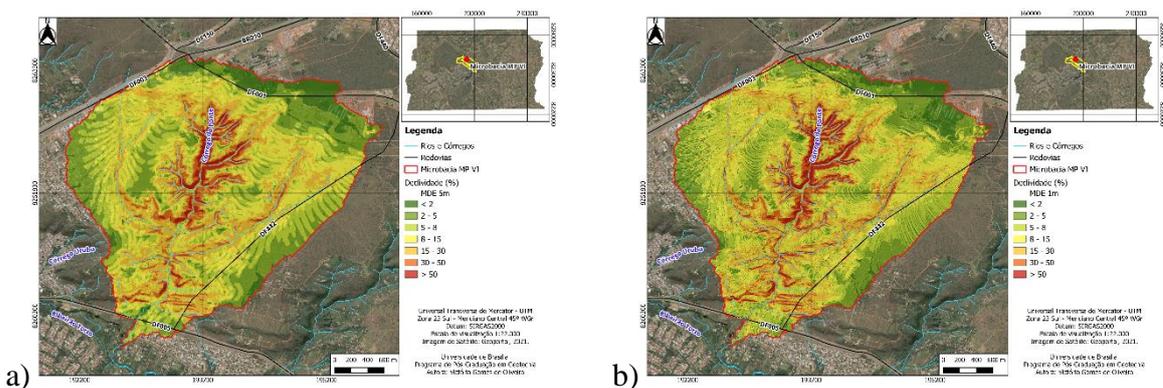


Figura 4.79 – Carta de declividade da microbacia MP VI. (a) Declividade do MDE de 5m; e (b) Declividade do MDE de 1m.

Tabela 4.37 – Classes de declividade da microbacia MP VI.

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| < 2             | 55,63     | 6,60%       | 54,06     | 6,42%       | 1,57          | -2,82%       |
| 2 - 5           | 149,29    | 17,72%      | 139,59    | 16,57%      | 9,70          | -6,50%       |
| 5 - 8           | 164,11    | 19,48%      | 159,47    | 18,93%      | 4,64          | -2,83%       |

| Declividade (%) | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                 | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| 8 - 15          | 243,85    | 28,95%      | 236,10    | 28,03%      | 7,75          | -3,18%       |
| 15 - 30         | 153,17    | 18,18%      | 151,90    | 18,03%      | 1,27          | -0,83%       |
| 30 - 50         | 55,55     | 6,59%       | 65,21     | 7,74%       | 9,66          | 17,39%       |
| > 50            | 20,72     | 2,46%       | 35,99     | 4,27%       | 15,27         | 73,70%       |
| <b>Total</b>    | 842,32    | 100,00%     | 842,32    | 100,00%     | -             | -            |

Para a microbacia MP VI, as diferenças na declividade ocorrem na diminuição de todos os intervalos de declividade até 30% aumento significativo de declividades onduladas a fortes (maiores que 30%) do MDE 5m para o MDE 1m. Em termos absolutos, o maior aumento ocorre justamente no intervalo maior que 50% (aumento de área em 15,27 ha), correspondendo à maior diferença relativa também (aumento de área em 73,70%) na comparação de declividade do MDE 1m em relação ao MDE 5m. Em termos absolutos, nenhuma diferença absoluta ultrapassa 16 hectares, ou seja, todas as diferenças de declividade correspondem a menos de 2% da área total da microbacia MP VI.

A Figura 4.80 apresenta graficamente a distribuição da porcentagem de microbacia MP VI por faixa de declividade. Observa-se que mais de 69% da microbacia apresenta declividades menores que 15%, com destaque para o intervalo de 8 a 15% de declividade. A faixa não urbanizável com declividades maiores que 30% corresponde de 9,05% (MDE 5m) a 12,01% (MDE 1m) da microbacia MP VI.

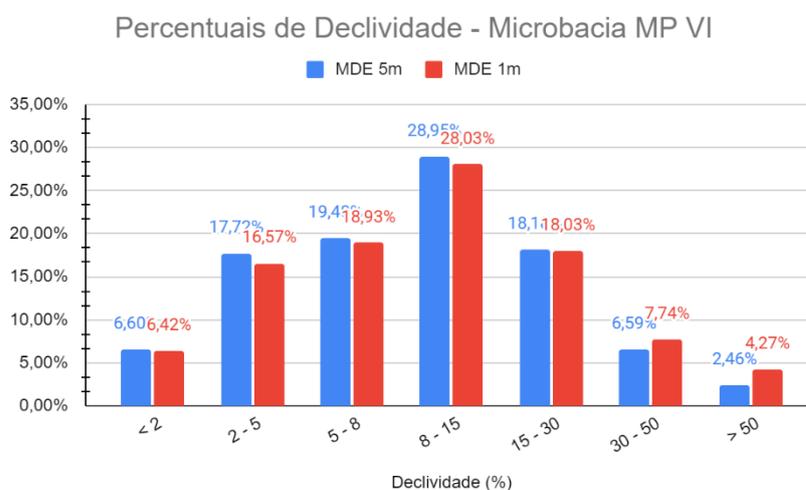


Figura 4.80 – Gráfico de distribuição da área MP VI em (%) por intervalos da declividade.

### 4.6.3 FORMAS DE VERTENTE

Como visto nas Cartas de Forma de Vertente da microbacia MP VI (Figura 4.81), há uma visível diferença nas curvaturas horizontais (convergente, planar e divergente) e nas curvaturas verticais (côncavo, retilíneo e convexo) com a mudança do dado de precisão do MDE.

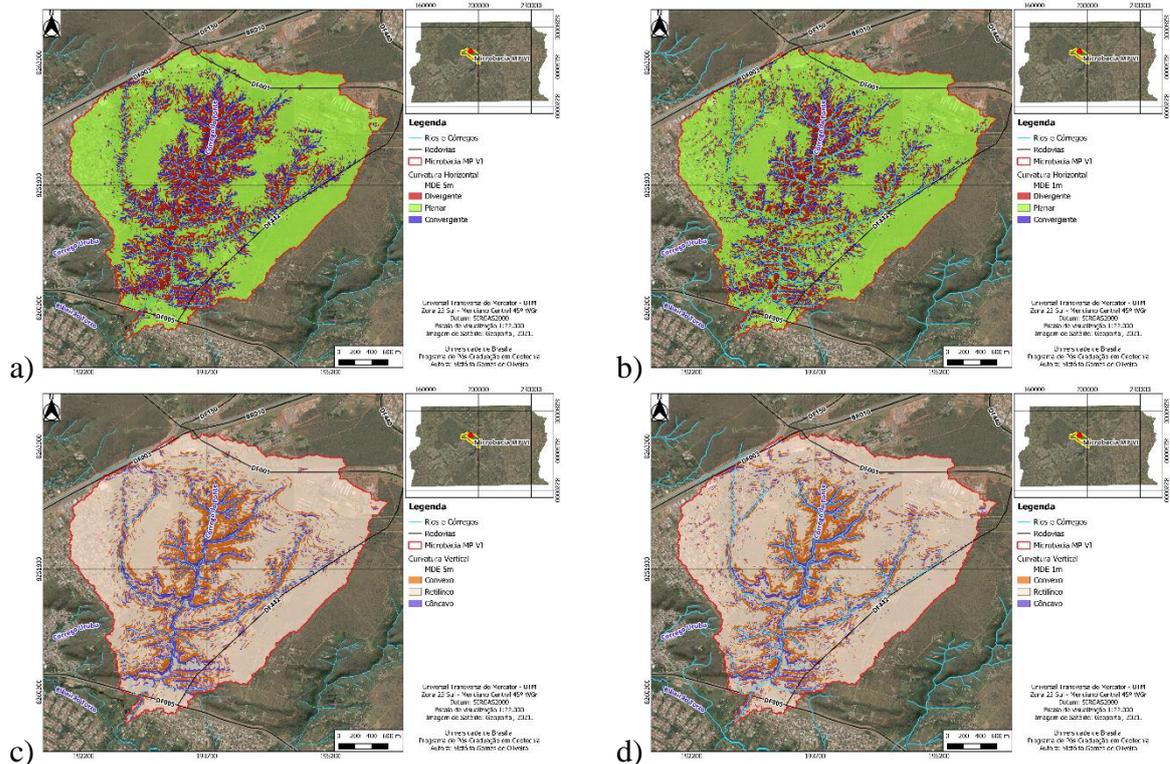


Figura 4.81 – Cartas de formas de vertente da microbacia MP VI. (a) Curvatura horizontal do MDE de 5m; (b) Curvatura horizontal do MDE de 1m; (c) Curvatura vertical do MDE de 5m e (d) Curvatura vertical do MDE de 1m.

Foram feitos vários de testes conjuntos nos MDE para determinar de forma arbitrária os limiares das vertentes retilíneas na microbacia MP VI, visando gerar mapas relacionados aos tipos de relevo da microbacia. Esses testes incluíram a utilização de mapas comparativos de relevo sombreado com as cartas de curvatura horizontal e vertical, a observação padronizada de perfis de vertentes representativas e ajuste da variação estatística fornecida pelo *software* ArcGIS.

Como resultado, foram selecionados os intervalos de -0,20/m a +0,23/m para a classe de vertentes planares e -0,31/m a +0,35/m para a classe de vertentes retilíneas no MDE 5m. Já para o MDE 1m, foram selecionados os intervalos de -0,29/m a +0,29/m para a classe de vertentes planares e -0,40/m a +0,42/m para a classe de vertentes retilíneas.

Constatou-se o alargamento da faixa de limiães no MDE 1m com os testes de curvatura. Ao aplicar os mesmos limiães do MDE 5m, ocorre o aparecimento de *pixels* de curvatura divergente/convergente ou convexa/côncava em áreas que, na análise visual, não correspondem à realidade. Contudo, esse procedimento acarreta em aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas. Os testes e limiães estabelecidos na microbacia MP VI foram comparados com outras bacias de características similares como a microbacia MP II. A Tabela 4.38 apresenta as áreas obtidas e seus respectivos percentuais para cada tipo de curvatura na microbacia MP VI.

Tabela 4.38 – Classificação das formas de vertente para a microbacia MP VI.

| Forma de Vertente    | MDE 5m      |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |         |
|----------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|---------|
|                      | Área (ha)   | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |         |
| Curvatura Horizontal | Divergente  | 146,58      | 17,40%    | 119,18      | 14,15%        | 27,4         | -18,69% |
|                      | Planar      | 576,11      | 68,40%    | 618,7       | 73,45%        | 42,59        | 7,39%   |
|                      | Convergente | 119,63      | 14,20%    | 104,44      | 12,40%        | 15,19        | -12,70% |
| <b>Total</b>         | 842,32      | 100,00%     | 842,32    | 100,00%     | -             | -            |         |
| Curvatura Vertical   | Convexa     | 135,44      | 16,08%    | 119,35      | 14,17%        | 16,09        | -11,88% |
|                      | Retilínea   | 609,12      | 72,31%    | 630,80      | 74,89%        | 21,68        | 3,56%   |
|                      | Côncava     | 97,76       | 11,61%    | 92,17       | 10,94%        | 5,59         | -5,72%  |
| <b>Total</b>         | 842,32      | 100,00%     | 842,32    | 100,00%     | -             | -            |         |

A curvatura horizontal convergente foi observada em 14,20% da área do MDE 5m em comparação com 12,40% no MDE 1m. Já a curvatura vertical côncava foi observada em 11,61% da área do MDE 5m em comparação com 10,94% no MDE 1m. Essas áreas foram classificadas com suscetibilidade alta à inundação e ao alagamento (valor 3).

As formas de vertente planar e retilínea foram definidas como valor 2 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 68,40% da área do MDE 5m comparativamente à 73,45% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal planar, e em 72,31% da área do MDE 5m comparativamente à 74,89% da área do MDE 1m, para curvatura vertical retilínea. Percebe-se que, para o MDE 1m, o modelo tem um aumento de áreas de curvaturas planares e retilíneas por apresentar mais trechos desse tipo de curvatura entre as classes convergentes e divergentes e as classes côncava e convexa, respectivamente.

As formas de vertente divergente e convexa foram definidas como valor 1 para a classificação da suscetibilidade à inundação e ao alagamento. Essas classes são verificadas em 17,40% da

área do MDE 5m comparativamente à 14,15% da área do MDE 1m, para curvatura horizontal divergente, e em 16,08% da área do MDE 5m comparativamente à 14,17% da área do MDE 1m, para curvatura vertical convexa. As Figuras 4.82 e 4.83 sintetizam de forma comparativa o percentual de curvatura horizontal e vertical, respectivamente, para a análise de formas de vertente nesta microbacia.

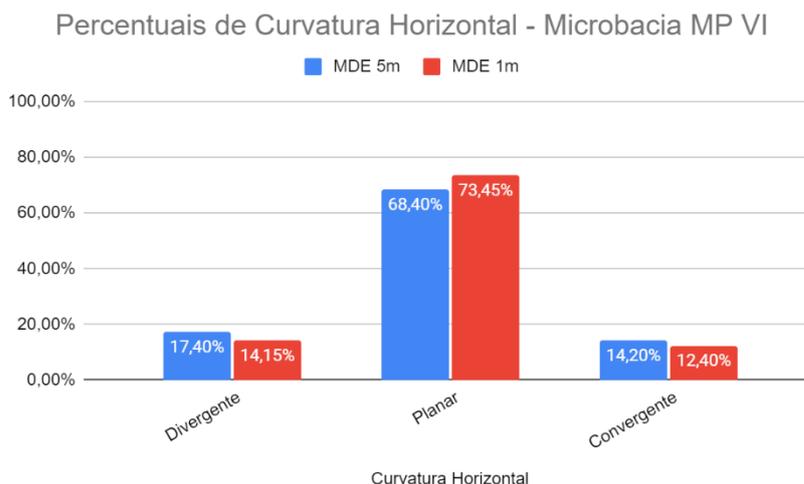


Figura 4.82 – Percentuais de curvatura horizontal na microbacia MP VI.

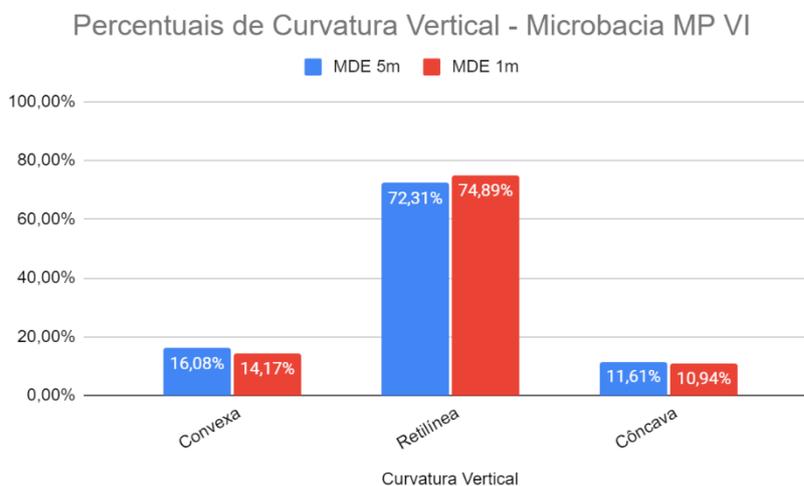


Figura 4.83 – Percentuais de curvatura vertical na microbacia MP VI.

#### 4.6.4 MODELO HAND

As Cartas do Modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage* – Altura Acima da Drenagem Mais Próxima), Figura 4.84, evidenciam uma concentração de alturas mais próximas às drenagens associados à hidrografia já existente da microbacia MP VI. Por se tratar de uma

área afluente ao Ribeirão Torto, as áreas com menores alturas verticais de drenagem correspondem aos córregos como o Córrego da Ponte e nascentes.

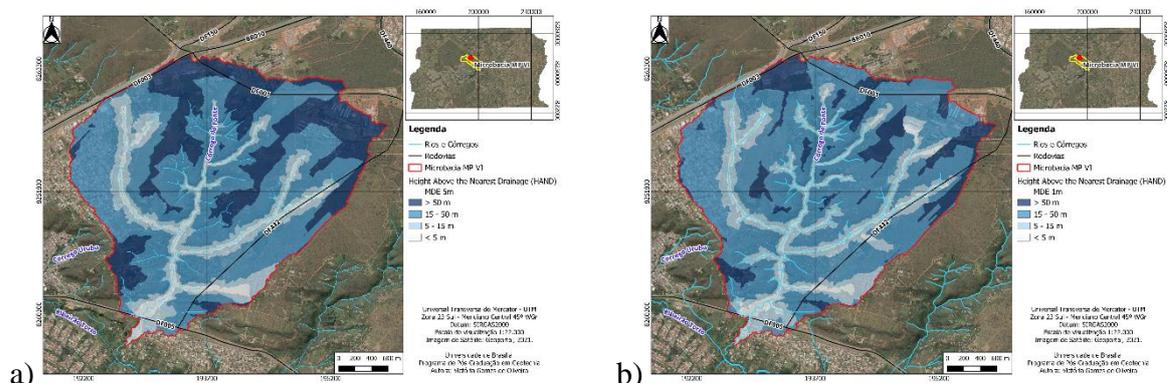


Figura 4.84 – Cartas do modelo HAND da microbacia MP VI. (a) HAND do MDE de 5m e (b) HAND do MDE de 1m.

A Tabela 4.39 apresenta as áreas em há e em (%) da microbacia MP VI dos intervalos de valor do HAND definidos por Silva et al. (2013). As divisões dos intervalos foram definidas baseando-se em quatro classes para o HAND: inundação (até 5 m), transição (de 5 m a 15 m), encostas (de 15 m a 50 m) e topos de morro (maior que 50 m), sendo classificados quanto a suscetibilidade a inundações e alagamentos de forma decrescente.

Tabela 4.39 - Classificação do modelo HAND segundo classes definidos por Silva et al. (2013) para a microbacia MP VI e seus respectivos quantitativos.

| Modelo<br>HAND (m) | MDE 5m        |                | MDE 1m        |                | Diferença        |                 |
|--------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|
|                    | Área<br>(ha)  | Porcentagem    | Área<br>(ha)  | Porcentagem    | Absoluta<br>(ha) | Relativa<br>(%) |
| < 5                | 60,16         | 7,14%          | 65,07         | 7,73%          | 4,91             | 8,16%           |
| 5 - 15             | 122,24        | 14,51%         | 153,48        | 18,22%         | 31,24            | 25,56%          |
| 15 - 50            | 449,99        | 53,42%         | 510,66        | 60,63%         | 60,67            | 13,48%          |
| > 50               | 209,93        | 24,92%         | 113,11        | 13,43%         | 96,82            | -46,12%         |
| <b>Total</b>       | <b>842,32</b> | <b>100,00%</b> | <b>842,32</b> | <b>100,00%</b> | -                | -               |

Os testes feitos para obtenção da área de contribuição de acordo com a rede de drenagem obtida pelo HAND, para a microbacia MP VI, resultaram em áreas de contribuição distintas para cada MDE, sendo a área de contribuição do MDE 5m igual a 21,76 ha e do MDE 1m igual a 9,66 ha. Foi testado aplicar a área de contribuição do MDE 1m no modelo HAND de 5 metros, porém os resultados apresentados se mostram superestimados para a microbacia local.

Com o aumento de precisão do modelo digital, nota-se um aumento relativo de 8,16 % (HAND menor que 5m) na área inundável e um aumento na extensão dos cursos hídricos na microbacia

MP VI, principalmente nos cursos adjacentes ao Córrego da Ponte. Isso também favorece a redução de área de 96,82 ha do MDE 5m para o MDE 1m nas áreas de HAND menor que 50m, com resultados menos conservadores das áreas de drenagem.

A drenagem obtida pela modelagem HAND e utilizada neste trabalho visou adequar, de maneira fidedigna, a realidade de todas as microbacias, especialmente as de alta densidade hidrográfica como as microbacias MP II, III-IV e VI. Observa-se que nos dois modelos da microbacia MP VI, há redução de área de topo de morro com mudança de classificação para escarpas e isso é verificado nos mapas já apresentados de hipsometria e declividade.

A Figura 4.85 apresenta as informações da Tabela 4.49 de intervalos dos diferentes MDEs, visando proporcionar uma visualização mais eficaz dos dados. Destaca-se uma notável concentração de área no intervalo de 15 a 50 metros de ambos MDEs, com diferenças significativas entre o intervalo de 5 a 15 metros para o MDE 5m (14,51%) e MDE 1m (18,22%) e o intervalo de maior que 50 metros para o MDE 5m (24,92%) e MDE 1m (13,43%).

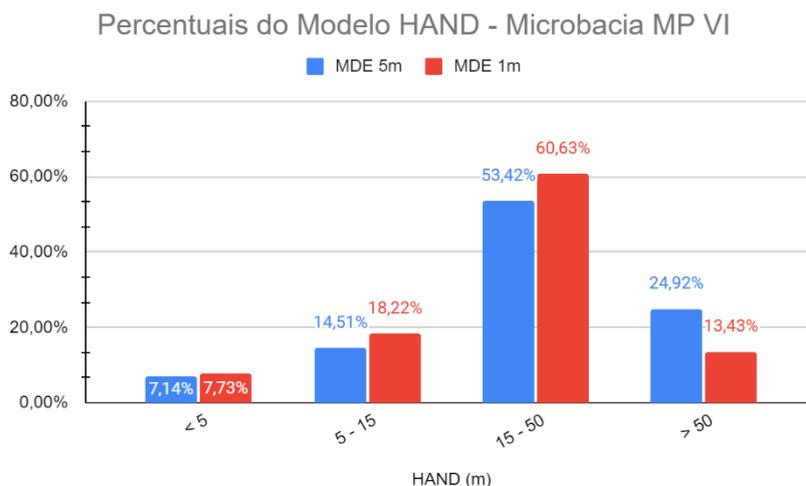


Figura 4.85 – Gráfico de distribuição da área MP VI em (%) por intervalos do HAND.

#### 4.6.5 USO E COBERTURA DO SOLO

A Carta de Uso e Cobertura da Solo (Figura 4.86) da microbacia MP VI foi elaborada a partir de dados de uso e cobertura de 2019 disponibilizados no Geoportal na escala de 1:10.000. Para as áreas selecionadas, o sistema de classificação abrangeu as seguintes classes: Água, Área construída, Formação campestre, Formação florestal, Formação savânica, Reflorestamento, Sistema viário e Solo exposto.

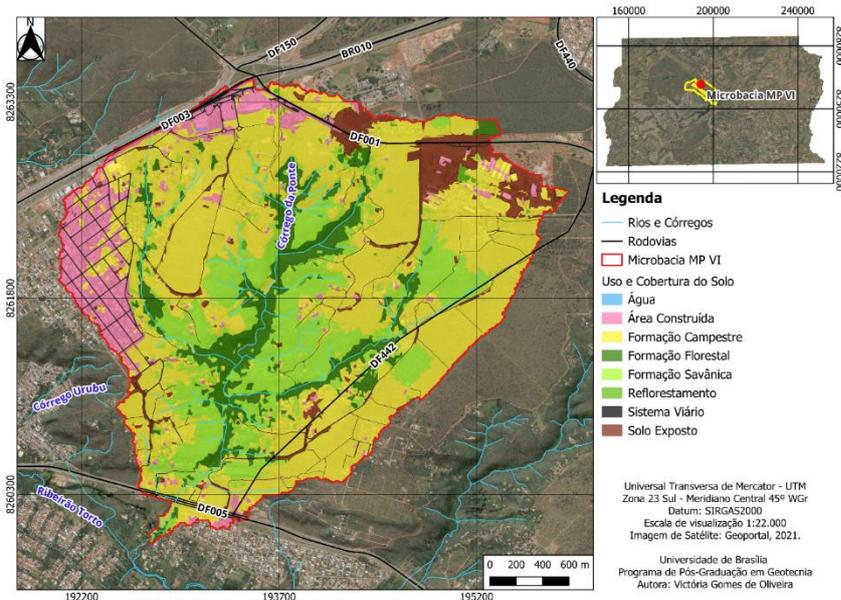


Figura 4.86 - Carta de uso e cobertura do solo da microbacia VI.

Tabela 4.40 – Áreas em hectares e porcentagem das classes de uso e ocupação do solo da microbacia MP VI.

| <b>Uso e Cobertura do Solo</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>Porcentagem</b> |
|--------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Água</b>                    | 0,14             | 0,02%              |
| <b>Área construída</b>         | 72,05            | 8,55%              |
| <b>Formação campestre</b>      | 430,97           | 51,16%             |
| <b>Formação florestal</b>      | 86,96            | 10,32%             |
| <b>Formação savânica</b>       | 170,86           | 20,28%             |
| <b>Reflorestamento</b>         | 3,56             | 0,42%              |
| <b>Sistema viário</b>          | 29,57            | 3,51%              |
| <b>Solo exposto</b>            | 48,21            | 5,72%              |
| <b>Total</b>                   | 842,32           | 100,00%            |

Como visto na Tabela 4.40, a Formação Campestre (51,16%), a Formação Savânica (20,28%) e a Formação Florestal (10,32%) representam a maior porcentagem dessa microbacia, evidenciando um alto grau de conservação de cobertura vegetal, porém com focos de urbanização e solo exposto na área da microbacia.

As áreas classificadas com valor 3 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, alta suscetibilidade, representam 101,76 ha ou 12,08% da totalidade da microbacia MP VI. A distribuição concentra-se, principalmente, na extremidade oeste da bacia por corresponderem à parte das áreas de declividade até 8%. Essa classe apresenta cobertura média de impermeabilização que confere capacidade intermediária de escoamento superficial. Destaca-se que ocorre um processo de expansão urbana nessas áreas, concentrando pequenas porções

ainda não antropizadas de cobertura vegetal. Esse processo de impermeabilização tende a promover o aumento do escoamento superficial caso não haja infraestrutura de drenagem adequada para comportar o crescimento urbano nessas áreas.

As áreas classificadas com valor 2 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, média suscetibilidade, são representadas pela classe de solo exposto em áreas antropizadas nessa microbacia, com valores de área de 48,21 ha ou 5,72%. A distribuição se concentra na cabeceira da bacia em áreas de declividade plana a suave, indicando processos de ação antrópica.

As áreas classificadas com valor 1 para suscetibilidade à eventos hidrológicos, baixa suscetibilidade, correspondem às classes de formações florestal, savânica, campestre e reflorestamento e ocupam área de 692,35 ha ou 82,20% da bacia. A distribuição dessa categoria concentra-se ao longo de toda bacia, com ênfase em coberturas vegetais mais arbóreas no médio a baixo curso, principalmente junto aos cursos hídricos e encostas. O fato dessa classe estar localizada em áreas de declividade a partir de 8% e encostas, além de recobrir córregos e nascentes da microbacia, indica baixa taxa de expansão urbana, além de limitações topográficas de ocupação urbana e favorece a preservação de áreas protegidas pela legislação.

#### **4.6.6 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO**

A Figura 4.87 apresenta as cartas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP VI, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Modelo HAND supracitados nos itens “4.6.2”, “4.6.3” e “4.6.4”. É perceptível que a maior parte da região se encontra em zonas de muito baixa e baixa suscetibilidade à inundação e estão, também, em áreas de alta declividade, uma vez que essa microbacia possui diversos córregos e nascentes. A Tabela 4.41 traz o compilado de áreas de suscetibilidade à inundação da microbacia MP VI.

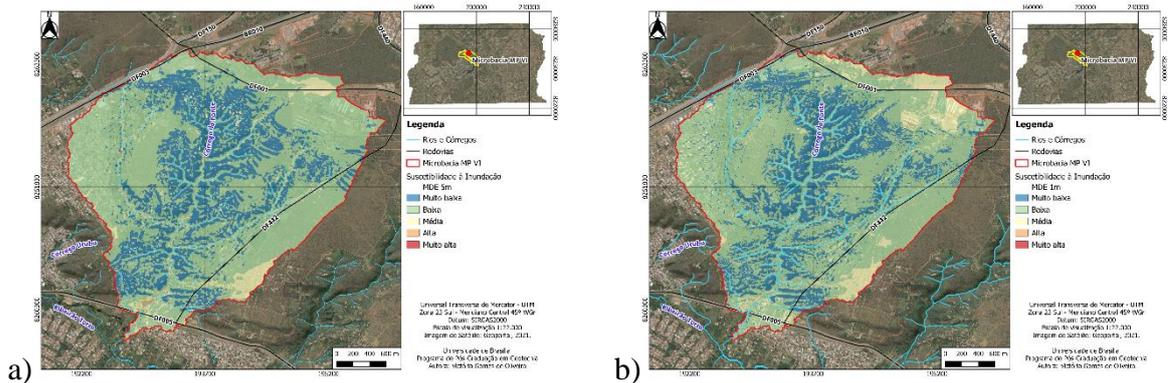


Figura 4.87 - Carta da suscetibilidade a inundações da microbacia MP VI. (a) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade à inundação do MDE de 1m.

Tabela 4.41 - Classificação da suscetibilidade a inundações para a microbacia MP VI.

| Suscetibilidade à Inundação | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-----------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                             | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>          | 227,10    | 26,96%      | 195,42    | 23,20%      | 31,68         | -13,95%      |
| <b>Baixa</b>                | 550,96    | 65,41%      | 548,63    | 65,13%      | 2,33          | -0,42%       |
| <b>Média</b>                | 59,52     | 7,07%       | 85,89     | 10,20%      | 26,37         | 44,30%       |
| <b>Alta</b>                 | 4,55      | 0,54%       | 12,33     | 1,46%       | 7,78          | 170,99%      |
| <b>Muito alta</b>           | 0,19      | 0,02%       | 0,05      | 0,01%       | 0,14          | -73,68%      |
| <b>Total</b>                | 842,32    | 100,00%     | 842,32    | 100,00%     | -             | -            |

A região da microbacia MP VI, assim como a microbacia MP II, possui a particularidade de ser uma região de alta densidade hidrográfica, com diversos afluentes do Ribeirão Torto. Boa parte da microbacia encontra-se em área de muito baixa suscetibilidade (26,96% do MDE 5m e 23,20% do MDE 1m) e baixa suscetibilidade (65,41% do MDE 5m e 65,13% do MDE 1m). A análise de suscetibilidade à inundação possibilita uma análise mais cautelosa em caso de expansão urbana em áreas ainda não ocupadas. A Figura 4.88 identifica de forma comparativa o percentual de áreas suscetíveis à inundação nesta microbacia.

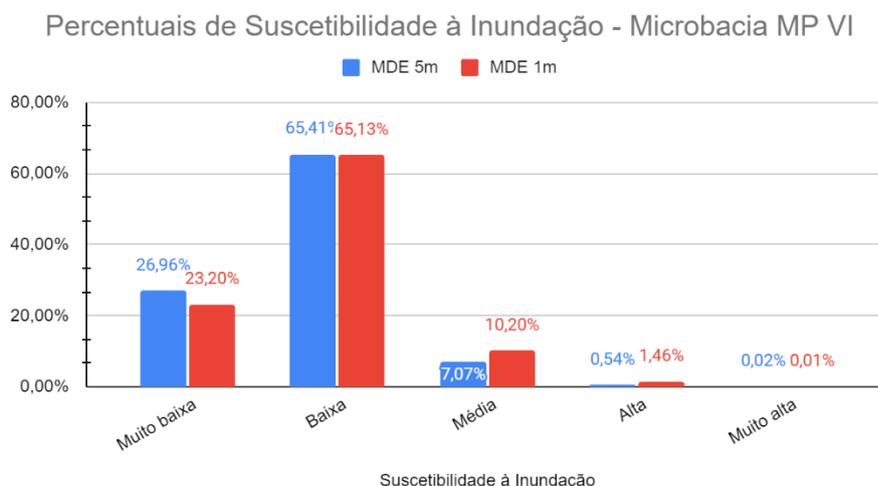


Figura 4.88 - Percentual de classes de suscetibilidade à inundação na microbacia MP VI.

Na categoria de Muito Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP VI, ocorre a diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, correspondente à diferença relativa de 73,68%. Identifica-se a predominância dessas áreas no leito dos cursos hídricos, em especial no Córrego da Ponte, áreas já passíveis de inundação e com densa cobertura vegetal de formação florestal e savânica.

Na categoria de Alta Suscetibilidade à inundação da microbacia MP VI, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, expresso na diferença relativa de 170,99% (7,78 ha). Essas áreas estão localizadas principalmente próximas ao exutório, em regiões de declividade plana suave (até 5%) e correspondentes majoritariamente às áreas no intervalo HAND menor que 5m. Ocorrem, também, em áreas de curvatura planar e retilínea, que configuram formas de vertente intermediárias para o acúmulo de água.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 7,07% da área do MDE 5m e 10,20% da área do MDE 1m, ou seja, um incremento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Essa diferença (26,37 ha em termos de diferença absoluta) ocorre, principalmente, com aumento de áreas no intervalo de 15 a 50 metros no modelo HAND no MDE 1m e o cruzamento de dados de declividade plana (até 2%) na cabeceira e extremidades da microbacia. Dessa forma, há uma superestimativa de média suscetibilidade em áreas que são improváveis de ocorrer inundação.

As áreas caracterizadas como Baixa Suscetibilidade correspondem à mais da metade da microbacia MP VI, com variação de área de 550,96 ha ou 65,41% no MDE 5m e área de 548,63

ha ou 65,13% no MDE 1m. Por se tratar de uma bacia que abrange diversos cursos hídricos perenes e intermitentes localizados em área densamente vegetada, as áreas urbanizadas da microbacia estão mais afastadas dos córregos e em cotas intermediárias a elevadas do terreno. A predominância da classificação de baixa suscetibilidade se deve pela grande área de declividade plana a suave ondulada (até 8%) em áreas de HAND entre 15 e 50 m e curvatura planar retilínea.

Por fim, as áreas classificadas como Muito Baixa Suscetibilidade são caracterizadas por superfícies majoritariamente convexas e divergentes de declividade maior que 8% e localizadas em zonas do HAND nos intervalos de 15 a 50m e maior que 50m. Correspondem a áreas significativas de ambos MDEs (26,96% no MDE 5m e 23,20% no MDE 1m), com redução relativa de 13,95% de área do MDE 1m em comparação com o MDE 5m.

#### 4.6.7 CARTAS DE SUSCETIBILIDADE AO ALAGAMENTO

A Figura 4.89 apresenta as cartas de suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP VI, resultado da álgebra de mapas das reclassificações da Declividade, Formas de Vertente e Uso e Cobertura do Solo supracitados nos itens “4.6.2”, “4.6.3” e “4.6.5”. É perceptível que a maior parte das áreas em zonas de muito alta e alta suscetibilidade ao alagamento se encontram justamente em áreas urbanizadas, correspondente a 8,28% da área para o MDE 5m e 7,11% para o MDE 1m (Tabela 4.42).

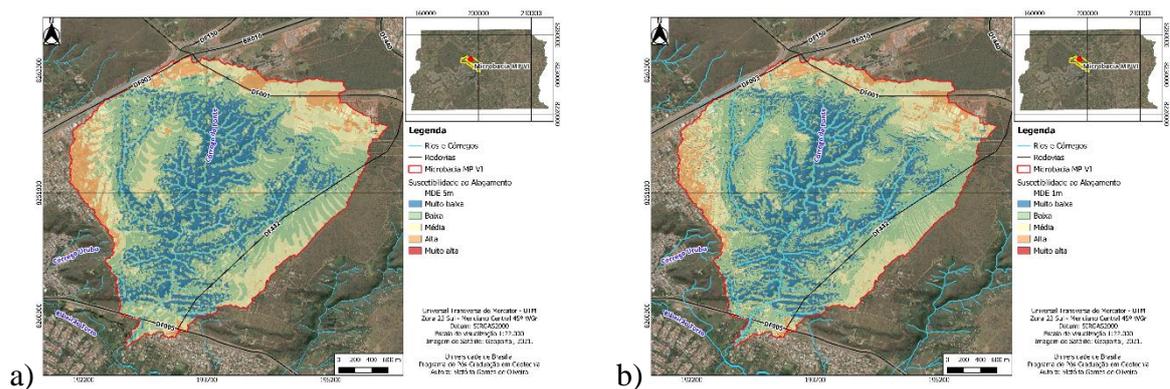


Figura 4.89 - Carta da suscetibilidade a alagamentos da microbacia MP VI. (a) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 5m e (b) Classificação de suscetibilidade ao alagamento do MDE de 1m.

Tabela 4.42 – Classificação da suscetibilidade a alagamentos para a microbacia MP VI.

| Suscetibilidade ao Alagamento | MDE 5m    |             | MDE 1m    |             | Diferença     |              |
|-------------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|--------------|
|                               | Área (ha) | Porcentagem | Área (ha) | Porcentagem | Absoluta (ha) | Relativa (%) |
| <b>Muito baixa</b>            | 210,49    | 24,99%      | 205,75    | 24,43%      | 4,74          | -2,25%       |
| <b>Baixa</b>                  | 362,4     | 43,02%      | 384,33    | 45,63%      | 21,93         | 6,05%        |
| <b>Média</b>                  | 199,72    | 23,71%      | 192,35    | 22,84%      | 7,37          | -3,69%       |
| <b>Alta</b>                   | 69,54     | 8,26%       | 59,5      | 7,06%       | 10,04         | -14,44%      |
| <b>Muito alta</b>             | 0,17      | 0,02%       | 0,39      | 0,05%       | 0,22          | 129,41%      |
| <b>Total</b>                  | 842,32    | 100,00%     | 842,32    | 100,00%     | -             | -            |

Assim como a suscetibilidade à inundação, classes de muito baixa e baixa suscetibilidade ao alagamento são muito expressivas nessa microbacia para ambos MDEs. Porém, o dado de maior precisão topográfica (MDE 1m) possui diminuição das classes de média e alta suscetibilidade a alagamento em relação ao MDE 5m. Isso, provavelmente, está relacionado à diminuição de áreas de curvaturas convergente e côncava no modelo de maior precisão. A Figura 4.90 apresenta de forma gráfica as comparações entre as mudanças de suscetibilidade a alagamentos.

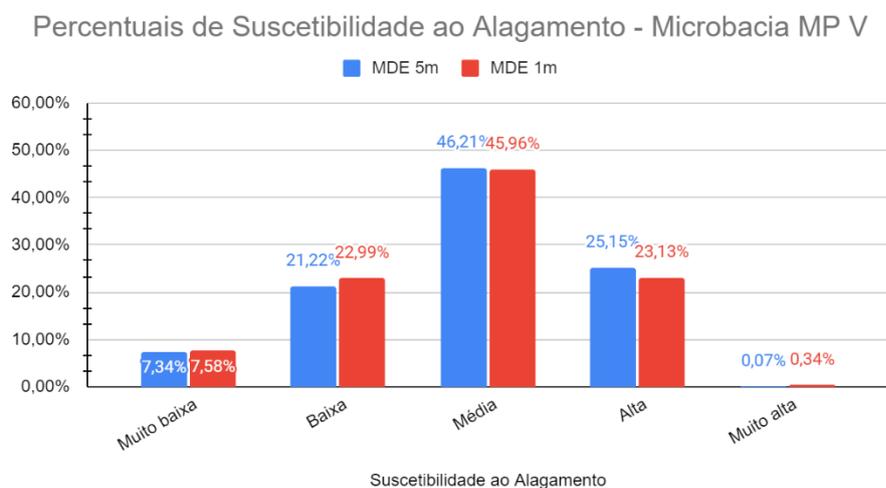


Figura 4.90 - Percentual de classes de suscetibilidade ao alagamento na microbacia MP VI.

Na classe de Muito Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP VI, ocorre um aumento de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, visível na diferença relativa de 129,41%, ainda que em termos absolutos isso corresponda a 0,22 ha. Está associado ao cruzamento de áreas com declividade plana e curvaturas convergentes e/ou convexas em áreas urbanas, observadas como locais de acúmulo de água.

Na classe de Alta Suscetibilidade ao alagamento da microbacia MP VI, ocorre uma diminuição de áreas do MDE 5m para o MDE 1m, representada na diferença relativa de 14,44% e

correspondente à 10,04 ha na diferença absoluta. Corresponde à segunda menor classe de suscetibilidade nesta microbacia para ambos MDEs (8,26% do MDE 5m e 7,06% do MDE 1m), por se tratar de uma região com alto índice de ocupação antrópica em declividades de até 5% na cabeceira e extremidades da microbacia. Além disso, observa-se que o padrão de ocupação urbano é caracterizado predominantemente por residências e condomínios de alto padrão e muitas áreas arborizadas, características que normalmente inibem o acúmulo de água em escala local.

A região classificada como Média Suscetibilidade corresponde a 23,71% da área do MDE 5m e 22,84% da área do MDE 1m, ou seja, uma diminuição de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange áreas próximas à cabeceira da microbacia com declividade entre 5 e 15% associadas a ocupação urbana e áreas de solo exposto. A redução relativa (3,69%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de redução de áreas de baixa suscetibilidade próximas às ocupações urbanas, uma vez que nessas áreas o MDE 1m apresenta regiões com declividades mais declivosas.

A região classificada como Baixa Suscetibilidade corresponde a 43,02% da área do MDE 5m e 45,63% da área do MDE 1m, ou seja, um aumento de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação. Abrange parte das áreas de declividade entre 5 e 15% na região associada a formação savânica e curvaturas planares e retilíneas. O incremento relativo (6,05%) do MDE 1m em relação ao MDE 5m está principalmente relacionado ao aumento de áreas de declividade onduladas a fortes (maiores que 30%).

Na região classificada como Muito Baixa Suscetibilidade, predominam áreas de curvatura divergente e/ou convexa em áreas de cobertura vegetal e declividades onduladas a fortes (maiores que 15%). Há uma redução de áreas nesta classe com o aumento de precisão do modelo digital de elevação e diminuição de áreas de curvatura divergente convexa, com 24,99% da área do MDE 5m e 24,43% da área do MDE 1m, sendo a segunda classe mais expressiva nesta microbacia.

## 5 CONCLUSÃO

A identificação de áreas suscetíveis à eventos hidrológicos é um procedimento crucial para auxiliar o planejamento e a gestão pública. A análise de suscetibilidade e a caracterização das microbacias de acordo com as suas características de relevo e uso e ocupação do solo permitem esclarecer quais áreas necessitam de atenção especial e eventuais intervenções prioritárias.

A suscetibilidade a inundações mostrou-se mais propensa a ocorrer em áreas já inundadas por córregos e suas áreas de cheia e, de modo geral, não apresentam riscos a áreas com ocupação urbana consolidada. Já a suscetibilidade a alagamentos mostrou-se mais propensa a ocorrer em áreas onde o solo sofre interferência antrópica significativa, podendo agravar ou acelerar esses processos. As áreas urbanas de interesse (microbacias MP I, MP II, MP III-IV, MP IV, MP V e MP VI) apresentam regiões com cursos hídricos bem documentados, com graus de adensamento populacional variados, características urbanísticas próprias e infraestrutura urbana predominante em áreas de declividades menos acentuadas (<15%).

Este estudo envolveu a coleta de uma extensa quantidade de informações, abrangendo diferentes contextos espaciais e sociais. A variedade de informações reunidas e coleta de dados das bases distritais de informações georreferenciadas como o Geoportal-DF possibilitaram a construção de um banco de dados robusto sobre as áreas de interesse deste trabalho.

Embora esta pesquisa não tenha empregado análises diretas das áreas, a integração dos dados obtidos em *sites* de domínio público mostrou-se muito prático e eficiente. A aplicação dessa metodologia, além de ter baixo custo de execução, mostrou-se viável, principalmente para utilização dos dados de curva de nível de 5 metros, e proporcionou resultados satisfatórios para a realidade das microbacias, sendo passível de aplicação e adaptação para outras realidades.

Assim, a utilização de geotecnologias em estudos voltados para a detecção de áreas de suscetibilidade hidrológica não apenas expande a capacidade analítica em diferentes escalas, mas também desempenha um papel essencial ao oferecer suporte para o desenvolvimento de estratégias preventivas e mitigadoras de desastres naturais. As Figuras 5.1 e 5.2 juntamente com a Tabela 5.1 explicitam a relação entre as classes de suscetibilidade à inundação e ao alagamento hierarquizadas (muito alto e alto, médio, baixo e muito baixo) para cada uma das microbacias comparando as mudanças percentuais com o aumento de precisão da escala dos Modelos Digitais de Elevação de 5 metros e 1 metro.

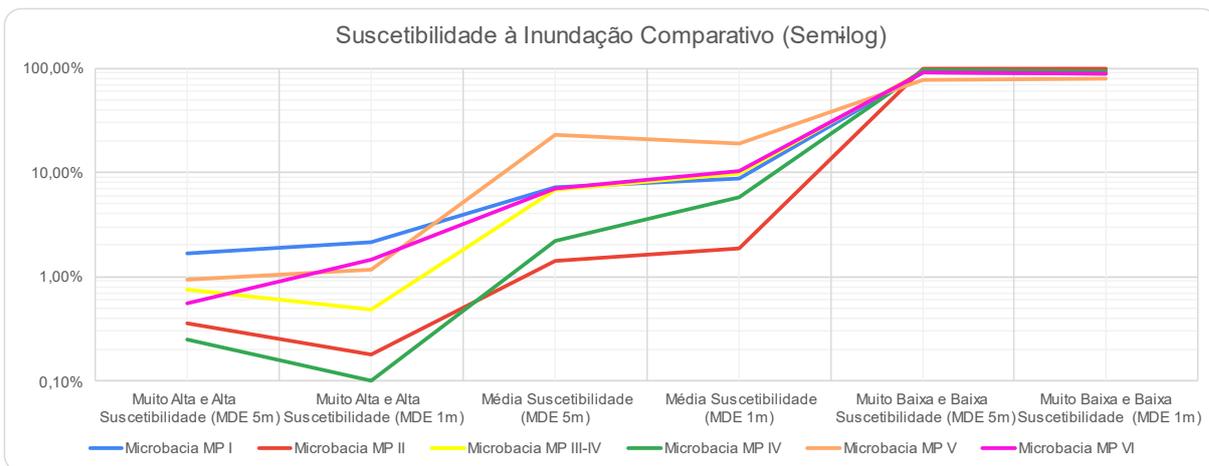


Figura 5.1 – Gráfico de suscetibilidade à inundação comparativo percentual entre microbacias e escalas de precisão de 5m e 1m.

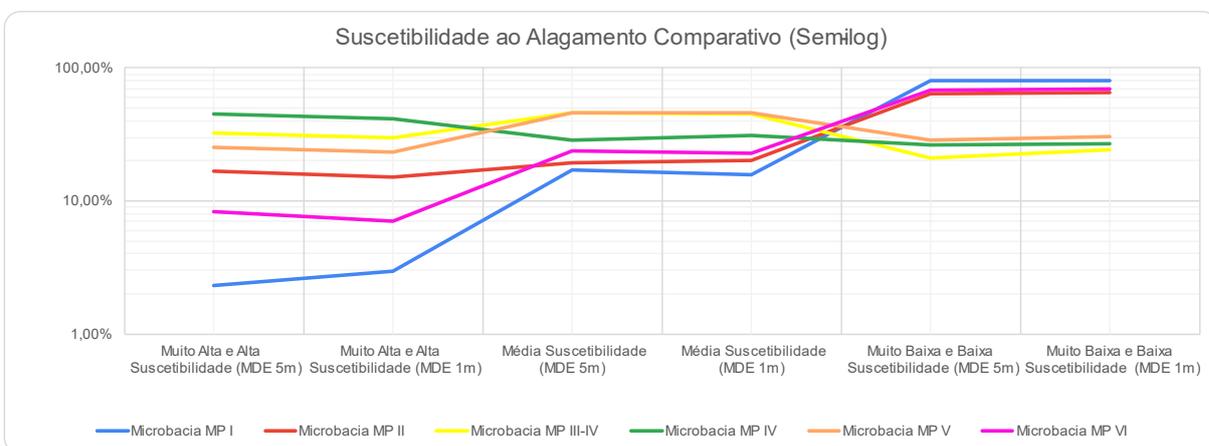


Figura 5.2 – Gráfico de suscetibilidade ao alagamento comparativo percentual entre microbacias e escalas de precisão de 5m e 1m.

Tabela 5.1 - Quadro percentual de suscetibilidade hidrológica nas microbacias.

| Suscetibilidade |                     | Escala de Precisão | MP I   | MP II  | MP III-IV | MP IV  | MP V   | MP VI  |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|
| Inundação       | Muito Alta e Alta   | MDE 5m             | 1,68%  | 0,36%  | 0,75%     | 0,25%  | 0,93%  | 0,56%  |
|                 |                     | MDE 1m             | 2,17%  | 0,18%  | 0,49%     | 0,10%  | 1,17%  | 1,47%  |
|                 | Média               | MDE 5m             | 7,14%  | 1,40%  | 6,81%     | 2,23%  | 22,72% | 7,07%  |
|                 |                     | MDE 1m             | 8,63%  | 1,85%  | 9,88%     | 5,71%  | 18,79% | 10,20% |
|                 | Muito Baixa e Baixa | MDE 5m             | 91,19% | 98,23% | 92,44%    | 97,52% | 76,36% | 92,37% |
|                 |                     | MDE 1m             | 89,20% | 97,97% | 89,63%    | 94,18% | 80,04% | 88,33% |
| Alag            | Muito Alto e Alta   | MDE 5m             | 2,29%  | 16,60% | 32,71%    | 45,38% | 25,22% | 8,28%  |
|                 |                     | MDE 1m             | 2,95%  | 15,01% | 30,07%    | 41,63% | 23,47% | 7,11%  |

| Suscetibilidade | Escala de Precisão         | MP I   | MP II  | MP III-IV | MP IV  | MP V   | MP VI  |        |
|-----------------|----------------------------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|                 | <b>Média</b>               | MDE 5m | 17,24% | 19,52%    | 46,29% | 28,47% | 46,21% | 23,71% |
|                 |                            | MDE 1m | 15,77% | 20,07%    | 45,49% | 31,17% | 45,96% | 22,84% |
|                 | <b>Muito Baixa e Baixa</b> | MDE 5m | 80,47% | 63,88%    | 21,00% | 26,16% | 28,56% | 68,01% |
|                 |                            | MDE 1m | 81,29% | 64,93%    | 24,44% | 27,20% | 30,57% | 70,06% |

O mapeamento de suscetibilidade para inundações indicou uma redução percentual de Muito Alta e Alta Suscetibilidade nas microbacias MP II, MP III-IV e MP IV com o aumento da escala de precisão em comparação com as microbacias MP I, MP V e MP VI, que tiveram um incremento percentual nessa mesma classe de suscetibilidade. Já o mapeamento de suscetibilidade para alagamentos indicou uma redução percentual de Muito Alta e Alta Suscetibilidade em todas as microbacias, exceto na microbacia MP I, com o aumento da escala de precisão.

De modo geral, as metodologias e os dados empregados neste estudo foram capazes de enriquecer as análises dos fenômenos de inundação e alagamento para a realidade urbana do DF. É relevante notar que as ferramentas utilizadas dispensam a necessidade de múltiplas fontes de dados, sendo de fácil compreensão e aplicação, apesar da inerente subjetividade na atribuição de valores para os parâmetros utilizados. Destaca-se, ainda, que a utilização de curvas de nível de metro em metro proporcionou um conhecimento de alta resolução sobre a topografia e o mapeamento de áreas urbanas, porém trata-se de um dado limitante para a análise, uma vez que não abrange todo o território do DF.

É importante salientar, por outro lado, que as metodologias se baseiam em levantamentos de dados computacionais sujeitos a imprecisões. A atribuição de valores para os parâmetros com base apenas na literatura sem série histórica de eventos pode não estimar de forma atualizada os reais processos de desastres hidrológicos. Além disso, ressalta-se a maior demanda computacional para processamento de dados em escala de precisão (1:2.000). No entanto, é crucial destacar que possíveis imprecisões e maior demanda de recursos computacionais não invalidam os procedimentos utilizados, apenas ressaltam que podem influenciar as representações das áreas urbanas avaliadas.

## 6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base no tema proposto, na densidade de assuntos relacionados a áreas de suscetibilidade hidrológica e nos resultados obtidos foi possível identificar outros temas para a continuidade deste trabalho. Nesse contexto, apresentam-se algumas sugestões para pesquisas futuras, visando subsidiar a identificação de outras áreas suscetíveis a alagamentos e inundações no DF.

- Cruzamento de dados históricos com as áreas mapeadas: buscar uma coleta e análise de dados mais precisa entre áreas mapeadas como áreas de suscetibilidade ao alagamento e inundação e eventos históricos noticiados, visando a validação de áreas mapeadas neste estudo.
- Resgate de dados históricos: coletar informações históricas adicionais que possam enriquecer a compreensão de eventos hidrológicos no DF ao longo do tempo.
- Estudo aprofundado dos processos de escorregamento de encostas: atrelar a análise de suscetibilidade a eventos hidrológicos com eventos geológicos para obter uma avaliação geral dos processos geodinâmicos, correlacionando-os com parâmetros geotécnicos, tipos de solos e geomorfologia.
- Análise de suscetibilidade para outras Regiões Administrativas do DF: aplicar a metodologia e mapeamento de áreas de suscetibilidade à inundação e alagamento em outras microbacias urbanas.
- Avaliação específica de risco de alagamento e inundações: coletar dados socioeconômicos e de vulnerabilidade social em campo e cruzar com os dados de suscetibilidade hidrológica para uma análise detalhada das condições de risco e de infraestrutura urbana das áreas habitadas de interesse.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHUALLI, L. A. F. (2019). Aplicação Da Cartografia Geotécnica Como Subsídio Para Planejamento Urbano No Setor Habitacional Fercal, Publicação 338/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 207p.
- AMARAL, R.; RIBEIRO, R.R. (2011). Enchentes e inundações. In: Desastres naturais, conhecer para prevenir. Tominaga, L.K; Santoro, J; Amaral, R. (Organizadores). Instituto Geológico, São Paulo, p. 40-53.
- BARBOSA, F. A. R. (2006). Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB/Francisco de Assis dos Reis Barbosa. João Pessoa, 116p.
- BATISTA, P. H. L. (2014). Cartografia Geotécnica aplicada aos Riscos de Alagamento e Inundação na Bacia do rio São Bartolomeu. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-236/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 223p.
- BRASIL. (2021). GRID+10: Caderno Técnico de Gestão Integrada de Riscos e Desastres. Samia Nascimento Sulaiman, organizadores, Ministério do Desenvolvimento Regional; Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, Brasília, DF, 1º ed., 154p.
- BRASIL. (2012). Lei no 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e sobre o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC); Autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis no 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, DF.
- BRITO, S. N. A.; OLIVEIRA, A. M. S. (1998). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE.
- CÂMARA, G.; DAVIS JR, C.A.; MONTEIRO, A.M.V. (org.). (2001). Introdução à Ciência da Geoinformação. MCT/INPE [INPE-10506-RPQ/249], São José dos Campos, SP, 345 p.
- CARVALHO, C.S., MACEDO, E.S. & OGURA, A.T. (Org.). (2007). Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. Brasília, DF, Min. das Cidades/IPT, 176 p.

- CERRI, L.E.S. e AMARAL, C. P. (1998). Riscos Geológicos. In: Oliveira, A.M.S. e Brito, S.N.A. (ed.). Geologia de Engenharia. São Paulo, SP, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), p. 301-310.
- CERRI, L.E.S. (1990). Carta Geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. 6º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, Salvador, BA, 1: 309-317.
- CERRI, L.E.S.; AKIOSSI, A.; AUGUSTO FILHO, O. & ZAINÉ, J.E. (1996). Cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método de detalhamento progressivo. 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, Rio de Janeiro, RJ, 2: 537-548.
- CODEPLAN (2022). Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios (PDAD) 2021. Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN); Secretaria de Estado de Fazenda, Planejamento, Orçamento e Gestão do Distrito Federal, Brasília, DF, 1º ed., 154p.
- CONCEIÇÃO, R. A. C. e SIMÕES, P.M.L. (2021). Nota Técnica para Elaboração de Modelagens de Inundação. Repositório Institucional de Geociências, Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Brasil, 9p.
- DA SILVA, A.P.F., RODRIGUES-CARVALHO, J.A. (2006). Engineering geological mapping for the urban planning of Almada County, Portugal. IN: Culshaw, M.G., REEVES, H.J., JEFFERSON, I., SPINK, T.W. (eds) Engineering Geology for tomorrow's Cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 165p.
- DEARMAN, W.R. (1991). Engineering Geological Mapping. British Library Cataloguing Publication Data, Butterworth e Heinemann, London, UK, 415 p.
- DINIZ, N.C. (1998). Automação da cartografia geotécnica: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, SP, 2 vol., 297 p.
- DINIZ, N. C. e FREITAS, C. G. L. (2013). Cartografia geotécnica. In: COUTINHO, Roberto Quental (Coord. e Org.). Parâmetros para a cartografia geotécnica e diretrizes para medidas de intervenção de áreas sujeitas a desastres naturais. 1 ed., Capítulo 3. Convênio

- Ministério das Cidades, Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP) e Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Brasília: MCidades, GEGEP e UFPE.
- DISTRITO FEDERAL (1977). Decreto n°. 4.008 de 26 de dezembro de 1977. Aprova o Sistema Cartográfico do Distrito Federal (SICAD) e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial do Distrito Federal, 1977.
- FREITAS, C. G. L., CAMPANHA, V. A. (2007). Carta geotécnica e ambiental aplicada em planos diretores municipais. 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, Uberlândia. ABGE, p. 562-570.
- GONÇALVES, L. S. M; TEIXEIRA, B. A. N. (2021). Identificação de publicações sobre dispositivos de drenagem urbana sustentáveis e chuvas de projeto. In: III SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA: SINGEURB, Maceió. Anais. Porto Alegre: ANTAC, p. 79-86.
- GUERRA, A.T e GUERRA, A.J.T. (2008). Novo dicionário geológico-geomorfológico. Rio de Janeiro, RJ, Ed. Bertrand Brasil Ltda., 6 ed., 652 p.
- HUTCHINSON, M.F. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Australia.
- HUTCHINSON, M.F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology n° 106, p. 211-232.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2023). Censo Demográfico 2022. IBGE. Disponível: <https://censo2022.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2024.
- INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. (2004). SPRING versão 4.1. São Paulo: INPE. Disponível: [www.inpe.br](http://www.inpe.br). Acesso em: 02 de dezembro de 2023.
- LOLLO, J.A. et al (2013). Cartas de suscetibilidade a erosão e a inundações para área de expansão urbana de ilha solteira/sp como subsídio ao planejamento territorial urbano. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, RS, 8p.

- MOURA, A. C. M. (2003) Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano. Belo Horizonte, Ed. da Autora.
- MOREIRA, M. A. (2001). Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 246p.
- NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RO-DRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WA-TERLOO, M.; SALESKA, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404 (1-2), pp. 13-29.
- NOBRE, A.D., CUARTAS, L.A., MOMO, M.R., et al. (2015). HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.10581. Vol. 30, nº 2, pags. 320-333.
- RENNÓ C.D., NOBRE A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J., WATERLOO, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTMDEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112 (9):3469-3481.
- SANTOS, R. F. (organizadora). (2007). MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Vulnerabilidade Ambiental - Desastres Naturais ou Fenômenos Induzido – Brasília: MMA. 192 p.
- SANTOS, A.R. (2014). Manual básico para a elaboração e para o uso da Cartografia Geotécnica. Rudder, São Paulo, SP, 109 p.
- SILVA, J.X. (2007). Geoprocessamento em estudos ambientais: uma perspectiva sistêmica. In: MEIRELLES, M.S.P., CÂMARA.G & ALMEIDA, C.M. (Ed). *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Brasília, DF, Embrapa Informação Tecnológica, p. 23-53.
- SILVA, W.F.; MOLLERI, G.S.F.; PINTO, M.B.P, ARAÚJO JUNIOR, G.J.L.D. (2013) Análise do modelo HAND para a indicação de áreas suscetíveis a eventos críticos de cheias. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*. São José dos Campos: Inpe. p. 7001-7008.

- SILVA JUNIOR, E.E.A. (2019). Geotecnologias e Planejamento Urbano: Proposta Metodológica e Avaliação de Dados Obtidos por Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) como Contribuição à Cartografia Geotécnica. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 155/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272p.
- SILVA NETO, J. C. A. (2013). Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. Geografia (Londrina), v.22, p.5-25.
- SOBREIRA, F.G. e SOUZA, L.A. (2012). Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, SP, v. 2, n. 1, p. 79-97.
- VALERIANO, M. M. (2008a). Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 75p.
- XAVIER, S., PORTELLA, A., BRESSANI, L.A. (2015). Cartografia Geotécnica e Planejamento Urbano. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Outubro 2015.
- ZUQUETTE, L.V. (1987). Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 219 p.
- ZUQUETTE, L.V., GANDOLFI, N. (2004). Cartografia geotécnica. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 190 p.