



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUSCEPTIBILIDADE A INUNDAÇÕES NO
DESENVOLVIMENTO URBANO ATRAVÉS DE MODELO BASEADO EM
CÉLULAS AUTÔMATAS PARA SIMULAÇÃO DE TENDÊNCIAS DO USO E
OCUPAÇÃO DO SOLO NA CIDADE DE ITAGUAÍ/RJ.

Diego Lemos Coutinho

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Civil, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Rio de Janeiro

Setembro de 2024

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES NO
DESENVOLVIMENTO URBANO ATRAVÉS DE MODELO BASEADO EM
CÉLULAS AUTÔMATAS PARA SIMULAÇÃO DE TENDÊNCIAS DO USO E
OCUPAÇÃO DO SOLO NA CIDADE DE ITAGUAÍ/RJ

Diego Lemos Coutinho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez.

Aprovada por: Prof. Marcelo Gomes Miguez.

Prof. Daniel Andrés Rodriguez.

Prof. Noêmia de Oliveira Figueiredo.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2024

Coutinho, Diego Lemos

Análise da influência da susceptibilidade a inundações no desenvolvimento urbano através de modelo baseado em células autômatas para simulação de tendências do uso e ocupação do solo na cidade de Itaguaí/RJ. / Diego Lemos Coutinho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XVII, 163 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Gomes Miguez.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 156-163

1. Drenagem urbana. 2. Planejamento urbano 3. Modelo da paisagem 4. Células Autômatas. I. Miguez, Marcelo Gomes. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder saúde, motivação e uma conjuntura favorável para o desenvolvimento do trabalho, bem como tantas outras bênçãos na vida.

Agradeço ao meu orientador, Miguez, pelos ensinamentos, direcionamentos e por confiar na minha capacidade. Ao Programa de Engenharia Civil (PEC), em especial aos integrantes do Laboratório de Hidráulica Computacional (LAC), que dividem tantas experiências e multiplicam tantos conhecimentos.

Agradeço também ao professor Felix Carriello pelas diretrizes iniciais que me abriram as portas para a aplicação do modelo, dividindo experiências valiosas para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço à Marinha pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional, em especial à DOCM que, com todas as dificuldades de pessoal, batalha pelas oportunidades de melhoria do conhecimento da tripulação.

Agradeço à minha família pelo apoio, pelo amor incondicionalmente dedicado e pela compreensão da minha ausência, por tantas e tantas vezes. Da mesma forma, aos amigos que, próximos ou distantes, se fizeram presentes, fisicamente ou espiritualmente, vibrando, torcendo, sofrendo e comemorando juntos, cada etapa. Obrigado pelos ouvidos, pelas palavras, incentivos e preocupações que, certamente, deixaram o meu caminho muito mais leve.

“Devemos aprender a projetar com a natureza, não contra ela”.

Ian McHarg

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES NO
DESENVOLVIMENTO URBANO ATRAVÉS DE MODELO BASEADO EM
CÉLULAS AUTÔMATAS PARA SIMULAÇÃO DE TENDÊNCIAS DO USO E
OCUPAÇÃO DO SOLO NA CIDADE DE ITAGUAÍ/RJ

Diego Lemos Coutinho

Setembro/2024

Orientador: Marcelo Gomes Miguez

Programa: Engenharia Civil

O crescimento urbano desordenado está entre as principais causas da vulnerabilidade a inundações. Este estudo aplicou um modelo de Autômatos Celulares (CA) para compreender a dinâmica da paisagem e analisar tendências da urbanização em Itaguaí/RJ e arredores, bem como os efeitos de medidas de controle de ocupação, com enfoque nos riscos de inundações. Na primeira fase, a análise das Matrizes de Transição revelou tendências de avanço da antropização entre 2000-2011 e 2011-2020. Na análise dos Pesos de Evidência, a baixa influência do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI) no processo de ocupação confirmou a hipótese de que os atrativos da urbanização (estradas, ferrovias, comércio, indústria, centralidades, terrenos planos e outros) se sobrepõem à segurança contra inundações, atuando de forma a atrair a ocupação em áreas de risco e repelindo-a em áreas seguras. Na segunda fase deste estudo, são realizadas simulações do modelo para avaliar os efeitos da implementação de medidas de controle de ocupação, indicando uma tendência de redução de 26471 células urbanas (23.8 km²) em áreas de risco, até 2050, sendo capazes de evitar a exposição de cerca de 9850 pessoas, promovendo uma redução de 35% da vulnerabilidade a inundações, e ainda comprovando que podem corrigir o efeito negativo relacionado à forte influência dos demais atrativos urbanos para áreas frágeis, em detrimento da segurança contra inundações, assim demonstrando ser fundamental que estejam previstas nos Planos Diretores para construir cidades mais resilientes.

Abstract of the Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FLOOD SUSCEPTIBILITY ON URBAN
DEVELOPMENT USING A CELLULAR AUTOMATA-BASED MODEL TO
SIMULATE LAND USE AND OCCUPATION TRENDS IN ITAGUAÍ/RJ

Diego Lemos Coutinho

September/2024

Advisor: Marcelo Gomes Miguez

Department: Civil Engineering

Uncontrolled urban growth is among the main causes of flood vulnerability. This study applied a Cellular Automata (CA) model to understand landscape dynamics and analyze urbanization trends in Itaguaí/RJ and surrounding areas, as well as the effects of land use control measures, focusing on flood risk. In the first phase, the analysis of Transition Matrices revealed trends in the expansion of anthropization between 2000-2011 and 2011-2020. In the analysis of Weights of Evidence, the low influence of the Physical Environment Flood Susceptibility Index (PEFSI) on the occupation process confirmed the hypothesis that the attractiveness of urbanization (roads, railways, commerce, industry, centralities, flat terrains, and others) outweighs flood safety, acting to attract occupation in risk areas and repelling it in safe areas. In the second phase of this study, model simulations were conducted to assess the effects of implementing land use control measures, indicating a trend of reducing 26,471 urban cells (23.8 km²) in risk areas by 2050, potentially avoiding the exposure of approximately 9,850 people, promoting a 35% reduction in flood vulnerability, and further proving that these measures can correct the negative effect related to the strong influence of other urban attractions on fragile areas, to the detriment of flood safety. This demonstrates the importance of incorporating such measures into Master Plans to build more resilient cities.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 4 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 5 |
| 1.2.1 | Geral | 5 |
| 1.2.2 | Específicos | 5 |
| 1.3 | METODOLOGIA GERAL | 6 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| 2.1 | O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO | 9 |
| 2.1.1 | A Problemática | 9 |
| 2.1.2 | Panorama Histórico | 12 |
| 2.1.3 | Vulnerabilidade da Região Metropolitana de Rio de Janeiro (RMRJ) e suas Tendências de Expansão | 17 |
| 2.2 | AS INUNDAÇÕES E A URBANIZAÇÃO | 21 |
| 2.2.1 | Definições de Enchentes, Inundações e Enxurradas | 22 |
| 2.2.2 | Estatísticas dos desastres relacionados a inundações | 23 |
| 2.2.3 | Impactos das Inundações | 32 |
| 2.2.4 | Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI) | 37 |
| 2.2.5 | Medidas de Controle de Inundações | 38 |
| 2.3 | MODELO DE URBANIZAÇÃO BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES 46 | |
| 2.3.1 | O Estado da Arte | 49 |
| 2.3.2 | Dinâmica do Modelo | 50 |
| 2.3.3 | Mecanismos do Modelo | 57 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 63 |
| 3.1 | METODOLOGIA | 63 |
| 3.1.1 | 1ª Etapa: Análise da dinâmica do desenvolvimento urbano | 64 |
| 3.1.2 | 2ª Etapa: Análise de cenários considerando a implementação de medidas de controle de ocupação urbana | 72 |

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2 | ÁREA DE ESTUDO | 73 |
| 3.2.1 | Localização..... | 73 |
| 3.2.2 | Histórico da expansão urbana de Itaguaí..... | 74 |
| 3.2.3 | Aspectos Biofísicos | 76 |
| 3.2.4 | Aspectos Econômicos | 84 |
| 3.2.5 | Aspectos Sociais..... | 88 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 90 |
| 4.1 | DADOS DE ENTRADA | 90 |
| 4.1.1 | Mapas da Paisagem | 90 |
| 4.1.2 | Variáveis estáticas | 93 |
| 4.2 | MATRIZES DE TRANSIÇÃO | 94 |
| 4.3 | PESOS DE EVIDÊNCIA E ANÁLISES DE INFLUÊNCIAS DAS VARIÁVEIS 101 | |
| 4.3.1 | Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI) | 103 |
| 4.3.2 | Altitude..... | 108 |
| 4.3.3 | Declividade..... | 111 |
| 4.3.4 | Distância de rodovias e vias locais..... | 113 |
| 4.3.5 | Distância de Ferrovias | 117 |
| 4.3.6 | Distância de Polos Industriais/Portuários e Comerciais..... | 120 |
| 4.3.7 | Distância de áreas urbanas (distance_to_6) | 123 |
| 4.3.8 | Análise integrada dos Pesos de Evidência das transições urbanas (→6).126 | |
| 4.4 | TESTES DE CORRELAÇÃO..... | 130 |
| 4.5 | CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO | 131 |
| 4.5.1 | Ajuste Inicial do modelo | 132 |
| 4.5.2 | Ajustes e testes de similaridade..... | 133 |
| 4.5.3 | Modelo calibrado..... | 137 |
| 4.6 | SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS E ANÁLISES DE TENDÊNCIAS | 139 |
| 4.6.1 | Classes de uso do solo | 142 |
| 4.6.2 | Classes de uso do solo conforme riscos de inundações | 143 |
| 4.6.3 | Células urbanas (Classe 6), conforme riscos de inundações | 149 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 152 |
| 5.1 | Conclusões..... | 152 |
| 5.2 | Recomendações | 154 |

Referências156

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – As Vantagens e Desvantagens da Baixa e Alta Densidade (ACIOLY e DAVIDSON, 1998)..... | 10 |
| Figura 2 – Desenvolvimento das cidades (Mundo Ocidental) (KAUFFMANN, 2003)..... | 13 |
| Figura 3 – Etapas da Urbanização no Brasil | 16 |
| Figura 4 – Indicadores de Urbanização e Renda (IUR-CEPERJ) para a RMRJ da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). (BRASIL, 2018) | 19 |
| Figura 5 – Evolução cronológica da Mancha de Ocupação do Território Metropolitano do Rio de Janeiro. Fonte: (BRASIL, 2018) | 20 |
| Figura 6 – Número de mortes por desastres no mundo (1900 a 2016). (EMDAT, 2017)..... | 24 |
| Figura 7 – Número de mortes no mundo agrupados por década e tipo de desastre (1900 a 2015). (EMDAT, 2017)..... | 24 |
| Figura 8 – Principais desastres naturais no Brasil entre 2000 e 2007. (SANTOS, 2007)..... | 26 |
| Figura 9 - Estimativa da densidade do kernel (kernel quadrático) para ocorrências de desastres naturais no Brasil. (EMDAT, 2019)..... | 26 |
| Figura 10 – Desastres relacionados a enchentes e chuvas intensas ocorridas em Petrópolis, no Rio de Janeiro em 1966 (a) e 1988 (b), considerados um dos mais trágicos da sua história. Fonte: Secretaria Nacional de Defesa Civil. (COPPETEC, 2014)..... | 28 |
| Figura 11 – Número anual de ocorrências de desastres naturais no estado do RJ entre 1991 e 2012. (COPPETEC, 2014)..... | 30 |
| Figura 12 – Número de ocorrências de desastres no Rio de Janeiro (2000 a 2012). Fonte: Plano Estadual de Recursos Hídricos – INEA (2014). (COPPETEC, 2014)..... | 30 |
| Figura 13 – Número médio mensal de ocorrências de desastres de inundações e deslizamentos no Rio de Janeiro (2000 a 2012). Fonte: Defesa Civil. (COPPETEC, 2014) | 31 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 14 – Esquema das alterações no balanço hídrico, decorrente da urbanização. Fonte: JHA et al., 2021 apud Miguez, M.C. (2016) (MIGUEZ, VERÓL e REZENDE, 2016)..... | 33 |
| Figura 15 – Variação dos hidrogramas para uma mesma chuva, em função das modificações ocorridas no uso do solo. Fonte: Butler e Davies, 2000 apud Miguez <i>et al</i> (2016) | 34 |
| Figura 16 – Interações biota-solo-água: 1 – Floresta Conservada; 2 – Floresta degradada; 3 – Gramíneas; e 4 – Solo Exposto. (SANTOS, 2007)..... | 35 |
| Figura 17 – Ocupação urbana de canal secundário. (SANTOS, 2007)..... | 36 |
| Figura 18 - Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações. Fonte: Produzido pelo autor..... | 38 |
| Figura 19 – Conceito Tradicional de Drenagem (BATTEMARCO, 2016)..... | 39 |
| Figura 20 – Persistência e Resiliência de uma paisagem. (SANTOS, 2007)..... | 42 |
| Figura 21 - Conceito de Drenagem Urbana Sustentável (BATTEMARCO, 2016) | 43 |
| Figura 22 – Exemplos de Medidas Estruturais Extensivas e Intensivas. (SANTOS, 2007)..... | 45 |
| Figura 23– Representação da paisagem no modelo baseado em autômatos celulares. (CAMARA e MEDEIROS, 1998)..... | 51 |
| Figura 24 – Esquema Ilustrativo da Teoria de Bayes e do método de pesos de evidências. (ALMEIDA, 2004) | 58 |
| Figura 25 – Fluxograma geral do estudo..... | 63 |
| Figura 26 – Esquema geral do teste de similaridade fuzzy, com função de decaimento exponencial. | 71 |
| Figura 27 - Imagem aérea da Área de Estudo. Fonte: Produzido pelo autor. | 74 |
| Figura 28 – Mapa de Altitude da Área de Estudo. Fonte: Produzido pelo autor. . | 77 |
| Figura 29 – Mapa de Declividade da Área de Estudo. Fonte: Produzido pelo autor. | 78 |
| Figura 30 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo (2020). | 80 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 31 - Bacia hidrográficas do Rio Guandu. | 81 |
| Figura 32 - Bacia hidrográficas do Rio da Guarda. Fonte: Produzido pelo autor. | 82 |
| Figura 33 - Bacia hidrográficas do Rio Trapiche. (FRAGA, 2018)..... | 83 |
| Figura 34 – Porto de Itaguaí (PREFEITURA DE ITAGUAÍ, 2018)..... | 85 |
| Figura 35 – Estação ferroviária de Coroa Grande (Década de 50). (PREFEITURA DE ITAGUAÍ, 2018)..... | 87 |
| Figura 36 – Polígono de Piranema (Extração de Areia). (COPPETEC, 2014)..... | 87 |
| Figura 37 – Índice de Vulnerabilidade Social de Itaguaí. (MARGUTI, COSTA e FAVARÃO, 2017). | 89 |
| Figura 38 – 1ª Etapa do estudo (fluxograma geral)..... | 90 |
| Figura 39 – Mapas de uso e ocupação do solo observados para os anos 2000, 2011 e 2020. | 91 |
| Figura 40 – Tendência geral da paisagem entre os períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020)..... | 98 |
| Figura 41 – 2ª Etapa do estudo (fluxograma geral)..... | 132 |
| Figura 42 – Mapa de paisagem observado e simulado (ajuste inicial) para o ano de 2020..... | 133 |
| Figura 43 – Mapas de paisagem observado e simulado, obtido com o modelo calibrado, para o ano de 2020..... | 138 |
| Figura 44 – Mapas de índices de similaridade fuzzy mínima e máxima, respectivamente, com função de decaimento exponencial para janela de 5x5..... | 139 |
| Figura 45 – Mapa da paisagem com indicação das áreas com restrição de ocupação (ISMFI > 60), utilizadas para as simulações do Cenário 2..... | 140 |
| Figura 46 – Mapas de uso do solo simulados para o ano de 2030, 2040 e 2050, respectivamente, nos Cenários 1 (esquerda) e 2 (direita)..... | 142 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Evolução da população urbana (período 1955 a 2015). (TUCCI e BERTONI, 2003) | 15 |
| Tabela 2 – População dos municípios do Rio de Janeiro levantados nos censos demográficos do IBGE dos anos de 2000 e 2010. (BRASIL, 2018)..... | 20 |
| Tabela 3 – Ranking dos 5 desastres mais letais do mundo, nos anos de 2017 a 2020, respectivamente. (GEO RISKS RESEARCH, 2021) | 25 |
| Tabela 4 – População, taxa de crescimento e taxa de ocupação urbana e rural, segundo a região Sudeste e suas Unidades da Federação (2000 e 2010). Fonte: IBGE (2010) | 27 |
| Tabela 5 – Desastres naturais importantes no Rio de Janeiro, ocorridos entre 1711 e 1999, segundo registros do Corpo de Bombeiros. (COPPETEC, 2014) | 28 |
| Tabela 6 – Matrizes de Transição de passos único, dos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020)..... | 94 |
| Tabela 7 - Matrizes de Transição de passo múltiplo, dos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020)..... | 95 |
| Tabela 8 – Probabilidades totais de ocorrência da transição na área de estudo dos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020)..... | 96 |
| Tabela 9 – Percentuais de redução, crescimento e transição total das classes, nos períodos 1 e 2..... | 97 |
| Tabela 10 – Tendência geral dos coeficientes médios aproximados dos Pesos de Evidência das transições urbanas (3→6, 4→6 e 5→6), conforme as faixas de tendências das variáveis explicativas. | 127 |
| Tabela 11 – Parâmetros do ajuste final das métricas da paisagem. | 135 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 1 – Percentual das classes de uso e ocupação do solo nos Mapas da Paisagem nos anos 2000, 2011 e 2020. | 92 |
| Gráfico 2 – Percentual de transições para urbano ($\rightarrow 6$). | 101 |
| Gráfico 3 – Pesos de Evidência da variável estática ISMFI, originais (esquerda) e suavizados (direita), para as transições: (a) $3 \rightarrow 6$; (b) $4 \rightarrow 6$; e (c) $5 \rightarrow 6$ | 104 |
| Gráfico 4 – Pesos de Evidência suavizados (buffer” = 8) da variável estática “ISMFI”, para as transições: $3 \rightarrow 6$; $4 \rightarrow 6$; e $5 \rightarrow 6$ | 105 |
| Gráfico 5 – Quantidades e Percentuais de transições para urbano ($\rightarrow 6$), conforme as faixas de tendências analisadas, no período 2 (2011 a 2020). | 106 |
| Gráfico 6 - Números de ocorrências e percentuais das transições $3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 6$ e $5 \rightarrow 6$, conforme faixas de ISMFI, no período 2 (2011 a 2020). | 106 |
| Gráfico 7 – Pesos de Evidência da variável estática “Altitude” para as transições: (a) $3 \rightarrow 6$; (b) $4 \rightarrow 6$; e (c) $5 \rightarrow 6$ | 109 |
| Gráfico 8 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de Altitude. | 110 |
| Gráfico 9 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de altitudes e tipo de transição. | 111 |
| Gráfico 10 – Pesos de Evidência da variável estática “Declividade” para as transições: (a) $3 \rightarrow 6$; (b) $4 \rightarrow 6$; e (c) $5 \rightarrow 6$ | 112 |
| Gráfico 11 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de declividade. | 113 |
| Gráfico 12 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de altitudes e tipo de transição. | 113 |
| Gráfico 13 – Pesos de Evidência das variáveis estáticas “Distância de Rodovias” e “Distância de Vias locais” para as transições: (a) $3 \rightarrow 6$; (b) $4 \rightarrow 6$; e (c) $5 \rightarrow 6$ | 114 |
| Gráfico 14 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de Rodovias” e “Distância de Vias Locais”. | 116 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 15 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de “Distância de Rodovias” e “Distância de Vias Locais” e tipo de transição. . | 117 |
| Gráfico 16– Pesos de Evidência das variáveis estáticas “Distância de ferrovias” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6. | 118 |
| Gráfico 17 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de Ferrovias”. | 119 |
| Gráfico 18 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de “Distância de Ferrovias” e tipo de transição. | 119 |
| Gráfico 19 – Pesos de Evidência das variáveis estáticas “Distância dos Polos Industriais/Portuários” e “Distância de Polos Comerciais” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6. | 121 |
| Gráfico 20 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de Polos Industriais/Portuários” e “Distância de Polos Comerciais”. | 122 |
| Gráfico 21 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme tipo de transição e faixas de “Distância de Polos Industriais/Portuários” e “Distância de Polos Comerciais”. | 123 |
| Gráfico 22 – Pesos de Evidência da variável dinâmica “Distância de áreas urbanas (distance_to_6)” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6. | 124 |
| Gráfico 23 - Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de áreas urbanas”. | 124 |
| Gráfico 24 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme tipo de transição e faixas de “Distância de áreas urbanas” | 125 |
| Gráfico 25 – Distribuição da variável ISMFI nas “faixas de tendência” das variáveis biofísicas (Altitude e Declividade). | 129 |
| Gráfico 26 - Distribuição da variável ISMFI nas “faixas de tendências” das variáveis relacionadas às facilidades urbanas. | 130 |
| Gráfico 27 – Índices de similaridade máxima e mínima do modelo calibrado... | 136 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 28 – Percentuais totais das classes dos mapas simulados nos Cenários 1 e 2, respectivamente. | 143 |
| Gráfico 29 – Percentuais das classes de uso do solo observados (2000, 2011 e 2020) e simulados (2030, 2040 e 2050), nos Cenários 1 e 2, conforme regiões de suscetibilidade. | 145 |
| Gráfico 30 – Alteração (acréscimos e reduções) das áreas das classes 2 e 6, simuladas para o ano de 2050, do Cenário 1 para o Cenário 2. | 146 |
| Gráfico 31 – Quantidade de células urbanas (classe 6), conforme ISMFI..... | 149 |
| Gráfico 32 – Percentual de células urbanas (classe 6), conforme ISMFI. | 150 |

1 INTRODUÇÃO

Desde o surgimento da Cidade Industrial Moderna, até os dias atuais, a população mundial urbana teve uma trajetória acelerada de crescimento, principalmente nas cidades de países em desenvolvimento como o Brasil, que experimentou uma explosão urbana em função do seu processo de industrialização tardia a partir da segunda metade do século XX. Com o crescimento urbano desordenado e as transformações antrópicas no ambiente, as enchentes tornaram-se um dos maiores problemas urbanos enfrentados pela humanidade, que tem como consequências não somente as perdas humanas e materiais, mas também a estagnação econômica, redução da receita dos impostos, aumento do custo de vida e inúmeras outras. “Após muitas décadas de esforço, foram poucos os avanços alcançados na redução da vulnerabilidade da sociedade brasileira aos desastres, mesmo àqueles de natureza cíclica, ou seja, que têm previsão de ocorrências, como as enchentes” (INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, 2011-2012).

Segundo Miguez et al (2014), as enchentes causam uma série de perdas sociais e econômicas, além de impactos em diversos aspectos da vida da cidade, desde riscos à saúde, perturbação da infraestrutura urbana e prejuízos econômicos públicos e privados. De forma resumida, o que acontece é que a expansão e/ou densificação urbana descontrolada sobrecarrega(m) o espaço, ocupa(m) áreas impróprias e ainda altera(m) significativamente o uso e ocupação do solo, diminuindo a sua permeabilidade, aumentando as velocidades de escoamento e as vazões das cheias dos rios, elevando seus níveis de enchente a patamares muito acima do fenômeno natural. Aliado a isso, a grande maioria das cidades possui infraestrutura de drenagem insuficiente, com canais, galerias e bocas de lobo incapazes de conduzir os volumes de chuva, que se tornam cada vez maiores em um efeito “bola de neve”. Adicionalmente, as soluções tradicionais de buscar descarregar rapidamente as vazões demandadas intensifica o processo de falha. Ainda se observa o aumento visível da degradação ambiental e da poluição urbana, com destaque especial para a perda de vegetação, a erosão e o lançamento de resíduos e sedimentos nos corpos hídricos.

Em um sentido mais amplo, o maior desafio da gestão pública atual é a diminuição da defasagem entre o crescimento urbano e a necessidade de implementação de

infraestrutura que dê suporte adequado a este crescimento, incluindo as necessidades básicas das populações urbanas, principalmente às relacionadas à renda, segurança, mobilidade, saúde, educação e infraestrutura urbana, com destaque para aquelas que envolvem os sistemas e serviços de saneamento, incluindo o abastecimento de água, o esgotamento sanitário, a coleta de resíduos sólidos e a drenagem urbana.

No Brasil, de modo geral, o processo de expansão das cidades, associado à baixa eficiência do poder público no controle urbano, leva a um quadro de ocupação irregular que expõe grande parte da população, principalmente a de baixa renda, a uma situação de vulnerabilidade a inundações. Neste contexto, esses fatores se retroalimentam em um processo de “favelização” e formação das periferias, na maioria das vezes, através de processos informais de ocupação de terras e autoconstrução de moradias, agravando vertiginosamente os problemas urbanos.

Em diversas cidades Brasileiras, em especial na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), a situação ainda se agrava em função da especulação imobiliária, que impõe o “não acesso” à terra por parte da população, estimulando a ocupação indevida, muitas vezes em áreas inadequadas para moradias, como as regiões naturalmente suscetíveis a alagamentos.

O quadro crescente de exposição das populações a inundações, gera questionamentos sobre os fatores forçantes (“drivers”) que, de fato, influenciam o processo de ocupação urbana, levantando a hipótese de que os atrativos para a urbanização (rodovias, ferrovias, terrenos planos, comércio, indústrias, centralidades e outros) se sobrepõem à segurança contra inundações.

Durante muitas décadas, as medidas de controle de inundações relacionadas com a abordagem tradicional, foram voltadas apenas para soluções estruturais, destinadas prioritariamente ao condicionamento do escoamento superficial, incluindo o redimensionamento de canais e galerias, o controle de extravasamentos por diques, ou mesmo retardo de cheias com reservatórios artificiais, entre outros. Entretanto, as experiências mundiais mostraram que as soluções tradicionais, aplicadas isoladamente, tendencialmente não são sustentáveis, uma vez que não são capazes de acompanhar o crescimento da demanda, fruto da urbanização acelerada e da modificação do uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas, evidenciando que tais soluções são incapazes de conduzir os volumes das cheias, cada vez maiores. Ao longo das últimas décadas,

apesar dos seus passos ainda muito lentos, a tendência das medidas de controle de inundações aponta para um enfoque mais amplo, buscando soluções sistêmicas para a bacia, integrando o homem e o meio ambiente, com o objetivo maior de permitir uma convivência harmônica da população com os cursos d'água, procurando resgatar padrões de escoamento próximos daqueles anteriores à urbanização. Neste sentido, destaca-se a importância de medidas de controle que tornem as cidades mais resistentes e resilientes a inundações, de forma que seu funcionamento seja menos afetado pela passagem das cheias, no sentido de que tenham a capacidade de reestabelecer suas funções, o mais rápido possível, com o mínimo de transtornos. Desta forma, a tendência das ações de controle de inundações mais modernas inclui a ação conjunta de medidas estruturais, como a construção de estruturas hidráulicas de drenagem pluvial, mas também as medidas não estruturais, que incluam o planejamento e controle de uso e ocupação do solo, integrados aos Planos Diretores Urbanos (PDU), e que direcionem uma expansão urbana mais sustentável. A prevenção do risco, evitando que o processo de urbanização exponha a população ao perigo das inundações, de forma geral, vem sendo considerada a ação mais simples, econômica e efetiva no processo de gestão do risco de inundações.

Neste contexto, os PDU ganharam grande importância para a gestão pública nas últimas décadas, pois se tratam do “principal instrumento que um município dispõe para organizar o seu território, as suas atividades e usos da terra, e é também o meio para se atingir a desejada qualidade de vida para as populações” (SANTOS, 2007). Para isso, considera-se que os PDU devem ser elaborados com base em projeções de tendências futuras do desenvolvimento urbano, associados a Planos de Manejo que contenham medidas possíveis efetivas de controle do uso e ocupação do solo, com destaque para aquelas relacionadas ao controle de ocupação urbana em áreas susceptíveis a inundações.

Tendo em vista que o processo de urbanização é de difícil previsão, devido à elevada quantidade de fatores forçantes interrelacionados, e em diferentes escalas, os modelos de simulação da paisagem se destacam por gerar informações muito úteis para a compreensão da dinâmica da paisagem e pela capacidade de reproduzir artificialmente as principais tendências, possibilitando inúmeras análises do processo.

No contexto atual, com a evolução da tecnologia computacional e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), os modelos de simulação da paisagem aplicados à

projeção de mapas de uso e ocupação do solo mostram-se como ferramenta de grande utilidade para o planejamento de cenários urbanos. Deve-se também destacar a “importância de considerar modelos de processos dinâmicos que possibilitem a inclusão, tanto de fatores urbanos quanto de fatores do ambiente natural, o que pode ser obtido através de modelos baseados em Autômatos Celulares – CA” (PERES e POLIDORI, 2009). Tais modelos “podem ser entendidos como um dispositivo heurístico útil para avaliar, em curto e longo prazo, os resultados de uma variedade de cenários, traduzidos como diferentes conjunturas socioeconômicas, políticas e ambientais” (SOARES-FILHO, RODRIGUES e COSTA, 2009).

O presente estudo, através da aplicação de modelo baseado em CA, como ferramenta para a simulação das tendências do uso e ocupação do solo da cidade de Itaguaí/RJ, apresenta metodologia para análise da influência da ocorrência de inundações na ocupação urbana, através do uso do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI), elaborado por Miranda (2016), como referência aproximada para o perigo de inundações, em comparação com as demais variáveis relacionadas aos atrativos para a urbanização. Se confirmada a hipótese estipulada anteriormente, que fatores atrativos para a urbanização, como terreno planos, acesso a transportes e proximidade de centralidades e outros, se sobrepõem ao risco de inundações, torna-se necessário estabelecer controles de ocupação que evitem a ocupação de áreas frágeis e susceptíveis a inundações. Nessa situação, o modelo CA também será utilizado para simular tendências em cenários que permitam avaliação dos efeitos da implementação de medidas de manejo do uso do solo, incluindo ações de controle e ordenação de ocupação.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento urbano nas cidades brasileiras tem ocorrido, em sua grande maioria, de forma desordenada e sem a aplicação efetiva de medidas de controle urbano. O presente trabalho encontra justificativa na necessidade de analisar a dinâmica da paisagem e a influência dos riscos de inundações no processo de ocupação urbana, bem como prover ferramentas para o seu planejamento e controle, através da aplicação de modelo CA, utilizando o Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI) como referência para avaliação do crescimento urbano sobre áreas propensas à inundação. Como resultado, buscou-se propor metodologia que subsidie tomadas de decisões de

gestores, com ênfase no reconhecimento da necessidade de atuar na minimização da vulnerabilidade a inundações.

Adicionalmente, o município de Itaguaí e redondezas, tomados como caso de estudo para exploração da metodologia proposta, faz parte de uma região do estado do Rio de Janeiro, que se destaca pelo seu grande potencial de crescimento, onde é esperado um adensamento urbano considerável para as próximas décadas, e pelas suas características físicas e climáticas naturais favoráveis à configuração de áreas com alta suscetibilidade a inundações. Neste contexto, considera-se fundamental a compreensão da dinâmica urbana da região e a implementação de medidas de planejamento urbano integradas a Planos de Manejo, com medidas de controle de uso e ocupação do solo nas regiões com maiores riscos de inundações, além da necessidade de se prever uma infraestrutura necessária para garantir um crescimento urbano sustentável.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo principal da pesquisa é a proposição de metodologia para análise da influência da susceptibilidade a inundações no desenvolvimento urbano, utilizando um modelo CA, como ferramenta para simulação do uso do solo, considerando fatores biofísicos e de infraestrutura urbana, em mesoescala, em diferentes cenários, avaliando primeiramente os resultados espontâneos, mapeados com a observação do desenvolvimento passado, e os resultados futuros, modificados pela adoção de possíveis restrições formais ao desenvolvimento urbano.

As tendências de crescimento urbano da cidade de Itaguaí/RJ e redondezas, em diferentes cenários, serão avaliadas considerando a implementação de medidas de controle de uso e ocupação do solo, propostas de modo a evitar a ocupação urbana em áreas com fragilidade natural, devido à sua maior susceptibilidade à inundações.

1.2.2 Específicos

Mais especificamente, os objetivos da pesquisa são:

- Análise das tendências do uso e ocupação do solo por meio de aplicação de modelo baseado em autômatos celulares, implementado na plataforma DINAMICA EGO, com foco no processo de urbanização na cidade de Itaguaí/RJ e redondezas;
- Análise da influência da susceptibilidade a inundações na dinâmica do desenvolvimento urbano, por meio das análises dos pesos de evidência, associados ao uso do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI), como referência de comparação, e da distribuição espacial das tendências; e
- Estudo dos efeitos na dinâmica da paisagem em função da implementação de medidas de manejo do uso do solo, considerando ações de controle urbano com restrição de ocupação das áreas de maior suscetibilidade a inundações, obtidos por meio de simulações de cenários nos anos 2030, 2040, e 2050.

1.3 METODOLOGIA GERAL

De modo geral, a metodologia para o desenvolvimento do trabalho consiste em duas etapas principais, articuladas e complementares:

i. Análise da dinâmica do desenvolvimento urbano.

A etapa inicial consiste na implementação de modelo da paisagem, baseado em autômatos celulares, por meio da plataforma “Dinamica EGO”, para estudo das tendências do uso e ocupação do solo e análise da dinâmica do desenvolvimento urbano, associados ao conhecimento dos riscos de inundações do território, dado pela aplicação do Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI). Essa análise busca avaliar se a segurança contra inundações é significativa nos movimentos esperados de modificação do uso do solo e se é capaz de evitar a ocupação de áreas frágeis.

Para a aplicação do modelo, foram utilizados, como dados de entrada, os mapas de uso e ocupação do solo, observados nos anos 2000, 2011 e 2020, juntamente com mapas das variáveis explicativas (estáticas e dinâmicas), elencadas como as principais forçantes do processo de urbanização, com o objetivo de representar as tendências gerais da dinâmica da paisagem, com o enfoque pretendido. As variáveis estáticas utilizadas no modelo foram: Declividade; Altitude; Distância das Rodovias; Distância das Vias Locais; Distância das Ferrovias; Distância dos Polos Comerciais; Distância dos Polos Industriais/Portuários; e o Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI). As variáveis dinâmicas utilizadas no modelo correspondem aos mapas de

distância de cada classe de uso do solo e que são automaticamente atualizadas pelo modelo a cada passo de tempo.

Através de análise dos Pesos de Evidência, ou “Weights of Evidence” (WofE), gerados pelo modelo, também foi possível avaliar a influência de cada variável forçante, sobre cada transição do processo de urbanização, observado nos períodos 1 e 2. Desta forma, através dos gráficos dos Pesos de Evidência (WofE) do ISMFI, foi possível quantificar e analisar a influência da susceptibilidade a inundações na dinâmica do desenvolvimento urbano – essa avaliação deve indicar se esta variável exerce, realmente, o papel de forçante efetiva na ocupação do território, atraindo a não ocupação das áreas de maior risco de inundação. Duas situações são possíveis: 1) a susceptibilidade física é reconhecida e capaz de induzir a não ocupação de áreas frágeis; ou 2) a susceptibilidade física não é capaz de auxiliar espontaneamente no ordenamento adequado do território, sendo sobrepujada pela importância das demais forçantes e, portanto, criando condições para prejuízos futuros, advindos de vastas áreas urbanas expostas à inundação.

Neste contexto, utilizou-se o modelo CA, associado ao ISMFI, para realizar a análise da distribuição espacial das tendências nas regiões de susceptibilidade, classificadas como: “Muito Baixa a Baixa” ($ISMFI \leq 40$); “Média” ($40 > ISMFI \leq 60$); e “Alta a Muito Alta” ($ISMFI > 60$). A distribuição das tendências de urbanização em cada faixa de risco potencial será feita por meio das estatísticas dos mapas observados e simulados, contabilizando as células conforme os tipos de uso e ocupação do solo e suas respectivas localizações entre as regiões de susceptibilidade.

ii. Análise de cenários considerando a implementação de medidas de controle de ocupação urbana.

A simulação de cenários consiste na utilização do modelo da paisagem para a análise de possíveis tendências futuras do desenvolvimento urbano, em resposta à implementação de medidas de manejo do uso do solo com controle de ocupação nas áreas de susceptibilidade a inundações Alta e Muito Alta, definidas pelos valores de $ISMFI > 60$. Reproduzindo a dinâmica da paisagem observada pelo modelo no período 2, mais recente, foram realizadas simulações de tendências do uso e ocupação do solo, em cenários a médio e longo prazo (2030, 2040 e 2050). Ressalta-se que esta aplicação não possui o objetivo de realizar previsões exatas para o futuro, mas sim utilizá-lo como

ferramenta de planejamento urbano, avaliando e interpretando possibilidades em projeções de cenários.

Para isso, foram definidos dois cenários: **Cenário 1) Sem controle de ocupação**; e **Cenário 2) Com controle de ocupação**, ambos considerando como premissa uma suposta continuidade dos fatores biofísicos e de infraestrutura urbana, do período 2 (2011 a 2020), bem como as tendências da dinâmica da paisagem, captada e reproduzida pelo modelo.

Mais especificamente, os cenários foram definidos com objetivo de avaliar os efeitos de medidas de manejo do uso do solo na dinâmica da paisagem, com implementação de ações de controle que restrinjam a ocupação das áreas de maior fragilidade a inundações, servindo como ferramenta de planejamento urbano e, eventualmente, corrigindo a falha relacionada à não efetividade da susceptibilidade a inundações como forçante da ocupação do território, caso esse seja o resultado da avaliação decorrente do primeiro passo da metodologia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO

2.1.1 A Problemática

Segundo Miguez et al (2016), “A urbanização representa o processo de crescimento das cidades, o qual implica a modificação das características naturais ou rurais, transformando-as em urbanas.” (MIGUEZ, VERÓL e REZENDE, 2016)

De modo geral, os processos de crescimento das cidades são influenciados por inúmeros fatores ambientais, econômicos, sociais e culturais, que impulsionam o processo de urbanização e que, em grande parte, estão associados a ocupações irregulares e ações não efetivas de planejamento e controle.

Desde o surgimento da Cidade Industrial Moderna até os dias atuais, diversas iniciativas, novas tecnologias, políticas públicas, obras de infraestrutura e legislações têm procurado, ainda que muitas vezes “a posteriori”, minimizar os efeitos nocivos resultantes do processo de urbanização acelerado verificado em inúmeras cidades do mundo, inclusive no Brasil. (KAUFFMANN, 2003)

O aumento da ocupação urbana no uso do solo e o adensamento populacional podem ter inúmeras consequências para a cidade que, na grande maioria das vezes, se desenvolvem sem medidas de planejamento e controle urbano eficientes.

Juntamente com o crescimento urbano, aumentam também as necessidades básicas da população, principalmente as relacionadas à infraestrutura urbana de saneamento, incluindo abastecimento de água, esgotamento sanitário, coleta, tratamento e destinação de resíduos sólidos e drenagem urbana. Aliadas a isso, destacam-se as inúmeras consequências desse processo relacionadas às questões ambientais, econômicas, sociais e políticas.

A Figura 1, apresenta um quadro ilustrativo e comparativo entre vantagens e desvantagens associadas às ocupações urbanas, com maiores ou menores densidades populacionais. Neste contexto, destacam-se inúmeros problemas provenientes do aumento da densidade urbana, incluindo a criminalidade, poluição, piora da mobilidade

urbana, saturação do espaço, sobrecarga nas infraestruturas, maiores riscos de degradação ambiental, dentre outros.



Figura 1 – As Vantagens e Desvantagens da Baixa e Alta Densidade (ACIOLY e DAVIDSON, 1998)

Atualmente sabe-se que o adensamento urbano desordenado constitui um dos principais fatores que compromete a qualidade de vida nas áreas urbanas. Além disso, a impermeabilização dos solos nas bacias hidrográficas emerge como um elemento crítico que contribui significativamente para a intensificação das cheias e inundações. Tais condições expõem uma grande parcela da população urbana a situações de vulnerabilidade a desastres relacionados a enchentes, incluindo inundações, enxurradas, deslizamentos e erosão, gerando consideráveis prejuízos humanos, ambientais e financeiros em todo o mundo.

A vulnerabilidade é a condição intrínseca de uma área que determina a sua capacidade de responder a perturbações, levando em consideração suas características naturais e antrópicas. Ela se refere ao potencial de uma fração do território sofrer impactos adversos em decorrência de eventos externos, influenciada pelo tipo e pela magnitude dessas perturbações.

Neste contexto, a ocupação do solo urbano sem planejamento tem como consequência, dentre outros impactos ambientais negativos: i) a sobrecarga no sistema de drenagem urbana por meio do aumento da impermeabilização do solo e da diminuição da infiltração; ii) a perda da cobertura vegetal por pavimentos impermeáveis, diminuindo a infiltração da água no solo e aumentando a sua quantidade e a sua velocidade de escoamento; iii) a escassez e a diminuição da qualidade dos recursos hídricos; iv) o

acúmulo de resíduos sólidos nos elementos do sistema de drenagem (canais, bueiros, bocas de lobo, etc.), obstruindo-os e, com isso, ocasionando seus transbordamentos em períodos de chuva; e v) o aumento da densidade urbana em determinadas zonas, principalmente as consideradas de baixo valor especulativo imobiliário da cidade. (SANTOS, RUFINO e FILHO., 2017)

A vulnerabilidade aos desastres de enchentes urbanas é uma consequência comum à maioria das cidades no mundo inteiro e, de forma cíclica, está principalmente relacionada a fatores ambientais, econômicos, sociais, culturais e políticos. De modo geral, a expansão e densificação urbana sem controle sobrecarregam o espaço, ocupam áreas impróprias suscetíveis a alagamento e ainda alteram significativamente o uso do solo. Na maioria das cidades brasileiras, as medidas de controle urbano não são eficientes e o atendimento às necessidades básicas não acompanha a velocidade da urbanização, sendo inevitável a sobrecarga da infraestrutura de drenagem existente, tornando os canais, galerias e outros incapazes de conduzir os volumes de chuva. Por fim, associado a tudo isso, agravam-se a degradação ambiental e a poluição urbana, além de gerar enormes prejuízos para a população e para a gestão pública.

Entre os principais impulsores do processo de aumento da vulnerabilidade a inundações, destaca-se a ocupação de áreas impróprias, sujeitas a inundações naturais, e muitas vezes classificadas como Áreas de Proteção.

De acordo com o inciso II, do art. 3.o da Lei no 12.651/2012, Área de Preservação Permanente (APP) é uma área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. De acordo a legislação ambiental, por tratar-se de regiões, geralmente suscetíveis a inundações e deslizamentos, devido às suas próprias características naturais, é importante que tal área seja protegida.

As áreas naturalmente mais suscetíveis a processos de inundações e escorregamentos, estão protegidas legalmente, inclusive em áreas urbanas onde é fundamental a atenção à ocupação em áreas de várzeas também chamadas de planícies de inundação. Para garantir a sua função ambiental a legislação ambiental prevê a existência

das Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo de rios, lagos e lagoas, em encostas íngremes e topos de morro, evitando a ocupação indevida e a formação de áreas de risco.

Diante do exposto, pode-se afirmar que o maior desafio da gestão pública atual é a diminuição da defasagem entre o crescimento urbano e a necessidade de implementação de infraestrutura que dê suporte adequado a este crescimento. De acordo com Farr (2013), a necessidade de transitar para o urbanismo sustentável torna-se urgente, à medida que a população global se move cada vez mais para as cidades e os impactos das mudanças climáticas se intensificam, e propõe estratégias de urbanismo sustentável que integram soluções para energia, transporte e uso do solo, garantindo que o crescimento urbano ocorra de maneira harmoniosa com o meio ambiente.

Segundo McHarg (1969), as cidades devem ser projetadas em complemento ao ambiente natural, levando em consideração os contornos, os rios e ecossistemas, primeiramente entendendo a terra e suas capacidades, e depois alocando as atividades humanas de acordo com suas características naturais.

Neste contexto, torna-se evidente a importância de Planos Diretores Urbanos bem elaborados e baseados em planejamentos a longo prazo bem definidos, com medidas de controle de uso e ocupação do solo possíveis e efetivas. Tais medidas consistem em diversas ações, incluindo a (re)definição e/ou implementação de parâmetros urbanísticos de zoneamento, condizentes com as características naturais da região, controle das taxas de ocupação e permeabilidade do solo, proteção de APP, entre outras.

2.1.2 Panorama Histórico

2.1.2.1 *As primeiras cidades no mundo*

Historicamente, o processo de surgimento e expansão das cidades, com a transformação das populações rurais em populações urbanas, ao longo dos anos, sempre resultou na criação de cidades com grande carência em termos de infraestrutura, planejamento e gestão, principalmente na área de saneamento e nas regiões de menor poder financeiro. Neste contexto, torna-se claro que o processo de urbanização sempre estimulou o aumento das diferenças sociais e a má distribuição dos recursos públicos, agravando-se cada vez mais os problemas urbanos. Em outras proporções e consequências atuais, este processo histórico ainda é continuamente observado na atualidade e apresenta perspectivas reais de agravamento futuro.

A Figura 2, apresenta um quadro de contextualização temporal do processo de desenvolvimento das cidades no mundo ocidental, desde a pré-história até a atualidade, com ênfase às questões de saneamento e infraestrutura urbana. Observa-se que desde a antiguidade, as cidades já se posicionavam próximas a mananciais, com objetivo de obter água para seu sustento, e/ou próximas a colinas, aproveitando a posição topográfica das áreas livres de inundações.

A partir do século X, as cidades medievais foram construídas baseadas em um sistema agrícola, localizadas próximas aos cursos hídricos importantes, em posições geográficas favoráveis e dotadas de núcleos urbanos protegidos por muralhas que cercavam toda a área urbana destinada à nobreza. Com o desenvolvimento do comércio, houve o surgimento de uma nova classe social, a burguesia, que ocupando os núcleos urbanos, deram origem aos chamados “subúrbios”. Gradualmente, os problemas urbanos também se acentuaram, principalmente em relação à defasagem do sistema de saneamento, dos maus hábitos de higiene e das epidemias que marcaram este período.

| ÉPOCA | CARACTERÍSTICAS |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PRÉ-HISTÓRIA (anterior a 3500 a.C.) | Surgimento das primeiras cidades por volta de 5000 a.C. |
| ANTIGUIDADE (3500 a.C. a 476 d.C.) | Localização de cidades próximas a mananciais hídricos e/ou em colinas. |
| Grécia até IV a.C. | Cidades abrangiam parte alta (centro religioso) e parte baixa (vida pública). Vias estreitas e traçado adaptado ao ambiente natural. Já apresentavam sistemas de drenagem de águas pluviais, de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. |
| Grécia (Helenismo) de IV a.C. até e I a.C. | Introduzida rigorosa simetria nos traçados urbanos e a especialização de bairros por funções |
| Império Romano a partir de I a.C.até 476 d.C. | Refinamento técnico aliado ao caráter prático nas feições urbanas. |
| IDADE MÉDIA (476 d.C. a 1453 d.C.) | Localização de cidades ainda próximas a recursos hídricos, aproveitando a geografia local para defesa e localização de lotes. Cercadas por muralhas. Ruas servindo aos deslocamentos a pé ou em carroças. Sistema sanitário deficiente. A partir do século XIII ampliam-se os sistemas de saneamento e valoriza-se a limpeza, segurança, regularidade e beleza. |
| IDADE MODERNA (1453 d.C.; a 1789 d.C.) | Crescimentos das cidades em população e construções e ampliação dos limites. Sistemas de saneamento em defasagem ao crescimento urbano. |
| Renascimento (séculos XV e XVI) | Ausência de hábitos de higiene, epidemias. Primeiras evidências de segregação espacial. Ampliação dos traçados das ruas por eixos monumentais para os novos veículos rodoviários - coches. Traçados de ruas simétricos, construções de praças e jardins. |
| Barroco (séculos XVII e XVIII) | Acentuam-se os traçados regulares e simétricos, as linhas retas e as perspectivas monumentais. Maior expansão das cidades. Novas soluções técnicas para o saneamento inclusive em substituição aos sistemas medievais. |
| IDADE CONTEMPORÂNEA (a partir de 1789 d.C.) | Início do processo moderno de urbanização. Cidades industriais (Revolução Industrial século XVIII). Transferências de grandes contingentes do campo para as cidades. Avolumam-se os problemas urbanos inclusive de saneamento. Alargamento de ruas, evolução da engenharia sanitária. Acentuam-se desigualdades sociais e urbanas. Surge a necessidade de Planos para intervenção do Estado nas cidades. Surgimento do Urbanismo. |

Figura 2 – Desenvolvimento das cidades (Mundo Ocidental) (KAUFFMANN, 2003)

A partir do século XV, no surgimento das cidades renascentistas, o sistema feudal foi então sendo substituído pelos Estados Modernos, caracterizados por uma reorganização urbana e reestruturação viária, dotada de eixos monumentais para comportar o crescimento populacional da nova classe social consolidada, a burguesia. Esta classe passou a ocupar as avenidas importantes que foram ampliadas e planejadas,

dotadas de praças e jardins. E assim, iniciou-se um aumento da preocupação com a infraestrutura urbana, principalmente das condições de saneamento básico.

A intensa efervescência científica e cultural desse período, juntamente com a expansão marítima do Ocidente e a descoberta de novas terras e civilizações, incluindo o Brasil, resultou em uma ampliação significativa das áreas urbanas. Esse crescimento acentuou a demanda por soluções mais complexas para mitigar os impactos decorrentes das atividades urbanas, especialmente no que se refere ao abastecimento de água e à gestão de esgoto e resíduos sólidos.

Ao final do século XVIII, com a Revolução Industrial, observou-se um crescimento demográfico bastante acelerado e, conseqüentemente, um avanço significativo da migração da população rural para urbana. Neste processo, iniciou-se um movimento acelerado do adensamento e expansão dos bairros operários, agravando significativamente os problemas urbanos, com destaque os relacionados ao saneamento. Neste período, as cidades se viram obrigadas a construir grandes sistemas de esgotamento sanitário e drenagem urbana e observou-se grandes avanços da engenharia sanitária. Neste contexto, evidenciou-se a necessidade dos planos de intervenção do Estado nas cidades, e assim nasceu o conceito de urbanismo.

Cabe ressaltar que, juntamente com os avanços, observou-se também o acentuamento das diferenças entre as áreas ocupadas por diferentes classes sociais, principalmente em relação à qualidade dos serviços públicos e da infraestrutura urbana. Esta diferença é considerada um reflexo do modelo de produção capitalista e que é massivamente presente na formação das cidades atuais, onde observa-se que a prioridade dos investimentos em infraestrutura e demais serviços ocorrem nas áreas de interesse da classe dominante, devido à maior rentabilidade e retorno. Tal condição agrava ainda mais a diferença social e a má distribuição de renda.

Durante os séculos XIX e XX, na idade contemporânea, os efeitos da industrialização alastraram-se pelo mundo até atingir os países em desenvolvimento, quando o processo de expansão urbana foi ganhando cada vez mais celeridade. Segundo Guglielmo (1996) apud Tucci e Bertoni (2003), “durante a primeira metade do século XX a população total do mundo se incrementou em 49% e a população urbana em 240%. Na segunda metade do século esta evolução se acelerou: a população urbana passou de 1520 milhões de habitantes, em 1974, para 1.970 milhões em 1982”. Em 2007, pela primeira

vez na história, o número de habitantes das cidades superou o das zonas rurais, com uma população urbana mundial da ordem de 3.3 bilhões de pessoas. Este fato pode ser analisado através da Tabela 1 abaixo, que apresenta a evolução dos percentuais da população mundial urbana em relação à rural, no período de 1955 a 2015.

Tabela 1 – Evolução da população urbana (período 1955 a 2015). (TUCCI e BERTONI, 2003)

| Año | 1955 | 1975 | 1995 | 2015 |
|---------------|------|------|------|------|
| [% del total] | 32 | 38 | 45 | 54 |

Diante dos movimentos históricos e de todo o processo de expansão urbana, até hoje observado, principalmente nos países em desenvolvimento, torna-se bastante latente a preocupação imediata com o futuro das populações das cidades, merecendo atenção especial ao controle urbano para lidar com os problemas.

2.1.2.2 As Cidades Brasileiras

Assim como as tendências mundiais, a expansão urbana no Brasil, a partir do século XVI, resultou no aumento das demandas urbanas, principalmente as relacionadas à falta de saneamento. A Figura 3, apresenta um quadro com um resumo do processo de urbanização brasileira, desde os períodos colonial, imperial até o republicano.

Inicialmente, no período colonial, observou-se a ocupação das regiões litorâneas do país com o aumento da demanda por saneamento, principalmente no fim do século XVIII com a 1ª Revolução Industrial, que marcou o crescimento das cidades.

A partir do século XIX, já no período imperial, a expansão urbana se direcionou às regiões do interior do país, impulsionada pela construção das linhas férreas. Posteriormente, com o surgimento do urbanismo sanitário, iniciaram-se as aplicações de investimentos do império para melhoramentos públicos para tentar suprir a demanda crescente em saneamento.

No século XX, o país em seu período republicano manteve o ritmo crescente da expansão urbana e do aumento das suas demandas por saneamento, acelerados a partir de 1930, com o processo de industrialização que alavancou o país. A ocupação urbana se consolidou inicialmente no Sudeste e Nordeste, onde ficou evidente o agravamento das diferenças sociais e a problemática do país, com necessidades urgentes de soluções para os problemas urbanos. Neste contexto, cresceu a necessidade de elaboração de Planos

Urbanos que direcionassem o processo de urbanização, com destaque para a criação de Brasília, na década de 60. A expansão urbana manteve-se acelerada em direção às regiões internas do país, incluindo o sertão nordestino e a Amazônia, e consolidando novos centros urbanos como Fortaleza, Manaus, Brasília-Goiânia, entre outros.

| PERÍODO | | CARACTERÍSTICAS |
|-----------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COLONIAL | Século XVI a XVIII | Núcleos urbanos ao longo da faixa litorânea, principalmente na Bahia, Rio de Janeiro e São Paulo. Cidades muradas situadas em locais estratégicos de defesa com traçados de ruas regulares e acompanhando os terrenos. |
| | Século XVIII ao final | Final do período apresenta grandiosidade no traçado urbano e na arquitetura. Urbanismo barroco principalmente em Minas Gerais. Algumas obras de drenagem e saneamento sem conseguir suprir a demanda. |
| IMPERIAL | Início do Século XIX | Abastecimento parcial de água e esgotamento sanitário (centros urbanos). Ocupação do interior do país principalmente na região Sudeste (ao longo das ferrovias) e também região Nordeste. Crescimento urbano se acentua e o Império investe em melhoramentos públicos. |
| | Final do Século XIX. | Início do urbanismo sanitário, obras saneadoras e de remodelação urbana. Aumentam os problemas urbanos especialmente em relação aos serviços de saneamento. |
| REPÚBLICA | Início até 1930 | Acentua-se a urbanização principalmente no Nordeste e Sudeste e aumenta a defasagem do suprimento dos serviços de saneamento. Influência de Haussmann (Paris) no urbanismo. Começam as transferências de capitais de alguns estados. |
| | De 1930 a 1960 | A industrialização do país acelera o processo de urbanização. Aumenta o contingente populacional dos centros urbanos e também o número de cidades principalmente no norte do Paraná e centro de Goiás. São Paulo se consolida como metrópole nacional. Elaboram-se planos pilotos para novas capitais e se inicia a construção de Brasília. Estado se preocupa em sistematizar sua atuação e, ao final do período com o aumento da problemática urbana e das contradições sociais, busca soluções em planos e planejamentos econômicos e físico-territoriais. |
| | De 1960 a 1980 | Urbanismo Moderno se consolida como principal influência, especialmente após a construção de Brasília. Proliferam-se iniciativas de planejamento urbano e os serviços de saneamento continuam em atraso em relação à demanda. A urbanização se expande para o Sertão Nordestino e Amazônia e se inicia a construção de uma rede urbana nacional integrada. Críticas ao Modernismo, questões ambientais se anunciam face aos graves problemas urbanos acentuados com a crise econômica e política do período. |
| | A partir de 1980 | Começam, após a superação parcial da crise vivida nos anos anteriores, a surgir movimentos sociais e urbanos por melhores condições de vida nas cidades. Alguns destes anseios na área urbana e ambiental são contemplados na legislação elaborada especialmente nas décadas de 80 e 90 (Constituição Federal e Planos Diretores Municipais). A expansão urbana para o interior do país continua, com menor adensamento populacional. As metrópoles Rio e São Paulo apresentam redução de crescimento e se consolidam novos centros dinâmicos (Fortaleza, Manaus, Brasília-Goiânia entre outros). A década de 2000 se inicia com um desafio: viabilizar o Desenvolvimento Urbano Sustentável. |

Figura 3 – Etapas da Urbanização no Brasil

Cabe ressaltar que durante o processo acelerado da urbanização brasileira, a conjuntura social e a falta de planejamento urbano, levaram à formação de cidades sem infraestrutura adequada e com a ocupação de áreas muitas vezes inapropriadas.

O “não acesso” às terras adequadas à moradia, associado a baixa atuação do poder público, leva a um quadro de ocupação irregular, especialmente em áreas periféricas dos grandes centros urbanos, onde também se observa um estreito vínculo entre a pobreza e a degradação ambiental, tornando a população de baixa renda a mais vulnerável a desastres naturais (SANTOS, 2007).

Cabe ainda destacar que, conforme Marguti, Costa e Favarão (2017), a principal abordagem das políticas públicas consiste na intervenção “a posteriori”, por meio da provisão de infraestrutura e da regularização fundiária em regiões onde a habitação já está estabelecida. Essa dinâmica aumenta os custos ambientais, de instalação e de operação

da infraestrutura e dos serviços urbanos, resultando em maiores obstáculos para a distribuição equitativa desses serviços em todo o território.

2.1.3 Vulnerabilidade da Região Metropolitana de Rio de Janeiro (RMRJ) e suas Tendências de Expansão

O processo de estruturação das cidades, comumente impulsionado por objetivos econômicos em busca da maximização da rentabilidade mediante a valorização do preço da terra, tende a provocar diversos impasses no que concerne à manutenção da qualidade do meio ambiente urbano (COSTA SILVA, 2005).

Atualmente, segundo a estimativa populacional realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2020, a RMRJ é a segunda maior área metropolitana do Brasil, com 12.5 milhões de habitantes, concentrando 72% de toda a população do Estado do Rio de Janeiro. A concentração populacional em áreas urbanas corresponde a cerca de 99.5% dos habitantes da região. De acordo com o Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI-RMRJ), assim como a tendência histórica brasileira, o território da RMRJ:

“desenvolveu um padrão de ocupação e expansão urbana resultante da contínua exclusão da população de baixa renda de áreas centrais da cidade em direção às periferias e franjas urbanas. Dois fatores preponderantes contribuíram para a recorrência de tal movimento na história de formação do Rio: (i) a especulação imobiliária sem medidas de correção e controle por parte do Estado, além de políticas de remoção de assentamentos informais e cortiços das áreas visadas pelo mercado e objeto de grandes intervenções de requalificação urbana; (ii) ausência de políticas públicas habitacionais e de uso e ocupação do solo capazes de incorporar e integrar a população de baixa renda ao tecido urbano dotado de infraestrutura urbana adequada e com mais oferta de serviços e oportunidades”. BRASIL (2018, p. 5)

Tais movimento históricos, econômicos e políticos impulsionaram a ocupação da periferia da RMRJ, realizada predominantemente pela população de baixa renda, através de processos informais de ocupação de terras e autoconstrução de moradias, em grande parte em localizadas em áreas inadequadas como planícies de inundação e encostas de morros, muitas vezes classificadas como Área de Preservação Permanente (APP), colocando grande da população em situação vulnerabilidade.

Cabe destacar ainda que a especulação imobiliária e a consequente valorização das áreas centrais aumentaram os obstáculos para grupos sociais de baixa renda terem acesso a moradias adequadas, aumentando ainda mais o distanciamento social.

Adicionalmente, as características naturais do meio físico da RMRJ, entremeada por maciços rochosos, baías, lagos, lagoas, rios, praias e mangues, condicionam e, muitas vezes, dificultam o desenvolvimento urbano adequado.

O que se observa atualmente, é que a heterogeneidade socioespacial na construção da metrópole contribuiu para a formação de áreas urbanas sem atributos de urbanização, comprometendo as oportunidades e a qualidade de vida da população local (MARGUTI, COSTA e FAVARÃO, 2017). Tal situação torna evidente que as áreas mais carentes nos quesitos urbanização e renda são também as mais vulneráveis.

A Figura 4 abaixo apresenta os indicadores de urbanização e renda (IUR-CEPERJ) para a RMRJ, proveniente de estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2017). Em análise, é possível observar que os melhores indicadores IUR-CEPERJ (bom e razoável) estão localizados na região mais central, mais próxima ao centro da cidade. E conforme as tendências observadas, as regiões mais periféricas apresentam os piores indicadores (forte e extrema), ou seja, com as maiores carências nos quesitos urbanização e renda. Os espaços em branco são classificados como áreas rurais ou áreas urbanas com menos de cinco domicílios, podendo indicar ocupações do solo por matas, morros, corpos d'água, setores não urbanizados, áreas urbanas isoladas, entre outros. Destas áreas, pode-se observar alguns municípios que ainda não sofreram com a ocupação total do seu território, como Itaguaí, Seropédica, Paracambi, Nova Iguaçu, Duque de Caxias, Magé, Guapimirim e Maricá.

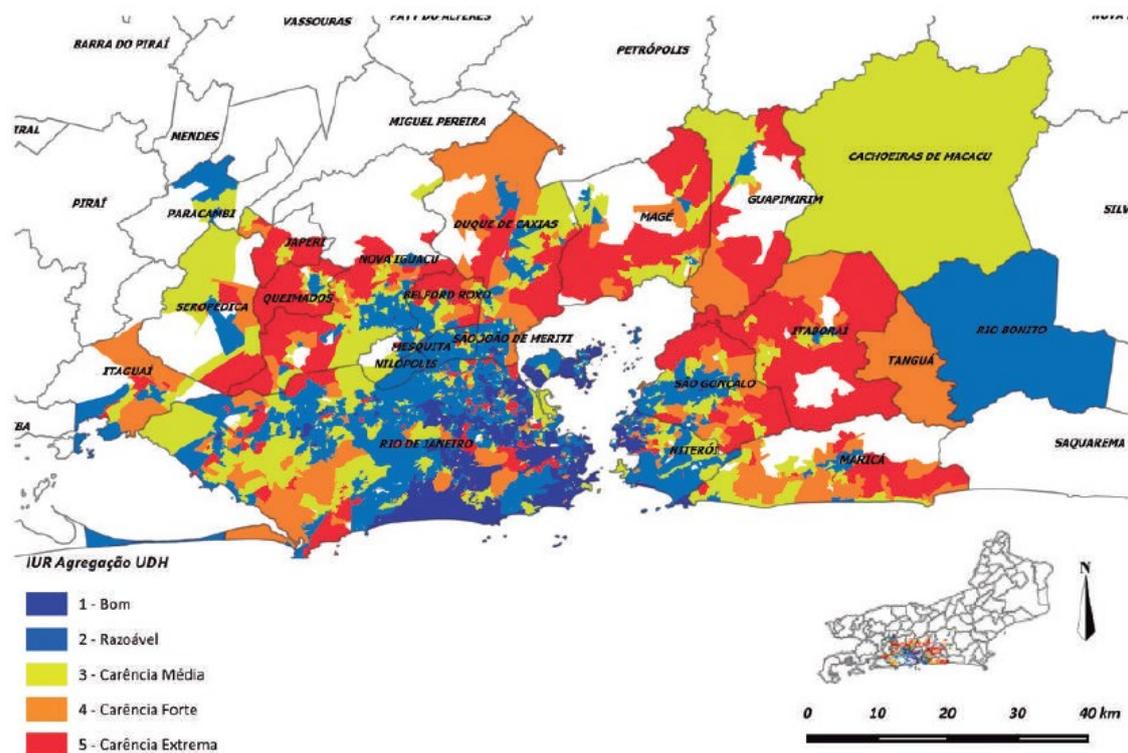


Figura 4 – Indicadores de Urbanização e Renda (IUR-CEPERJ) para a RMRJ da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). (BRASIL, 2018)

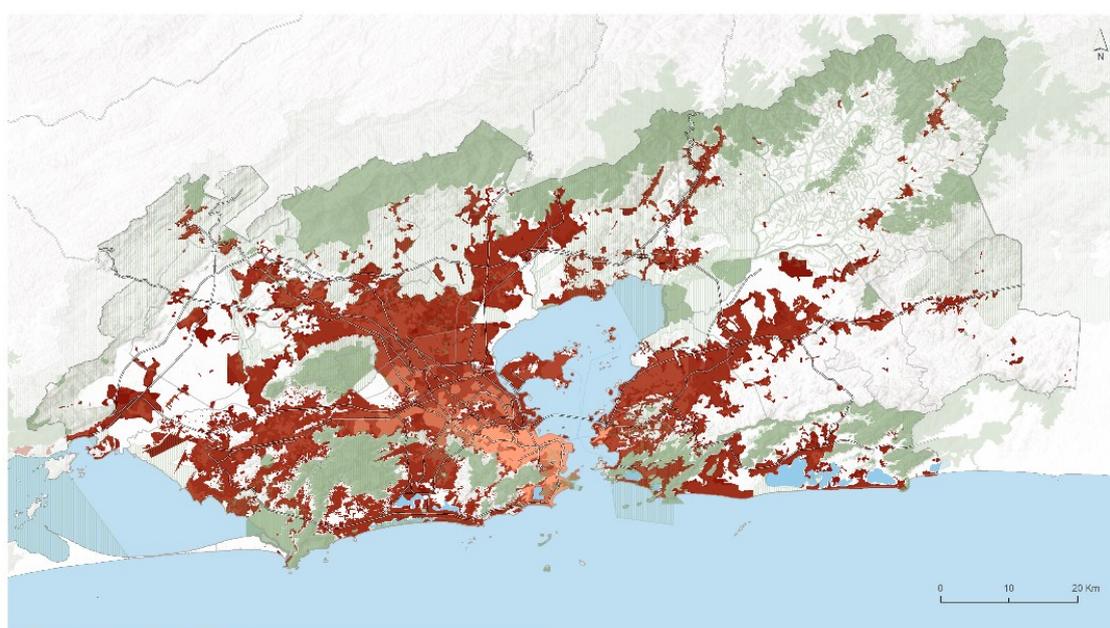
Apesar da maior concentração urbana nos arredores da capital, novos empreendimentos e ações relativamente recentes, como o Porto de Itaguaí e o Arco Metropolitano, possivelmente já contribuem para uma alteração desse quadro, no sentido de promover maior descentralização da oferta de empregos e impulsionar a ocupação urbana nas regiões mais periféricas.

Conforme Tabela 2 abaixo, de acordo com os últimos levantamentos dos censos de 2000 e 2010, os maiores percentuais de crescimento populacional da RMRJ foram observados nas cidades de Maricá (39.8%), seguido de Guapimirim (26.3%), Itaguaí (24.8%), Seropédica (16.5%) e Tanguá (15.2%).

A Figura 5 abaixo apresenta a evolução cronológica da ocupação da RMRJ, evidenciando o espraiamento da mancha urbana, a polaridade da capital neste processo e os fortes eixos de expansão que vão sendo atraídos em direção a oeste, com limite na cidade de Itaguaí, e a Leste, com limite na cidade de Maricá.

Tabela 2 – População dos municípios do Rio de Janeiro levantados nos censos demográficos do IBGE dos anos de 2000 e 2010. (BRASIL, 2018).

| | População 2000 | População 2010 | Incremento 2000-2010 | Variação % |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|---------------|
| Belford Roxo | 434.474 | 469.332 | 34.858 | 7,4 |
| Cachoeiras de Macacu | 48.543 | 54.273 | 5.730 | 10,6 |
| Duque de Caxias | 775.456 | 855.048 | 79.592 | 9,3 |
| Guapimirim | 37.952 | 51.483 | 13.531 | 26,3 |
| Itaboraí | 187.479 | 218.008 | 30.529 | 14,0 |
| Itaguaí | 82.003 | 109.091 | 27.088 | 24,8 |
| Japeri | 83.278 | 95.492 | 12.214 | 12,8 |
| Magé | 205.830 | 227.322 | 21.492 | 9,5 |
| Maricá | 76.737 | 127.461 | 50.724 | 39,8 |
| Mesquita | 166.080 | 168.376 | 2.296 | 1,4 |
| Nilópolis | 153.712 | 157.425 | 3.713 | 2,4 |
| Niterói | 459.451 | 487.562 | 28.111 | 5,8 |
| Nova Iguaçu | 754.519 | 796.257 | 41.738 | 5,2 |
| Paracambi | 40.475 | 47.124 | 6.649 | 14,1 |
| Queimados | 121.993 | 137.962 | 15.969 | 11,6 |
| Rio Bonito | 49.691 | 55.551 | 5.860 | 10,5 |
| São Gonçalo | 891.119 | 999.728 | 108.609 | 10,9 |
| São João de Meriti | 449.476 | 458.673 | 9.197 | 2,0 |
| Seropédica | 65.260 | 78.186 | 12.926 | 16,5 |
| Tanguá | 26.057 | 30.732 | 4.675 | 15,2 |
| Total Municípios (exceto RJ) | 5.109.585 | 5.625.086 | 515.501 | 9,2 |



Fonte: Camêrolo Queiroz. Lançado, com dados de PDAM/NET/CMRJ

Evolução da Mancha de Ocupação do Território Metropolitano



Figura 5 – Evolução cronológica da Mancha de Ocupação do Território Metropolitano do Rio de Janeiro. Fonte: (BRASIL, 2018)

É possível, inclusive, observar que a evolução da mancha ao longo dos anos acompanhou os trajetos das vias ferroviárias e rodoviárias que atuaram, e ainda atuam, dentre outros fatores, como fortes agentes impulsionadores do processo.

Ressalta-se que Itaguaí e Maricá estão entre as cidades da RMRJ que apresentaram as maiores variações populacionais entre os anos de 2000 e 2010. Nos resultados do Censo de 2022, apesar da retração populacional do Estado, da Metrópole e cidades como Rio de Janeiro e São Gonçalo, destacam-se ainda pelos seus crescimentos populacionais positivos, as cidades de Maricá, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Mangaratiba, Queimados, Saquarema, Seropédica e Tanguá.

Diante do exposto, considerando as características físicas naturais da RMRJ, as tendências de ocupação, observadas ao longo das últimas décadas, bem como as suas perspectivas de futuro, considera-se fundamental que sejam definidas medidas de manejo do uso do solo com planejamento das áreas com os maiores potenciais de crescimento, a ser realizado com base em análise de cenários futuros, de modo a definir medidas eficazes de controle do uso e ocupação do solo, com a previsão da infraestrutura necessária.

As medidas de planejamento e controle para as cidades com maior potencial de crescimento, com destaque às cidades de Itaguaí e Maricá, são consideradas fundamentais para uma estratégia de ordenamento territorial coerente com a visão de futuro da RMRJ, de modo a minimizar a vulnerabilidade da população e os inúmeros impactos na mobilidade, no meio ambiente, no patrimônio, na qualidade de vida da população, na economia, na segurança, etc.

2.2 AS INUNDAÇÕES E A URBANIZAÇÃO

“As primeiras cidades, na Antiguidade, surgiram junto a rios, em função da necessidade de terras férteis e de irrigação para a produção de alimentos excedentes para abastecê-las, bem como em função do próprio abastecimento de água para consumo humano. A água mostrou-se sempre como um fator fundamental para o crescimento das cidades, e grandes civilizações floresceram no seu entorno.” (MIGUEZ, VERÓL e REZENDE, 2016)

Ressalta-se que no passado, as enchentes eram consideradas como um fenômeno benéfico, pois permitiam o aporte de material rico em nutrientes e desejáveis à agricultura

das várzeas. (SANTOS, 2007) Atualmente, com o crescimento urbano desordenado e as transformações antrópicas no ambiente, as enchentes tornaram-se um dos maiores problemas urbanos enfrentados pelas populações do planeta.

2.2.1 Definições de Enchentes, Inundações e Enxurradas

Neste trabalho o termo “cheia” é utilizado de maneira geral para se referir aos eventos provocados pelas chuvas, incluindo enchentes, inundações, enxurradas. Entretanto, é importante destacar que existem diferenças nas definições destes termos.

Enchentes são fenômenos naturais que ocorrem nos cursos d’água, que consistem simplesmente na elevação dos níveis de água, seja de qualquer dimensão, podendo ou não causar transbordamento.

O termo inundação se refere especificamente ao transbordamento de água nos canais principais, provocado pelo fenômeno de enchente. É importante destacar que “não existe rio sem ocorrência de enchente. Todos têm sua área natural de inundação (planícies de inundação) e esse fenômeno não é, necessariamente, sinônimo de catástrofe. Quando o homem ultrapassa os limites das condições naturais do meio em que vive então as inundações passam a ser um problema social, econômico e/ou ambiental. Assim, a inundação torna-se um evento catastrófico quando a área inundável não apresenta uma ocupação adequada como construção de residências nas áreas ribeirinhas. (SANTOS, 2007)

Para o termo “enxurrada” existem várias definições com diferentes particularidades, todas referindo-se a uma ideia de um fenômeno de inundação brusca provocado por chuvas intensas. Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), proposta em 2012, são definidas como escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracteriza-se pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. Atualmente, devido à redução da capacidade de infiltração associada à urbanização irregular ou sem planejamento, as enxurradas têm se tornado frequentes em diversos centros urbanos, estando muitas vezes associadas a alagamentos, sendo que sua distinção se torna cada vez mais complexa. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2013)

Estes fenômenos geralmente ocorrem em bacias com baixa capacidade de retenção e/ou com elevada geração de escoamento superficial e costumam provocar muita destruição incluindo erosão de terrenos e arrastamentos de árvores, pontes, casas, lixo, etc. Os efeitos aparecem principalmente nas confluências dos rios quando eles não têm mais capacidade de escoar os fluxos, nas curvas dos cursos de água ou quando as enchentes transportam materiais (por exemplo, lixo jogado as margens dos cursos de água em períodos secos) que provocam bloqueios dos escoamentos e que após o rompimento provocam ondas violentas, com elevadas capacidades destrutivas. (SANTOS, 2007)

2.2.2 Estatísticas dos desastres relacionados a inundações

Com a crescente urbanização, as inundações tornaram-se mais frequentes e intensas ao longo dos anos. De modo geral, sem medidas adequadas de atenuação, como bacias de retenção ou infiltração, a tendência é que os escoamentos sejam canalizados para os rios cada vez mais rápido. Devido à falta de gestão das águas pluviais em áreas urbanizadas, as inundações são cada vez mais comuns e devastadoras (HOOKE, 2006).

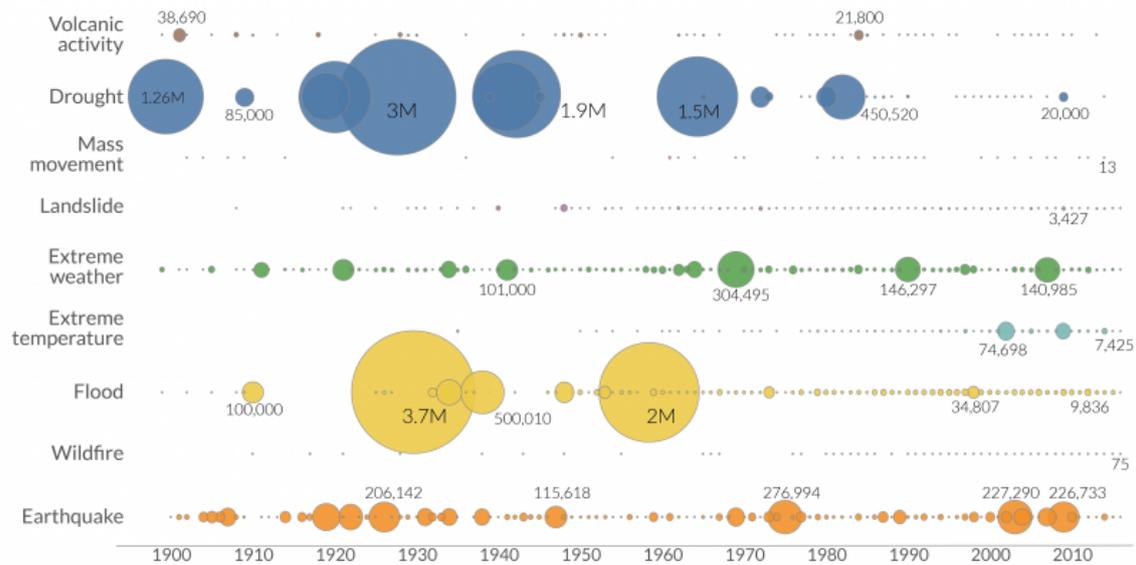
As Figuras 6 e 7 ilustram através de gráficos, os dados históricos do número de mortes em função de desastres naturais ocorridos em todo o mundo, disponibilizados pela plataforma “Our World in Data”. Nestes gráficos é possível identificar as consequências desastrosas nos números de morte dos eventos relacionados a secas, enchentes e terremotos, principalmente até a metade do século XX.

Na Figura 6, é possível notar que os maiores registros de mortes por enchentes (flood) ocorreram entre as décadas de 30 e 60, possivelmente por influência da expansão urbana acelerada nesta época, principalmente das cidades localizadas nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil. Após este período, possivelmente devido ao aumento da preocupação mundial com o problema e à implementação de medidas de controle de enchentes, estes eventos tornaram-se menos letais, porém muito mais frequentes, afinal o processo de expansão urbana mantém-se acelerado.

Global deaths from natural disasters (1900–2016)

Our World in Data

The size of the bubble represents the total death count per year, by type of disaster.



Data source: EMDAT (2017): OFDA/CRED International Disaster Database, Université catholique de Louvain – Brussels – Belgium. OurWorldInData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Figura 6 – Número de mortes por desastres no mundo (1900 a 2016). (EMDAT, 2017)

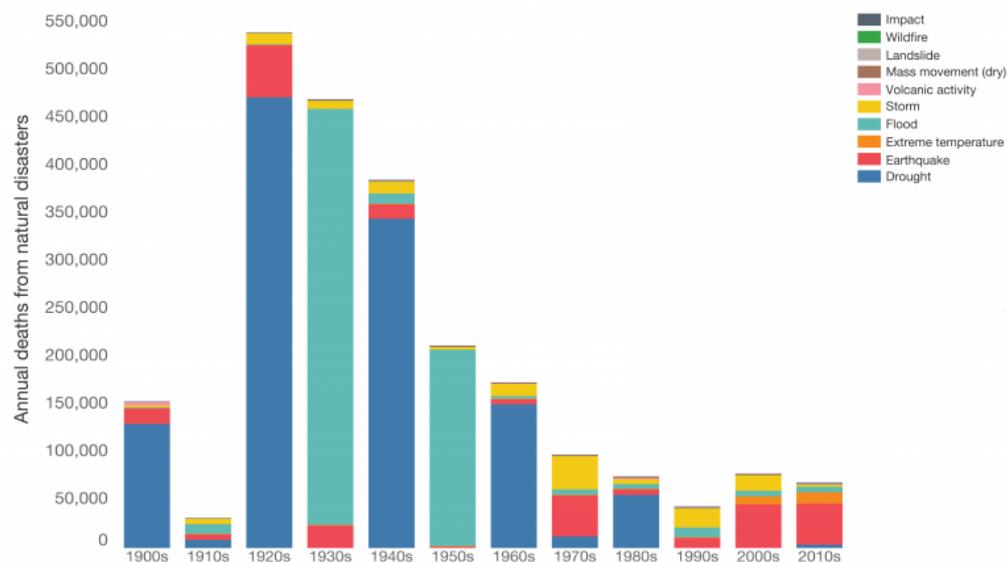
Na Figura 7, é possível observar que nas últimas décadas, considerando o número total de mortes por desastres, as enchentes e chuvas intensas, juntamente com as secas e terremotos, ainda se encontram entre os tipos mais letais do mundo.

Global annual deaths from natural disasters, by decade

Our World in Data

Absolute number of global deaths from natural disasters, per year.

This is given as the annual average per decade (by decade 1900s to 2000s; and then six years from 2010-2015).



Source: EMDAT (2017): OFDA/CRED International Disaster Database, Université catholique de Louvain – Brussels – Belgium. The data visualization is available at OurWorldInData.org. There you find research and more visualizations on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

Figura 7 – Número de mortes no mundo agrupados por década e tipo de desastre (1900 a 2015). (EMDAT, 2017)

A Tabela 3 abaixo apresenta quadros com os 5 desastres mais letais do mundo, nos anos de 2017 a 2020, onde é possível observar a predominância de desastres de enchentes, terremotos e ciclones. É importante ainda destacar a alta frequência dos eventos relacionados às chuvas intensas como enchentes, enxurradas e deslizamentos de terra que nos anos de 2019 e 2020, representaram quatro das cinco piores ocorrências de desastres do planeta.

Tabela 3 – Ranking dos 5 desastres mais letais do mundo, nos anos de 2017 a 2020, respectivamente. (GEO RISKS RESEARCH, 2021)

| Date | Country/Region | Event | Fatalities |
|----------------|---------------------------|------------------------|------------|
| Jun - Oct 2017 | South Asia | Flood | 2,700 |
| 12.11.2017 | Iran, Islamic Republic of | Earthquake | 630 |
| 14.8.2017 | Sierra Leone | Landslide | 500 |
| 19.9.2017 | Mexico | Earthquake | 369 |
| 1.4.2017 | Colombia | Flash flood, landslide | 329 |

| Date | Country/Region | Event | Fatalities |
|---------------|----------------|----------------------------|------------|
| 28.9.2018 | Indonesia | Earthquake, tsunami | 2,102 |
| 5.8.2018 | Indonesia | Earthquake | 556 |
| 22.12.2018 | Indonesia | Volcanic activity, tsunami | 437** |
| 7.8-21.9.2018 | India | Flood, landslide | 319 |
| 5-9.7.2018 | Japan | Flood, landslide | 224 |

| Date | Country/Region | Event | Fatalities |
|------------------|--------------------------------------------|-----------------------|------------|
| 9-14.3.2019 | Mozambique, Malawi, Zimbabwe, South Africa | Cyclone Idai | 1,014 |
| 2-29.7.2019 | Bangladesh, India, Myanmar, Nepal | Flood, landslide | 708 |
| 1-26.8.2019 | India | Flood, landslide | 424 |
| 25.1.2019 | Brazil | Flash flood, mudslide | 300 |
| June – July 2019 | China | Flood, flash flood | 225 |

| Date | Country/Region | Event | Fatalities |
|-------------|-----------------------|--------------------|------------|
| 12.7-1.10. | Pakistan | Flash flood, flood | 400 |
| 1.5-12.5. | Uganda, Rwanda, Kenya | Flood, flash flood | 281 |
| Jun - Aug | Bangladesh | Flood | 257 |
| 24.8-31.8. | Afghanistan | Flash flood | 190 |
| 2.11-12.11. | America, Caribbean | Hurricane Eta | 183 |

No Brasil, conforme Figura 8, assim como a tendência mundial, considerando o número de perdas humanas e materiais todos os anos, os maiores desastres naturais observados entre 2000 e 2007 estão relacionados às enchentes (inundações), com 58% do total de ocorrências. Posteriormente destaca-se os desastres relacionados à seca e deslizamentos de terra com 14% e 11%, respectivamente.

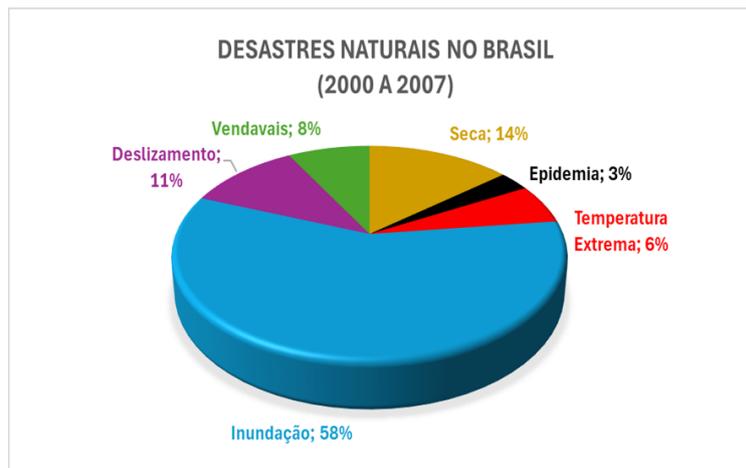


Figura 8 – Principais desastres naturais no Brasil entre 2000 e 2007. (SANTOS, 2007)

A Figura 9 apresenta o mapa de densidade do kernel que produz uma visualização processada e suavizada da densidade de ocorrências na vizinhança de cada célula do mapa resultante. Através do mapa é possível observar que a densidade de kernel tem seus maiores níveis na região litorânea, incluindo o Sudeste e partes do Sul e do Nordeste. Isso indica haver uma maior concentração de ocorrências de desastres nessas regiões, que são as regiões mais urbanizadas do país (EMDAT, 2019).

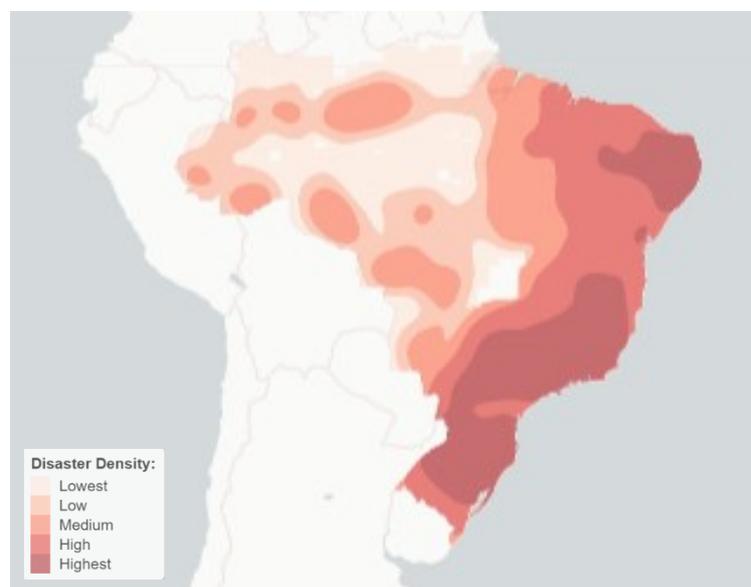


Figura 9 - Estimativa da densidade do kernel (kernel quadrático) para ocorrências de desastres naturais no Brasil. (EMDAT, 2019)

Pode-se afirmar que os desastres de enchentes são realidade na maior parte das cidades brasileiras e estão relacionados aos seus fenômenos climáticos naturais, principalmente das chuvas intensas, e são potencializados pela ação do homem no processo de expansão urbana e ocupação do solo. Um ponto a observar é que a região

Sudeste, particularmente os estados do Rio de Janeiro e São Paulo, apresentam as maiores populações sujeitas a estes desastres, quando relacionadas às outras regiões.

Conforme Tabela 4 abaixo, em levantamento no último Censo do IBGE, no ano de 2010, os estados do Rio de Janeiro e São Paulo apresentaram Taxas de População Urbana de 96.71% e 95.88%, respectivamente, superiores à taxa média na região Sudeste, de 86.92% e do Brasil, de 84.3%. Estes números são esperados uma vez que as regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo constituem os maiores aglomerados urbanos do país. Estes dados reforçam a afirmação de que as regiões mais urbanizadas tendem a apresentar as maiores ocorrências de enchentes.

Tabela 4 – População, taxa de crescimento e taxa de ocupação urbana e rural, segundo a região Sudeste e suas Unidades da Federação (2000 e 2010). Fonte: IBGE (2010)

| Abrangência Geográfica | População | | Crescimento (2000-2010) % | Taxa de População Urbana (2010) % | Taxa de População Rural (2010) % |
|------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| | 2000 | 2010 | | | |
| Brasil | 169.799.170 | 190.732.694 | 12,33 | 84,3 | 15,7 |
| Região Sudeste | 72.412.411 | 80.835.724 | 10,97 | 86,92 | 92,95 |
| Minas Gerais | 17.891.494 | 19.595.309 | 9,52 | 83.38 | 16.62 |
| Espírito Santo | 3.097.232 | 3.512.672 | 13,41 | 85.29 | 14.51 |
| Rio de Janeiro | 14.391.282 | 15.993.583 | 11,13 | 96.71 | 3.29 |
| São Paulo | 37.032.403 | 41.252.160 | 11,39 | 95.88 | 4.12 |

No Rio de Janeiro, segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos, de 2014, do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), os dados sobre desastres naturais ocorridos no estado antes do ano 2000 são escassos, porém há registros históricos desde o século XVIII. “Na descrição dos antigos desastres, selecionados pelo Corpo de Bombeiros como os mais importantes, constam referências a eventos extremos de chuvas intensas, indicando que estes sempre ocorreram na cidade do Rio de Janeiro e no estado, causando inundações nas baixadas e margens de rios e deslizamentos nas encostas. É na segunda metade do século XX que se observa o maior número de desastres destacados pelo Corpo de Bombeiros como os mais importantes.” (COPPETEC, 2014)

A Tabela 5 apresenta os registros dos piores desastres naturais do estado do RJ, levantados pelo Corpo de Bombeiros até 1999. Observa-se que todos os desastres estão relacionados a enchentes e chuvas intensas, com destaque para as ocorrências dos anos de 1966 e 1988, ilustrados na Figura 10, consideradas uma das mais trágicas da história, levando-se em consideração o número de mortos e desabrigados desta categoria.

Em análise a um período mais recente através do gráfico na Figura 11, o número de ocorrências de desastres naturais ocorridos no estado do Rio de Janeiro entre 1991 e 2012 demonstrou um aumento significativo dos desastres após o ano 2000. “É possível supor que este maior número resulte tanto da maior frequência de desastres associada ao aumento da população, dos desmatamentos, da ocupação de áreas de risco e, portanto, da exposição humana aos eventos climáticos, como também resulte da melhor capacidade de documentação dos desastres do que nos séculos anteriores.” (COPPETEC, 2014)

A Figura 12 apresenta o gráfico com o número de ocorrência de desastres conforme tipificação dos Relatórios da Defesa Civil entre os anos de 2000 e 2012. Em análise, observa-se que as inundações contemplam 62% dos desastres ocorridos no estado do RJ entre os anos de 2000 e 2012. Este percentual é considerado bastante expressivo, ratificando que as inundações são um problema crescente no estado do Rio de Janeiro, merecendo grande atenção do poder público, privado e da população em geral.



Figura 10 – Desastres relacionados a enchentes e chuvas intensas ocorridas em Petrópolis, no Rio de Janeiro em 1966 (a) e 1988 (b), considerados um dos mais trágicos da sua história. Fonte: Secretaria Nacional de Defesa Civil. (COPPETEC, 2014)

Tabela 5 – Desastres naturais importantes no Rio de Janeiro, ocorridos entre 1711 e 1999, segundo registros do Corpo de Bombeiros. (COPPETEC, 2014)

| Ano | Mês | Causa | Desastre / Danos | Cidade / Região |
|------|-----------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1711 | Setembro | Chuvas | Grandes inundações. | Rio de Janeiro |
| 1756 | Abril | Ventos fortes, Temporal | Inundações e desabamentos. | Rio de Janeiro |
| 1811 | Fevereiro | Chuvas intensas | Inundações e desmoronamento do morro do Castelo, mortes. | Rio de Janeiro |
| 1906 | Março | Chuva de 165 mm em 24 h. | Inundações por transbordamento do canal do Mangue e desmoronamentos com mortes nos morros de Santa Teresa, Santo Antônio e Gamboa | Rio de Janeiro |
| 1924 | Abril | Fortes chuvas | Inundações por transbordamento do canal do Mangue e desabamentos de barracos com vítimas no morro de São Carlos. | Rio de Janeiro |
| 1940 | Janeiro | Chuva de 112 mm | Alagamentos e mortes por desabamentos no bairro do Santo Cristo. | Rio de Janeiro |
| 1942 | Janeiro | Chuva de 132 mm | Inundação e desabamento que soterrou cinco pessoas no morro do Salgueiro. | Rio de Janeiro |
| 1962 | Janeiro | Temporal de 242 mm | Transbordamento do canal do Mangue e do rio Maracanã, inundações, deslizamentos, 25 mortos e centenas de desabrigados. | Rio de Janeiro |
| 1966 | Janeiro | Chuvas | Enchentes e deslizamentos, 250 mortos e 50.000 desabrigados. | Rio de Janeiro e estado da Guanabara |
| 1967 | Janeiro | Chuvas | Enchentes e deslizamentos, 500 mortos e 25.300 feridos | Rio de Janeiro e estado da Guanabara |
| 1981 | Novembro | Chuvas | Deslizamentos, 20 mortos. | Estrada Rio - Teresópolis |
| 1982 | Dezembro | Chuvas | Deslizamentos no Morro Pau da Bandeira, transbordamento do rio Faria-Timbó, inundações, seis mortos. | Rio de Janeiro |
| 1983 | Março | Temporal de 189 mm | Desabamento em Santa Teresa, cinco mortos, transbordamento de rios e canais em Jacarepaguá deixou mais de 150 desabrigados. | Rio de Janeiro |
| 1983 | Outubro | Temporal | Inundação, deslizamento no morro Pavãozinho, 13 mortos. | Rio de Janeiro |
| 1985 | Janeiro | Chuvas | Enchente, 19 mortos, 50 feridos e 15.000 desabrigados | Angra dos Reis e Paraty |
| 1987 | Fevereiro | Chuvas | Enchente, 292 mortos e 20.000 desabrigados | Petrópolis, Teresópolis e Rio de Janeiro |
| 1988 | Fevereiro | Chuvas | Enchente, 277 mortos e 2.000 desabrigados | Petrópolis e Baixada Fluminense |
| 1988 | Fevereiro | Chuvas | Enxurradas e deslizamento no morro Dona Marta, seis mortos, 40 feridos e 300 desabrigados; Deslizamentos/pedras atingiram Hospital Santa Genoveva, 18 mortos. | Rio de Janeiro |
| 1988 | Fevereiro | Chuvas | Enchente e deslizamentos, 289 mortos, 734 feridos e 18.560 desabrigados | Rio de Janeiro |
| 1991 | Janeiro | Chuvas | Enchente, 25 mortos. | Rio de Janeiro |
| 1999 | Janeiro | Chuvas | Enchente, 41 mortos e 180 famílias desabrigadas. | Rio de Janeiro, Vale do Paraíba e Região Serrana |

Fonte: "Relação dos desastres mais importantes ocorridos no Estado do Rio de Janeiro", apresentada no Histórico do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, publicado em 2003 no site da Defesa Civil.

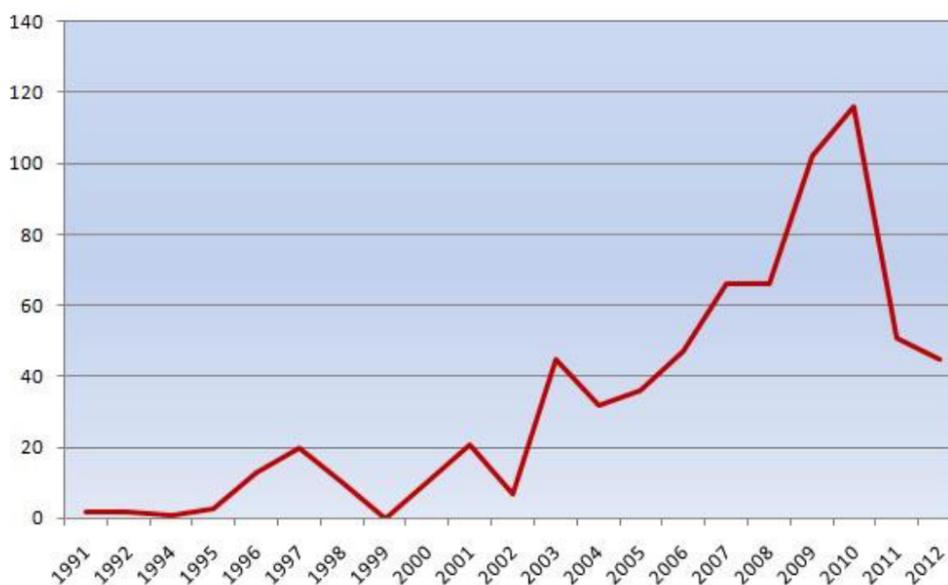


Figura 11 – Número anual de ocorrências de desastres naturais no estado do RJ entre 1991 e 2012. (COPPETEC, 2014)

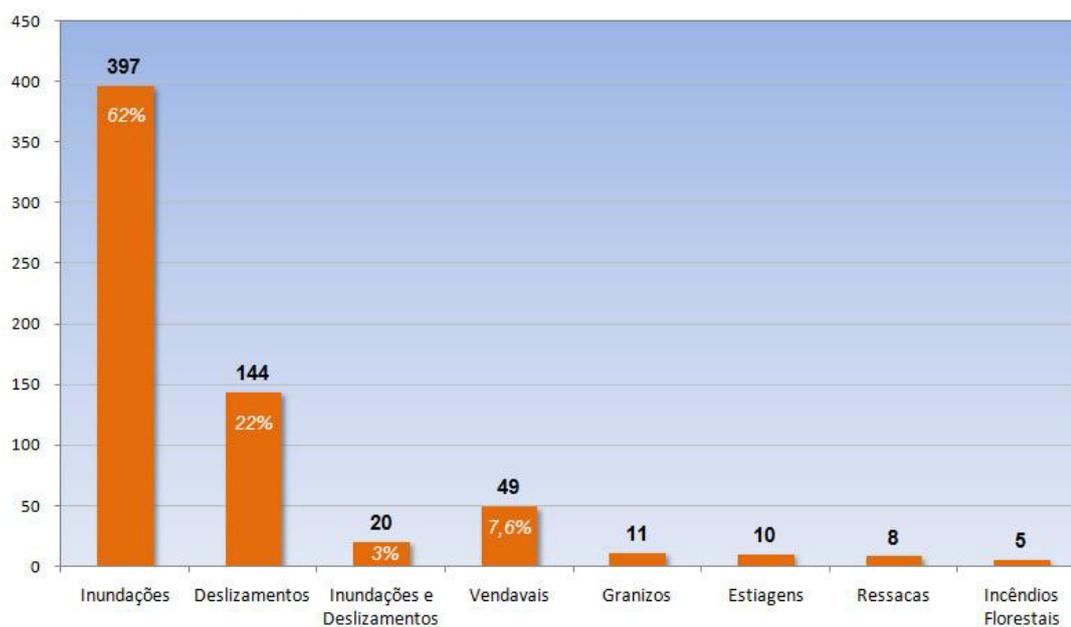


Figura 12 – Número de ocorrências de desastres no Rio de Janeiro (2000 a 2012). Fonte: Plano Estadual de Recursos Hídricos – INEA (2014). (COPPETEC, 2014)

De modo a fazer uma análise da sazonalidade dos fenômenos, a Figura 13, apresenta os números de ocorrência de inundações e deslizamentos no estado do Rio de Janeiro, entre os anos de 2000 e 2012, tipificados proporcionalmente. É possível observar que os meses de janeiro e dezembro se mostraram como os períodos com maior número de ocorrências dos desastres relacionados a enchentes, incluindo inundações, deslizamentos e ocorrências mistas.

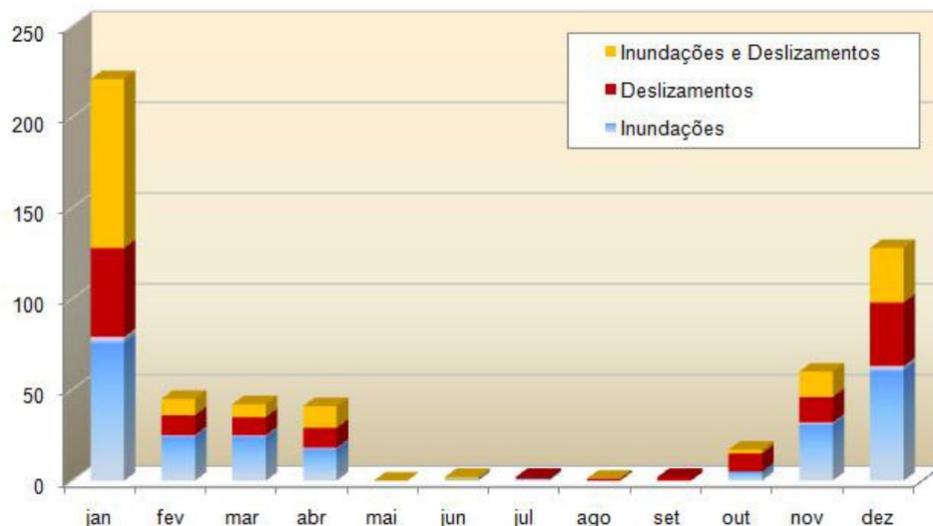


Figura 13 – Número médio mensal de ocorrências de desastres de inundações e deslizamentos no Rio de Janeiro (2000 a 2012). Fonte: Defesa Civil. (COPPETEC, 2014)

Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos, do INEA (2014), “Além de janeiro ser um mês típico da estação mais quente e chuvosa (verão), os eventos extremos de chuva neste mês podem encontrar condições de maior fragilidade, pelo acumulado de chuvas dos meses anteriores (novembro e dezembro), tais como: solos encharcados, rios cheios e assoreados, drenagem pluvial entupida, etc.”. É importante ainda destacar que juntamente com o número de ocorrências expressivo deste período, os danos humanos também correspondem às maiores proporções, atingindo 49% do número total de pessoas desalojadas, desabrigadas e/ou deslocadas e 72% do número total de vítimas fatais, sendo que 964 (84%) das 1.147 mortes registradas em janeiro ocorreram em 2011 na Região Serrana. (COPPETEC, 2014)

Considerando o panorama de desastres naturais no Brasil e no mundo e com ênfase nos desastres de enchentes ocorridos no Rio de Janeiro, e ainda a expansão urbana acelerada observada de algumas década atrás até os dias atuais, é possível afirmar que todos estes dados apresentados corroboram com a ideia de que os desastres relacionados às enchentes, além de estarem intimamente relacionados a uma predisposição natural para chuvas intensas, são potencializadas pela ocupação urbana que se agrava em processo gradual.

2.2.3 Impactos das Inundações

Segundo (MIGUEZ, REZENDE e VERÓL, 2015), o rápido processo de urbanização dos últimos 200 anos com controle inadequado de uso do solo tem levado a um aumento de superfícies impermeáveis, a uma redução da capacidade de retenção natural e, conseqüentemente, maiores vazões picos de descarga e volumes de escoamento (runoff). O padrão das superfícies urbanas típicas leva também a um aumento da velocidade de escoamento. Nos países em desenvolvimento, o problema é ainda pior, por causa da industrialização tardia que concentrou este processo na metade do século passado. Este tipo de evento causa uma série de perdas sociais e econômicas, produzindo impactos em diversos aspectos da vida da cidade, incluindo desde riscos à saúde, prejuízos econômicos públicos e privados, e perturbação da infraestrutura urbana.

Com o crescimento das cidades e a transformação do solo rural em solo urbano, surgem os diversos problemas característicos deste tipo de ocupação do solo, uma vez que alteram o ciclo hidrológico natural (equilibrado e harmônico) para um ciclo hidrológico urbano (alterado), gerando respostas fluviais bem diferentes.

A Figura 14 apresenta dois esquemas que ilustram a diferença entre os balanços hídricos dos ciclos hidrológicos naturais e urbanos, onde os volumes de entrada e saída são representados pelo tamanho das setas.

De forma resumida, o ciclo hidrológico pode ser visualizado como o fluxo em diversos compartimentos, onde: parte do volume da precipitação é retido pela cobertura vegetal, em troncos e folhas; parte se transforma no estado gasoso, através do fenômeno de evapotranspiração; e a parte restante atinge a superfície do solo. Do volume na superfície, dependendo das condições de permeabilidade, parte será escoada superficialmente, parte ficará armazenada na superfície e parte poderá infiltrar no solo atingindo as mais diferentes profundidades. A infiltração é caracterizada por fluxos lentos e contínuos criando enormes compartimentos que atuam como reservatórios subterrâneos (aquíferos), responsáveis por alimentar os cursos d'água nos períodos de estiagem.

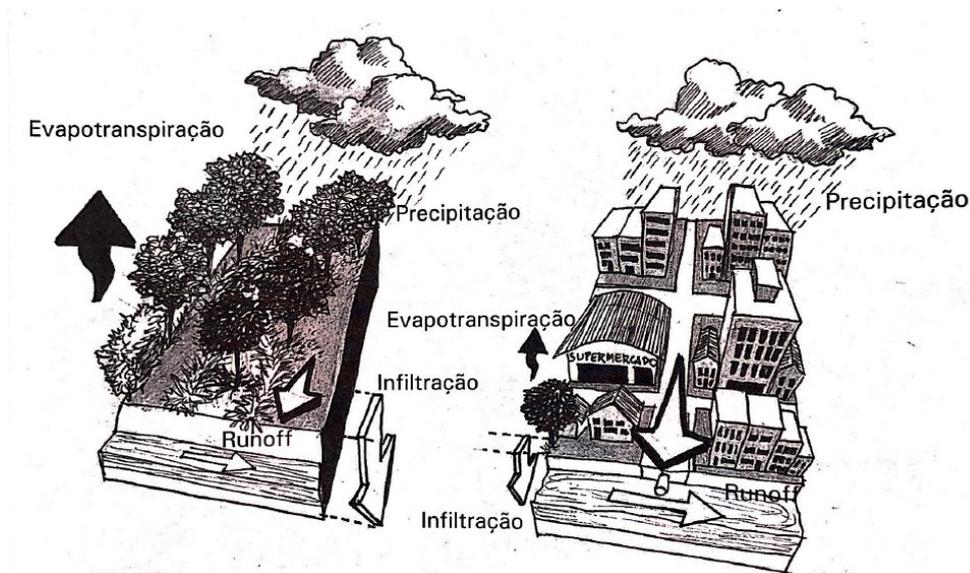


Figura 14 – Esquema das alterações no balanço hídrico, decorrente da urbanização. Fonte: JHA et al., 2021 apud Miguez, M.C. (2016) (MIGUEZ, VERÓL e REZENDE, 2016)

Em ciclos hidrológicos urbanos, é possível observar através dos tamanhos das setas na Figura 14 que, devido à diminuição da camada vegetal e à redução da permeabilidade do solo, os volumes de infiltração, volumes de reserva superficial e evapotranspiração são menores e, conseqüentemente, há um aumento da vazão superficial (runoff), que escoará rapidamente em direção ao sistema de drenagem, formado por bocas de lobo, dutos, canais artificiais, rios, lagos, reservatórios e outros. Quando os sistemas de drenagem não são suficientes para receber este volume no tempo de duração da chuva, dependendo da sua intensidade, ocorrem os alagamentos, inundações e enxurradas.

Ainda é importante destacar, que cada bacia tem suas particularidades e que os níveis de enchente dependem de uma série de características do meio físico, incluindo não somente os aspectos naturais, mas também das características da infraestrutura existente, principalmente em relação às dimensões das seções de escoamento, às declividades dos canais e aos tipos de material dos leitos, margens e planícies inundáveis.

A Figura 15 ilustra exemplos de hidrogramas característicos dos tipos de uso e ocupação do solo rural, semiurbano e urbano (cidade). Os hidrogramas são gráficos que apresentam a vazão superficial em função do tempo. Através deles é possível identificar as ondas de cheia resultante das chuvas. Na ilustração da referida figura, é possível perceber que, com o avanço da urbanização o volume superficial de chuva se torna maior e a onda de cheia se torna mais curta, gerando um pico de vazão consideravelmente maior.

Isso significa que o volume superficial, além de ser maior em bacias urbanas, passa pela cidade em um espaço de tempo menor, fazendo como que os alagamentos atinjam níveis mais altos.

No ciclo hidrológico natural, a cobertura vegetal tem papel fundamental para o seu equilíbrio, conferindo resistência ao solo contra erosão superficial e deslizamentos, proporcionada pelas raízes, facilitando a infiltração de água no solo, retardando e diminuindo a vazão de pico da onda de cheia, além de atuar nas funções reguladoras da evapotranspiração que controlam a perda gradual de água do solo.

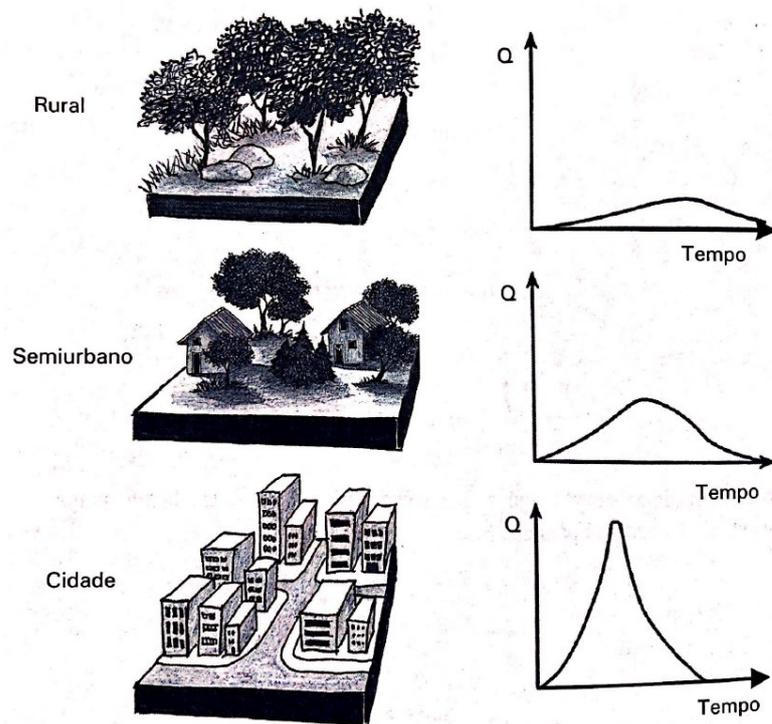


Figura 15 – Variação dos hidrogramas para uma mesma chuva, em função das modificações ocorridas no uso do solo. Fonte: Butler e Davies, 2000 apud Miguez *et al* (2016)

De modo a ilustrar esse raciocínio, a Figura 16 apresenta 4 cenários de cobertura vegetal onde as setas em linha cheia indicam a direção dos fluxos d’água e as setas pontilhadas indicam as perdas por evapotranspiração. Pode-se observar que no cenário 1, de floresta preservada, os fluxos de infiltração e evapotranspiração são maiores que nos demais cenários, além disso, as raízes profundas e folhas protegem a superfície do solo contra erosão e deslizamentos. Nos cenários 2 e 3, de florestas degradadas e gramíneas, percebe-se uma diminuição considerável da infiltração e da evapotranspiração, enquanto as raízes se tornam mais enfraquecidas e/ou menos profundas, favorecendo a ocorrência de deslizamentos de terra. Adicionalmente, a diminuição das folhas e o aumento do

escoamento superficial aumentam a erosão no terreno. Já no cenário 4, de solo exposto, a infiltração e evapotranspiração tornam-se muito baixas devido à falta de raízes e folhas que ainda expõem o solo aos processos acelerados de erosão superficial.

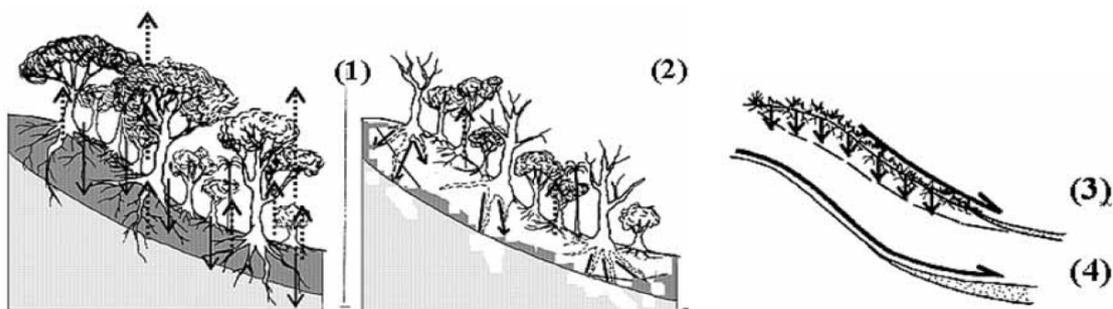


Figura 16 – Interações biota-solo-água: 1 – Floresta Conservada; 2 – Floresta degradada; 3 – Gramíneas; e 4 – Solo Exposto. (SANTOS, 2007)

Os cursos d’água naturais podem ser divididos em canal principal e canal secundário. Nos períodos de estiagem em que os níveis dos cursos d’água estão baixos, o fluxo de água é conduzido pelo canal principal. Em rios perenes, este canal sempre apresenta escoamento de água. Nos períodos de cheias a água atinge níveis mais elevados, ultrapassando os limites do canal principal, ocupando também o canal secundário, e que juntos conduzem água neste período. O canal secundário pode ter escoamento durante certos intervalos de tempo, de forma temporária. Importante destacar que a área ocupada pelo canal secundário é chamada de planície de inundação, sendo considerada uma área naturalmente alagável.

Conforme ilustrado na Figura 17, uma prática bastante comum nos processos de urbanização das cidades é a ocupação urbana das planícies de inundação, consideradas fundamentais para receber os volumes excedentes nos períodos de cheias. “Uma vez eliminado o espaço que deveria ser deixado livre para a acomodação das grandes enchentes, as águas acabam procurando outros caminhos, espalhando-se pela planície urbanizada, muitas vezes com profundidades maiores e, por consequência, atingindo regiões antes não alagáveis naturalmente” (MIGUEZ, VERÓL e REZENDE, 2016)

É importante observar que a ocupação das planícies de inundação ocorre, em sua grande maioria, por populações de baixa renda e baixa escolaridade, sem as condições de moradia e infraestrutura urbana adequadas, configurando áreas de risco cada vez maiores, colocando essa população em situação de vulnerabilidade a estes desastres. Esta situação

ainda se agrava quando essas áreas estão localizadas nas zonas costeiras, podendo sofrer ainda a influência adicional do aumento das marés.

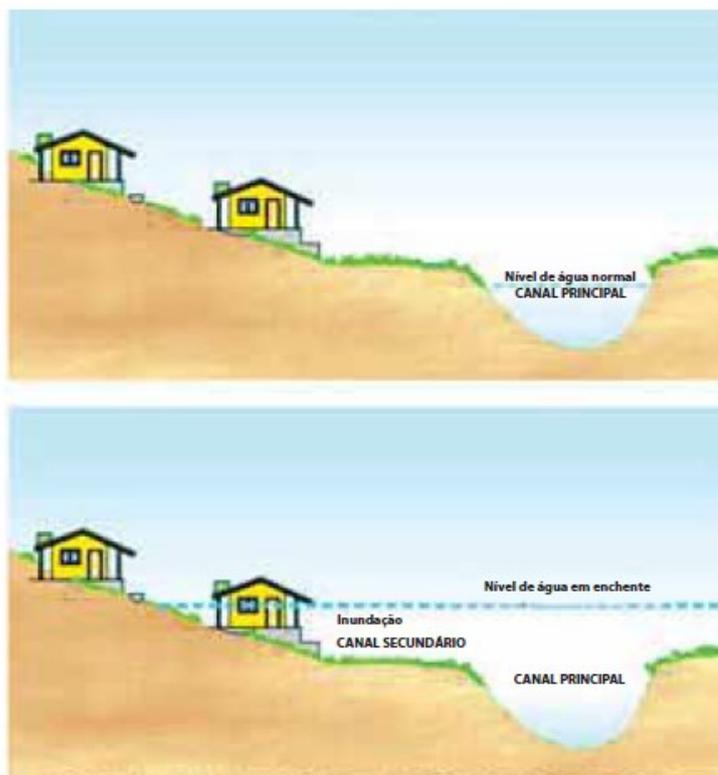


Figura 17 – Ocupação urbana de canal secundário. (SANTOS, 2007)

Em resumo, segundo o Atlas do Saneamento, IBGE (2011), pode-se destacar dois grandes impactos no sistema de drenagem em função da urbanização das bacias. “O primeiro impacto é causado pelo aumento do volume escoado, devido à impermeabilização do solo e consequente diminuição da infiltração, fazendo com que uma parcela maior da chuva se transfira para os cursos d’água da bacia, através do escoamento superficial. No segundo impacto, as enchentes naturais atingem a população que ocupa os leitos de rios por falta de planejamento do uso do solo, por ocupação indevida ou pelo não convencimento dos reais perigos envolvidos na questão. Outra possível razão seria a própria demanda de populações mais organizadas dos municípios mais populosos que, com melhores níveis educacionais e socioeconômicos, criam canais de reivindicação formais e outras formas de pressão popular por melhores serviços. A distribuição dos serviços de drenagem urbana pelos municípios segundo as Grandes Regiões do Brasil confirma as situações mais favoráveis nas áreas mais desenvolvidas. No caso das Regiões Sul e Sudeste, é onde se concentram os melhores atendimentos pelo

serviço de drenagem urbana. Situação oposta é a visualizada para a Região Norte, onde a proporção de municípios com rede de drenagem é sensivelmente menor”. (IBGE, 2011)

Aliado a tudo isso, é importante destacar que a falta de planejamento urbano adequado e a urbanização descontrolada agravam também a degradação ambiental e a degradação dos rios, não somente pelos impactos na quantidade de água mas também na qualidade da água. O aumento significativo de superfícies impermeáveis (estradas, edifícios, estacionamentos) contribui para o aumento do escoamento superficial, que não consegue ser absorvido pelo solo, aumentando o risco de inundações e levando poluentes diretamente para os corpos hídricos (SCHUELER, 1987).

A introdução de efluentes de esgoto in natura e resíduos sólidos no corpo d’água, além de outros impactos de valor ambiental geram um grande desequilíbrio da biota aquática, como instabilidade dos canais, aumento de sedimentos e alteração dos fluxos dos corpos d’água devido à modificação da sua geometria.

Diante do exposto, considera-se de grande importância a implementação de medidas de controle de enchentes, associadas ao gerenciamento da expansão urbana, com planejamento do uso e ocupação do solo, impedindo a ocupação das planícies de inundação naturais, mantendo a cobertura vegetal nos locais mais sensíveis, garantindo um percentual de permeabilidade do solo e criando a infraestrutura necessária para moradias adequadas, com sistema de drenagem eficiente.

2.2.4 Índice de Suscetibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI)

Como forma para mapear as áreas da cidade sujeitas a inundações, (MIRANDA, 2016) propôs o Índice de Suscetibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI). De modo geral, o índice considera que a suscetibilidade a inundações está ligada aos fatores físicos (antrópicos e/ou naturais) do ambiente, a partir de quatro indicadores relacionados à declividade do terreno, proximidade a cursos d’água, nível de impermeabilização do solo e influência de maré.

Na Figura 18, que apresenta o mapa com o ISMFI da área de estudo, pode-se observar que a parte oeste, onde encontra-se a cidade de Itaguaí, possuem índices predominantemente entre Alto a Muito Alto.

ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE DO MEIO FÍSICO A INUNDAÇÕES (ISMFI)

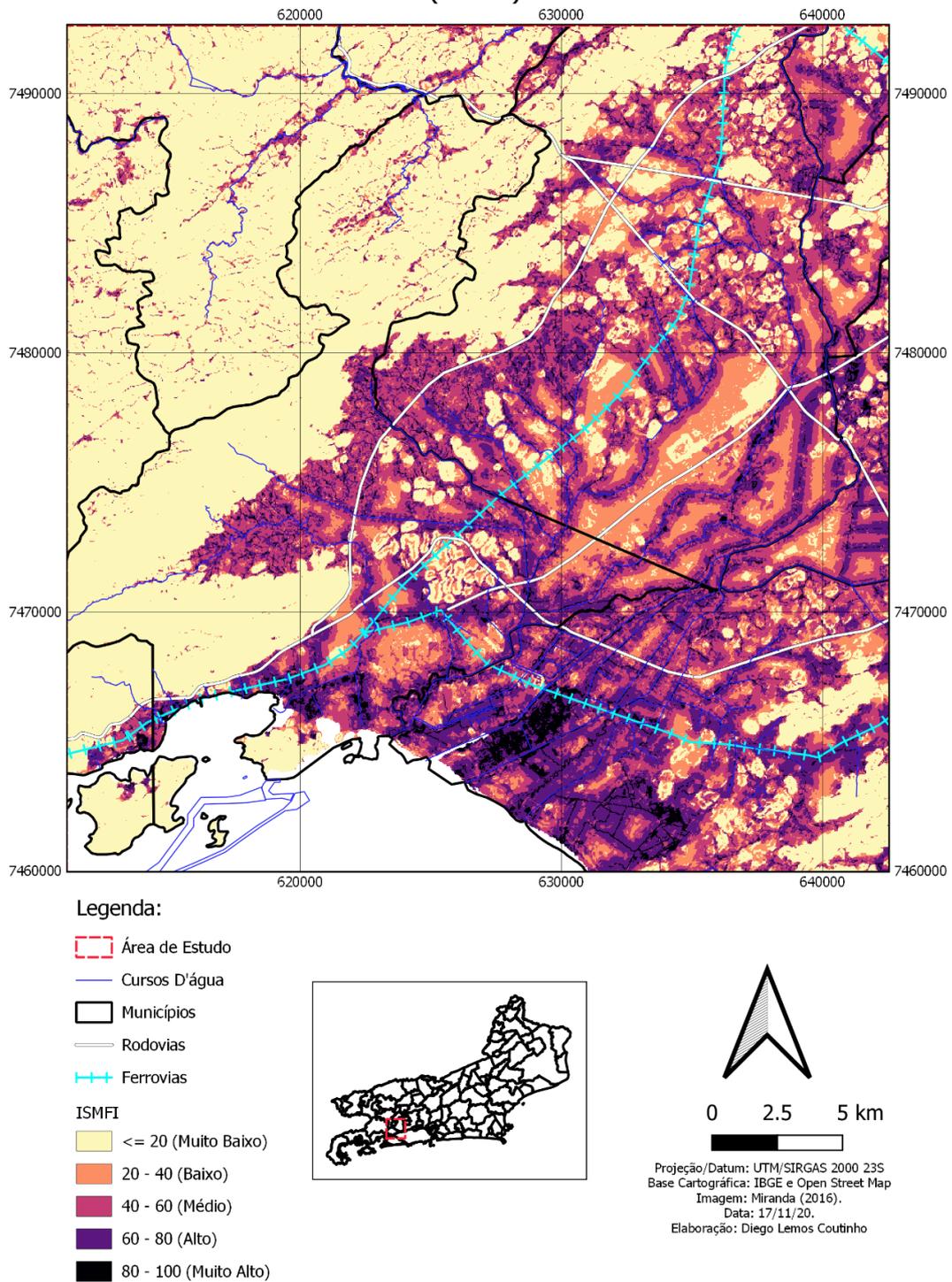


Figura 18 - Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações. Fonte: Produzido pelo autor.

2.2.5 Medidas de Controle de Inundações

A abordagem tradicional de controle de inundações, por muito tempo foi voltada apenas para soluções estruturais destinadas somente à melhoria do escoamento como: redimensionamento de canais e dutos; controle de níveis por diques; ou mesmo retardo de cheias com reservatórios artificiais; entre outros. Estas soluções são baseadas nas etapas Captar, Conduzir e Descarregar, conforme ilustrado na Figura 19, e cumpriram um papel importante no desenvolvimento do conceito de drenagem urbana, sendo atualmente ainda consideradas bastante úteis e com vasto campo de aplicação. Entretanto, as experiências mostraram que tais soluções não são capazes de acompanhar o crescimento da demanda devido ao processo de urbanização e modificação constante do uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas, tornando-as incapazes de conduzir os volumes de cheias cada vez maiores.

“Por muito tempo, o problema das inundações urbanas foi tratado sem necessariamente conectar as questões de controle do uso do solo às respostas das bacias hidrográficas. Essa visão direcionou as soluções de engenharia para transmitir rapidamente os crescentes fluxos pós-urbanização, geralmente considerando soluções isoladas de fim de linha. Nessa abordagem, os projetos convencionais de controle de inundações visavam somente aumentar a capacidade do sistema de drenagem. Conceitualmente, essa abordagem tem uma premissa intrinsecamente insustentável, pois parte da necessidade de adequar o sistema às consequências do aumento dos fluxos gerados pelo processo de urbanização, ao passo que o próprio crescimento da cidade não é contemplado.” (MIGUEZ,. REZENDE e VERÓL, 2015)



Figura 19 – Conceito Tradicional de Drenagem (BATTEMARCO, 2016)

Historicamente, a adoção de medidas meramente estruturais e com enfoque pontual, desenvolveu na sociedade um senso comum de que as medidas de controle de inundações estariam associadas apenas aos projetos e obras de engenharia. Esta ideia predominantemente sanitaria solidificou um pensamento de que os sistemas de drenagem têm apenas a função hidráulica de afastar rapidamente os volumes das cheias, transferindo-os para frente e potencializando os problemas das bacias à jusante.

Aliado a isso, esta visão enraizada na sociedade cria uma falsa sensação de segurança para a população, alimentando uma ideia equivocada de que estas obras seriam capazes de suportar as enchentes de qualquer magnitude, sem falhas. Neste contexto, o que se observa é um estímulo à ocupação indevida, muitas vezes em áreas suscetíveis a inundações e deslizamentos, e que sem a atuação do poder público no controle urbano, alimenta o processo de crescimento da vulnerabilidade a desastres naturais deste tipo.

Segundo Miguez et al. (2016), a visão convencional de mera adaptação dos sistemas de drenagem aos padrões de escoamento das águas pluviais modificados pelo processo de urbanização e alteração do uso do solo ainda é com frequência adotada, principalmente nos países periféricos como o Brasil. Nesta linha, grandes investimentos são destinados a obras de controle de inundações sem as devidas considerações das diversas relações entre as parcelas do ciclo hidrológico e o funcionamento da bacia hidrográfica tal qual um sistema. Como consequência, o poder público é obrigado a realizar recorrentes intervenções para adequar o sistema de drenagem às novas vazões de cheia, modificadas pela alteração do uso e ocupação do solo, devido a um processo de urbanização desordenado e sem planejamento.

Ao longo das últimas décadas e até os dias atuais, apesar de a passos ainda muito lentos, a tendência das medidas de controle de inundações aponta para um enfoque mais amplo, buscando soluções sistêmicas para a bacia, integrando o homem e o meio ambiente, com o objetivo maior de permitir uma convivência harmônica da população com os cursos d'água, procurando resgatar padrões de escoamento próximos daqueles anteriores à urbanização.

Pode-se dizer que estas novas tendências se iniciaram a partir de ideias embrionárias surgidas com apontamentos do Clube de Roma (Clube de Roma, 1968) e, posteriormente, com a consolidação do conceito de “Desenvolvimento Sustentável”, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (UNEP, 1972), também conhecido como “Conferência de Estocolmo”, onde novos conceitos começaram gradualmente a ser incorporados ao planejamento das cidades. Outro marco importante neste processo de evolução foi a assinatura da Agenda 21 durante a "Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento" ou "ECO-92", realizada na cidade do Rio de Janeiro, onde foram definidos os seguintes objetivos:

- Oferecer a todos, habitação adequada;

- Aperfeiçoar o manejo dos assentamentos humanos;
- Promover o planejamento e o manejo sustentáveis do uso da terra; e
- Promover assistência integrada de infraestrutura ambiental: água, esgotamento sanitário, drenagem e manejo dos resíduos sólidos.

Nestas novas diretrizes, considera-se as enchentes como fenômenos naturais e esperados nos cursos d'água e que não poderão ser evitadas. Entretanto, considera-se também que o homem pode aprender a conviver de forma menos impactante com estes fenômenos, ocupando o solo de modo a respeitar as áreas de alagamento natural da cidade e tomando as medidas necessárias para minimizar a deterioração dos corpos d'água, a vulnerabilidade aos desastres bem como os prejuízos e transtornos à população durante os períodos de cheias.

Para entender vulnerabilidade devemos considerar duas outras questões: a persistência, que é a medida do quanto um sistema, quando perturbado, se afasta do seu equilíbrio ou estabilidade sem mudar essencialmente seu estado; e a resiliência, ou seja, a capacidade de um sistema retornar a seu estado de equilíbrio, após sofrer um distúrbio (SANTOS, 2007), conforme ilustrado na Figura 20.

Estes conceitos aplicados aos sistemas da drenagem urbana, trazem para a gestão pública novos desafios de tornar as cidades cada vez mais resilientes e resistentes às inundações. Desta forma, o fundamento do conceito é que as cidades estejam preparadas para suportar as ondas de cheias através do gerenciando do uso e ocupação do solo das bacias, admitindo que certas regiões de usos menos importantes serão, de fato, alagáveis, sem gerar transtornos irreparáveis ou impedir a continuidade dos seus serviços essenciais. Desta forma, espera-se que as cidades sejam mais persistentes no sentido de que seu equilíbrio seja menos afetado pela passagem das enchentes, e ao mesmo tempo, sejam mais resilientes no sentido de que tenham a capacidade de reestabelecer o seu equilíbrio o mais rápido possível, com o mínimo de transtornos.



Figura 20 – Persistência e Resiliência de uma paisagem. (SANTOS, 2007)

Com o avanço dos conceitos, dentre as medidas de controle de inundações destacam-se práticas como dos “Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável” ou SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems) e as “Melhores Práticas de Gerenciamento” ou BMPs (Best Management Practices), com soluções que têm como objetivo a diminuição do volume de escoamento superficial, através do aumento das taxas de infiltração no solo e do amortecimento de cheias através do aumento do volume de reserva superficial. Além disso, as BMPs incluem uma preocupação adicional com a qualidade das águas lançadas nos corpos receptores.

Com as alterações climáticas, é cada vez mais crucial que as cidades adotem estratégias de gestão de águas pluviais que possam lidar com eventos de precipitação mais intensos e frequentes. O uso de Best Management Practices (BMPs) pode ajudar a minimizar os impactos das inundações e proteger infraestruturas urbanas, promovendo soluções como bacias de retenção, infraestruturas verdes, e biofiltros para controlar e reduzir o escoamento excessivo e a frequência das inundações hídricas (SCHUELER, 1987).

A infraestrutura verde, também chamada de Sistemas de Drenagem Sustentável (SuDS), inclui soluções mais naturais e ecológicas, como pavimentos permeáveis, telhados verdes, bacias de biorretenção, áreas de infiltração, lagoas de retenção e parques urbanos que atuam como esponjas. Essas soluções visam imitar os processos naturais de infiltração, retenção e evapotranspiração das águas pluviais (BUTLER e DAVIES, 2011).

Zevenbergen (2018) destaca a necessidade de planejamento integrado e a adaptação de infraestruturas existentes para implementar o conceito de “Cidade Esponja”, especialmente em países como a China, que enfrentam problemas severos de escassez de água e inundações urbanas, sendo fundamental a implementação de tecnologias para gerenciar a água de maneira mais natural e sustentável em ambientes urbanos. O conceito destaca a importância do design de espaços urbanos para absorver, limpar e reutilizar a

água naturalmente, ajudando a mitigar enchentes e aumentar a resiliência das cidades, combinando infraestrutura verde com técnicas tradicionais de controle de água.

Dentre as abordagens mais recentes destaca-se também o conceito de Soluções Baseadas na Natureza (NBS), que se refere ao uso de processos e ecossistemas naturais para lidar com desafios ambientais e sociais, como a gestão de águas pluviais, a mitigação de enchentes e a promoção da resiliência urbana, com o objetivo de integrar práticas sustentáveis no planejamento urbano e na gestão de recursos hídricos.

No Fórum Mundial da Água, de 2018, foram criticadas a dependência da infraestrutura tradicional "cinza" e destacadas a necessidade de uma abordagem equilibrada que integre soluções cinzas e verdes, sugerindo a implementação de NBS para proporcionar múltiplos benefícios, incluindo economia de custos, resiliência aos impactos climáticos e melhoria da saúde dos ecossistemas, podendo aumentar a disponibilidade de água, melhorar a qualidade da água e mitigar desastres relacionados à água por meio de processos naturais, como retenção de umidade do solo e recarga de aquíferos. (UNESCO, 2018)

Segundo Brears (2020), além de combater os efeitos negativos da expansão urbana promovendo infraestrutura verde, que melhora tanto a habitabilidade urbana quanto a qualidade ambiental, cidades que integram NBS em seu planejamento são mais resilientes aos desafios das mudanças climáticas, pois essas soluções oferecem barreiras naturais contra eventos climáticos extremos.

Entende-se que estas práticas diminuem a necessidade das medidas estruturais tradicionais, associadas somente à realização de grandes obras nas calhas dos rios e que visam prioritariamente a melhoria hidráulica dos escoamentos superficiais. O conceito de Drenagem Urbana Sustentável é baseado nas etapas captar, infiltrar e armazenar (quando possível), conduzir e descarregar, conforme Figura 21.



Figura 21 - Conceito de Drenagem Urbana Sustentável (BATTEMARCO, 2016)

Diante do exposto, as medidas atuais de controle de inundações incluem a ação conjunta de medidas estruturais e não estruturais visando tornar as cidades mais

resilientes, não somente com a construção de estruturas hidráulicas de drenagem pluvial, mas também com medidas não estruturais que incluam o planejamento e controle de uso e ocupação do solo, integrados aos Planos Diretores Urbanos (PDU).

É importante ainda destacar que, as medidas estruturais tradicionais de controle de inundações ainda são bastante úteis na prática e não poderão ser totalmente descartadas, mas sim associadas a medidas não estruturais de forma mais sustentável.

2.2.5.1 Medidas Estruturais

Medidas estruturais são intervenções diretas na infraestrutura urbana, como canalizações, barragens, reservatórios, parques longitudinais inundáveis e entre outros, com objetivo de agir diretamente sobre a distribuição de escoamentos (MIGUEZ et al., 2016).

De modo geral, pode-se afirmar que as medidas estruturais visam o controle e/ou ação corretiva dos escoamentos de enchentes e geralmente interferem de forma significativa na paisagem urbana.

Conforme ilustrado na Figura 22, as medidas estruturais podem ser: intensivas (hidráulicas), quando possuem ação direta sobre o escoamento nos rios e canais, alterando a hidrodinâmica da onda de cheia, buscando melhorar as condições hidráulicas dos sistemas, acelerando, retardando e/ou derivando o escoamento; ou extensivas (hidrológicas), quando possuem uma ação mais ampla, sob a bacia, buscando alterar a relação chuva x vazão, buscando melhorar as condições hidrológicas da bacia.

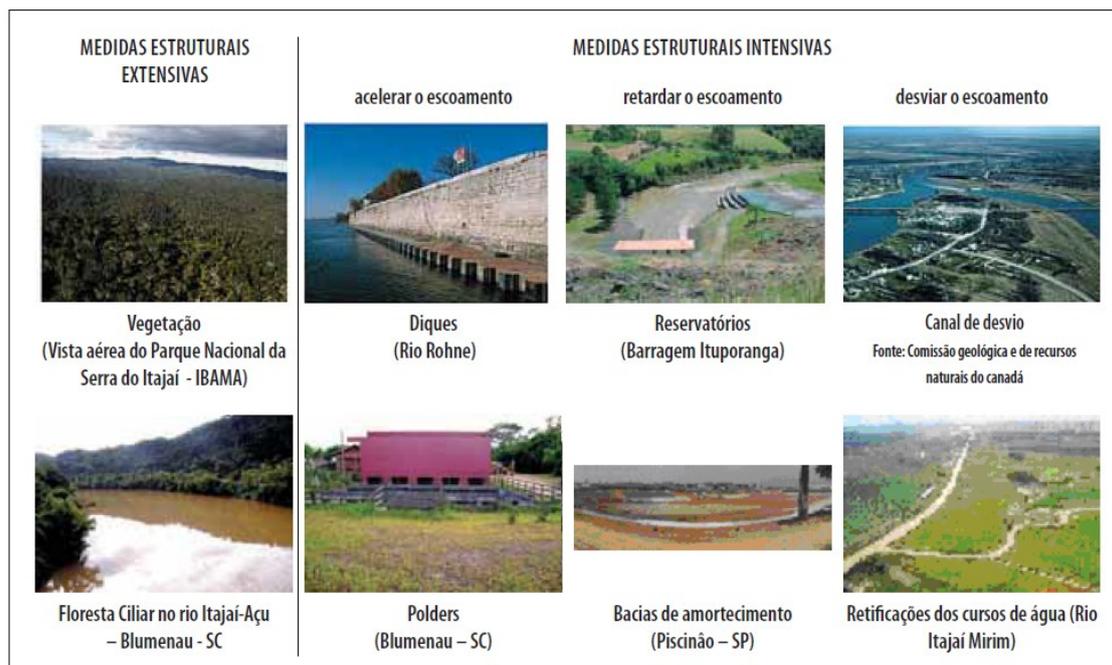


Figura 22 – Exemplos de Medidas Estruturais Extensivas e Intensivas. (SANTOS, 2007)

2.2.5.2 Medidas Não Estruturais

De modo geral, “as medidas não estruturais referem-se às ações não construtivas como leis, regulamentos, decretos, operações, ações, planos, políticas e ou programas voltados a prevenção e convivência com a problemática que buscam reduzir danos ou consequências” (FRAGA, 2018). São ações indiretas que possuem caráter preventivo e complementam as medidas estruturais no planejamento urbano que devem ser implementadas pelos gestores públicos, estimulando o envolvimento e participação da população para o seu sucesso.

As medidas não estruturais incluem ações consideradas essenciais para o controle de inundações como por exemplo, educação ambiental, plano diretores considerando as áreas inundáveis, controle de uso e ocupação do solo, preservação das áreas de proteção e cobertura vegetal (florestas e matas ciliares), sistemas de alerta, seguros contra inundações, entre outras.

Dentre as medidas de planejamento, considera-se que “o Plano Diretor é o principal instrumento que um município dispõe para organizar o seu território, as suas atividades e usos da terra, é também o meio para se atingir a desejada qualidade de vida para as populações. Com o Estatuto da Cidade (Lei 10.257 de 2001), que estabelece as diretrizes

gerais da política urbana, são definidas também as bases para a elaboração do Plano Diretor” (SANTOS, 2007).

2.3 MODELO DE URBANIZAÇÃO BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES

Segundo Forman & Godron, (1986), “a paisagem é uma área de terra heterogênea composta por um conjunto de ecossistemas interagindo, que se repete em forma semelhante ao longo da sua extensão”, sendo importante de observar a paisagem como um mosaico de diferentes componentes ecológicos interconectados, que juntos moldam o ambiente natural e humano.

O solo, a água, a vegetação, os campos agrícolas são elementos estruturais da paisagem que mantém relações entre si por meio de fluxos e ciclos, que resultam em um grau de organização, num certo espaço e num determinado tempo. O processo de urbanização e as atividades humanas interferem na organização dos elementos e desencadeiam alterações por toda cadeia, de modo que o estado de um elemento é condicionante e determinante do estado de outro elemento, e, assim, sucessivamente (SANTOS, 2007).

Neste contexto, as cidades são consideradas ambientes complexos, dotados de inúmeros fatores de influência que impulsionam, restringem e/ou proíbem o processo de expansão urbana em diferentes escalas de espaço e de tempo. Estas características fazem com que as mudanças do uso e ocupação do solo ocorram de forma não linear.

A diversidade de forças motrizes do processo de urbanização o tornam um fenômeno de difícil compreensão, podendo incluir aspectos naturais, sociais, econômicos, culturais, políticos, entre outros, englobando inúmeros “drivers” do processo de crescimento urbano, podendo destacar: relevo, clima, hidrografia, suscetibilidade a inundação, infraestrutura urbana (pavimentação, sistema de saneamento, energia elétrica, etc.), proximidade do mar, disponibilidade de empregos, vias de transporte, comércio, indústria, entre outros.

De acordo com Polidori (2004, p. 25), apesar de as abordagens tradicionais do espaço urbano sejam de manter separadas cidade e ambiente, as abordagens integradas qualificam a compreensão da cidade e da paisagem, e melhoram conceitos e práticas de planejamento urbano e ambiental.

Tendo em vista que a cidade é considerada parte do ambiente e que este se altera constantemente com a própria mudança de uso e ocupação do solo, torna-se evidente a necessidade de articulação entre o planejamento urbano e planejamento ambiental, com base na adoção de medidas de controle de crescimento urbano das cidades.

Considerando que o processo de ocupação urbana é de difícil compreensão, devido à elevada quantidade de fatores forçantes interrelacionados, diante da necessidade de soluções e ferramentas de apoio ao planejamento urbano que auxiliem na compreensão das dinâmicas de desenvolvimento urbano bem como na geração de cenários futuros para tomadas de decisões, os modelos da paisagem se destacam como úteis ferramentas para o planejamento urbano.

Os modelos LULC (Land Use and Land Cover), de uso e cobertura do solo, “são úteis para entender as trajetórias futuras do processo de degradação e fornecer suporte para explorar e delinear estratégias de mitigação e adaptação” (VIEIRA, TOMASELLA, *et al.*, 2020).

Segundo Soares-Filho et al (2009), o desenvolvimento de modelos espaço-temporais, nos quais o estado ou o atributo de certa localização geográfica muda com o passar do tempo em resposta a um conjunto de forças motoras, é um pré-requisito crucial para a modelagem ambiental e, portanto, abre uma vasta gama de possibilidades para a representação dos fenômenos dinâmicos.

Tratando-se especificamente de aplicações em crescimento das cidades, tendo em vista a necessidade de modelar a dinâmica da paisagem urbana, como um sistema complexo e auto-organizado, integrado ao ambiente natural, destacam-se os modelos baseados em autômatos celulares (CA).

Segundo Peres e Polidori (2009, p. 3):

“CA possibilitam uma convergência operacional de modelagem do ambiente urbanizado e o não urbanizado por diferenciação morfológica, por resistência espacial e por análise de limiares; conceitos de interesse nos campos da morfologia urbana, ecologia da paisagem e ecologia urbana, respectivamente. Soma-se ainda a própria dinâmica dos CAs, a capacidade de capturar processos

derivados da vizinhança espacial, a natural compatibilidade com os grids usados em sistemas de informações geográficas (SIG), a crescente disponibilidade de imagens de satélite e a popularização de conhecimentos em geocomputação”.

Os modelos de paisagem baseados em CA são importantes ferramentas para o planejamento das cidades pois realizam simulações de mapas de uso e ocupação do solo, obtidos através de comparação de mapas observados em períodos diferentes, juntamente com mapas de variáveis forçantes do(s) processo(s) de mudança (“drivers”) e que, associados a modelos estatísticos de pesquisa de padrões, são capazes de capturar e reproduzir efeitos da dinâmica local das transformações da paisagem.

Neste tipo de modelagem, analisar a paisagem e extrair dela componentes com comportamentos similares é um passo importante para ouvir o que a paisagem tem a nos dizer e para entendê-la. É perfeitamente possível identificar bairros ou vilas que apresentam padrões residenciais e de ocupação similares, determinados por características culturais, sociais e econômicas. Neste caso, é visível como a estrutura urbana define as suas funções. (SANTOS, 2007)

Segundo Almeida, et al (2002), os modelos CA aplicados a uso e ocupação do solo baseiam-se na ideia de que áreas diferentes em uma cidade podem exibir padrões de crescimento local auto-organizados devido a diferentes ações, resultando em padrões de crescimento auto similares. E ainda, a mudança ocorre puramente como uma função do que acontece na vizinhança imediata de qualquer célula particular. Em outras palavras, espera-se que o comportamento dos autômatos celulares em sua vizinhança, produto das decisões locais, quando reproduzido em escala global consigam representar os padrões da dinâmica do crescimento da cidade como um todo.

Os modelos baseados em autômatos celulares se destacam como uma excelente ferramenta por causa da sua flexibilidade estrutural à simulação “bottom-up”. (GONG, YANG, *et al.*, 2019)

É importante destacar que os modelos CA não preveem onde e nem quando haverá alteração da paisagem em função de eventos extremos, crises econômicas, por exemplo. Tais modelos reproduzem a dinâmica média observada em períodos anteriores, indicando

tendências futuras de mudanças que possam ou não possam ocorrer. (REZENDE, CARRIELLO, *et al.*, 2018)

2.3.1 O Estado da Arte

Segundo Almeida et al (2002), a maioria dos modelos urbanos até a década de 60 foram desenvolvidos por programas políticos e eram limitados às previsões mais significativas de rápido crescimento urbano e podiam apenas ser usados para análises comparativas de mudanças de longo termo onde assume-se que um futuro sistema atingiu o equilíbrio com o tempo.

Os modelos eram construídos tentando simular a dinâmica individual de cada fator forçante (driver) das mudanças por meio dos dados disponíveis para representá-las. Porém, estas dinâmicas eram consideradas complexas e impossíveis de serem todas representadas para compor o fenômeno como um todo. Desta forma, estes modelos mostraram-se inadequados, principalmente na modelagem de cidades de países em desenvolvimento, onde são comuns fenômenos de explosões de crescimento. Neste contexto, os modelos de autômatos celulares (CA) tornaram-se populares principalmente pela sua simplicidade, sendo capazes de replicar os processos complexos de mudanças urbanas sem serem sobrecarregados com suposições teóricas complexas.

Os primeiros modelos urbanos de autômatos celulares (CA) tiveram carácter mais pedagógico, com destaque aos modelos de Tobler (1970) aplicado em Detroit e o de Couclelis (1989) aplicado em Los Angeles.

A partir da década de 90 os modelos CA ganharam maior difusão com inúmeras aplicações para problemas urbanos de ordem prática, como os modelos de Wu (1996 e 1998), Xie (1996), White and Engelen (1993, 1997), Clarke, Hoppen, and Gaoydos (1997), Batty (1998), White, Engelen, and Uljee (1998), Clarke and Gaydos (1998), Xie e Sun (2000), Li e Yeh (2000), Yeh e Li (2002) e Torrens e O'Sullivan (2001).

No contexto das produções científicas brasileiras, destacam-se: Almeida (2002); Polidori (2004); Godoy e Soares-Filho (2007); Soares-Filho, Rodrigues e Costa (2009); Peres e Polidori (2009); e Rezende e Carriello *et al* (2018).

Segundo Ahmed, S. J. e Bramley, G. (2015), os principais fatores que difundiram o uso de CA na modelagem de mudança de uso do solo e crescimento urbano são:

- Os avanços nas tecnologias GIS;
- Disponibilidade de dados de Sensoriamento Remoto; e
- A sua capacidade de reproduzir sistemas urbanos complexos de forma realística, incorporando vários ramos das teorias complexas sem ser sobrecarregado com teorias assumidas.

2.3.2 Dinâmica do Modelo

De forma resumida, pode-se definir a estrutura do modelo dividindo-a em dois módulos:

- Módulo Quantitativo de Demanda: estima a demanda total de crescimento urbano; e
- Módulo de Alocação Espacial: determina o arranjo espacial da demanda. Implementado com base em probabilidades.

A dinâmica do modelo consiste em um mecanismo de simulação de mudança, ou seja, a quantidade de células que sofrerá alteração de determinado uso, e a partir deste, a sua distribuição locacional nas regiões com maiores probabilidades de transição. Segundo Almeida, et al (2002), o modelo consiste basicamente em determinar as probabilidades de transição que governam as mudanças no uso da terra como funções de uma variedade de fatores socioeconômicos e de infraestrutura, cujas relações com mudanças nos diferentes tipos de uso são medidas através de correspondências espaciais, semelhante aos métodos de sobreposição de mapa. A estrutura formal usada para determinar as probabilidades serão bayesianas, envolvendo uma atualização de probabilidades anteriores (“Prior”) através dos “Pesos de evidência”, fornecidos por esses fatores. Essas probabilidades são então usadas em vários procedimentos heurísticos que selecionam células específicas a serem desenvolvidas, de acordo com o ranking de regras determinadas pelas operações celulares. Assim, de forma resumida:

- A simulação de urbanização é baseada na estimativa de transição de uso do solo, usando métodos probabilísticos elementares inspirados na teoria de “Bayes” para aplicação do Método chamado “Peso de Evidências”;
- A probabilidade de mudança de uso do solo direciona o modelo de autômatos celulares baseado nas células vizinhas, implementada através de algoritmos de alocação empírica de uso do solo; e

- Vários fatores naturais, socioeconômicos, de infraestrutura e outros podem ser combinados para obter a probabilidade de mudança de usos do solo.

2.3.2.1 Dinâmica da Quantificação da Mudança

O sistema definido para o funcionamento do modelo consiste em uma área plana matricial, que contém a projeção de toda a região da paisagem de interesse, conforme ilustrado na Figura 23.

A área é visualizada como uma matriz bidimensional, dividida em N células (pixels), de dimensões iguais, onde qualquer célula i possui uma única classificação de estado k , na figura representada por cores, e que na aplicação dos modelos de urbanização se refere aos tipos de uso e cobertura do solo, que podem se modificar a cada passo de tempo t .

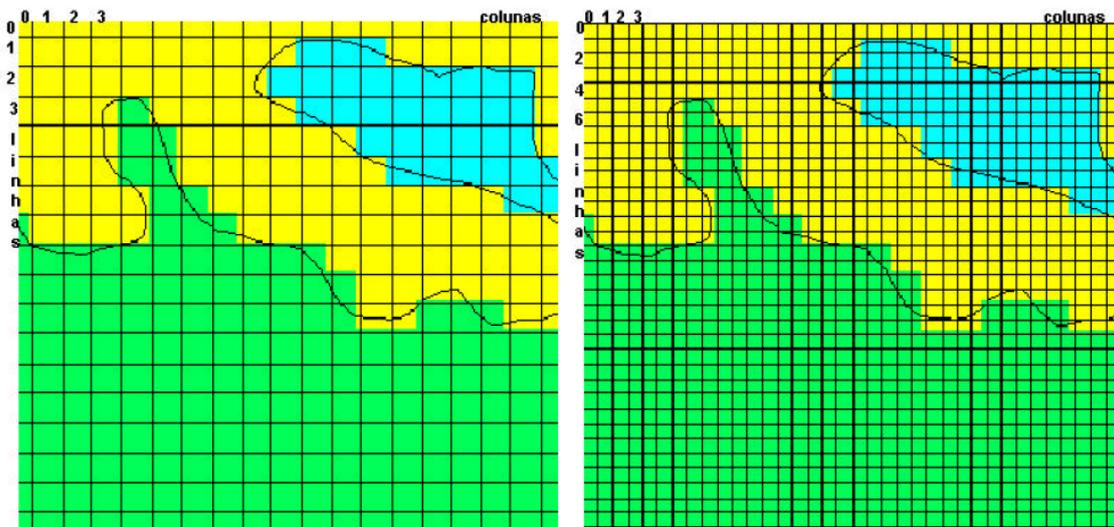


Figura 23– Representação da paisagem no modelo baseado em autômatos celulares. (CAMARA e MEDEIROS, 1998)

Com base no exposto, define-se os seguintes parâmetros:

- N: Número de células (pixels) com dimensões iguais;
- M: Número de classes em função do tipo de uso e cobertura do solo;
- τ : Número de passos de tempo;
- i ou j : Identificadores da localização das células, onde $i = \{1, \dots, N\}$ e $j = \{1, \dots, N\}$;
- k : identificador da classe do solo, onde $k = \{1, \dots, M\}$;

- l : identificador da classe de solo de interesse, que no presente estudo se refere à classe “Urbana”, onde $l \in k$; e
- t : identificador do passo de tempo, onde $t = \{1, \dots, \tau\}$.

Ressalta-se que $k = \{1, \dots, M\}$ são estados mutuamente exclusivos, ou seja, uma determinada célula i , possui um único tipo de solo k , no tempo t .

2.3.2.1.1 Transição

Considerando a alteração constante do estado k , de uma célula i qualquer, a cada passo de tempo t e ainda um determinado tipo de solo l de interesse, na análise da dinâmica de transição em uma escala a nível celular, é importante definir o parâmetro $N_i^k(t)$, conforme equação 1, para representar a notação do estado de cada célula, segundo o estado de interesse l do modelo.

$$\begin{aligned} N_i^k(t) &= 1, \text{ para } k = l \\ N_i^k(t) &= 0, \text{ para } k \neq l \end{aligned} \quad (1)$$

Tendo em vista que os tipos de solo k são estados mutuamente exclusivos, tem-se:

$$\sum_k N_i^k(t) = 1 \quad (2)$$

Os parâmetros $N_i^k(t)$ em nível celular podem ser agrupados em uma escala global considerando todas as células e/ou todos os tipos de solo, permitindo uma análise da transição em nível agregado através de $N^k(t)$ e $N(t)$, conforme equações 3 e 4 abaixo:

$$N^k(t) = \sum_i N_i^k(t) \quad (3)$$

$$N(t) = \sum_k N^k(t) = \sum_k \sum_i N_i^k(t) = N \quad (4)$$

Tendo em vista que o número de células é fixo em qualquer tempo t , pode-se afirmar que mesmo com a dinâmica de transição que ocorre em cada célula, em análise de nível agregado, é possível observar que o número de células $N = N(t)$ se conserva no sistema. (ALMEIDA, BATTY, *et al.*, 2002)

Considerando ainda que as células são todas das mesmas dimensões, a densidade total $\rho^k(t)$, de uma classe qualquer k , é dada pela equação:

$$\rho^k(t) = \frac{N^k(t)}{N} \quad (5)$$

i. Transição Celular

Em função da mudança de uso do solo, a transição em nível celular ΔN_i^{kl} de uma célula i qualquer, do tipo k no tempo t , para um tipo l no tempo $t+1$, é definida pela equação 6.

$$\Delta N_i^{kl} = 1, \quad \text{se } N_i^k(t) = 1 \text{ e } N_i^l(t+1) = 1 \quad (6)$$

A equação 6 significa que a transição assume valor 1, $\Delta N_i^{kl} = 1$, no caso de existir uma célula i , de um tipo k , e que sofra alteração para o tipo l , na passagem do tempo t para $t+1$. Caso não se satisfaçam as condições da equação, a transição em nível celular assume o valor nulo, ou seja, $\Delta N_i^{kl} = 0$.

ii. Transição Agregada

A transição em nível agregado ΔN^{kl} de todo o sistema, considerando a mudança de uso e a ocupação do solo de um tipo k para o tipo l , é dado pelo somatório das transições em nível celular ΔN_i^{kl} de todas as células, conforme equação 7.

$$\Delta N^{kl} = \sum_i \Delta N_i^{kl} \quad (7)$$

Embora o modelo trabalhe em um nível celular, é usual considerar essas transições em nível agregado pois isso possibilita que a dinâmica de longo termo seja articulada de maneira simples e direta (ALMEIDA, BATTY, *et al.*, 2002). É importante destacar que o número total de células do tipo l (urbanas, por exemplo), no tempo $t+1$, é dado pelo somatório das transições agregadas de todos os tipos k (incluindo l) para tipo l , conforme equação 8. Neste exemplo, o somatório de todas as células não urbanas que se tornaram urbanas.

$$N^l(t+1) = \sum_k \Delta N^{kl} \quad (8)$$

2.3.2.1.2 Mudança Agregada (Crescimento ou Declínio)

A mudança em nível agregado ΔN^k representa a quantidade de células de um tipo qualquer k que sofreu alteração, no passo de tempo t para $t+1$, dado pela equação 9.

$$\Delta N^k = N^k(t+1) - N^k(t) \quad (9)$$

Tendo em vista que o número de células do sistema se conserva em todos os passos de tempo, o somatório das mudanças agregadas ΔN^k de todos os tipos de uso do solo k é sempre nula, conforme equação 10.

$$\sum_k \Delta N^k = 0 \quad (10)$$

2.3.2.1.3 Probabilidade de Transição

A probabilidade de transição P^{kl} de um tipo de solo k para um determinado tipo de solo l é dada pela equação 11.

$$P^{kl} = \frac{\Delta N^{kl}}{N^k(t)} \quad (11)$$

onde $\sum_l P^{kl} = 1$

Define-se as probabilidades $\pi^k(t)$, de uso do solo k no tempo t , e $\pi^l(t+1)$, de uso do solo l no tempo $t+1$, conforme equações 12 e 13, respectivamente. Estes parâmetros representam os percentuais dos totais de células do tipo k (no tempo t) e do tipo l (no tempo $t+1$).

$$\pi^k(t) = N^k(t)/N \quad (12)$$

$$\pi^l(t+1) = N^l(t+1)/N \quad (13)$$

Apresentando as equações acima em formato matricial, da cadeia de Markov de primeira ordem, tem-se:

$$\pi(t+1) = \pi(t) * P \quad (14)$$

Onde P é a matriz que contém as probabilidades de transição, de todos os tipos possíveis de solo k para l , que representa matematicamente a transformação da Matriz de Probabilidade ao longo do tempo.

Desta forma, assumindo que as condições desta transformação não se alteram ao longo do tempo, ou seja, que a matriz de probabilidade de transição P seja constante, pode-se equacionar o processo no formato da cadeia de Markov de ordem τ , conforme o passo de tempo $t + \tau$, através da equação 15.

$$\pi(t + \tau) = \pi(t) * P^\tau \quad (15)$$

No processo de Markov, hipoteticamente, o sistema atinge o equilíbrio quando $\pi \approx \pi P^\tau$, ou seja, para uma matriz de probabilidade constante ao longo do tempo, assume-se

que existe um passo de tempo τ , suficientemente grande, para que as transformações aplicadas pelas condições de transição se tornam insignificantes a cada passo de tempo. Neste tempo, considera-se que o processo de transformação atingiu seu limite e que o sistema atingiu seu equilíbrio.

2.3.2.2 *Dinâmica de Locação da Mudança*

A dinâmica de locação do modelo consiste em alocar usos de terreno de vários tipos nas células em um nível desagregado de zonas. Mais especificamente, os processos locais distribuem espacialmente as quantidades de mudança ΔN^k , definindo as células do tipo k que sofrerão alteração para determinado tipo de uso do solo l , num determinado passo de tempo da simulação. Este processo ocorre com base na definição de “E” fatores forçantes (sociais, econômicos, biofísicos e de infraestrutura) que exercem influência no fenômeno de urbanização e que irão determinar no modelo a distribuição das probabilidades em nível celular. Desta forma, “assume-se que há um conjunto de probabilidades em um nível celular que é usado para tomar decisões sobre qual mudança de uso do solo é mais provável” (ALMEIDA, BATTY, *et al.*, 2002).

Conforme representado na equação 16, a probabilidade de transição $p_i^{kl}(t)$ de cada célula i é obtida inicialmente através da função $f(\bullet) = f(X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^E)$, que promove a cada passo de tempo a atualização bayseana, com base nas probabilidades condicionantes dos “E” múltiplos fatores forçantes $X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^E$, selecionados para representarem o processo de urbanização no modelo. Estes fatores são escolhidos por serem influenciadores do processo de transição (“drivers”), matematicamente, eles representam os pesos do critério de definição das localizações das mudanças. Desta forma, a probabilidade de mudança de cada célula será em função do somatório dos “Pesos de Evidência” W_i^E , associados a cada um dos fatores $X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^E$.

$$p_i^{kl}(t) = \Theta[f(X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^E), g(N_i^k(t), N_i^l \in \Omega_i, l \in M)] \quad (16)$$

Após a aplicação da função $f(\bullet)$, as probabilidades de transição são modificadas por duas operações denominadas “Expander” e “Patcher”, que operam entre as células vizinhas à célula i , com base na presença ou ausência das células de interesse tipo l . Estes operadores têm como objetivo a seleção das células que receberão a mudança de tipo de uso do solo, com base nas suas probabilidades de transição. Eles simulam

respectivamente, os mecanismos de expansão e sementeira dos aglomerados das células do tipo l , que podem ser as manchas urbanas observadas no crescimento das cidades, por exemplo.

Neste exemplo, operador “Expander” atua nas proximidades das células existentes do tipo l (urbanas), expandindo ou contraindo a mancha através da alocação da mudança nas suas células vizinhas. Já o operador “Patcher”, atua na geração de novos fragmentos da mancha urbana, fora da vizinhança. Estes fragmentos gerados pelo “Patcher” atuam como sementes, semeando novos aglomerados urbanos em áreas até então não urbanizadas. Em continuidade ao processo, os novos fragmentos, sofrendo expansão através da função “Expander”, irão impulsionar o desenvolvimento urbano na sua vizinhança, criando novos aglomerados urbanos. Os procedimentos de funcionamento destes operadores estão detalhados no item 2.3.3.3.

No modelo, a cada aplicação dos operadores, o grupo de probabilidades é normalizado, de modo que $\sum_{k,l} p_i^{kl}(t) = 1$, e depois é organizado em ordem decrescente, identificando as transições de tipo de solo que possuem as maiores probabilidades de ocorrência. Por fim, o algoritmo de Monte Carlo, baseado em um número aleatório, é usado para escolher a transição no passo de tempo t .

A transição de uso do solo para cada célula é dada pelas equações 17 e 18.

$$Q_i^{kl} = \frac{p_i^{kl}}{\sum_l p_i^{kl}} \quad (17)$$

$$\sum_l Q_i^{kl} = \mathbf{1} \quad (18)$$

De modo a obter a probabilidade de transição $\pi_i^l(t+1)$ no tempo seguinte $t+1$, de acordo com a equação 14, aplica-se a transição de Markov à probabilidade $\pi_i^l(t)$, substituindo a matriz P por Q_i^{kl} , obtendo a equação 19.

$$\pi_i^l(t+1) = \sum_k \pi_i^k(t) Q_i^{kl} \quad (19)$$

Apresentando a equação 19 no formato geral matriz-vetor, tem-se as equações 20 e 21.

$$\pi_i(t+1) = [\pi_i^1(t) \quad \dots \quad \pi_i^k(t) \quad \dots \quad \pi_i^M(t)] \begin{bmatrix} Q_i^{1l} \\ \vdots \\ Q_i^{kl} \\ \vdots \\ Q_i^{Ml} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\pi_i(t+1) = \pi_i(t)Q \quad (21)$$

2.3.3 Mecanismos do Modelo

2.3.3.1 Pesos de Evidência (Atualizações Bayesianas)

Os Pesos de Evidência representam a influência de cada variável na composição da probabilidade de uma transição qualquer $i \rightarrow j$, de uma classe i para uma classe j , no processo de mudança. No modelo, estes parâmetros “são usados para ponderar a influência de cada variável no cálculo da probabilidade da transição $i \rightarrow j$, muito úteis para identificar espacialmente as áreas mais favoráveis para mudança” (SOARES-FILHO, RODRIGUES e COSTA, 2009).

Pesos de evidência são um método quantitativo para combinar evidências em apoio a uma hipótese. O método foi originalmente desenvolvido para aplicação não espacial em diagnósticos médicos, no qual a evidência consistia em um conjunto de sintomas e a hipótese era do tipo "esse paciente tem doença x". Para cada sintoma, foi calculado um par de pesos, um para a presença do sintoma, outro para a ausência do sintoma. A magnitude dos pesos dependia da associação medida entre o sintoma e o padrão da doença em um grande grupo de pacientes. Os pesos poderiam então ser usados para estimar a probabilidade de um novo paciente contrair a doença, com base na presença ou ausência de sintomas (KEMP, G.F. e RAINES, 1999).

A probabilidade condicional permite inferir a probabilidade de ocorrer um evento A , sabendo-se que já ocorreu um evento B , atendendo ao conceito de probabilidades “a priori” e “a posteriori” de ocorrência de um determinado evento. Esta afirmação está fundamentada na Teoria de Bayes.

De modo a conceituar a Teoria de Bayes, na Figura 24, tem-se: a área de estudo A , a ocorrência de um evento R , de mudança do uso da terra de “Não-urbano” para “residencial”, e uma evidência ou variável explicativa (forçante) S , que neste caso indica a disponibilidade de suprimento de água no local. Considera-se ainda todas essas variáveis espacialmente independentes. Ou seja, as variáveis que explicam o fenômeno não apresentam correlação entre si.

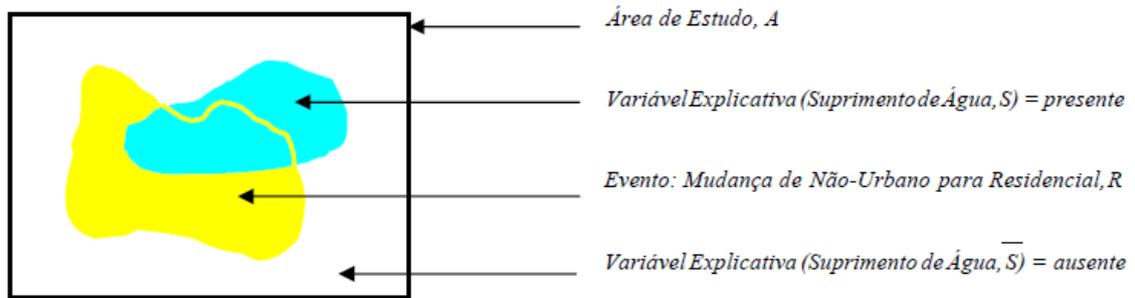


Figura 24 – Esquema Ilustrativo da Teoria de Bayes e do método de pesos de evidências. (ALMEIDA, 2004)

A aplicação do teorema consiste basicamente em determinar através da equação 22, a probabilidade de ocorrência do evento R (encontrar a classe residencial R) tendo em vista a presença da evidência S (suprimento de água) no local.

$$P(R|S) = \frac{P(R \cap S)}{P(S)} \quad (22)$$

Onde:

- $P(R|S)$ é a probabilidade condicional de ocorrência do evento de transição R, dada a presença da variável explicativa ou evidência S;
- $P(R \cap S)$ é o conjunto da interseção de R e S, igual à proporção da área das células onde ocorrem R e S juntos; e
- $P(S)$ é a probabilidade de ocorrência da evidência S.

Na aplicação prática deste teorema no modelo, a princípio, considera-se a transição controlada por um único fator forçante X, responsável por influenciar a probabilidade de mudança em um passo de tempo t. E definem-se os seguintes parâmetros:

- ΔN : Mudança do tipo de uso e cobertura do solo da classe k para l;
- X: Fator forçante (“driver”) do processo;
- $P(\Delta N)$: Probabilidade “a priori” de ocorrência da mudança ΔN ; e
- $P(\Delta N|X)$: Probabilidade “a posteriori” de ocorrência da mudança ΔN , atualizada de acordo com a ocorrência do fator forçante X.

Baseado na teoria de Bayes, a Probabilidade “a priori” $P(\Delta N)$ de ocorrência da mudança ΔN é atualizada de um passo de tempo para outro considerando a ocorrência de um fator forçante X, resultando na Probabilidade “a posteriori” $P(\Delta N|X)$ de ocorrência da mudança ΔN , dada a ocorrência do fator forçante X, conforme equação 22.

$$P(\Delta N|X) = P(\Delta N) \frac{P(X|\Delta N)}{P(X)} \quad (23)$$

Analogamente, a equação 23 apresenta a probabilidade de não ocorrência de mudança $\overline{\Delta N}$.

$$P(\overline{\Delta N}|X) = P(\overline{\Delta N}) \frac{P(X|\overline{\Delta N})}{P(X)} = 1 - P(\Delta N|X) \quad (24)$$

No caso do processo de urbanização, sabe-se que grande parte dos fatores forçantes são variáveis binárias, indicando apenas a presença ou ausência de infraestrutura urbana, áreas de proteção, áreas suscetíveis a alagamentos, entre outros, por exemplo. Para trabalhar com estes fatores, como forma de comparar as duas probabilidades adota-se a função “odds” $O(\bullet)$, dada pela equação 24.

$$O(\Delta N|X) = \frac{P(\Delta N|X)}{P(\overline{\Delta N}|X)} \quad (25)$$

Substituindo as equações 22 e 23 na equação 24, obtém-se a equação 25.

$$O(\Delta N|X) = O(\Delta N) \frac{P(X|\Delta N)}{P(X|\overline{\Delta N})} \quad (26)$$

Em análise à equação 25, observa-se que o termo $P(X|\Delta N)/P(X|\overline{\Delta N})$, chamado “Termo de Suficiência”, é o responsável por atualizar $O(\Delta N)$ devido à ocorrência do fator X, a cada passo de tempo.

Aplicando a função logaritmo na equação 25, tem-se:

$$\log[O(\Delta N|X)] = \log[O(\Delta N)] + \log \left[\frac{P(X|\Delta N)}{P(X|\overline{\Delta N})} \right] \quad (27)$$

$$\text{logit}[\Delta N|X] = \text{logit}[\Delta N] + \log \left[\frac{P(X|\Delta N)}{P(X|\overline{\Delta N})} \right] \quad (28)$$

Desta forma, define-se o Peso de Evidência Positivo W^+ , do fator X em relação ao fenômeno de transição, de acordo com as equações 29 e 30.

$$\text{logit}[\Delta N|X] = \text{logit}[\Delta N] + W^+ \quad (29)$$

$$W^+ = \log \left[\frac{P(X|\Delta N)}{P(X|\overline{\Delta N})} \right] \quad (30)$$

Analogamente, pode-se definir o Peso de Evidência Negativo W^- , do fator X em relação ao fenômeno de transição, conforme apresentado nas equações 31 e 32.

$$\text{logit}[\Delta N|\bar{X}] = \text{logit}[\Delta N] + W^- \quad (31)$$

$$W^- = \log \left[\frac{P(\bar{X}|\Delta N)}{P(\bar{X}|\Delta \bar{N})} \right] \quad (32)$$

2.3.3.2 Probabilidades Locacionais

Com base nas equações 29 a 32, considerando o processo de transição controlado por múltiplos fatores forçantes $\bar{x}_i^e = \bar{x}_i^1, \bar{x}_i^2, \dots, \bar{x}_i^E$, com seus pesos de evidência positivos e negativos associados, $\bar{w}_{ie} = \bar{w}_{i1}, \bar{w}_{i2}, \dots, \bar{w}_{iE}$, a atualização das probabilidades de transição de uma célula i , do tipo k para l , é dada pela equação 33.

$$\text{logit}[\Delta N_i^{kl}|\bar{X}_i^1, \bar{X}_i^2, \dots, \bar{X}_i^E] = \text{logit}[\Delta N_i^{kl}] + \sum_e \bar{w}_{ie} \quad (33)$$

Aplicando a função exponencial na equação 33, atualizada pelos múltiplos fatores forçantes $\bar{x}_i^e = \bar{x}_i^1, \bar{x}_i^2, \dots, \bar{x}_i^E$, obtém-se a probabilidade de transição $p_i^{kl}(t+1)$, “a posteriori”, dada pela equação 34.

$$p_i^{kl}(t+1) = \Psi \left[\frac{p_i^{kl}(t)}{1-p_i^{kl}(t)} \right] \cdot e^{\sum \bar{w}_{ie}} \quad (34)$$

Onde $p_i^{kl}(t)$ é a probabilidade de transição “a priori” e Ψ é uma constante de normalização aplicada para garantir que as probabilidades tenham somatório total 1.0.

2.3.3.3 Operadores de Transição

A dinâmica de transição ocorre selecionando-se, através dos operadores “Expandir” e “Patcher”, as células com maiores probabilidades de mudança (AHMED e BRAMLEY, 2015). Em outras palavras, os operadores de transição são responsáveis por identificar as células que sofrerão alteração de classe, de acordo com suas regras de operação, identificando suas vocações para a mudança conforme suas probabilidades de transição.

No processo de seleção das células destinadas às transições urbanas, por exemplo, o “Expandir” seleciona as células “não urbanas” próximas às aglomerações urbanas, enquanto o “Patcher” identifica células para a geração de novos fragmentos urbanos, que por sua vez, poderão sofrer expansão nas iterações seguintes e se tornarem novas aglomerações urbanas, através da operação do “Expandir”. Assim, os operadores atuam na alocação da mudança de forma combinada, dividindo-se percentualmente entre “Patcher” e “Expandir”, em proporção previamente definida, por meio dos parâmetros

de ajuste do modelo. Os percentuais de células a serem operadas por cada operador é um dos principais parâmetros de entrada do modelo uma vez que definem o número de células que serão alocadas para cada tipo de transição, por expansão ou por fragmentação. Tais parâmetros devem ser cuidadosamente ajustados nas fases de calibração do modelo pois definem toda a dinâmica de transição da simulação.

Desta forma, quando as transições no uso da terra forem finalmente escolhidas, esses algoritmos são operados de forma a garantir que o total do número de células associadas a cada transição geral, dada por ΔN^{kl} , seja atendido (ALMEIDA, BATTY, *et al.*, 2002).

2.3.3.3.1 “Expander”

De modo geral, o operador “Expander” reproduz o processo de expansão (ou contração) das aglomerações de células já existentes, realizando a transição de uso do solo nas suas fronteiras e alterando as suas formas e dimensões. Ao longo das iterações, os fragmentos em expansão podem se unir em grandes aglomerações de células, que no caso das transições da urbanização, formam as grandes manchas urbanas.

Segundo Almeida (2002), o processo do operador “Expander” segue os seguintes passos:

- Identificação das células que fazem fronteira com uma determinada célula i ;
- Atualização das probabilidades para o passo seguinte, de acordo com a equação 34;
- Escolhe as transições mais apropriadas deste grupo reduzido;
- Para cada célula do tipo l é associado um conjunto de células de fronteira $k \neq l$, que serão as células candidatas à conversão;
- Ponderação das probabilidades de transição de k para l , de acordo com a quantidade de células do tipo l entre as 8 células vizinhas Ω_i , conforme equação 35; e
- Amostragem aleatória que identifica as maiores probabilidades do conjunto para integrar um grupo mais reduzido. Esta seleção é feita heurísticamente com conceitos da técnica de Monte Carlo.

$$\hat{p}_i^{kl}(t+1) = \gamma \left[\frac{\sum_{j \in \Omega_i} N_j^l(t)}{8} \right] \cdot p_i^{kl}(t+1) \quad (35)$$

Onde γ é um fator de normalização e Ω_i a vizinhança “Moore” definida pelas 8 células vizinhas à célula i .

A probabilidade de transição de solo explicada por modelos estatísticos apenas reflete o processo auto organizacional, ou seja, reproduzindo os padrões de crescimento observados internamente pelas forças na área do modelo (AHMED e BRAMLEY, 2015).

2.3.3.3.2 “Patcher”

O operador “Patcher” simula o processo de semeadura de novos fragmentos, alocando a mudança de uso do solo em locais onde ainda não há células do tipo l , mas que possuem os maiores potenciais de transição. Este é um fenômeno espontâneo, impulsionado exogenamente por fatores externos à área da mudança.

Segundo Almeida (2002), o processo do operador “Patcher”:

- Identifica as células não urbanas $k \neq l$; e
- Certifica-se de que todas as células da sua vizinhança também não são urbanas e de que possuem potencial para conversão para l . Se uma célula for do tipo l e houver outras células do tipo l ao seu redor, isso configuraria células do tipo fronteira a serem operadas pela função “Expander”.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

A metodologia para o desenvolvimento do trabalho foi apresentada em duas etapas principais: **1ª Etapa)** Análise da dinâmica do desenvolvimento urbano; e **2ª Etapa)** Análise de cenários, considerando a implementação de medidas de controle de ocupação urbana, conforme fluxograma geral, apresentado na Figura 25.

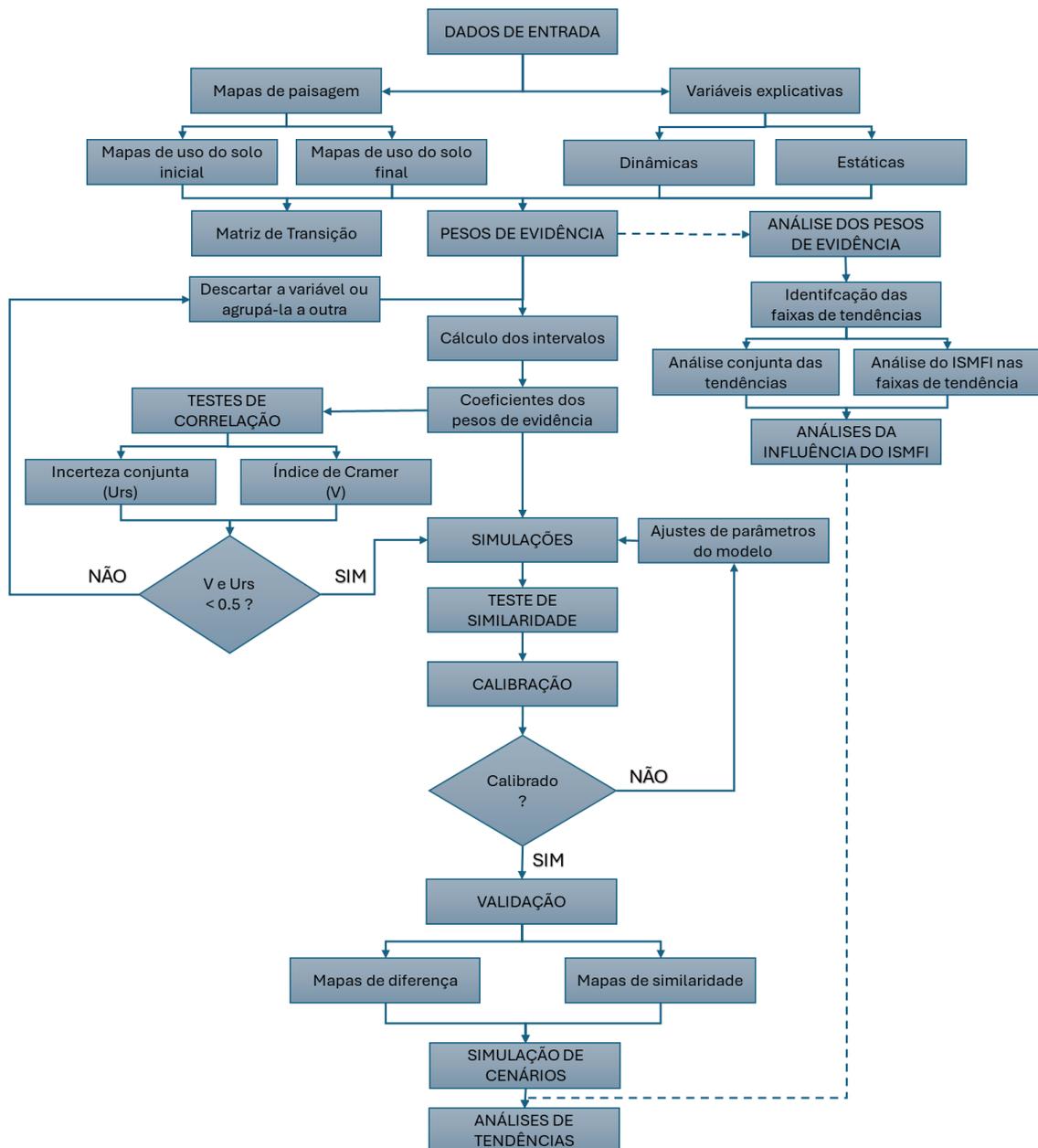


Figura 25 – Fluxograma geral do estudo.

As etapas do trabalho envolvem os passos da implementação e aplicação de modelo da paisagem, baseado em autômatos celulares, associado ao Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI), bem como da realização das análises necessárias para compreensão da dinâmica da paisagem e simulações de tendências futuras, em estudo de cenários.

O modelo foi implementado na plataforma “Dinamica EGO”, de domínio livre, baseado na técnica de autômatos celulares, desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

3.1.1 1ª Etapa: Análise da dinâmica do desenvolvimento urbano

Para a análise da dinâmica do desenvolvimento urbano foram necessárias avaliações e verificações dos dados de entrada do modelo, os Mapas da Paisagem (2000, 2011 e 2020), e dos dados gerados na sua implementação, como as Matrizes de Transição, os Pesos de Evidência, Testes de Correlação e Calibração/Validação.

De modo a compreender a dinâmica da paisagem, observada em diferentes conjunturas socioeconômicas, as etapas dos itens 3.1.1.1 a 3.1.1.2 foram implementadas para os períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020), de modo a analisar as tendências gerais da transformação do uso e ocupação do solo a longo prazo. As demais etapas do estudo, destinadas à implementação e aplicação do modelo para a simulação, foram realizadas considerando a dinâmica observada no período 2.

3.1.1.1 *Dados de Entrada*

Esta etapa contempla a coleta e a preparação dos dados da área de estudo, necessários para a implementação do modelo, incluindo os mapas de paisagem (inicial e final) e das variáveis estáticas. Os dados foram obtidos através de imagens de satélite, de rádio e outras bases de dados georreferenciadas, e incluem: limites administrativos municipais e estaduais; cursos d’água; limites das bacias hidrográficas; altitude; declividade; malhas rodoviárias e ferroviárias; Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI); e outros.

Os dados de entrada são recebidos pelo modelo através de mapas georreferenciados, em formato “raster”, com resolução espacial de 30x30 m e Datum SIRGAS 2000 / UTM zone 23S (EPSG 31983). A resolução foi definida em função da disponibilidade das

imagens LANDSAT gratuitas, referentes aos períodos pretendidos, e por serem consideradas suficientes para representar com precisão adequada a dinâmica da paisagem, através dos tipos de uso e ocupação. Os mapas foram elaborados com uso dos softwares QGIS 3.10.8 e Dinamica EGO 5.

i. Mapas de Paisagem (Inicial e Final)

Os principais dados de entrada do modelo são os mapas de paisagem (de uso e ocupação do solo), observados nos anos 2000, 2011 e 2020, confeccionados por meio da digitalização de imagens de satélites georreferenciadas, LANDSAT-8 e LANDSAT-5, obtidas pela base de dados da Divisão de Processamento de Imagens (DPI), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Para a classificação das imagens de satélite, inicialmente foram realizadas as composições (mosaicos), colorida e falsa-cor, e posteriormente a classificação supervisionada com apoio do plugin “Dzetsaka”, disponível da plataforma QGIS. Através da referida ferramenta foram coletadas amostras de tipos de uso e ocupação do solo, de acordo as suas cores características. Assim, de forma semiautomática, a ferramenta processou as imagens, gerando os mapas de uso e ocupação do solo com as seguintes classes:

- **Classe 1:** Áreas alagadas – incluindo mar, rios e lagos (naturais e/ou artificiais);
- **Classe 2:** Vegetação densa – florestas e vegetações arbóreas;
- **Classe 3:** Pastagem – campos com gramíneas e vegetação rasteira;
- **Classe 4:** Vegetação arbustiva / Agricultura – áreas cultivadas ou com vegetação de pequeno porte;
- **Classe 5:** Solo/Rocha Expostos – solo sem vegetação ou rocha;
- **Classe 6:** Urbano – áreas edificadas residenciais, comerciais, industriais, públicas e outras; e
- **Classe 7:** Estradas – áreas pavimentadas para rodovias.

Após a classificação supervisionada, fez-se necessária a correção dos mapas para eliminação de diversos erros de classificação, decorrentes do processo semiautomatizado.

A correção foi realizada manualmente através da comparação visual com imagens aéreas disponíveis na plataforma “Google Earth”, referente aos períodos estudados.

ii. Mapas das variáveis explicativas

Para a implementação do modelo foram elaborados mapas das variáveis estáticas, elencadas como as principais forçantes do processo de urbanização, juntamente com as variáveis dinâmicas, produzidas automaticamente pelo modelo, consideradas supostamente capazes de representar as tendências gerais da dinâmica da paisagem, com o enfoque pretendido. As variáveis estáticas utilizadas no modelo foram: Declividade; Altitude; Distância das Rodovias; Distância das Vias Locais; Distância das Ferrovias; Distância dos Polos Comerciais; Distância dos Polos Industriais/Portuários; e Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI).

Os mapas foram elaborados tendo como fonte algumas bases de dados georreferenciadas, incluindo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Estadual do Ambiente (INEA), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), OpenStreetMap (OSM) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Os mapas de Distância das Rodovias, Distância das Vias Locais, Distância das Ferrovias, Distância dos Polos Comerciais e Distância dos Polos Industriais/Portuários, utilizados como variáveis estáticas do modelo, foram elaborados com o uso do software QGIG e do functor “Calc Distance Map”, do Dinamica EGO, para o cálculo das distâncias euclidianas de cada célula até as regiões mais próximas, de cada variável em questão.

Como forma de entrada no modelo, as variáveis estáticas são agrupadas no “Cubo Raster”, reunindo o conjunto dos mapas, através do functor “Create Cube Map”, do Dinamica EGO. A extração das camadas para utilização do modelo é realizada através do functor “Extract Map Layer”, em suas rotinas operacionais.

iii. Mapas das variáveis dinâmicas

As variáveis dinâmicas são utilizadas para representar a influência das proximidades de cada classe nos processos de transição. Trata-se de mapas de distância, produzidos e atualizados automaticamente pelo modelo, a cada iteração, conforme a transformação gradual da paisagem simulada. Estas variáveis, juntamente com os mapas das variáveis estáticas, são consideradas as forçantes do modelo.

Assim como as variáveis estáticas, os mapas das variáveis dinâmicas são obtidos pelo modelo através do functor “Calc Distance Map”, do Dinamica EGO. Para isso, foram considerados os mapas de distância de todas as classes.

3.1.1.2 Matriz de Transição

A Matriz de Transição é obtida pelo modelo através da comparação, com tabulação cruzada, dos mapas de paisagem inicial e final, onde são calculadas as taxas de transição gerais de uso do solo, observadas no período em questão. Estas taxas correspondem às probabilidades de mudança, e irão definir o número de células a serem convertidas no intervalo de tempo da simulação, conforme equação 15. A análise das Matrizes de Transição, permite avaliar a representatividade de cada transição de classe, bem como a correlação entre elas, compondo a tendência geral da transformação da paisagem nos períodos 1 e 2.

As Matrizes de Transição de cada período foram calculadas, com o uso do functor “Determine Transition Matrix”, do DINAMICA EGO, gerando as Matrizes de Passo Único (Single Step), que correspondem ao período estudado em único passo de tempo, e de Passos Múltiplos (Multiple Steps), que correspondem ao período estudado, dividido em passos de tempo, que relativos a cada iteração do modelo.

No presente estudo, as Matrizes Múltiplas foram calculadas considerando o passo de tempo de 1 ano, totalizando 11 e 9 anos para os períodos 1 e 2, respectivamente.

3.1.1.3 Pesos de Evidência

O método dos Pesos de Evidência é aplicado no Dinamica EGO para produzir o mapa de probabilidades de transição, o qual representa as áreas mais favoráveis para uma mudança. Além da utilização para as simulações do modelo, os Pesos de Evidência também foram utilizados para analisar a dinâmica do desenvolvimento urbano, uma vez que quantificam o grau de influência de cada variável forçante (estática e dinâmica), na probabilidade de ocorrência de uma determinada transição.

De modo a otimizar o esforço computacional das simulações, os Pesos de Evidência de cada variável foram obtidos somente para as transições mais significativas, conforme suas probabilidades de ocorrência, definidas na Matriz de Transição. Considerando que

as transições adotadas devem representar a dinâmica geral da paisagem, com foco no processo de urbanização, objeto deste estudo, adotou-se como critério de escolha, as transições com probabilidades de ocorrência superiores a 0.5%, soma total das probabilidades da Matriz de Transição, ou que apresentem relevância para o foco pretendido.

Inicialmente, as transições consideradas pelo modelo foram: $1 \rightarrow 3$; $2 \rightarrow 3$; $2 \rightarrow 4$; $3 \rightarrow 1$; $3 \rightarrow 2$; $3 \rightarrow 4$; $3 \rightarrow 5$; $3 \rightarrow 6$; $4 \rightarrow 2$; $4 \rightarrow 3$; $4 \rightarrow 5$; $4 \rightarrow 6$; $5 \rightarrow 1$; $5 \rightarrow 3$; e $5 \rightarrow 6$. E posteriormente, nas fases de validação e calibração, foram analisadas as possibilidades de eliminação de algumas transições, de modo a melhorar a assertividade do modelo, definidas com base em testes de similaridade.

A atualização Bayesiana das probabilidades de transição é realizada pelo modelo, a cada passo de tempo, considerando a probabilidade de ocorrer determinada transição da classe (R), quando condicionada à ocorrência de uma evidência (S), representada por uma determinada variável explicativa (estática ou dinâmica), conforme a equação 22.

Tendo em vista a dificuldade da análise devido à grande variabilidade dos dados, inicialmente, foram observadas as similaridades entre os comportamentos dos coeficientes, relativos às transições urbanas ($3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 6$ e $5 \rightarrow 6$). O objetivo desta etapa é diminuir a variabilidade, identificando os intervalos das variáveis que definem “faixas de tendências” semelhantes entre si, quantificando seus graus de influência médios no processo de urbanização da região. Para isso, foram analisados, tanto os comportamentos dos coeficientes das transições urbanas, quanto as suas representatividades na transformação da paisagem, de acordo com suas probabilidades de ocorrência.

Ressalta-se que esse método envolve um pequeno grau de subjetividade que, quando realizada por diferentes analistas, poderão gerar resultados que não serão exatamente iguais, mas considerado suficiente para a representação das tendências médias da paisagem, apesar da sua falta de exatidão.

Após a definição das “faixas de tendências”, foi realizada a análise integrada dos Pesos de Evidência, comparando as influências de todas as variáveis entre si, e especialmente com a variável ISMFI, avaliando a influência dos riscos de inundações no processo de ocupação urbana, conforme proposto no 1º objetivo específico da pesquisa.

A seguir, são apresentados os dois passos realizados para a obtenção dos gráficos dos Pesos de Evidência, na plataforma DINAMICA EGO:

i. Intervalos das Variáveis Contínuas

Para a obtenção dos gráficos dos pesos de evidência, inicialmente o modelo calcula faixas ou intervalos de acordo com a estrutura dos dados que se apresentam sob a forma de grades contínuas, visto que o método de pesos de evidência opera apenas com variáveis categóricas (NOVAES, ALMEIDA, *et al.*, 2011). Portanto, é necessário categorizar os mapas de variáveis contínuas (mapas de distâncias, altitude, declividade, ISMFI).

O cálculo dos intervalos foi realizado através do functor “Determine Weights of Evidence Ranges”, do DINAMICA EGO, onde os parâmetros: “Increment”; “Minimum Delta”; “Maximum Delta” e “Tolerance Angle”, foram definidos para cada variável.

ii. Coeficientes dos Pesos de Evidências

Após a definição dos intervalos das variáveis contínuas categorizadas (dinâmicas e estáticas), descrito no passo anterior, foram realizados os cálculos dos coeficientes dos Pesos de Evidência, para todas as faixas de intervalos definidas pelo modelo, conforme os seus limites de abrangência.

Os referidos coeficientes foram obtidos através do functor “Determine Weights of Evidence Coefficients”, do Dinamica EGO, gerando os gráficos dos Pesos de Evidência para cada transição de classe do solo sob a influência de cada variável explicativa (estática ou dinâmica), calculados através da aplicação das equações 30 e 32.

3.1.1.4 Testes de correlação

Para a aplicação do método dos Pesos de Evidência faz-se necessário que os mapas das variáveis (estáticas e dinâmicas) sejam espacialmente independentes. Segundo Oliveira *et al.* (2021) apud Bonham-Carter (1994), “Quanto mais próximos de 1, maior a dependência espacial entre os pares de variáveis consideradas. Variáveis com correlação acima de 0.5 (50%) devem ser desprezadas ou combinadas em uma terceira que substituirá o par correlacionado no modelo”.

Desta forma, nesta etapa foram analisadas as correlações espaciais entre todos os pares possíveis de variáveis, para cada tipo de transição, testando sua independência. Para

o cálculo dos Índices de correlação foi utilizado o functor “Determine Weights of Evidence Correlation”, do Dinamica EGO, onde foram inseridas todas as transições de interesse do modelo. Mais especificamente, de modo a atestar a pouca associação (independência) entre os fatores, foram checados os limites dos índices $V < 0.5$ (Cramer) e $Urs < 0.5$ (Joint_Uncertainty).

3.1.1.5 Calibração e Validação

A etapa de Calibração e Validação consistiu no processo de ajuste dos parâmetros e dados do modelo de modo a obter a maior aproximação das simulações com a realidade observada, medida através de testes de similaridade. Para isso foi utilizado o mapa observado de 2020 como referência da paisagem real e assim comparado com os mapas simulados.

No presente trabalho foi adotado o método proposto por Soares-Filho et al. (2009), que consiste em uma adaptação do método proposto por Hagen (2003), em que desenvolveu novas métricas, incluindo o Kfuzzy, considerado como equivalente à estatística Kappa, e a similaridade fuzzy, que leva em consideração a incerteza da localização de uma categoria dentro da vizinhança de uma célula, tendo em vista que “até mesmo mapas que não se assemelham exatamente célula-a-célula podem ainda apresentar padrões similares e, igualmente, concordância espacial nas proximidades de uma célula”.

Desta forma, nesta etapa foram realizados manualmente inúmeros ajustes dos parâmetros de calibração do modelo, associados aos respectivos testes de similaridade fuzzy, com função de decaimento exponencial, aplicados através do functor “Calc Reciprocal Similarity Map”, do Dinamica EGO.

O functor realiza a comparação entre os mapas de diferença obtidos pela: 1) subtração entre o mapa final real (2020) e o mapa inicial real (2011); e 2) subtração entre o mapa final simulado (2020) e o mapa inicial real (2011), conforme ilustrado na Figura 26. Nestas comparações são realizados os cálculos dos índices de similaridade fuzzy em duas vias, do primeiro mapa para o segundo e do segundo para o primeiro, escolhendo o menor valor entre esses. Tais índices são obtidos empregando uma função de decaimento exponencial com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central.

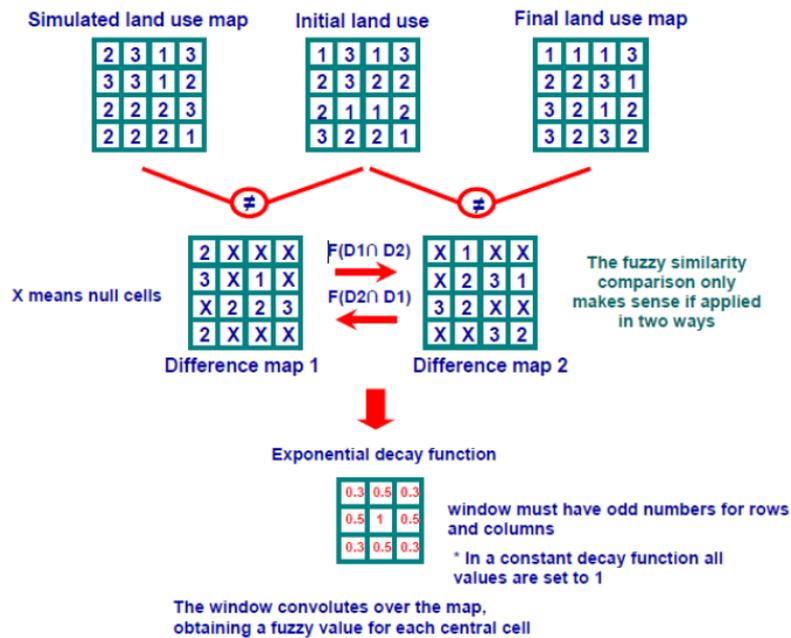


Figura 26 – Esquema geral do teste de similaridade fuzzy, com função de decaimento exponencial.

Além dos índices de similaridade médios da região, considerando janelas de 1x1 até 11x11 pixels, o functor gerou os mapas de similaridade que permitiram a análise das suas distribuições espaciais.

Os ajustes dos parâmetros do modelo, com seus respectivos testes, contemplaram: 1) alterações do percentual “Expander/Patcher”; 2) alterações dos parâmetros da métrica da paisagem (média, variância e isometria) dos operadores; 3) edição dos gráficos dos Pesos de Evidência, eliminando flutuações em excesso; e 4) Inclusão e exclusão de transições.

As métricas da paisagem foram obtidas com o software Fragstats 4.2, que realiza o levantamento das manchas formadas por cada tipo de transição de classe do uso do solo, observadas nos períodos 1 e 2, analisando as distribuições estatísticas das dimensões (média e variância) e formas geométricas (isometria) dos conjuntos de pixels gerados pelos operadores “Expander” e “Patcher”, em cada tipo de transição.

É interessante destacar a aleatoriedade das simulações produzidas pelo software em cada execução do modelo de simulação, pois, mesmo mantendo-se inalterados os parâmetros de transição, os resultados tendem a se apresentar distintos (TRENTIN e FREITAS, 2010). Desta forma, de modo a diminuir a aleatoriedade dos índices de similaridade, no presente trabalho foram realizadas quatro simulações distintas para cada

configuração de parâmetros testados, obtendo os valores médios dos índices de similaridade.

3.1.2 2ª Etapa: Análise de cenários considerando a implementação de medidas de controle de ocupação urbana

3.1.2.1 *Simulações dos Cenários*

Após a calibração e validação, para a análise de cenários foram realizadas simulações dos mapas de uso e ocupação do solo para os horizontes de 2030, 2040 e 2050, reproduzindo a dinâmica da paisagem observada pelo modelo no período 2 (2011 a 2020), considerando a implementação de medidas de controle de ocupação urbana.

Para esta etapa, foram definidos cenários com objetivo de avaliar os efeitos de medidas de manejo do uso do solo na dinâmica da paisagem, com implementação de ações de controle que restrinjam a ocupação urbana nas áreas de maior fragilidade a inundações, servindo como ferramenta de planejamento urbano e, eventualmente, corrigindo a falha relacionada à falta de influência da susceptibilidade a inundações na ocupação do território, caso esse seja o resultado da avaliação decorrente do primeiro passo da metodologia.

Dessa forma, os cenários adotados foram: 1) Sem controle de ocupação; e 2) Com controle de ocupação, das áreas com ISMFI > 60 (Alta e Muito Alta suscetibilidade a inundações), ambos considerando a suposta continuidade dos fatores biofísicos e socioeconômicos, observados no período 2 (2011 a 2020), utilizados para a construção do modelo.

É importante destacar que o propósito desta etapa não é de produzir previsões exatas sobre o futuro da dinâmica de ocupação, mas de estimular a análise e a discussão de possibilidades, de forma a subsidiar a elaboração e implementação de políticas urbanas.

3.1.2.2 *Análises de tendências*

Esta etapa consistiu na análise do cruzamento dos Mapas de Uso e Ocupação do Solo (simulados) com os Índice de Suscetibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI), permitindo a interpretação de possíveis tendências, conforme sua distribuição

espacial e a susceptibilidade a inundações, considerando os cenários propostos nos anos 2030, 2040 e 2050.

Para isso, foram contabilizadas as células conforme os tipos de uso do solo, e analisadas as tendências conforme as distribuições espaciais entre as regiões de susceptibilidade: “Muito Baixa a Baixa” ($ISMFI \leq 40$); “Média” ($40 > ISMFI \leq 60$); e “Alta a Muito Alta” ($ISMFI > 60$). Esta etapa foi desenvolvida com o uso das ferramentas do software QGIS.

As análises estatísticas da distribuição espacial das tendências, juntamente com as análises dos Pesos de Evidência, descritas no item 3.1.1.3, complementaram a avaliação da influência do ISMFI na dinâmica do desenvolvimento urbano, confirmando se esta variável exerce, realmente, a influência efetiva na ocupação do território. Além disso, esta etapa incluiu a análise dos efeitos da implementação das medidas de manejo do uso do solo propostas como ação corretiva.

3.2 ÁREA DE ESTUDO

3.2.1 Localização

O município de Itaguaí é parte integrante da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), mais precisamente na mesorregião metropolitana, entre a Baixada Fluminense e a Costa Verde, localizado a 73 km da capital a uma latitude $22^{\circ} 51' 07''$ S e longitude de $43^{\circ} 46' 30''$. Conforme Figura 27 sua área de 283 km² é cercada pelos municípios do Rio de Janeiro, Seropédica, Piraí, Paracambi, Rio Claro, Mangaratiba além de ser banhado pela Baía de Sepetiba na sua parte sul. Pertencem também ao município de Itaguaí, a Ilha dos Martins, Ilha da Madeira, Ilha das Cabras, Ilha do Gado, Ilha das Ostras, a parte leste da Ilha de Itacuruçá e a parte central da Restinga da Marambaia.

Para a análise da dinâmica urbana da região de interesse, faz-se necessária a análise integrada da área de estudo, contemplando também as manchas urbanas dos municípios vizinhos, que configurem os polos de desenvolvimento da região, incluindo Seropédica e Rio de Janeiro.

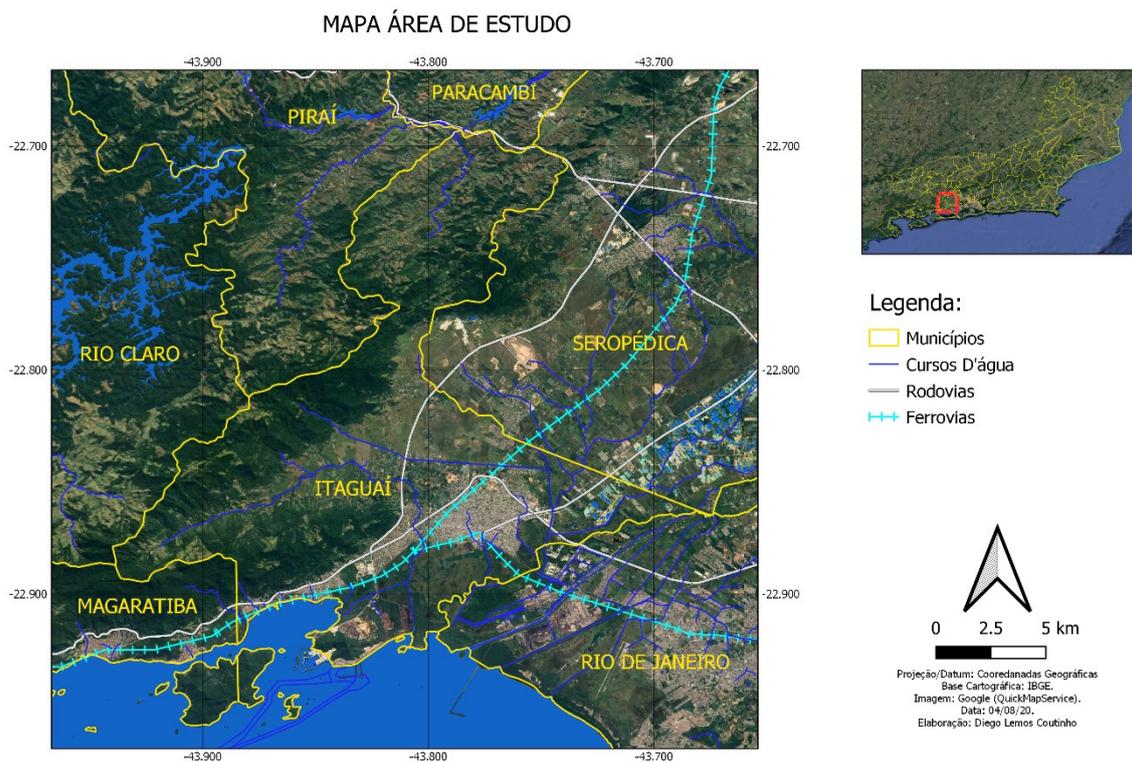


Figura 27 - Imagem aérea da Área de Estudo. Fonte: Produzido pelo autor.

3.2.2 Histórico da expansão urbana de Itaguaí

Historicamente, o desenvolvimento econômico do município de Itaguaí foi fortemente impulsionado, até a década de 1880, pela rota de mineração do ouro e posteriormente, pelas atividades rurais e comerciais com exportação em grande escala de café, açúcar, aguardente, farinha e cereais, que garantiu a sua permanência no cenário econômico, principalmente devido à sua proximidade com o Vale do Paraíba. “O advento da Lei Áurea ocasionou terrível crise econômica, refletida no considerável êxodo dos antigos escravos que representavam, anteriormente, o fator essencial do desenvolvimento agrícola. Esse fato, aliado à falta de transporte e a insalubridade da região, concorreu para o desaparecimento das grandes plantações periódicas e permanentes, que constituíam a riqueza principal da localidade” (IBGE, 1948).

“Atingida pelo esvaziamento do porto, pelas epidemias, pela evasão inevitável da mão-de-obra e pelo abandono de áreas antes cultivadas, Itaguaí chegou a perder quase tudo, inclusive a maior parte de sua memória. Entretanto, apesar de todas as dificuldades, conservou-se como município e empreendeu, ao longo do século XX, uma marcha de recuperação, conseguindo diversificar sua

economia e multiplicar, novamente, seu quantitativo humano” (PREFEITURA DE ITAGUAÍ, 2018).

Neste contexto, até a década de 60 Itaguaí viveu um período de estabilidade econômica e financeira, tendo como base econômica as atividades agrícolas. E a partir da década de 70, Itaguaí experimentou uma aceleração na sua taxa de urbanização motivada por forte incremento populacional (SERENCO SERVIÇOS DE ENGENHARIA E CONSULTORIA, 2016).

A abertura da rodovia Rio-Santos mudou o cenário, facilitando o deslocamento entre diversos municípios próximos. A inauguração da Usina de Itaguaí, em 1976, e da Nuclep, em 1975, bem como o início da construção do Porto de Sepetiba, em 1976, foram marcos importantes que impulsionaram um crescimento populacional de 74.35% na década de 70.

Na década de 80, observou-se uma retração da expansão demográfica em função da crise mundial, do endividamento do país e dos projetos não realizados e/ou que não produziram os efeitos esperados, como o Polo Petroquímico e a abertura do Porto de Itaguaí, respectivamente.

A partir da década de 90, impulsionada pela Lei de Modernização dos Portos em 1993, a cidade de Itaguaí obteve um grande acréscimo populacional. De acordo com o levantamentos do Censo nos períodos de 1991-2000 e 2000-2010, respectivamente, os crescimentos populacionais foram de 31.47% e 33.03%, com taxas médias anuais 3.09% e 2.90%, consideravelmente superiores às do Brasil, que foram 1.63% e 1.17%. Destacam-se como pontos marcantes desses períodos, a quebra do monopólio estatal, permitindo a entrada da iniciativa privada, além dos investimentos no Porto de Sepetiba, provenientes do programa “Brasil em Ação”, do Governo Federal, visando a modernização e ampliação da sua capacidade operacional.

Neste contexto, a cidade de Itaguaí observou uma transformação rápida e significativa de um setor rural em urbano dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Guandu. Com tudo isso, “nas últimas décadas observou-se a invasão de grande parte das áreas naturais consideradas de grande valor para o ecossistema em função de um desenvolvimento descontrolado” (IBGE, 1948).

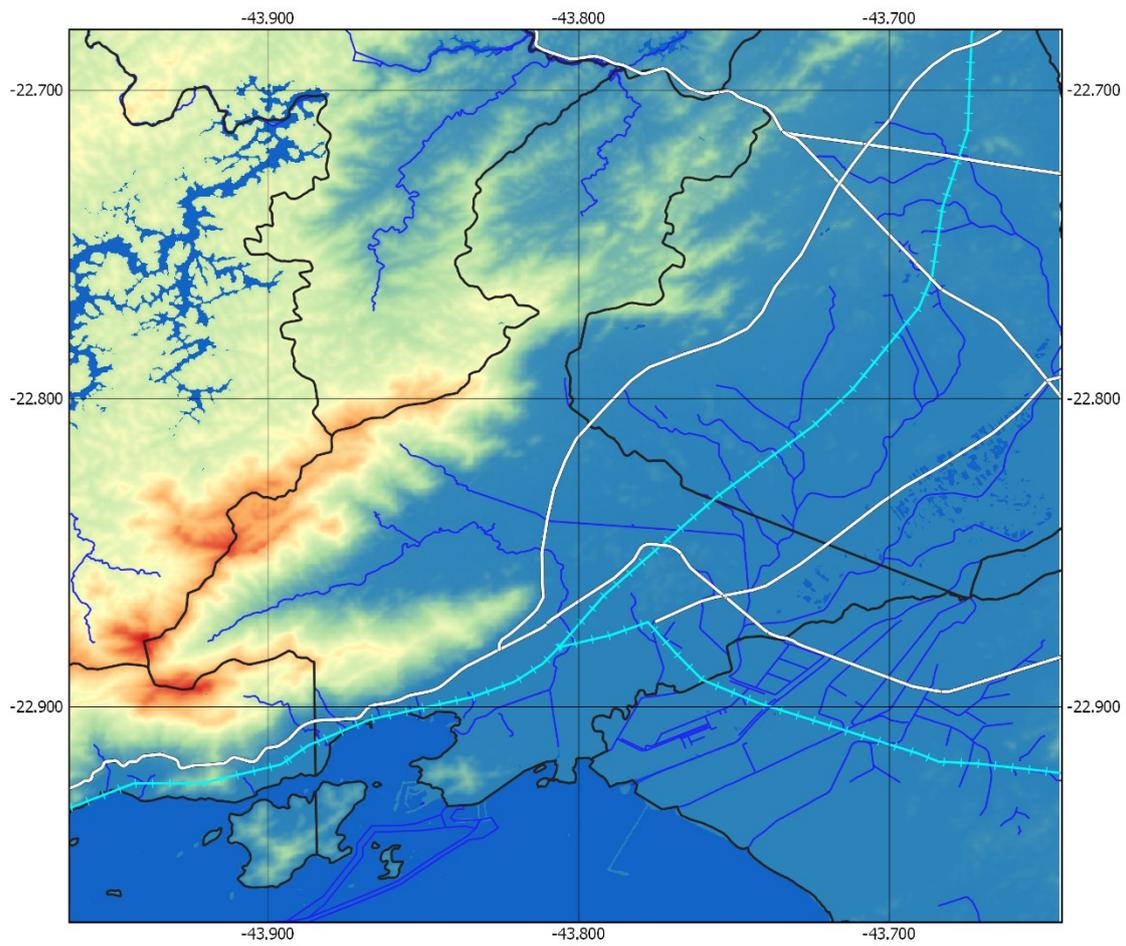
3.2.3 Aspectos Biofísicos

3.2.3.1 Relevo

Itaguaí possui relevo filiado ao sistema “Serra do Mar” e região costeira, contendo planícies aluviais entre montanhas e morros. Nas partes Norte, Oeste e Noroeste encontram-se grandes elevações chegando à altitude de 1.282 m em relação ao nível do mar. As principais serras são as de Itaguaí, Caçador, Matoso, Guarda Grande, Pouso Frio e Mazomba. Na região Central, Sul e Leste predominam terrenos mais planos, com altitude média de 15 metros em relação ao nível do mar, inclusive com diversas áreas alagadiças e pantanosas.

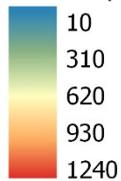
As Figuras 28 e 29 apresentam os Mapas de Altitude e Declividade da região, onde é possível identificar o contraste entre as áreas montanhosas acidentadas e as planícies, que ocupam a maior parte do território.

ALTITUDE

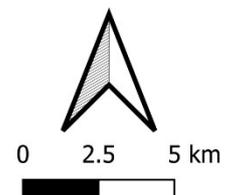
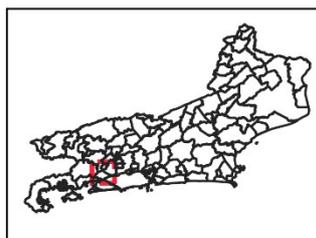


Legenda:

Altitude (m)



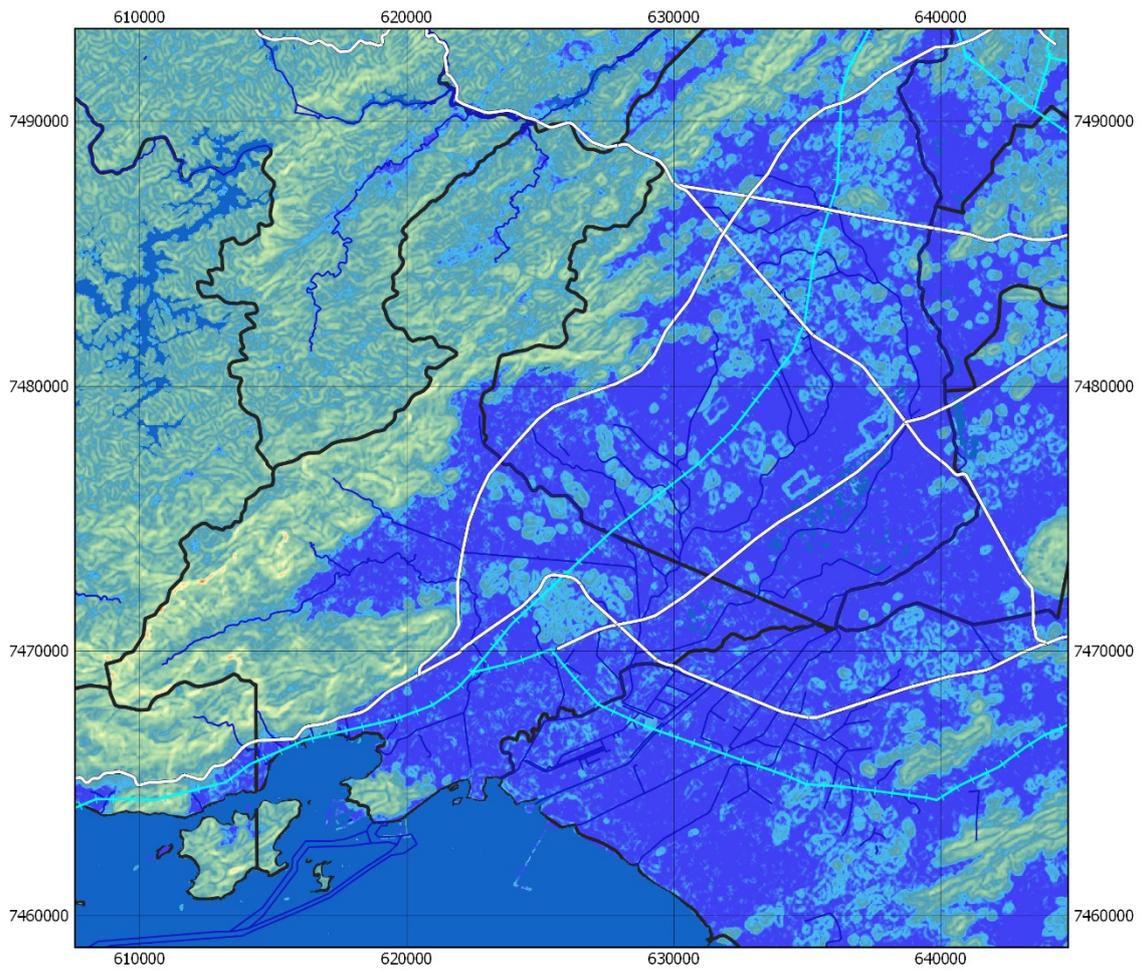
- Rodovias
- +— Ferrovias
- Limites Municipais
- ▭ AreadeEstudo
- Cursos d'água



Projeção/Datum: Cooredanadas Geográficas
Base Cartográfica: IBGE.
Imagem: NASA/SRTM (Earth Explorer/USGS).
Data: 28/07/20.
Elaboração: Diego Lemos Coutinho

Figura 28 – Mapa de Altitude da Área de Estudo. Fonte: Produzido pelo autor.

DECLIVIDADE

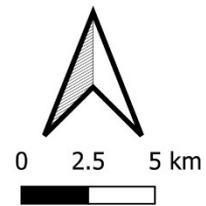
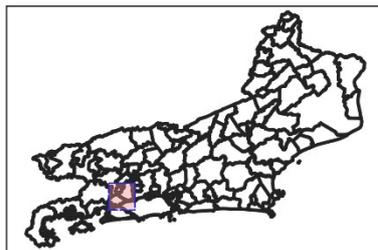


Legenda:

Declividade (%)

- 0 a 3 - Plano
- 3 a 8 - Suave-ondulado
- 8 a 20 - Ondulado
- 20 a 45 - Forte-ondulado
- 45 a 75 - Montanhoso
- 75 a 120 - Montanhoso1
- 120 a 180 - Montanhoso2
- 180 a 232 - Montanhoso3

- Rodovias
- Ferrovias
- Cursos d'água
- Municípios do RJ
- AreadeEstudo4



Projeção/Datum: UTM/SIRGAS 2000 23S
 Base Cartográfica: IBGE.
 Imagem: Topodata (Embrapa).
 Data: 17/11/20.
 Elaboração: Diego Lemos Coutinho

Figura 29 – Mapa de Declividade da Área de Estudo. Fonte: Produzido pelo autor.

3.2.3.2 *Clima*

O clima de Itaguaí é enquadrado como tropical úmido e tropical semiúmido, com chuvas abundantes no verão, máximas em dezembro e janeiro, e invernos secos com mínimas em junho e julho. As precipitações da região são favorecidas principalmente pelas massas de ar úmido vindas do oceano, que sofrem ascendência orográfica devido ao encontro com o relevo da Serra do Mar.

A temperatura média anual é de 24°C, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2014), com médias máximas de 28 °C em dezembro a fevereiro (verão) e médias mínimas de 19 °C em junho e julho (inverno).

3.2.3.3 *Vegetação*

A cobertura vegetal está diretamente relacionada à hidrografia, ao relevo e às condições climáticas e edáficas da região, caracterizada por paisagens diversificadas de vegetação nativa e antrópica, com florestas densas tropicais (em estágios médio e inicial de recuperação), vegetação de restingas, mangues, áreas alagadas e afloramentos rochosos, além de agricultura e pastagem. A região de estudo está inserida no Bioma Mata Atlântica com predomínio de coberturas vegetais dos tipos:

- **Formações pioneiras:** localizam-se na planície litorânea e compreendem os ecossistemas associados à mata atlântica, caracterizados por áreas com influências marinha (restingas), fluviomarina (manguezais) e fluvial (brejos e planícies alagáveis);
- **Campos de altitude:** ocorrem em áreas mais elevadas, na direção da Serra do Mar e em condições ambientais peculiares decorrentes dos efeitos da altitude e do relevo acidentado. O Parque Estadual Cunhambebe é uma unidade de conservação criada em 2008 que abrange parte do seu território; e
- **Campos de planície:** áreas com cobertura herbácea e herbácea arbustiva, ligados predominantemente às planícies fluviais e com maior influência antrópica. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2013)

3.2.3.4 *Uso e Ocupação do Solo*

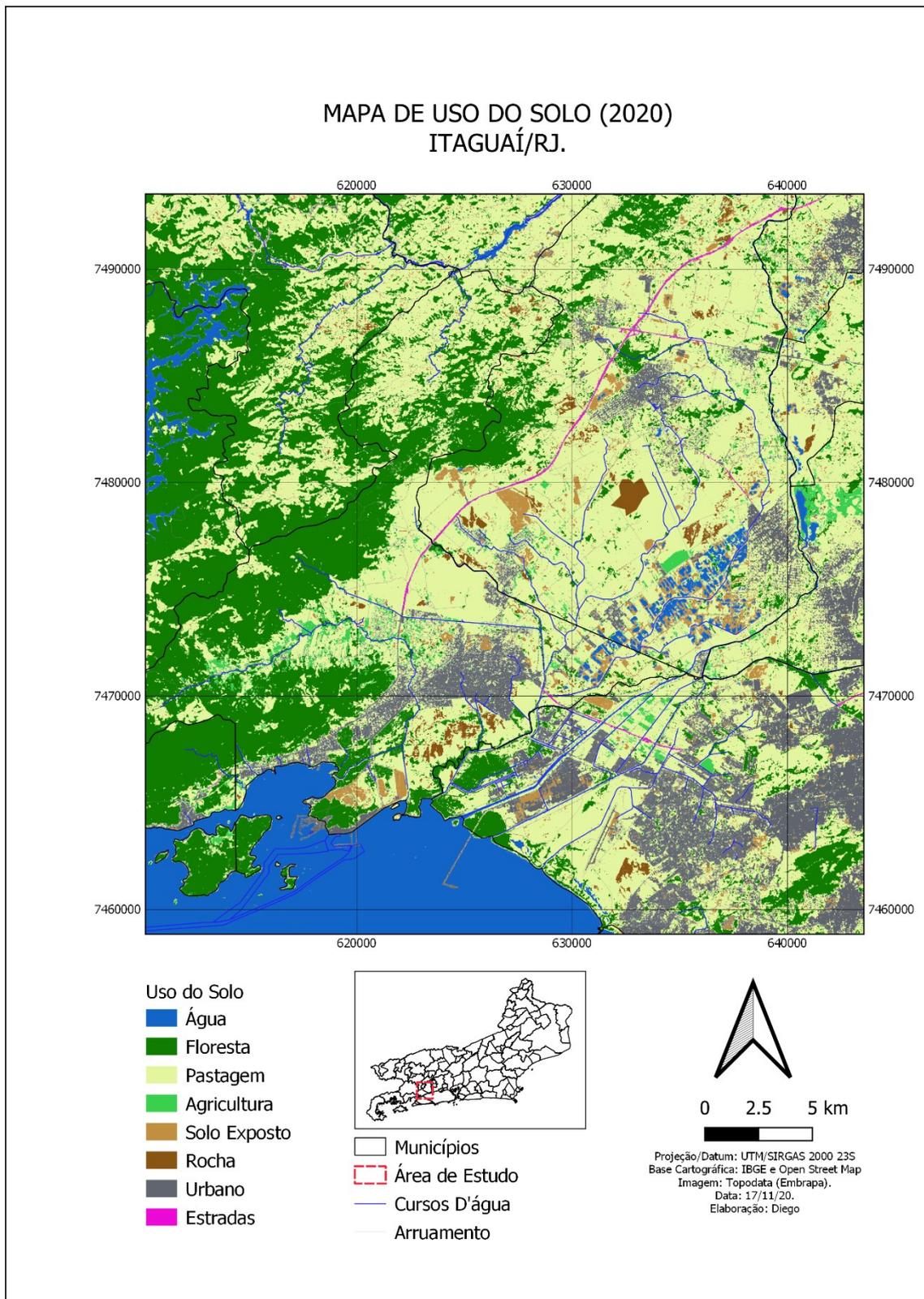


Figura 30 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo (2020).

A Figura 30 apresenta o Mapa de Uso e Ocupação do solo da área de estudo, do ano de 2020, onde é possível identificar na cor cinza as principais manchas urbanas localizadas nos municípios de Itaguaí, Seropédica e Rio de Janeiro. Estas regiões correspondem às áreas de maior densidade de ocupação e com as altitudes e declividades mais baixas, atuando como os polos do desenvolvimento urbano.

3.2.3.5 Hidrografia

A maior parte da área de estudo situa-se na bacia do Rio da Guarda, localizada na macro bacia do Rio Guandu, desaguando na Baía de Sepetiba, na região de divisa entre os municípios de Itaguaí e Rio de Janeiro, conforme Figuras 31 e 32.

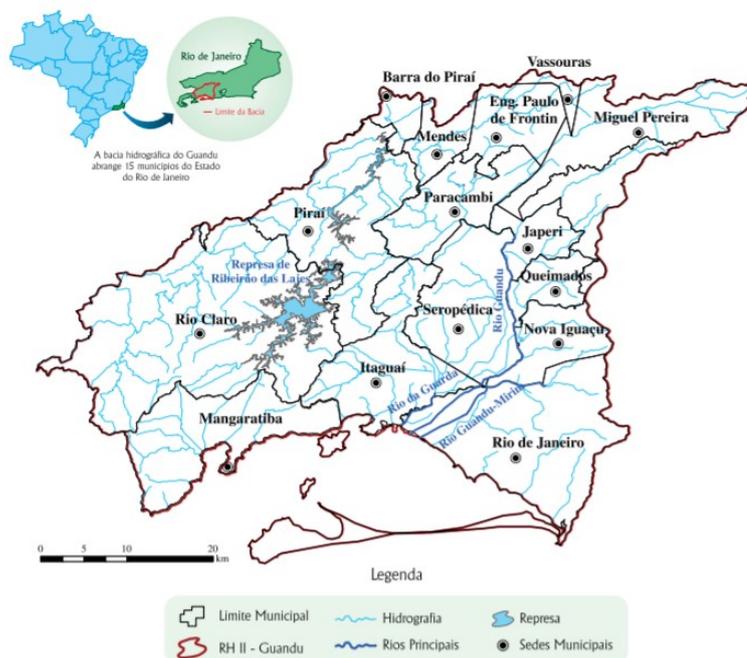


Figura 31 - Bacia hidrográficas do Rio Guandu.

O Rio da Guarda é um afluente do Rio Guandu e compreende uma área de cerca de 346 km² e a direita margeia a Bacia do Rio Guandu. Seu principal formador é o Valão dos Bois, cujas nascentes situam-se na vertente nordeste da Serra da Cachoeira, com uma extensão de aproximadamente 35 km e área de drenagem de aproximadamente, 131 km². O Rio da Guarda inicia-se após a confluência do Valão dos Bois com o Rio Piloto, se desenvolvendo ao longo de cerca de 7 km até a sua foz na Baía de Sepetiba. Seus principais afluentes são os Rios Piloto, Cai Tudo e Itaguaí (Ponte Preta), margem direita,

e Canal de São Francisco e Agostinho pela margem esquerda (INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE, 2011-2012).

As principais sub-bacias da região são as do Rio Itaguaí, do Rio Mazomba-Cação e do Rio Trapiche, todas desaguando direta ou indiretamente na baía de Sepetiba.

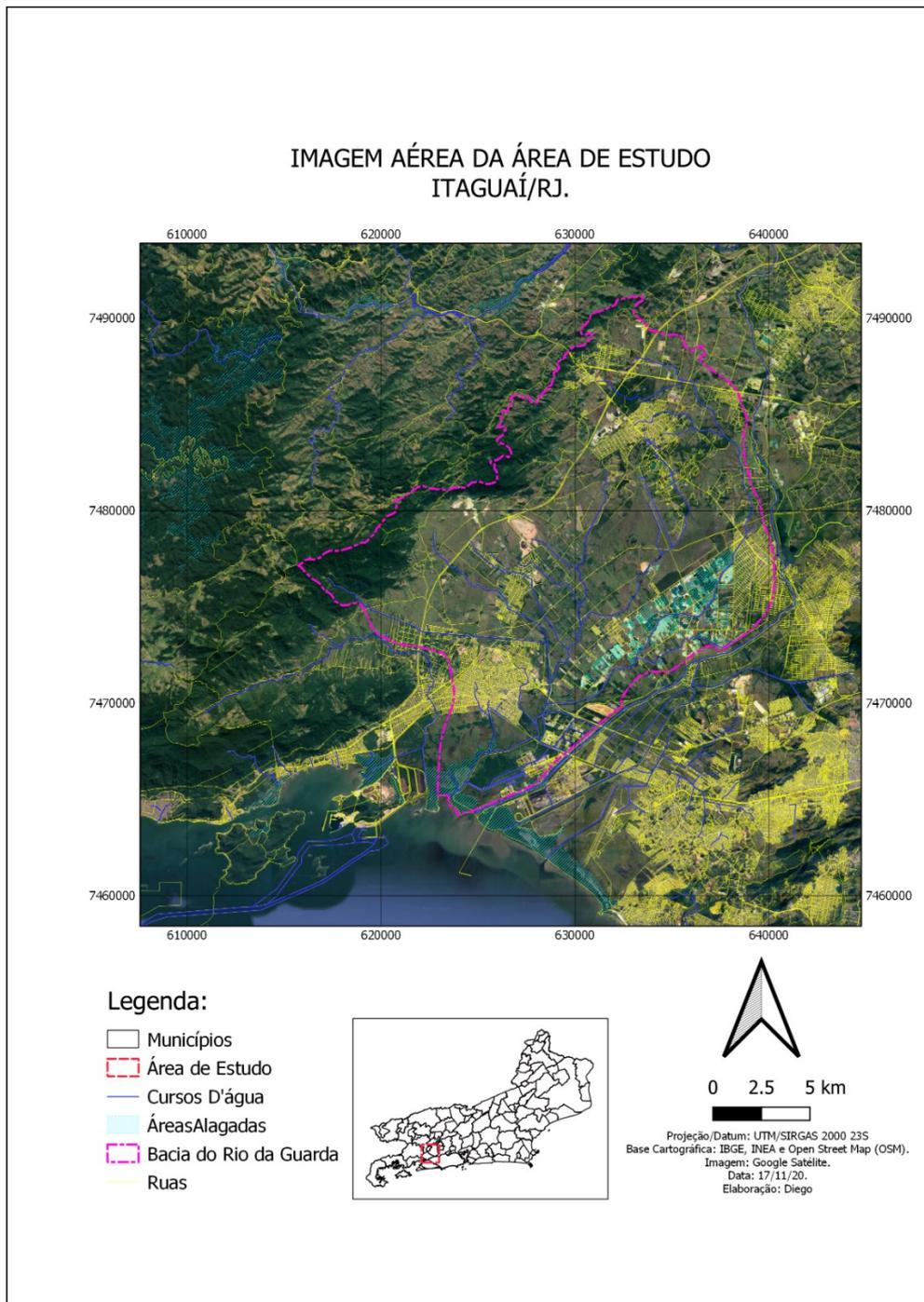


Figura 32 - Bacia hidrográficas do Rio da Guarda. Fonte: Produzido pelo autor.

A bacia que contempla a região do Centro do município é a do Rio Trapiche, com comprimento de 2.83 km desde seu início em céu aberto na RJ-099 até o deságue no Rio da Guarda. Conforme a Figura 33, a bacia do Rio Trapiche possui dois canais artificiais: o Canal do Viana, com comprimento de 2.82 km, desde seu início a céu aberto até o deságue no Rio Trapiche; e o Canal Bairro de Engenho, com comprimento de 1.73 km, desde seu cruzamento com a BR-101 até o deságue no Canal do Viana (FRAGA, 2018). As sub-bacias destes canais possuem a maior densidade de ocupação urbana da bacia e se encontram localizadas na sua parte mais baixa, o que aumenta a influência da variação de marés nos escoamentos e consequentemente os problemas relacionados a inundações.

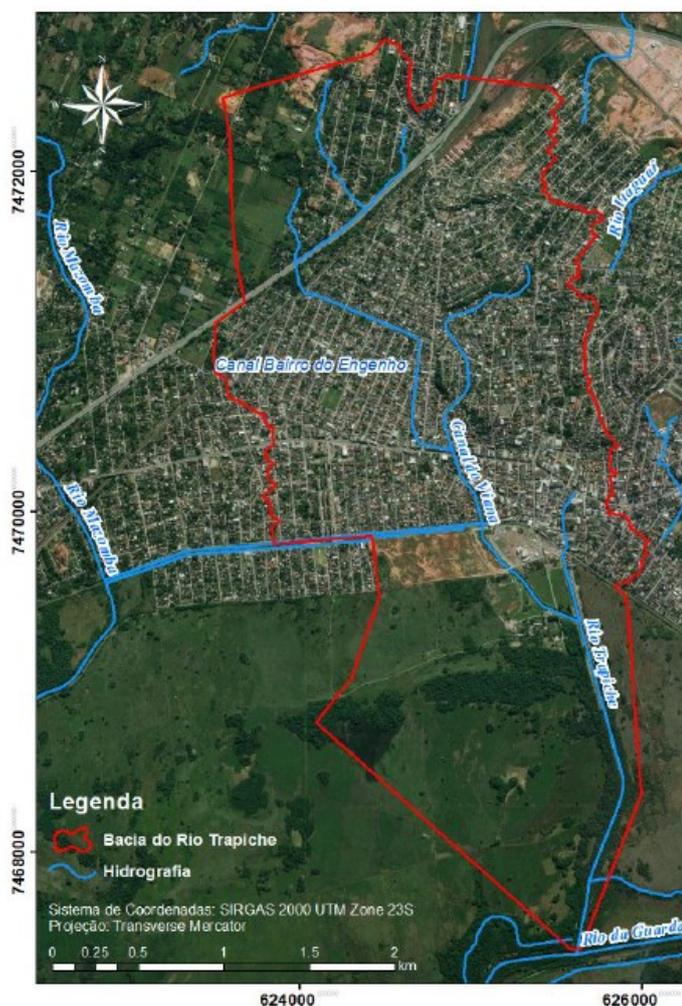


Figura 33 - Bacia hidrográficas do Rio Trapiche. (FRAGA, 2018)

A bacia do Rio Trapiche é caracterizada por edificações e aterros irregulares ao longo das margens, com canais de pequenas dimensões, estrangulamentos, associados à degradação ambiental com o lançamento de esgoto e resíduos.

A cidade de Itaguaí, assim como a maioria das cidades brasileiras, sofre com os resultados da sobreposição da estrutura urbana sobre o ambiente natural provocando alteração no regime de escoamento das águas de chuva. Durante muitos anos, o processo de urbanização sem controle resultou em elevado grau de impermeabilização das bacias e na ocupação das calhas dos rios e de suas planícies de inundação. Grande parte dos rios desta região teve seus cursos modificados e posteriormente retificados em canais artificiais. Aliado a tudo isso, a cidade de Itaguaí ainda sofre a influência direta das vazões do Rio Guandu e da maré da Baía de Sepetiba, criando um cenário bastante propício para enxurradas/inundações que se tornam cada vez maiores e mais frequentes.

No relevo da região, as montanhas que contrastam com as baixadas extensas atuam como divisores de água, que aliadas às intensidades pluviométricas elevadas, resultam em regimes fluviais dos cursos d'água com picos elevados de vazão nos períodos chuvosos e tempos de concentração relativamente curtos. Adicionalmente, a impermeabilização do solo em função da pavimentação urbana dificulta a infiltração de água no solo, aumentando ainda mais o volume de águas superficiais, gerando vazões de cheias maiores do que a capacidade natural de escoamento dos cursos de água.

Segundo Fraga (2018), a macrodrenagem não consegue escoar sua vazão por conta dos níveis de água elevados em seus canais, provocando refluxos e transtornos para a população. A porcentagem da população urbana dentro da bacia que sofre com cheias acima de 0.15 metros é de 43 %, totalizando 4.383 domicílios e 13.730 pessoas, estimados com base nos dados censitários do IBGE (2010). Os assoreamentos e o remanso do hidrograma do Rio da Guarda, combinado com a maré de sizígia, tem uma influência significativa na área urbana.

3.2.4 Aspectos Econômicos

Segundo o IBGE, o município de Itaguaí possuía 109091 habitantes no ano de 2010 e uma estimativa para 2016 de 120855. Apesar da origem agrária da região, segundo o censo de 2010, 95.52% da população já vivia na zona urbana e 4.48% na zona rural. A região apresentou, num movimento que ocorreu em todo o país e que nada tem a ver com as inversões que vêm acontecendo no município, um crescimento consistente do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), que em 1991 era de 0.483 e em 2010 chegou a 0.715, ocupando a 38ª posição no ranking entre os 92 municípios do Estado do Rio de Janeiro. O município vem apresentando um PIB crescente e a perspectiva é de que ele

aumento ainda mais com os grandes investimentos que ocorreram na região. (VILLELA, VIDAL, *et al.*, 2018)

Segundo SEA/INEA (2011), o município de Itaguaí apresenta, atualmente, importante centralidade associada à prestação de serviços do Porto de Itaguaí, sendo uma das grandes expectativas de crescimento da RMRJ, principalmente em relação à “geração de empregos, e também, investimentos ligados ao setor de siderurgia, bem como às áreas industriais no extremo oeste do município do Rio de Janeiro e no município de Itaguaí.

3.2.4.1 Atividades Portuárias

O Porto de Itaguaí (Figura 34) é considerado um dos vetores para a recuperação da economia fluminense e do desenvolvimento local e regional. Antes chamado de Porto de Sepetiba, localizado na costa norte da Baía de Sepetiba, o porto foi reinaugurado em 7 de maio de 1982, quando foram iniciadas as atividades do Terminal de Carvão e Alumina.



Figura 34 – Porto de Itaguaí (PREFEITURA DE ITAGUAÍ, 2018).

Atualmente, o município de Itaguaí possui uma estrutura portuária com localização estratégica, na confluência dos principais centros econômicos do país, colocando o Porto de Itaguaí, destacando-se entre os maiores exportadores brasileiros de minério de ferro e o principal porto concentrador de cargas do Mercosul.

3.2.4.2 Eixos Rodoviários

Historicamente, um dos principais impulsores do desenvolvimento do município de Itaguaí é o seu eixo rodoviário, com destaque à rodovia Rio-Santos (BR-101). Mais

recentemente, com o Arco Metropolitano, observou-se no período 2000 a 2010, uma taxa de expansão da mancha urbana de 3.85%, quase cinco vezes maior que a taxa de crescimento populacional da RMRJ, que foi de apenas 0.83% a.a.

A expectativa de crescimento da população da RMRJ no horizonte de 2030 previsto no estudo do Arco Metropolitano, estima o acréscimo de 1.362.832 habitantes no intervalo 2010 a 2030. Com relação às taxas anuais de crescimento, os maiores percentuais estariam em Maricá (2.2%), Guapimirim (1.6%) e Itaguaí (1.5%). (BRASIL, 2018).

De acordo com Tângari (2013), o Arco Metropolitano deve ser visto como um vetor do crescimento urbano, especialmente em regiões periféricas da região metropolitana, onde se destaca a importância de um planejamento adequado para lidar com esse crescimento. O aumento populacional nas áreas impactadas pode gerar problemas caso não haja políticas públicas eficazes para garantir a infraestrutura básica, habitação, transporte e serviços urbanos de qualidade. Além disso, o risco do crescimento desordenado pode levar à ocupação informal de áreas vulneráveis, como zonas de preservação ambiental, gerando mais desafios socioambientais. A necessidade de uma gestão territorial sustentável é apontada como essencial para controlar a expansão urbana e mitigar os impactos negativos, garantindo que o crescimento ocorra de maneira equilibrada e dentro de parâmetros de sustentabilidade.

3.2.4.3 Eixos Ferroviários

Os ramais ferroviários, conectados aos eixos rodoviários, tiveram papel importante na expansão urbana de Itaguaí. A Figura 35 ilustra a estação ferroviária de Coroa Grande em atividade, na década de 50. Atualmente os eixos ferroviários ainda são fundamentais para a logística das atividades do Terminal Portuário, com destaque à interligação da Ilha da Madeira ao Porto de Itaguaí.



Figura 35 – Estação ferroviária de Coroa Grande (Década de 50). (PREFEITURA DE ITAGUAÍ, 2018)

3.2.4.4 Polo Petroquímico e CSN

A implantação de uma segunda unidade pela Companhia Siderúrgica Nacional e na década de 90, a expectativa da implantação do Polo Petroquímico, foram um dos principais fatores impulsionadores do crescimento demográfico da população.

3.2.4.5 Mineração (Extração de Areia)

Na bacia do rio da Guarda se encontra o grande polo de extração de areia em cava do estado, localizado no município de Seropédica, formando o denominado “Polígono de Piranema”, apresentado na Figura 36.



Figura 36 – Polígono de Piranema (Extração de Areia). (COPPETEC, 2014)

O também conhecido como Distrito Areeiro de Seropédica-Itaguaí, possui área de aproximadamente 50 km² e é considerado um dos maiores do Brasil. Localizado a uma distância de distância 60 km da capital, o distrito fornece cerca de 90% da areia da construção civil da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

3.2.4.6 Centro de Tratamento de Resíduos

O Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) foi inaugurado em 2011 e criado para substituir o Aterro Sanitário de Gramacho, que esteve em operação desde 1978 no Rio de Janeiro. Situado no município de Seropédica, o CTR é o destino final dos resíduos sólidos gerados pela cidade do Rio de Janeiro. Com uma capacidade de processamento de até 10 mil toneladas de resíduos por dia, o centro é considerado um forte impulsor econômico da área de estudo.

3.2.4.7 Agricultura e Pecuária

Além de sua forte vocação industrial e portuária, “Itaguaí possui um histórico importante de atividades agrícolas, como fornecedor da região metropolitana do Rio de Janeiro, inclusive no passado recente, e ainda há atividades remanescentes como o arranjo produtivo local (APL) da banana, além de produzir cana-de-açúcar, feijão, mandioca e milho. Há também a criação de caprinos, galináceos, muares, ovinos e suínos” (VILLELA, VIDAL, *et al.*, 2018).

3.2.5 Aspectos Sociais

A Figura 37 apresenta um mapa do Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) da cidade de Itaguaí, indicando níveis médio a alto na maior parte do território do município. É possível identificar que os índices mais baixos estão concentrados na região central da cidade, dotada de melhores condições de infraestrutura urbana assim como melhores condições socioeconômicas.

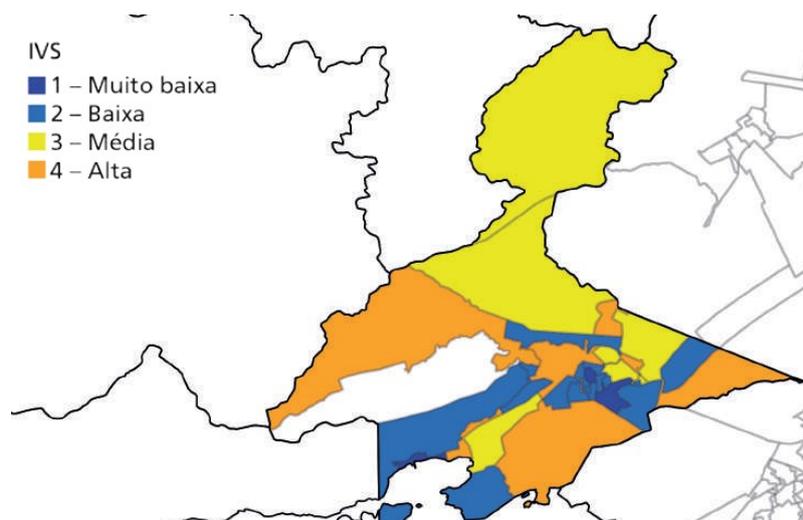


Figura 37 – Índice de Vulnerabilidade Social de Itaguaí. (MARGUTI, COSTA e FAVARÃO, 2017).

Baseado em indicadores do Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil (2013), o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) representa as necessidades, carências, recursos e possibilidades da sociedade, sendo um instrumento capaz de dimensionar as situações de exclusão, vulnerabilidade e pobreza multidimensional nos municípios brasileiros, Unidades da Federação (UFs), regiões metropolitanas e Unidades de Desenvolvimento Humano (UDHs). O IVS foi estruturado em três dimensões, a saber: i) Infraestrutura Urbana, que procura refletir as condições de acesso a serviços de saneamento básico e mobilidade urbana; ii) Capital Humano, envolvendo aspectos relacionados à conjuntura e perspectivas de inclusão social dos indivíduos, com base em saúde e educação; e iii) Renda e Trabalho, que agrupa indicadores relacionados à insuficiência de renda presente e insegurança futura. (MARGUTI, COSTA e FAVARÃO, 2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DADOS DE ENTRADA

A produção e análise dos Dados de Entrada, fundamentais para a implementação do modelo, são os primeiros resultados do estudo, fazendo parte da 1ª Etapa, conforme apresentado na Figura 38. Nesta etapa também estão incluídos os resultados e discussões das Matrizes de Transição, dos Pesos de Evidência e dos Testes de Correlação.

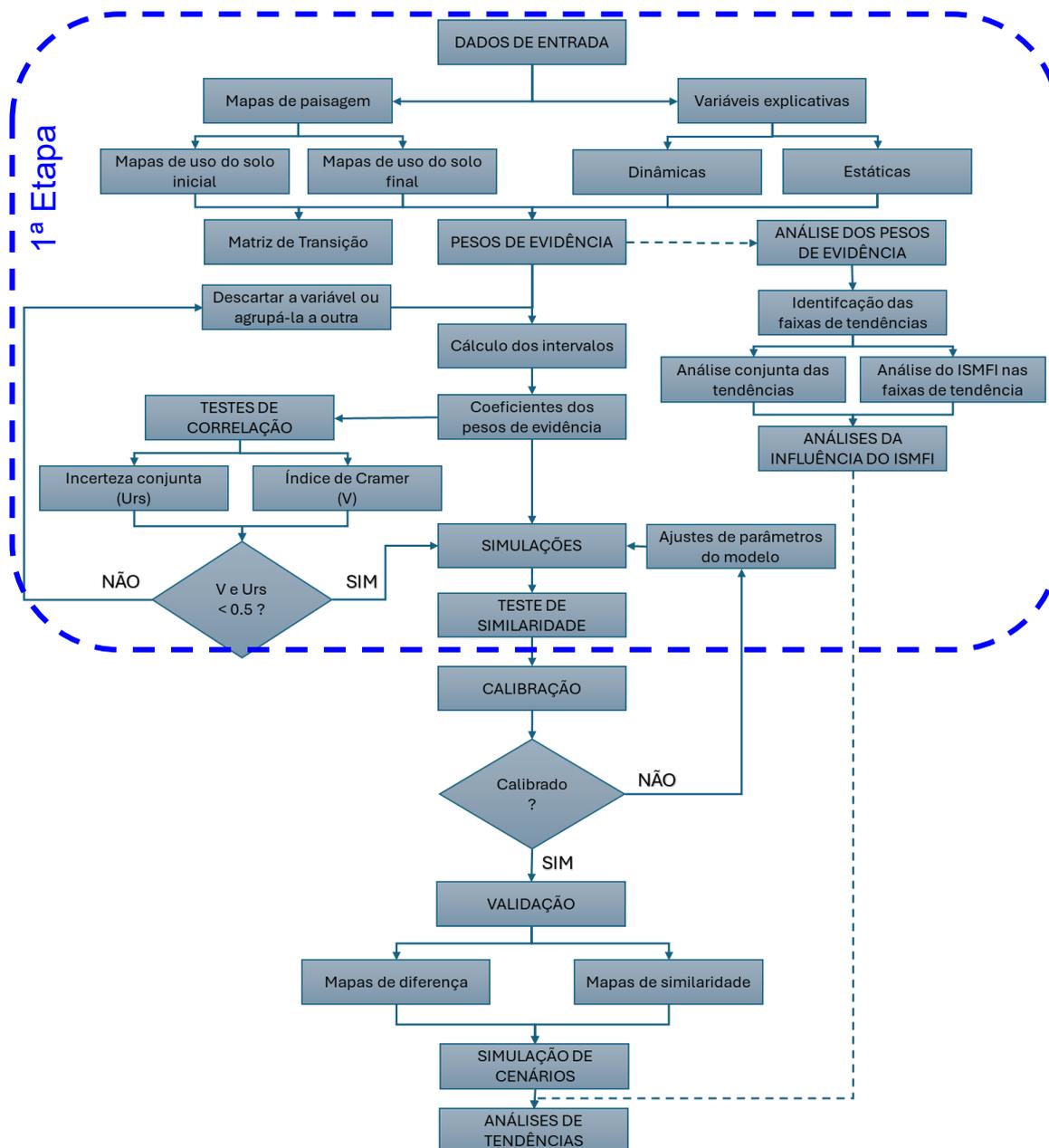


Figura 38 – 1ª Etapa do estudo (fluxograma geral).

4.1.1 Mapas da Paisagem

A Figura 39 apresenta os mapas de paisagem, contendo as classificações de uso e ocupação do solo, observadas nos anos 2000, 2011 e 2020, utilizados como entrada principal do modelo, captando os padrões e tendências gerais da dinâmica de urbanização dos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020).

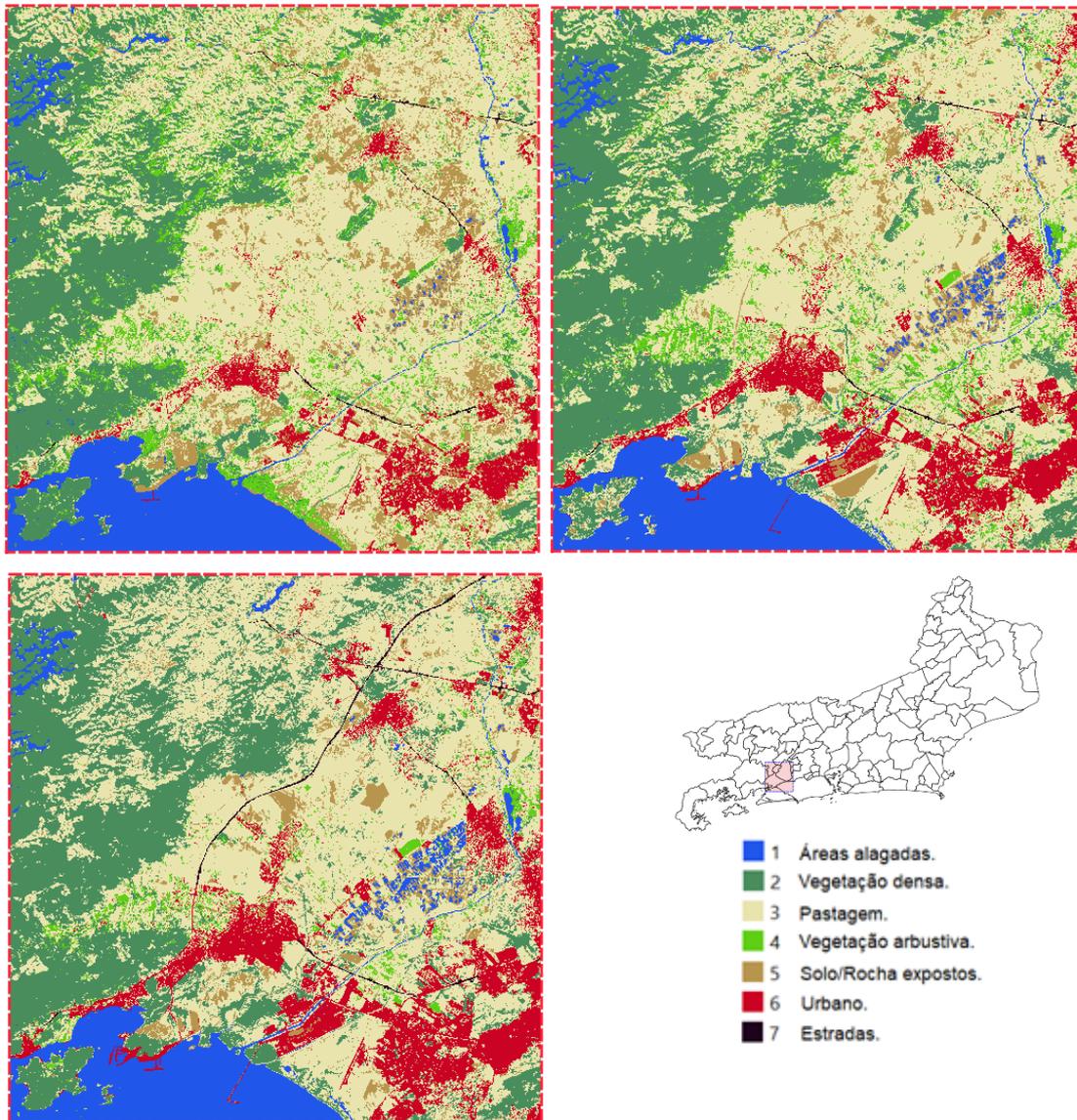


Figura 39 – Mapas de uso e ocupação do solo observados para os anos 2000, 2011 e 2020.

Em análise aos mapas da Figura 39, pode-se observar milhares de transições, de aumento e redução de classes, espalhadas por toda área de estudo, com manchas de inúmeros formatos e dimensões, principalmente das áreas de pastagem (classe 3), vegetação densa (classe 2), vegetação arbustiva (classe 4), solo / rocha expostos (classe 5) e urbanas (classe 6).

De modo a quantificar a distribuição total das células, de acordo com o observado nos Mapas da Paisagem, o Gráfico 1 apresenta os percentuais totais de cada classe do uso do solo nos anos 2000, 2011 e 2020.

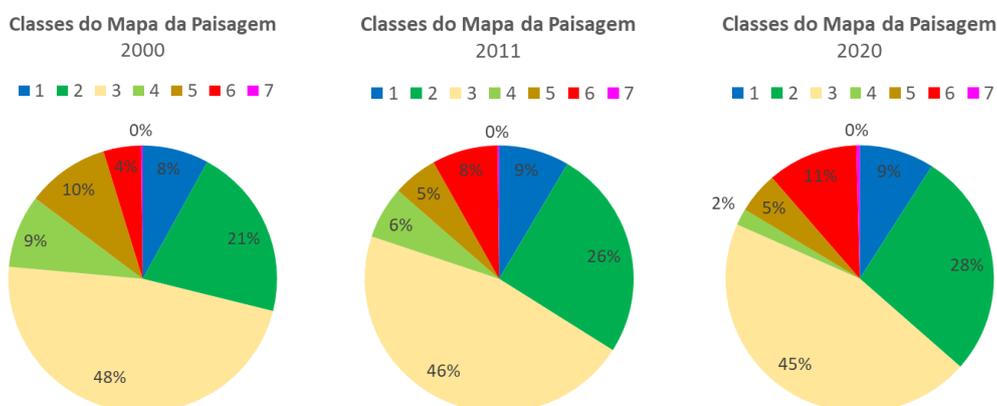


Gráfico 1 – Percentual das classes de uso e ocupação do solo nos Mapas da Paisagem nos anos 2000, 2011 e 2020.

Em análise ao Gráfico 1, associado aos Mapas de Paisagem, da Figura 39, pode-se destacar algumas características gerais marcantes das tendências observadas nos períodos 1 e 2:

- Crescimento significativo das áreas urbanas (classe 6), observado tanto por espalhamento quanto por adensamento, principalmente no torno dos eixos viários e dos Polos Urbanos existentes, dos municípios de Itaguaí, Seropédica e Rio de Janeiro;
- Crescimento da vegetação densa (classe 2), principalmente nas áreas mais distantes das áreas urbanizadas;
- Diminuição da vegetação arbustiva (classe 4), principalmente nas áreas mais próximas às áreas urbanizadas;
- Diminuição significativa, no período 1 (2000 e 2011), da quantidade de células de solo/rocha expostos (classe 5), com estabilização no período 2 (2011 a 2020);
- Geração de células de solo/rocha expostos (classe 5), que se tornaram estradas (classe 7), de 2011 para 2020, em função da construção do “Arco Metropolitano”, porém, com quantidades pouco expressivas para a paisagem;
- Os percentuais das áreas de pastagem (classe 3) apresentaram pouca alteração;
- Crescimento das áreas alagadas (classe 1), associados majoritariamente às atividades de extração de areia, com posterior estabilização do crescimento devido

à diminuição da classe 1, em função da sua transição para urbano proveniente das obras de construção de Portos.

De modo geral, a dinâmica da paisagem observada apresenta um padrão de transformação típico do processo de antropização, caracterizado pelo aumento significativo das áreas urbanizadas e pelos impactos nas áreas naturais de vegetação da região, em diferentes estágios de degradação. Pode-se afirmar, claramente, que o processo de urbanização é bastante influenciado pelas proximidades com os eixos viários e com as áreas urbanas existentes.

4.1.2 Variáveis estáticas

Os Mapas das variáveis estáticas são os parâmetros de entrada do modelo, espacialmente distribuídos na área de estudo, que juntamente com os Mapas das variáveis dinâmicas, foram elencados como os principais “forçantes” do processo de ocupação urbana. A implementação do modelo consiste em correlacionar as variáveis (estáticas e dinâmicas) com o padrão de ocupação urbana observado.

As variáveis estáticas selecionadas para representarem as tendências gerais da dinâmica da paisagem, com o enfoque pretendido, foram: 1) Declividade; 2) Altitude; 3) Distância das Rodovias; 4) Distância das vias locais; 5) Distância das Ferrovias; 6) Distância dos Polos Comerciais; 7) Distância dos Polos Industriais/Portuários; e 8) Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI).

As variáveis dinâmicas utilizadas no modelo correspondem aos mapas de distância de cada classe de uso do solo e que são automaticamente atualizadas pelo modelo a cada passo de tempo.

4.2 MATRIZES DE TRANSIÇÃO

As Tabelas 6 e 7 correspondem às Matrizes de Transição de passos único e múltiplo (ao passo de tempo de um ano), respectivamente, observadas nos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020).

Sendo a linha a classe de origem, e a coluna a classe de destino, os percentuais da tabela representam as probabilidades de ocorrência de cada transição, dentro do espaço amostral da classe de origem.

A matriz de transição de passo único contém os percentuais de ocorrência de cada transição durante os períodos 1 ou 2, observados. Já a matriz de transição de passo múltiplo, contém os percentuais de ocorrência de cada transição, no passo de tempo de um ano, em cada período.

Tabela 6 – Matrizes de Transição de passos único, dos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020).

| Matriz de Transição de Passo Único (Período 1) | | | | | | | |
|------------------------------------------------|------|-------|-------|------|------|-------|---|
| From/To | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | | 0.9% | 1.4% | 0.1% | 0.7% | 0.4% | |
| 2 | 0.3% | | 8.0% | 2.8% | 0.6% | 0.1% | |
| 3 | 0.6% | 7.3% | | 8.4% | 6.7% | 4.3% | |
| 4 | 1.1% | 37.3% | 40.3% | | 2.6% | 1.0% | |
| 5 | 3.4% | 2.3% | 62.9% | 1.5% | | 12.1% | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

| Matriz de Transição de Passo Único (Período 2) | | | | | | | |
|------------------------------------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| From/To | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | | 0.0% | 0.5% | 0.0% | 0.8% | 0.0% | |
| 2 | 0.2% | | 11.2% | 1.2% | 0.3% | 0.2% | 0.0% |
| 3 | 0.7% | 7.2% | | 2.0% | 7.2% | 5.2% | 0.2% |
| 4 | 0.2% | 28.8% | 54.4% | | 2.8% | 1.8% | 0.1% |
| 5 | 5.9% | 2.2% | 55.2% | 0.8% | | 8.6% | 2.0% |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

- 1 Áreas alagadas.
 ■ 3 Pastagem.
 ■ 5 Solo/Rocha expostos.
 ■ 7 Estradas.
■ 2 Vegetação densa.
 ■ 4 Vegetação arbustiva.
 ■ 6 Urbano.

Tabela 7 - Matrizes de Transição de passo múltiplo, dos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020).

| Matriz de Transição de Passo Múltiplo (Período 1) | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| From/To | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | | 0.08% | 0.12% | 0.01% | 0.06% | 0.04% | |
| 2 | 0.02% | | 0.66% | 0.23% | 0.05% | 0.01% | |
| 3 | 0.05% | 0.67% | | 0.78% | 0.62% | 0.40% | |
| 4 | 0.11% | 3.92% | 4.25% | | 0.27% | 0.10% | |
| 5 | 0.40% | 0.27% | 7.43% | 0.18% | | 1.43% | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

| Matriz de Transição de Passo Múltiplo (Período 2) | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| From/To | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | | 0.00% | 0.05% | 0.00% | 0.09% | 0.00% | |
| 2 | 0.02% | | 1.20% | 0.13% | 0.03% | 0.02% | 0.00% |
| 3 | 0.07% | 0.81% | | 0.22% | 0.80% | 0.58% | 0.02% |
| 4 | 0.04% | 5.02% | 9.47% | | 0.49% | 0.32% | 0.01% |
| 5 | 0.67% | 0.26% | 6.35% | 0.09% | | 0.98% | 0.23% |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |

- 1 Áreas alagadas.
 ■ 3 Pastagem.
 ■ 5 Solo/Rocha expostos.
 ■ 7 Estradas.
■ 2 Vegetação densa.
 ■ 4 Vegetação arbustiva.
 ■ 6 Urbano.

De modo a representar a magnitude das probabilidades, os números percentuais foram classificados em uma escala de cores, do vermelho (maior) para o azul (menor). Pode-se observar que as matrizes dos períodos 1 e 2 possuem distribuições de cores muito semelhantes, evidenciando que as dinâmicas da paisagem observadas seguem a mesma tendência geral de mudança, com algumas variações dos percentuais entre os períodos, indicando aceleração, desaceleração e/ou estabilidade de diversos processos interrelacionados entre si.

Destaca-se que a Tabela 7 apresenta percentuais menores que os da Tabela 6, uma vez que corresponde ao passo de tempo de um ano, e são aplicadas a cada iteração do modelo nas simulações.

De modo a identificar as transições com as maiores e menores ocorrências em toda área estudo, considerando todas as classes de uso do solo, obteve-se a Tabela 8, multiplicando-se cada linha das matrizes de passo múltiplo pelo percentual da sua classe de origem correspondente, observados nos mapas de paisagem iniciais. Desta forma, a referida tabela apresenta as probabilidades de ocorrência das transições dentro do espaço amostral de toda área de estudo, a cada passo de tempo de um ano.

Na Tabela 8, os somatórios das linhas e colunas representam, respectivamente, os percentuais de redução e crescimento das classes correspondentes, em toda área de estudo. Pode-se observar que o somatório das probabilidades totais da área de estudo, diminuiu de 3.16% para 2.97%, entre os períodos 1 e 2, respectivamente, indicando uma desaceleração geral do processo de transformação da paisagem, com um fator de redução de 0.94. Cabe também destacar que, apesar da diminuição geral, a geração de células urbanas (classes 6) mantém o mesmo percentual, indicando que a velocidade do processo de urbanização manteve-se estável nos períodos.

Tabela 8 – Probabilidades totais de ocorrência da transição na área de estudo dos períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020).

| Probabilidades Totais na Area de Estudo (Período 1) | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------------|
| From/To | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | TOTAL |
| 1 | | 0.006% | 0.010% | 0.001% | 0.005% | 0.003% | | 0.02% |
| 2 | 0.004% | | 0.138% | 0.049% | 0.011% | 0.002% | | 0.20% |
| 3 | 0.026% | 0.319% | | 0.369% | 0.295% | 0.189% | | 1.20% |
| 4 | 0.010% | 0.348% | 0.376% | | 0.024% | 0.009% | | 0.77% |
| 5 | 0.040% | 0.027% | 0.742% | 0.018% | | 0.142% | | 0.97% |
| 6 | | | | | | | | 0.00% |
| 7 | | | | | | | | 0.00% |
| TOTAL | 0.08% | 0.70% | 1.27% | 0.44% | 0.34% | 0.35% | 0.00% | 3.16% |

| Probabilidades Totais na Area de Estudo (Período 2) | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| From/To | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | TOTAL |
| 1 | | 0.000% | 0.005% | 0.000% | 0.008% | 0.000% | | 0.01% |
| 2 | 0.005% | | 0.307% | 0.032% | 0.008% | 0.006% | | 0.36% |
| 3 | 0.034% | 0.374% | | 0.102% | 0.371% | 0.268% | 0.011% | 1.16% |
| 4 | 0.002% | 0.318% | 0.600% | | 0.031% | 0.020% | 0.001% | 0.97% |
| 5 | 0.036% | 0.014% | 0.343% | 0.005% | | 0.053% | 0.012% | 0.46% |
| 6 | | | | | | | | 0.00% |
| 7 | | | | | | | | 0.00% |
| TOTAL | 0.08% | 0.71% | 1.26% | 0.14% | 0.42% | 0.35% | 0.02% | 2.97% |

■ 1 Áreas alagadas. ■ 3 Pastagem. ■ 5 Solo/Rocha expostos. ■ 7 Estradas.
■ 2 Vegetação densa. ■ 4 Vegetação arbustiva. ■ 6 Urbano.

Ainda na Tabela 8, pode-se observar que as linhas 3 (1.20% e 1.16%) e colunas 3 (1.27% e 1.26%), apresentam os maiores somatórios das matrizes dos períodos 1 e 2, indicando que as transições de pastagem (classe 3) representam as mudanças mais significativas da paisagem. Conforme os valores das colunas, a geração da classe 3 provém, majoritariamente, das transições 2→3, 4→3 e 5→3, com redução das classes 2 (vegetação densa), 4 (vegetação arbustiva) e 5 (solo/rocha expostos). Simultaneamente,

conforme valores das linhas, observa-se a redução da classe 3 principalmente em função das transições $3 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 4$, $3 \rightarrow 5$ e $3 \rightarrow 6$.

Trata-se de um processo cíclico e contínuo de transformação da paisagem, envolvendo as transições mais significativas: $(2, 4 \text{ e } 5) \rightarrow 3 \rightarrow (2, 4, 5 \text{ e } 6)$.

De modo geral, a transformação da classe 3, está diretamente relacionada à transformação das demais classes, em diferentes condições, gerando um balanço de reduções e crescimentos dos percentuais em função da degradação e/ou recuperação de vegetação, associados ainda à urbanização crescente, bem como às transições provenientes das atividades industriais, extrativistas, agrícolas e outras, compondo uma dinâmica da paisagem característica do processo de antropização.

De modo a compreender as tendências principais da dinâmica da paisagem, a Tabela 9 apresenta os somatórios dos percentuais de redução e crescimento de cada classe, provenientes da Tabela 8, bem como os seus balanços anuais da transição total. Pode-se observar que, nos dois períodos, a dinâmica da paisagem manteve-se com a mesma **tendência geral “4 e 5 \rightarrow 2, 3 e 6”**, em um processo contínuo de transformação das áreas de vegetação arbustiva (classe 4) e solo/rocha expostos (classe 5), em as áreas de vegetação densa (classe 2), pastagem (classe 3) e urbanas (classe 6).

Tendo em vista o foco do estudo voltado para as transições urbanas, os percentuais das transições das áreas alagadas (classe 1) e estradas (classes 7) não foram considerados representativos para a dinâmica geral da paisagem e por isso, desconsiderados na análise e na construção do modelo.

Tabela 9 – Percentuais de redução, crescimento e transição total das classes, nos períodos 1 e 2.

| Período 1 (2000 a 2011) | | | | Período 2 (2011 a 2020) | | | |
|-------------------------|---------|-------------|-----------------|-------------------------|---------|-------------|-----------------|
| Classe | Redução | Crescimento | Transição Total | Classe | Redução | Crescimento | Transição Total |
| 1 | -0.02% | 0.08% | 0.06% | 1 | -0.01% | 0.08% | 0.06% |
| 2 | -0.20% | 0.70% | 0.50% | 2 | -0.36% | 0.71% | 0.35% |
| 3 | -1.20% | 1.27% | 0.07% | 3 | -1.16% | 1.26% | 0.09% |
| 4 | -0.77% | 0.44% | -0.33% | 4 | -0.97% | 0.14% | -0.83% |
| 5 | -0.97% | 0.34% | -0.63% | 5 | -0.46% | 0.42% | -0.05% |
| 6 | 0.00% | 0.35% | 0.35% | 6 | 0.00% | 0.35% | 0.35% |
| 7 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 7 | 0.00% | 0.02% | 0.02% |

■ 1 Áreas alagadas. ■ 3 Pastagem. ■ 5 Solo/Rocha expostos. ■ 7 Estradas.
■ 2 Vegetação densa. ■ 4 Vegetação arbustiva. ■ 6 Urbano.

Em análise à alteração dos percentuais de redução e crescimento das classes nos períodos 1 e 2, pôde-se observar que a dinâmica da paisagem observada, entre os períodos 1 e 2, indicam tendências de aceleração, desaceleração e estabilidade dos processos, conforme ilustrado na Figura 40.

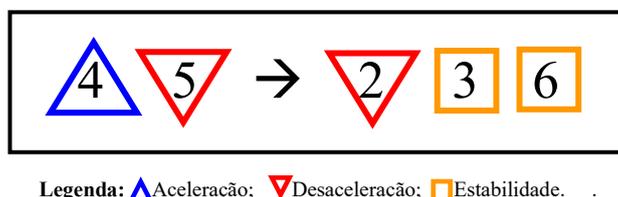


Figura 40 – Tendência geral da paisagem entre os períodos 1 (2000 a 2011) e 2 (2011 a 2020).

De modo a analisar os impactos das alterações da dinâmica da paisagem nos períodos 1 e 2, com base nas probabilidades das Tabelas 8 e 9, destacam-se algumas particularidades importantes das tendências observadas:

i. Desaceleração do crescimento da vegetação densa (→2).

Pode-se observar que as taxas de crescimento da classe 2, 0.70% e 0.71%, dos períodos 1 e 2, mantiveram-se muito próximas, dando continuidade à velocidade do processo. Entretanto, suas taxas de redução, diminuíram de -0.20% para -0.36%, acelerando o processo de supressão vegetal e assim, no balanço geral, diminuindo a sua taxa de transição total, de 0.5% para 0.35%, revelando uma tendência de desaceleração da recuperação de áreas verdes. Com base nos Mapas da Paisagem observados, esta revegetação densa ocorre majoritariamente nas áreas mais elevadas, em regiões menos antropizadas.

ii. Estabilidade da taxa de crescimento de pastagem (→3).

As taxas de transição total das áreas de pastagem (classe 3), entre os períodos 1 e 2, foram de 0.07% e 0.09%, respectivamente, consideradas equivalentes devido à diferença entre elas não representar uma alteração significativa no balanço total. Entretanto, é importante ressaltar que as taxas de redução e crescimento da classe 3 são as mais significativas da dinâmica da paisagem, representando cerca 40% das transições observadas na área de estudo e cerca de 50% dentre as transições das classes 2, 4, 5 e 6, em diversas interrelações entre as classes, conforme analisado anteriormente.

iii. Aceleração da perda de vegetação arbustiva (4→).

Entre os períodos 1 e 2, na Tabela 9, pode-se observar a diminuição da taxa de crescimento (→4), de 0.44% para 0.14%, e o aumento da taxa de redução (4→), de -0.77% para -0.97%. Estas alterações representam uma diminuição significativa da taxa de transição total da vegetação arbustiva (classe 4), de -0.33% para -0.83%, indicando um agravamento considerável neste processo de supressão vegetal.

É ainda oportuno destacar que as transições 4→3 e 3→4, entre as células de pastagem e vegetação arbustiva, são as mais significativas nesse processo de supressão vegetal. Na Tabela 8, o aumento da probabilidade da transição 4→3, de 0.376% para 0.600%, e a redução da transição oposta 3→4, de 0.396% para 0.102%, resultou em uma diminuição de -0.5% no percentual de Transição Total da classe 4, correspondendo a 98% das alterações em questão. Em outras palavras, a diminuição da classe 4 está relacionada majoritariamente à geração da pastagem.

Tal tendência se torna mais evidente ao observar que a transição 4→3, que no período 1 representava 49.0% das células (classe 4) suprimidas, passou a representar 61.7%, no período 2. Em sentido oposto, a transição 3→4, que representava 84.6% das células (classe 4) geradas, passou a representar 73.1%. Estas alterações dos percentuais das transições entre as classes 3 e 4 são claros indicadores da aceleração do processo de supressão da vegetação arbustiva.

iv. Desaceleração da diminuição de solo/rocha expostos (5→).

Conforme Tabela 8, foram observadas desaceleração nas taxas de redução, de -0.97% para -0.46%, e aceleração nas taxas de crescimento, de 0.34% para 0.42%, totalizando uma desaceleração da taxa de transformação total das áreas de solo/rocha expostos (classe 5), -0.63% para -0.05%, entre os períodos.

Tendo em vista que as transições para as áreas de pastagem (classe 3) são responsáveis por cerca de 80% das transformações da classe 5, os principais indicadores da desaceleração observada são a diminuição da probabilidade da transição 5→3, de 0.742% para 0.343%, e o aumento da probabilidade da transição 3→5, de 0.295% para 0.371%. Cabe destacar que tal desaceleração está diretamente associada à geração de células de classe 3 (pastagem), que provinham majoritariamente da classe 5 (solo/rocha

expostos), no período 1, e passaram a provir da classe 4 (vegetação arbustiva), no período 2. Mais especificamente, a formação da classe 3 no período 1, tinha sua origem em 58.6% (classe 5) e 29.7% (classe 4), que no período 2 passou para 27.3% (classe 5) e 47.8% (classe 4).

Diante do exposto, corroborando com o item iii, pode-se afirmar que a aceleração da supressão de vegetação arbustiva (4→) e a diminuição da sua recuperação (→4), estão relacionados à grande parte da alteração da dinâmica da paisagem entre os períodos 1 e 2, consideradas um reflexo claro da intensificação do processo de antropização da região.

v. Não houve alteração da taxa de crescimento urbano (→6).

Conforme Tabelas 8 e 9, a taxa de Transição Total das células urbanas manteve-se em crescimento constante, de 3.5%, nos períodos 1 e 2, indicando que, mesmo com alterações das conjunturas socioeconômicas, houve uma continuidade do processo de urbanização, com estabilidade das taxas de transição.

É importante destacar a diminuição significativa do processo de urbanização em áreas de solo/rocha expostos (5→6), saindo de 0.142% para 0.053%, dando espaço ao aumento do processo em áreas de pastagem (3→6), de 0.189% para 0.268%, e vegetação arbustiva (4→6), de 0.09% para 0.020%. Tal tendência está representada no Gráfico 2, contendo os percentuais de células que sofreram cada tipo de transição para urbano (→6). Conforme pode-se observar, o percentual de 5→6 diminuiu de 41.2% para 15.4%, enquanto o percentual de 3→6 aumentou, de 54.7% para 77.2%. Adicionalmente, em menor proporção, observa-se também o aumento do percentual de 4→6, de 2.6% para 5.8%. Estes números indicam que a maior parte das células urbanas originadas na classe 5, no período 1, passou a ter origem em células de pastagem (classe 3) e vegetação arbustiva (classe 4), no período 2.

Este aumento da urbanização em nas classes 2, 3 e 4 em detrimento da diminuição nas células de classe 5 (mais degradadas), indicam mais uma vez o claro avanço da degradação ambiental da região.

Essa conjuntura denota um desenvolvimento urbano caracterizado pela ocupação gradual das áreas verdes, destacando a tendência de urbanização das regiões rurais, com a diminuição de imóveis localizados em sítios em função da especulação imobiliária, envelhecimento populacional no campo e/ou redução da atividade agrícola familiar, além da degradação ambiental e ocupação de áreas inadequadas pela população.

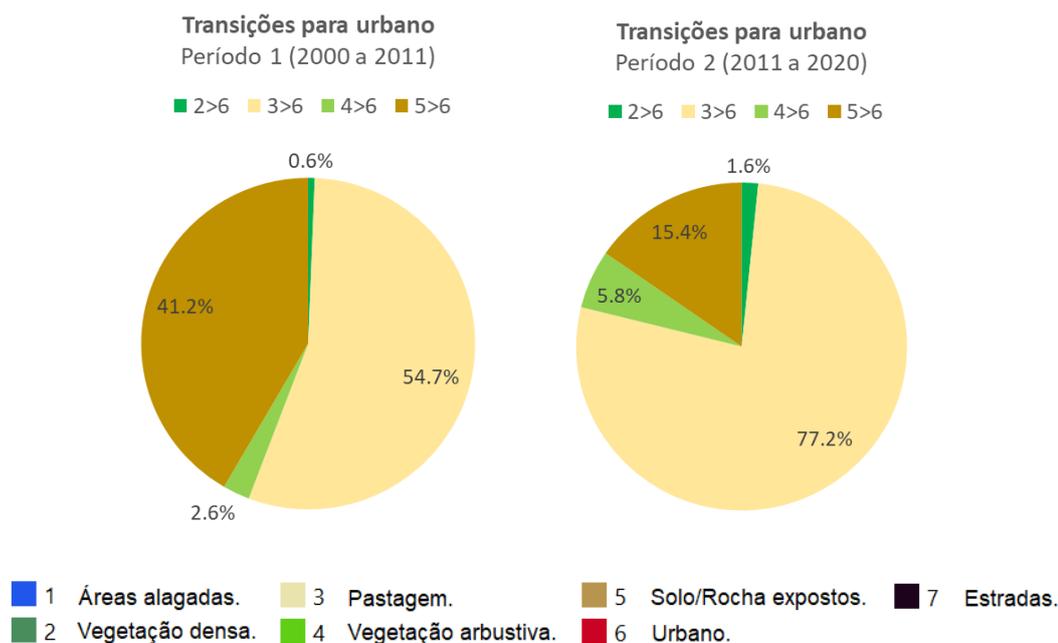


Gráfico 2 – Percentual de transições para urbano (→6).

4.3 PESOS DE EVIDÊNCIA E ANÁLISES DE INFLUÊNCIAS DAS VARIÁVEIS

Para a aplicação do método dos Pesos de Evidência, foram utilizadas as mudanças mais significativas da dinâmica da paisagem, selecionadas por apresentarem as maiores probabilidades de ocorrência de transição no processo de urbanização, dentro do enfoque pretendido. Desta forma, as transições inicialmente utilizadas foram 1→3; 2→3; 2→4; 3→1; 3→2; 3→4; 3→5; 3→6; 4→2; 4→3; 4→5; 4→6; 5→1; 5→3; e 5→6. Posteriormente, as transições 2→4, 3→1 e 3→4 foram excluídas do modelo, na fase de calibração e validação (item 4.5), conferindo melhores índices de similaridade das simulações.

As variáveis explicativas adotadas no processo de modelagem da paisagem, foram selecionadas por serem consideradas as principais forças do processo de urbanização. Em outras palavras, elas foram utilizadas no modelo por estarem associadas aos principais atrativos para a urbanização, incluindo os aspectos biofísicos favoráveis (Altitude e Declividade) e também a proximidade com as facilidades urbanas, como serviços públicos (transporte, saneamento, energia, segurança, etc), vias de tráfego (rodovias e ferrovias), loteamentos, oportunidades de empregos, negócios, comércio, equipamentos públicos (praças, parques, escolas, hospitais, etc), entre outros. Considera-se que tais

atrativos urbanos são os principais impulsores do processo, juntamente com as condições biofísicas favoráveis, motivando a população a ocupar determinadas regiões, seja para fins de moradia, indústria, comércio, serviços, equipamentos públicos ou outros.

As transições para urbano, $3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 6$ e $5 \rightarrow 6$, apesar de corresponderem a aproximadamente 11% do total das transições da região de estudo, são consideradas como um dos principais indicadores do avanço da transformação da paisagem, uma vez que representam efetivamente o processo de ocupação, e por estarem indiretamente associadas às demais transições antrópicas, como: supressão vegetal (classes 2 e 4), geração de pastagem e solo/rocha expostos (classes 3 e 5) e outras, neste caso representadas majoritariamente por $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 5$, $4 \rightarrow 3$ e $4 \rightarrow 5$.

Conforme explicitado no item 4.2, em oposição ao processo de antropização, também foram observadas transições de recuperação ambiental, com revegetação das áreas degradadas, como $5 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 2$ e $3 \rightarrow 2$.

É importante também destacar que as transições para urbano ($\rightarrow 6$) se retroalimentam em “feed backs” positivos, gerando nas áreas urbanizadas cada vez mais atrativos urbanos, que atuam também como “forçantes” do processo em toda a sua vizinhança, expandindo ainda mais o seu movimento de ocupação.

Nesse contexto, a dinâmica da paisagem é regida pelo balanço entre as transições antrópicas e as transições de recuperação ambiental, cada uma delas influenciada pelas variáveis explicativas, compostas por alguns fatores biofísicos e socioeconômicos. Para analisar esta dinâmica tão complexa, os gráficos dos Pesos de Evidência das transições urbanas $3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 6$ e $5 \rightarrow 6$, foram utilizados como ferramenta para explorar, quantificar e compreender as influências de cada variável explicativa no processo de urbanização, com o foco na ocupação das áreas, considerando ainda os seus potenciais riscos de inundações.

As variáveis explicativas utilizadas para a construção do modelo são:

- **Varáveis estáticas:** Declividade; Altitude; Distância das Rodovias; Distância das Vias Locais; Distância das Ferrovias; Distância dos Polos Comerciais; Distância dos Polos Industriais/Portuários; e Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI); e

- **Variáveis dinâmicas (mapas de distância):** distance_to_1; distance_to_2; distance_to_3; distance_to_4; distance_to_5; distance_to_6; e distance_to_7.

De modo geral, na comparação entre os inúmeros gráficos dos Pesos de Evidência dos períodos 1 e 2, pode-se afirmar que as influências das variáveis apresentaram tendências muito semelhantes, apesar de algumas diferenças localizadas. Tendo em vista que as projeções dos cenários futuros do presente estudo baseiam-se na suposição da continuidade da dinâmica atual, o modelo foi implementado através das observações do período 2.

De modo uniformizar os Pesos de Evidência entre as transições urbanas 3→6, 4→6 e 5→6, no período 2, inicialmente foram identificados, para cada variável “forçante”, intervalos aproximados que definem “faixas de tendências” (inicial, intermediárias e final), em que os coeficientes apresentaram comportamentos similares entre as transições, quantificando os seus graus de influência médios no processo. Posteriormente, no item 4.3.8, foram obtidos os coeficientes médios aproximados das três transições, em cada faixa de tendência, ponderados pelos seus percentuais de ocorrência, de modo a permitir a análise integrada das influências de cada variável sobre as transições urbanas, no contexto geral da paisagem.

4.3.1 Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI)

Considerando que o ISMFI representa a fragilidade do local quanto aos riscos de inundações em potencial, associados ao meio físico em que se encontram, a análise de sua influência no processo de urbanização, juntamente com as das demais variáveis, torna-se importante para o estudo, permitindo a compreensão da dinâmica do desenvolvimento urbano com o enfoque pretendido. Conforme apresentado no item 2.2.4, o ISMFI é classificado da seguinte forma, segundo os riscos de inundações:

- $0 \leq \text{ISMFI} \leq 20$: Muito Baixo;
- $20 < \text{ISMFI} \leq 40$: Baixo;
- $40 < \text{ISMFI} \leq 60$: Médio;
- $60 < \text{ISMFI} \leq 80$: Alto; e
- $80 < \text{ISMFI} \leq 100$: Muito Alto.

No Gráfico 3, os Pesos de Evidência da variável ISMFI, são apresentados para as transições $3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 6$ e $5 \rightarrow 6$, respectivamente. A coluna da esquerda contém os gráficos obtidos pelo modelo, inicialmente calculados para pequenos intervalos (“Buffer” = 1), onde pode-se observar uma variabilidade significativa dos dados, com coeficientes positivos e negativos.

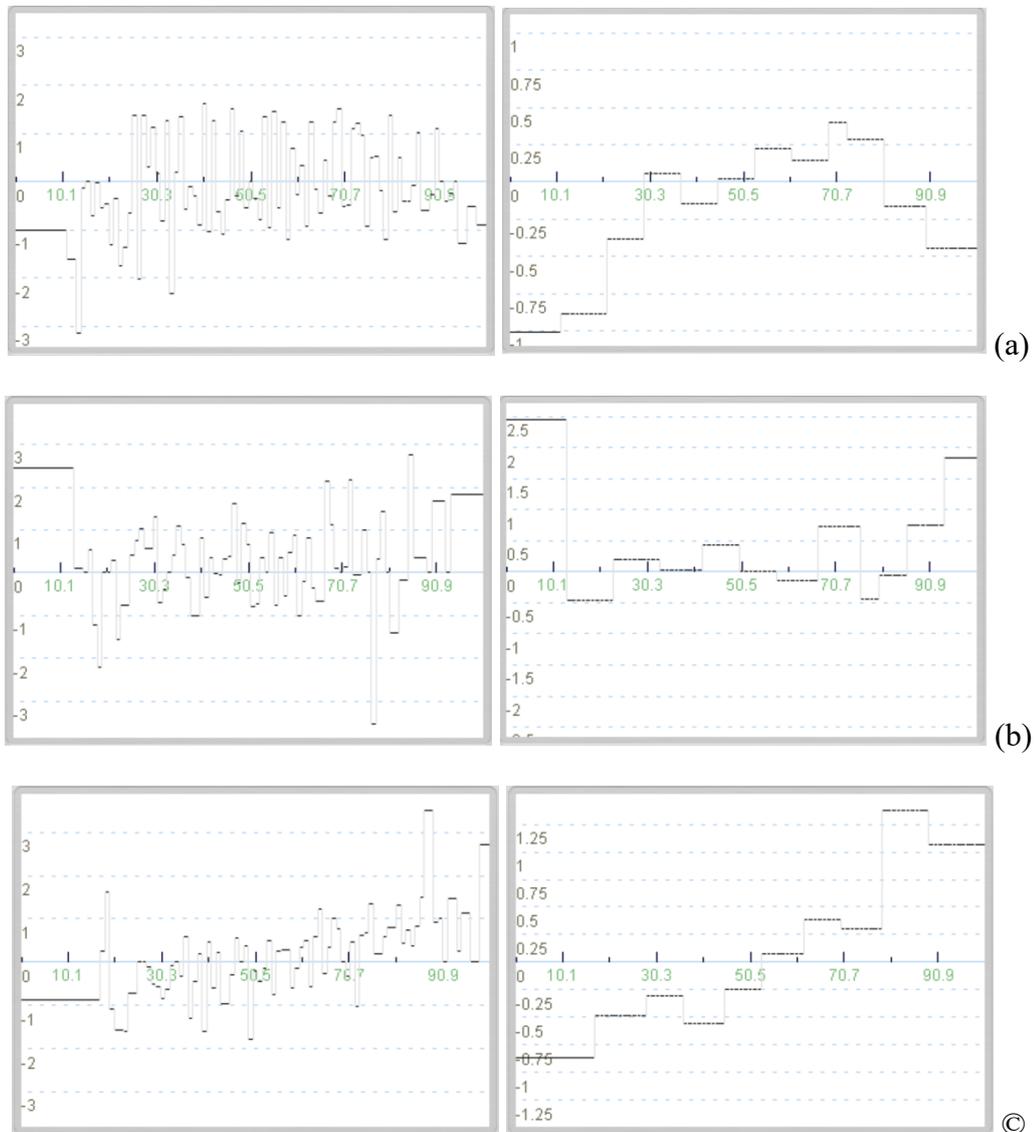


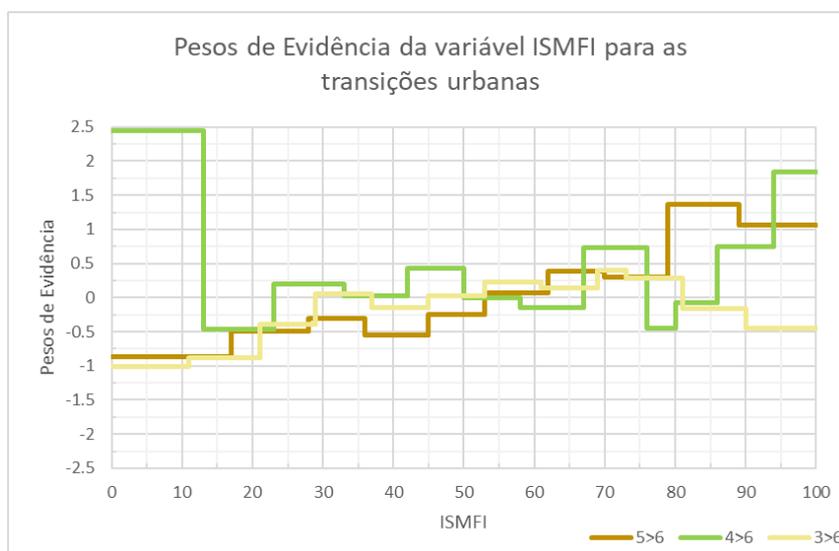
Gráfico 3 – Pesos de Evidência da variável estática ISMFI, originais (esquerda) e suavizados (direita), para as transições: (a) $3 \rightarrow 6$; (b) $4 \rightarrow 6$; e (c) $5 \rightarrow 6$.

A variabilidade dos gráficos da esquerda indica uma influência mal estabelecida da variável nas transições estudadas. Em outras palavras, tal variabilidade denota um fraco “senso comum” da população, sobre a importância de os riscos de inundações serem priorizados no processo de ocupação. Esta pouca influência do ISMFI observada

corrobora com a hipótese de que os atrativos urbanos se mostram mais influentes na dinâmica da paisagem, do que os riscos de inundações.

De modo a atenuar a variabilidade dos dados, permitindo a identificação e análise das tendências gerais dos pesos de evidência, o Gráfico 3, na coluna direita, apresenta os coeficientes calculados para intervalos maiores (“buffer” = 8).

Para uma melhor análise da dinâmica da paisagem, os gráficos “suavizados” foram apresentados sobrepostos no Gráfico 4, de modo a permitir a comparação visual entre as influências do ISMFI nas três transições urbanas simultaneamente.



- | | | | |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| ■ 1 Áreas alagadas. | ■ 3 Pastagem. | ■ 5 Solo/Rocha expostos. | ■ 7 Estradas. |
| ■ 2 Vegetação densa. | ■ 4 Vegetação arbustiva. | ■ 6 Urbano. | |

Gráfico 4 – Pesos de Evidência suavizados (buffer” = 8) da variável estática “ISMFI”, para as transições: 3→6; 4→6; e 5→6.

Em análise aos gráficos sobrepostos, pode-se observar, nas faixas intermediárias, de “20 a 80”, relativas aos riscos “Baixo”, “Médio” e “Alto”, os baixos coeficientes positivos e negativos (± 0.5), indicam pouca influência da variável no processo de urbanização dessas regiões. É importante destacar que a tendência desta faixa corresponde a 93% das transições para urbano ($\rightarrow 6$), conforme o Gráfico 5, que apresenta as quantidades e percentuais das referidas transições, para cada faixa de ISMFI, no período 2.

Outro ponto de destaque são os altos coeficientes dos Pesos de Evidência nas faixas inicial e final, “0 a 20” e “0 a 80”, indicando que a variável tem influência mais forte nas

regiões de risco “Muito Baixo” e “Muito Alto”, respectivamente. Entretanto, estas faixas correspondem a apenas 2% e 5% das ocorrências, respectivamente, totalizando 7% das transições para urbano. Apesar da pouca representatividade quando comparada à transição total, é importante destacar que os coeficientes da faixa “80 a 100” contemplam 1635 células ocupadas no período 2, equivalentes a uma área de 1.5 km² em regiões de risco “Muito Alto”.

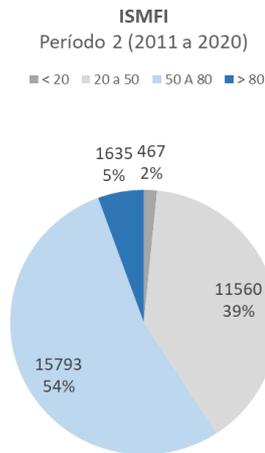


Gráfico 5 – Quantidades e Percentuais de transições para urbano (→6), conforme as faixas de tendências analisadas, no período 2 (2011 a 2020).

De modo a identificar as tendências por tipo de transição, o Gráfico 6 apresenta os números de ocorrências e os percentuais das transições 3→6, 4→6 e 5→6, no período 2 (2011 a 2020), em cada faixa de tendências, adotada para os Pesos de Evidência da variável ISMFI.

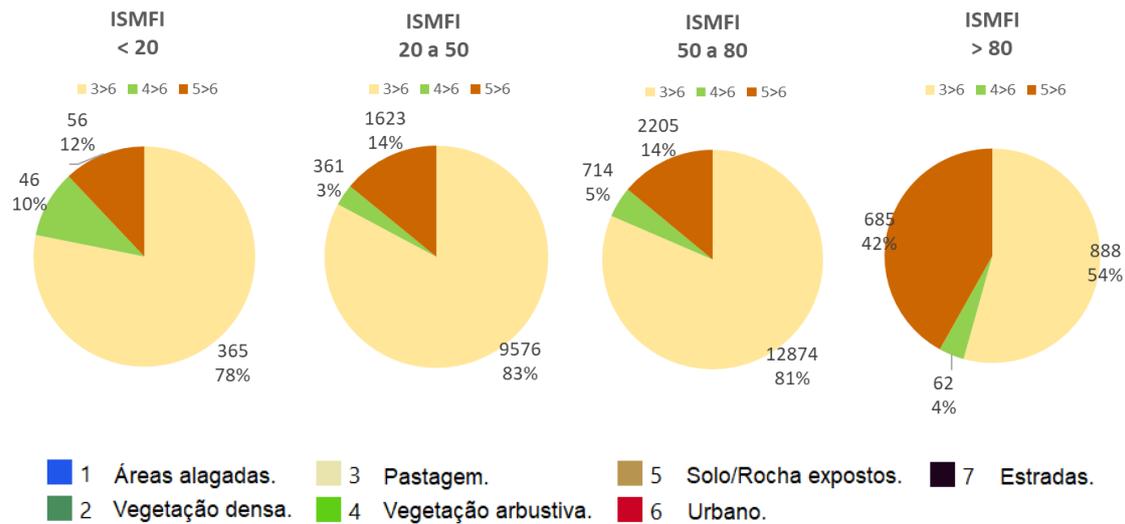


Gráfico 6 - Números de ocorrências e percentuais das transições 3→6, 4→6 e 5→6, conforme faixas de ISMFI, no período 2 (2011 a 2020).

De modo geral, pode-se observar que a transição 3→6 apresentou os maiores percentuais em todas as faixas, com média total de 80% das ocorrências. Este número encontra-se dentro do esperado, tendo em vista tratar-se da probabilidade de ocorrência total anual mais alta dentre as transições para urbano, 0.268%, conforme apresentado na Tabela 8. As transições 5→6 e 4→6, correspondem a 16% e 4% do número total de transições, respectivamente, e possuem probabilidades de ocorrência total anual de 0.053% e 0.020%, conforme Tabela 8.

Em uma análise mais detalhada, considerando os tipos de transição para urbano, em cada faixa do ISMFI, pode-se observar as seguintes faixas de tendências:

i. ISMFI entre 0 e 20 (Muito Baixo): os Pesos de Evidência negativos e sem variabilidade para as áreas de pastagem (classe 3) e solo/rocha expostos (classe 5), da ordem de -1.0, indicam uma influência bem definida para a “não ocupação” dessas regiões. Esta tendência encontra-se na contramão do esperado em um processo de urbanização que considere a segurança contra inundações como norteador da ocupação. Em contrapartida, nas áreas de vegetação arbustiva (classe 4), observam-se altos coeficientes positivos, da ordem de 2.5, indicando uma forte influência desta ocupação, porém pouco expressiva na paisagem, devido à sua baixa probabilidade de ocorrência total (Tabela 8), quando comparada às demais transições. O número de ocorrências da transição 4→6, na faixa de ISMFI < 20, é de apenas 46 células, equivalente a apenas 10% das transições da faixa, conforme Gráfico 6. Apesar da pouca expressão na paisagem, cabe destacar que este é o maior percentual de ocorrência desta transição, quando comparado às outras faixas, indicando uma tendência de maior ocupação das áreas de vegetação arbustiva (classe 4) nesta faixa.

ii. ISMFI entre 20 e 80 (Baixo, Médio e Alto): os baixos coeficientes dos Pesos de Evidência, variando entre positivos e negativos, indicam uma fraca influência da variável ISMFI no processo das três transições para urbano, revelando uma baixa prioridade da segurança contra inundações, observada na maior parte das ocupações (93%), indicando que as outras variáveis, associadas aos atrativos urbanos, mostram-se mais influentes que o ISMFI no processo de ocupação urbana desta faixa. Pode-se ainda destacar, com base no Gráfico 6, que cerca de 80 % das ocupações ocorrem em células de pastagem (classe 3) e 14% em células de solo/rocha expostos (classe 5), que compõem a maior parte da paisagem.

iii. ISMFI entre 80 e 100 (Muito Alto): os altos Pesos de Evidência positivos para a transição 5→6, indicam forte influência no processo de ocupação das áreas de solo/rocha expostos (classe 5), em regiões de risco “Muito Alto”. Esta tendência também é oposta ao esperado, do ponto de vista da segurança contra inundações. O balanço entre a influência da variável ISMFI e as probabilidades totais de ocorrência (Tabela 8), de cada transição, resulta em um aumento do percentual de ocorrências da transição 5→6 nesta faixa (Gráfico 6), atingindo 42%, o triplo das demais faixas. Pode-se afirmar que, este aumento nesta faixa se deve principalmente à forte impulsão da transição 5→6, devido aos coeficientes positivos, à repulsão da transição 3→6, devido aos seus coeficientes negativos, e à baixa probabilidade de ocorrência da transição 4→6.

De modo geral, pode-se afirmar que a variável ISMFI, além de não representar uma influência significativa em 93% das ocupações urbanas, que ocorrem na faixa entre “20 a 80” (Baixo, Médio e Alto riscos), ainda exerce forte influência positiva em 5% das ocupações na faixa “80 a 100” (risco Muito Alto), principalmente em áreas solo/rocha expostos (classe 5). Estas tendências são contrárias ao esperado para uma ocupação com controle de inundações. Como exceção, na faixa “0 a 20” (risco Muito Baixo) observa-se a influência de ocupação em áreas de vegetação arbustiva (classe 4), porém, sem representatividade na paisagem, correspondendo a apenas 2% das transições para urbano.

4.3.2 Altitude

Em análise aos Pesos de Evidência da variável Altitude, para as transições 3→6, 4→6 e 5→6, apresentados no Gráfico 7, pode-se observar a variabilidade dos coeficientes, porém com tendência geral predominantemente positiva, até cerca de 60 m de altitude, indicando uma influência para a ocupação desta faixa. Em altitudes maiores que 60 m, os coeficientes são predominantemente negativos, com forte influência para a “não ocupação”, principalmente nas áreas de pastagem (classe 3). Esta repulsão do processo se torna ainda mais forte na faixa de altitude > 150 m. Atribui-se a isto o desinteresse da população pelos locais mais elevados, geralmente em função das dificuldades de acesso e da diminuição das facilidades urbanas nessas regiões.

Um ponto de destaque na tendência observada são os coeficientes positivos das transições 4→6 e 5→6, em baixas altitudes (até 5 m), chegando a 2.00 e 0.49, respectivamente, indicando a atração da ocupação destas áreas, mesmo diante dos riscos de inundações associados às baixas altitudes. Em sentido oposto, a transição (3→6), com

altitudes até 4 m, apresenta pequenos coeficientes negativos, de até -0.36, indicando uma tendência de leve repulsão do processo de urbanização das áreas de pastagem (classe 3), nesta faixa de altitude. Conforme discutido em 4.3.1, estes gráficos refletem a tendência de maior ocupação em áreas de vegetação arbustiva (classe 4) com altitudes de até 4 m.

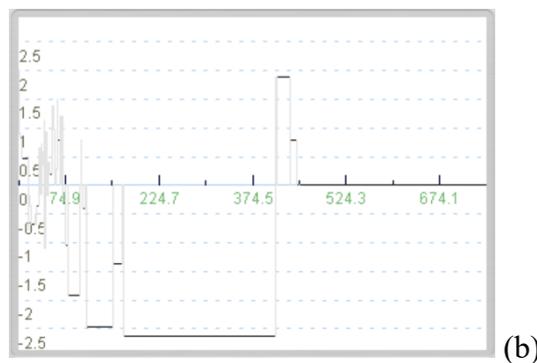
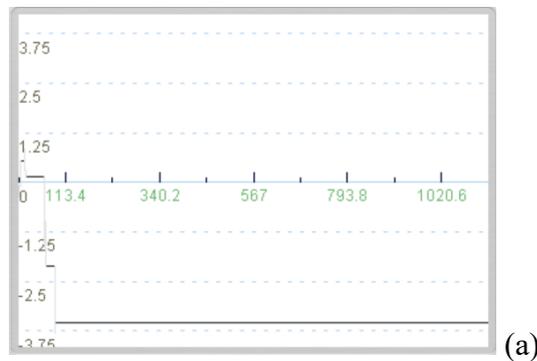


Gráfico 7 – Pesos de Evidência da variável estática “Altitude” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6.

É importante destacar que 14% das transições urbanas (→6) ocorrem na faixa de até 5m e 85% na faixa de 5 a 60 m, conforme apresentado no Gráfico 8, totalizando 99% das transições para urbano em altitudes menores que 60 m.

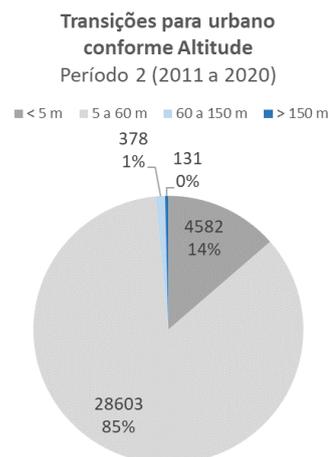


Gráfico 8 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de Altitude.

Em análise mais detalhada da distribuição das transições, o Gráfico 9 apresenta as quantidades e percentuais de células para cada tipo de transição urbana, em cada faixa de altitude. Considerando que os percentuais médios das transições em todas as faixas de tendência são: 80% (3→6); 4% (4→6); e 16% (5→6), observa-se que na faixa de até 5 m ocorre uma diminuição do percentual de 3→6 para 67%, e um aumento do percentual de 5→6 para 30%. Estas variações em relação à média são fruto da influência da repulsão e impulsão da altitude nas referidas transições, respectivamente.

Em resumo, observa-se em relação à Altitude que, para as áreas mais baixas, de até 5 m, a variável além de ter pouca influência para impedir a ocupação das áreas de pastagem (classe 3), atua como forte impulsora (atrativo) da urbanização nas áreas de solo/rocha expostos (classe 5). E, mesmo com a leve repulsão observada em 3→6, as áreas de pastagem ainda são as mais suscetíveis às inundações, devido a sua alta probabilidade total de ocorrência da transição (Tabela 8).

Acredita-se que a tendência de ocupação das áreas mais baixas ocorra, principalmente, pela influência dos atrativos urbanos, associados também a um possível desconhecimento dos riscos relativos às baixas altitudes e/ou, na maioria das vezes, agravados pela dificuldade de acesso a outras terras. Esta condição é comum principalmente para a população de baixa renda que, muitas vezes, tem conhecimento dos riscos do local, mas tornam-se vulneráveis devido à condição social em que se encontram.

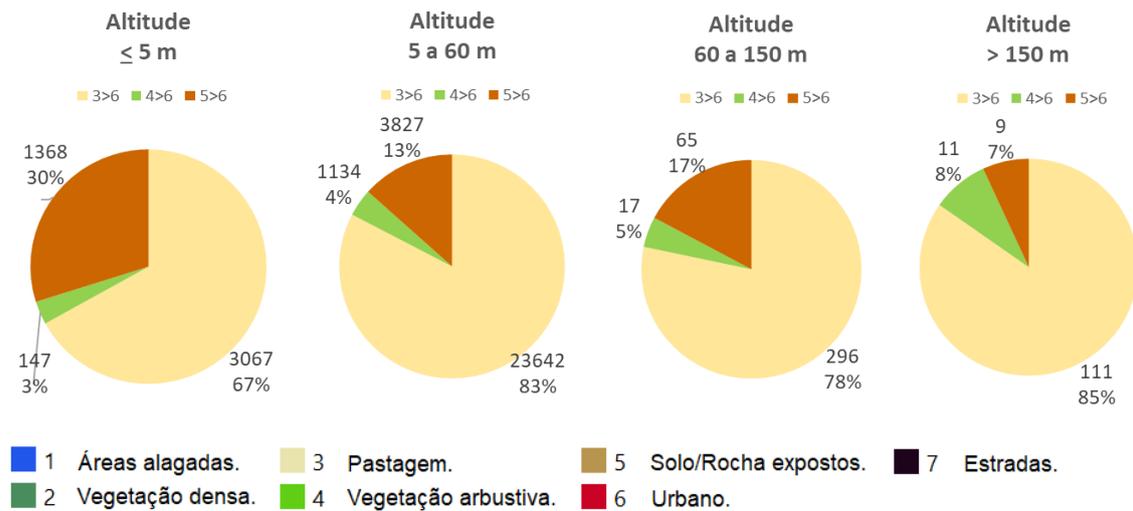


Gráfico 9 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de altitudes e tipo de transição.

De maneira análoga, a tendência de “não ocupação” das faixas de altitudes >60 m, tornando-se ainda mais forte para altitudes >150 m, reflete as limitações no processo de ocupação dessas regiões, caracterizadas pela falta de atributos urbanos e pelas suas difíceis condições de acesso. É importante destacar que as tendências de “ocupação” das áreas mais baixas e, ainda, a “não ocupação” das áreas mais altas, são consideradas contrárias à lógica de um processo de urbanização voltado para a segurança contra inundações, sendo estes considerados argumentos de apoio à hipótese estudada.

4.3.3 Declividade

Para a transição 3→6, os Pesos de Evidência da variável Declividade, no Gráfico 10, apresentaram uma pequena influência positiva, com coeficientes até 0.5, na faixa inicial de declividades < 12% e, posteriormente, uma forte influência negativa para declividades > 12%, atingindo coeficientes de até -3.39. Para as transições, 4→6 e 5→6, a Declividade apresentou coeficientes muito pequenos, quase nulos, indicando pouquíssima influência em todas as faixas. Ainda assim, observa-se que, mesmo com influência muito baixa, os coeficientes apresentam o mesmo comportamento observado para a transição 3→6, com valores positivos na faixa inicial (neste caso para as declividades < 2%) e negativos (para declividades > 2%). Dessa forma, assim como observado para a Altitude, os Pesos de Evidência da Declividade indicam uma tendência oposta ao esperado sob o ponto de vista da segurança contra inundações. Eles apresentam uma impulsão da ocupação nas áreas mais planas que são as regiões associadas aos

maiores riscos de inundações. Além disso, eles também apresentaram uma forte repulsão nas áreas mais declivosas, associadas aos menores riscos de inundações. Esta tendência também pode ser identificada no Gráfico 11, onde observa-se que 84% das transições ocorrem nas faixas de declividades $< 8\%$.

No Gráfico 12, pode-se observar também que os percentuais das transições para urbano mantiveram as mesmas tendências de distribuição para as três faixas de declividade, indicando que a influência da variável é uniforme entre as classes 3, 4 e 5.

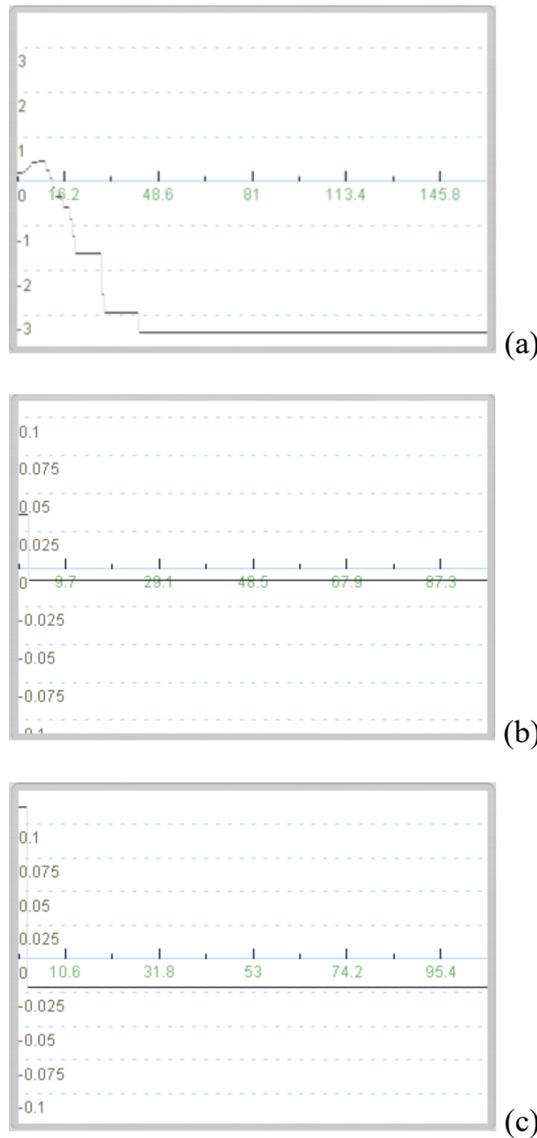


Gráfico 10 – Pesos de Evidência da variável estática “Declividade” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6.

Transições para urbano conforme Declividade
Período 2 (2011 a 2020)

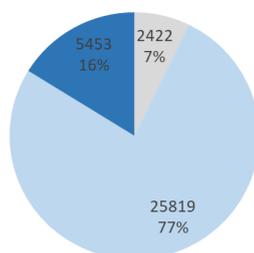


Gráfico 11 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de declividade.

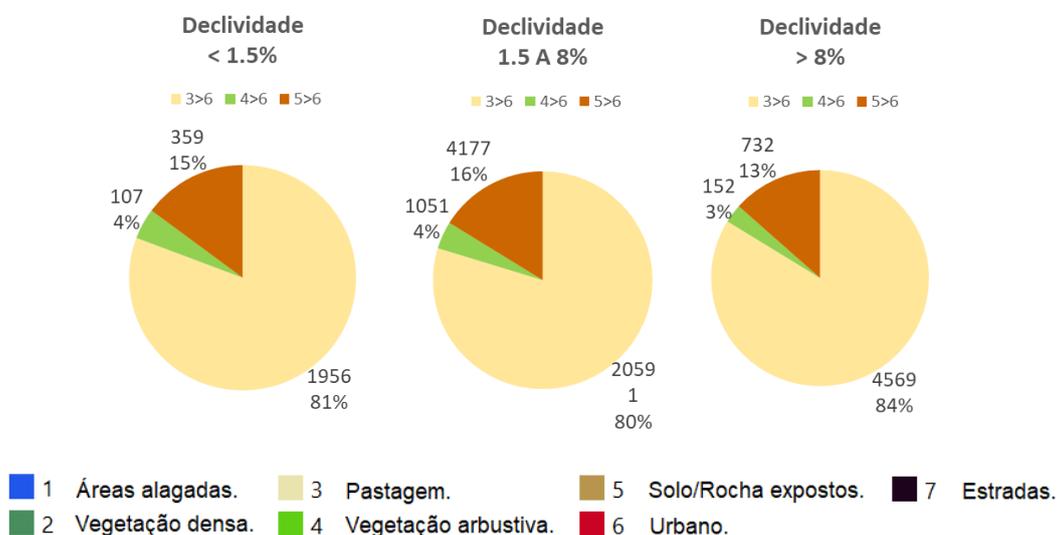


Gráfico 12 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de altitudes e tipo de transição.

Diante do exposto, assim como nos terrenos em altitudes elevadas, a repulsão da ocupação em terrenos inclinados também é considerada natural devido às dificuldades de acesso e à falta dos atrativos urbanos. Entretanto, a impulsão da ocupação das áreas mais planas demonstra mais uma vez, um possível desconhecimento sobre os riscos associados a estas regiões e, ainda, que os atrativos urbanos exercem maior influência no processo de urbanização em relação à segurança contra inundações.

4.3.4 Distância de rodovias e vias locais

Os eixos de transporte se destacam como um dos maiores impulsores do processo de urbanização, criando condições de acesso às regiões inexploradas e assim, atraindo a

ocupação urbana em suas proximidades. A influência das rodovias e das vias locais podem ser observadas na ocupação da região de estudo, através das células urbanas (classe 6) que surgiram ao longo das vias nos períodos 1 e 2, conforme observado nos Mapas de Paisagem dos anos de 2000, 2011 e 2020 (Figura 39).

Em análise aos Pesos de Evidência do Gráfico 13, de modo geral, para as duas variáveis, pode-se observar uma impulsão do processo de urbanização nas faixas iniciais, de acordo com o tipo de transição.

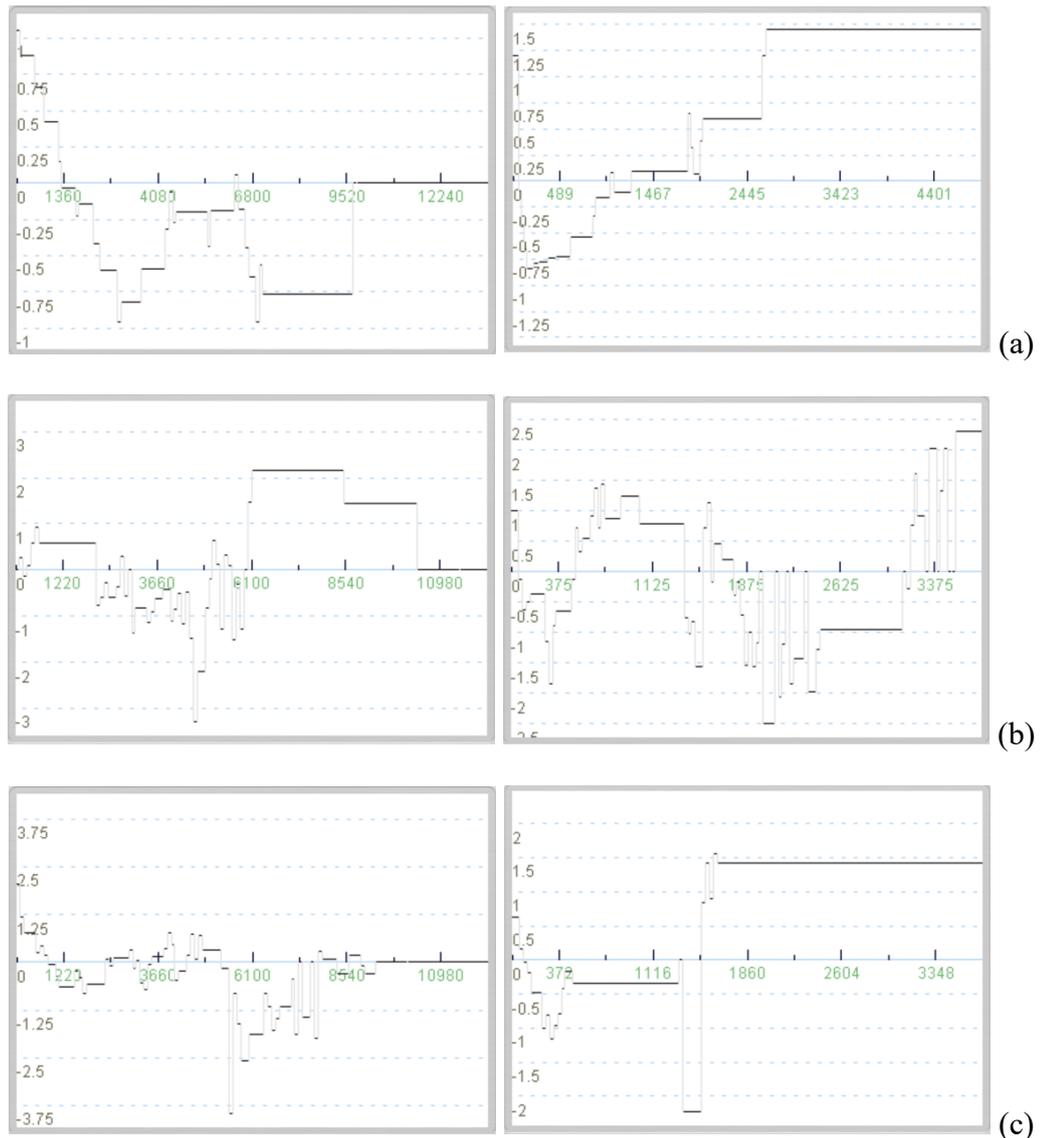


Gráfico 13 – Pesos de Evidência das variáveis estáticas “Distância de Rodovias” e “Distância de Vias locais” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6.

No caso da variável “Distância de rodovias” os coeficientes positivos são observados para distâncias de até 1.2 km, aproximadamente, principalmente nas áreas de pastagem (classe 3) e solo/rocha expostos (classe 5). No caso das vias locais, também é

observada a mesma influência positiva inicial, porém até 60 m de distância. Assim como as demais variáveis, essa impulsão inicial está relacionada não somente ao acesso às terras inexploradas, proporcionado pelas vias, mas também, indiretamente, aos atrativos urbanos.

Para as faixas de distâncias intermediárias, observa-se uma tendência predominante de repulsão. No caso das rodovias, tal tendência é observada nas faixas de distância de 1.2 a 6 km e de 6 a 10 km, aproximadamente. E no caso das vias locais, a tendência de repulsão é observada na faixa de distância de 60 a 300 m, tornando-se ainda mais forte na faixa de distâncias > 300 m, aproximadamente. Considera-se que as tendências negativas, observadas nas faixas intermediárias, representam uma limitação da ocupação dessas regiões em função da falta das facilidades urbanas e dos aspectos biofísicos desfavoráveis, que se destacam como condicionantes para a urbanização.

Uma exceção à repulsão observada nas faixas intermediárias são os coeficientes positivos dos Pesos de Evidência da “Distância de Rodovias” para a transição 4→6, na faixa entre 6 e 10 km, conforme Gráfico 13. Considera-se que estes dados se referem à vocação urbana das áreas de vegetação arbustiva (classe 4), localizadas em áreas rurais, ainda não exploradas por rodovias, e que se encontram em processo de urbanização.

Nas faixas finais, de distância maiores que 10 km de Rodovias, os coeficientes nulos, indicam uma falta de influência da variável em questão. No caso das vias locais, observa-se uma forte impulsão da urbanização nas áreas localizadas a distâncias a partir de 1.5 a 3.0 km, aproximadamente. Entretanto, a forte influência observada não gera efeitos significativos na paisagem, tendo em vista que o percentual de transições nessa faixa de distância é muito baixo, conforme apresentado no Gráfico 14.

No Gráfico 14, confirmando as tendências gerais observadas nas demais variáveis, pode-se afirmar que a maior parte da urbanização ocorre nas faixas iniciais, localizadas mais próximas às Rodovias e Vias Locais. Pode-se observar que 53% das transições ocorrem a menos de 1.2 km de Rodovias, e 86% a menos de 60 m de Vias Locais. Analogamente, nas faixas finais, de distâncias de Rodovias (> 10 km) e de Vias Locais (> 300 m), as ocorrências representam menos que 1% das transições.

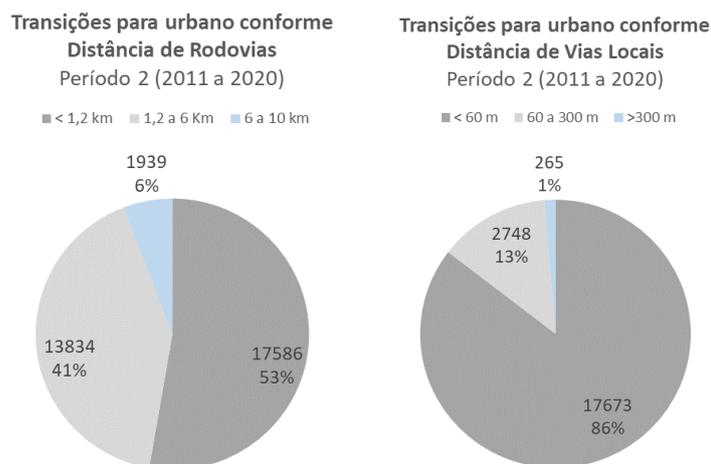


Gráfico 14 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de Rodovias” e “Distância de Vias Locais”.

No Gráfico 15 é possível avaliar a distribuição das tendências conforme as faixas de distância. Um ponto de destaque é o aumento do percentual da transição 4→6, na faixa de distância de “6 a 10 km” de Rodovias, coerente com os altos coeficientes positivos dos seus Pesos de Evidência (até 2.15). Conforme discutido anteriormente, acredita-se que estes dados, estejam associados ao processo de urbanização das regiões rurais e ao desencadeamento da antropização gradual da região com o avanço da supressão vegetal.

Outro ponto de destaque no Gráfico 15, no caso da “Distância das Vias Locais”, são as maiores ocorrências da transição 5→6, atingindo os percentuais de 31% na faixa de 60 a 300 m, e 66% na faixa > 300 m. Esta tendência revela que em regiões mais distantes das vias locais, as células de solo/rocha expostos (classe 5) apresentam maior vocação urbana, possivelmente por representarem as áreas mais degradadas no entorno dos aglomerados urbanos em expansão.

Diante do exposto, de modo geral, os Pesos de Evidência analisados indicaram que, de fato, a proximidade com as rodovias e vias locais são atrativos importantes para a ocupação urbana, até determinadas distâncias, devido não somente ao acesso às novas terras, mas também pelos outros atrativos urbanos indiretamente associados. Analogamente, em regiões mais distantes, observa-se que a forte repulsão do processo representa uma necessidade limitante do processo de urbanização, ainda maior que a força de impulsão, configurando uma vocação urbana cada vez mais baixa, à medida que se tornam mais distantes das rodovias e vias locais.

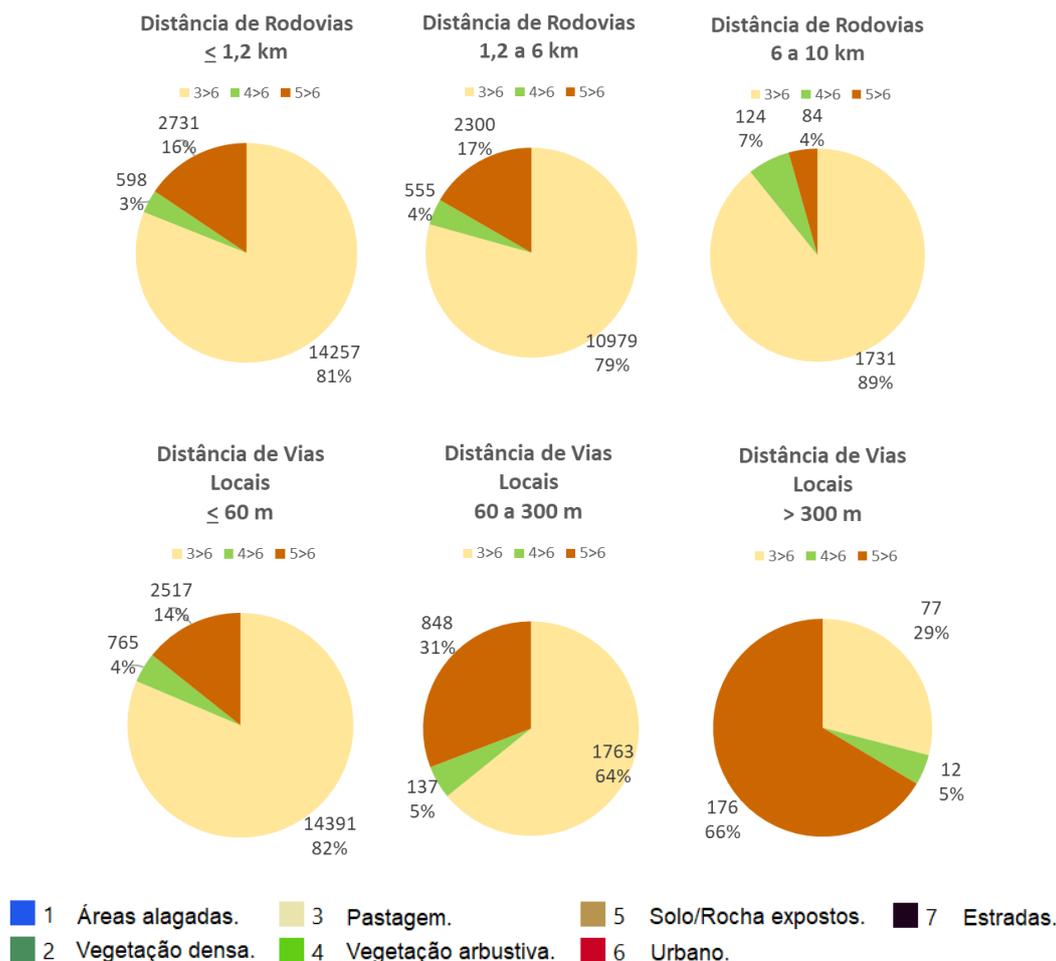


Gráfico 15 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de “Distância de Rodovias” e “Distância de Vias Locais” e tipo de transição.

4.3.5 Distância de Ferrovias

Os Pesos de Evidência da variável “Distância de ferrovias”, do Gráfico 16, apresentam a mesma tendência geral das variáveis “Distância de rodovias” e “Distância de vias locais”, com algumas particularidades.

A variável apresenta impulsão inicial para a urbanização das regiões mais próximas às ferrovias, localizadas a distâncias de até 2 km, aproximadamente, dependendo da classe. Nas faixas intermediárias, entre 2 e 14 km, e entre 14 e 20 km, em média, observa-se variabilidade dos coeficientes, porém com tendência predominantemente negativa, tornando-se ainda mais fortes com o aumento da distância, até tornarem-se neutras na faixa de distância final (> 20 km).

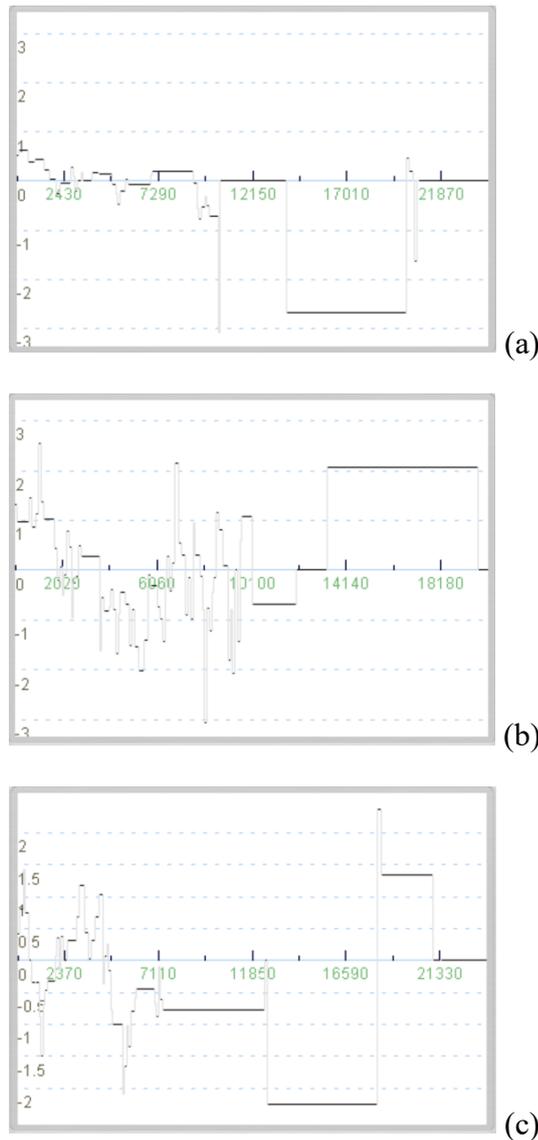


Gráfico 16– Pesos de Evidência das variáveis estáticas “Distância de ferrovias” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6.

Conforme o Gráfico 17, pode-se destacar que 42% das transições para urbano ocorrem na faixa inicial (< 2 km) e 58% na faixa intermediária (2 e 14 km), de distâncias de ferrovias. Nas faixas das distâncias maiores que 14 km, as ocorrências não são representativas.

No Gráfico 18, pode-se destacar que, apesar de não representativos na dinâmica geral da paisagem, observa-se um aumento dos percentuais das transições 5→6, na faixa intermediária entre 14 e 20 km, e 4→6, na faixa de distância >20 km, indicando uma influência positiva para urbanização das classes 4 e 5, conforme observado nos seus Pesos de Evidência. Esta mesma tendência é observada nos coeficientes da variável “Distância

de rodovias” que, conforme discutido anteriormente, é atribuída ao processo de urbanização das áreas rurais.

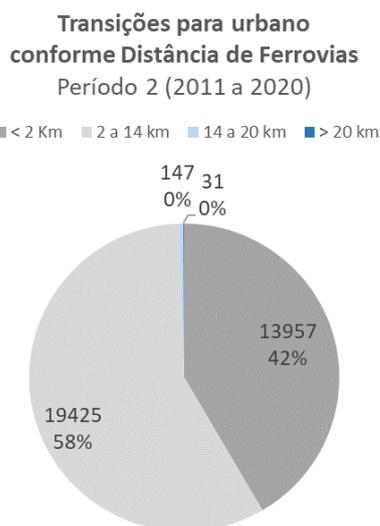


Gráfico 17 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de Ferrovias”.

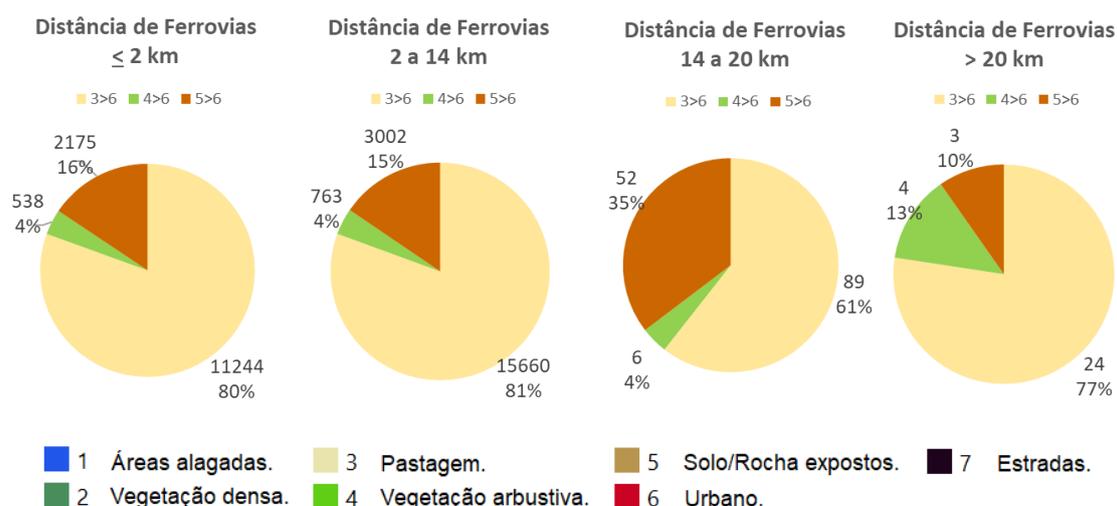


Gráfico 18 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme faixas de “Distância de Ferrovias” e tipo de transição.

Diante do exposto, análogo às variáveis “Distância de rodovias” e “Distância de vias locais”, observa-se para a variável “Distância de ferrovias”, a tendência de impulsão para urbanização das áreas mais próximas às ferrovias e repulsão para áreas mais distantes, é um típico resultado da influência das facilidades urbanas no processo do desenvolvimento da região.

4.3.6 Distância de Polos Industriais/Portuários e Comerciais

Os Polos Industriais/Portuários e Comerciais são considerados atributos urbanos importantes para o desenvolvimento local, tendo em vista não somente a disponibilidade de comércio e serviços para a população, mas também a oferta de empregos e negócios gerados também pela indústria e atividades portuárias, além de todos os impactos na economia local, como oportunidades de investimentos, a arrecadação de impostos, obras de infraestrutura e urbanização, o giro na economia, etc.

O Gráfico 19 apresenta os Pesos de Evidência, das variáveis “Distância dos Polos Industriais/Portuários” e “Distância dos Polos Comerciais” para as transições 3→6, 4→6 e 5→6, onde é possível observar que, de modo geral, os coeficientes assumem a mesma tendência geral observada para as outras variáveis, com algumas particularidades.

De modo geral, os gráficos das transições mais representativas das duas variáveis apresentam tendências de impulsão do processo de urbanização para a faixa inicial de distância < 3 km dos polos.

Na faixa intermediária entre 3 e 9 km, aproximadamente, observa-se bastante flutuação dos coeficientes, indicando influências não muito bem definidas, porém, com tendências predominantemente negativas, conforme aumento da distância.

Na faixa média entre 9 e 17 km, destacam-se fortes tendências de repulsão da urbanização, com coeficientes atingindo valores de -2.0 a -3.0, considerados significativos quando comparados aos coeficientes das outras variáveis, mostrando que as atividades comerciais e industriais/portuárias são, de fato, fatores de forte influência na dinâmica da ocupação urbana.

Na faixa final de distâncias >17 km, observa-se influência neutra para a “Distância dos Polos Industriais/Portuários”. Para a “Distância de Polos Comerciais”, nesta faixa, observam-se fortes tendências negativas para as transições 3→6 e 5→6, atingindo coeficientes de -3.0 a -2.0, respectivamente. Em exceção a isto, observa-se uma forte tendência positiva para a transição 4→6, com coeficientes até 4.0.

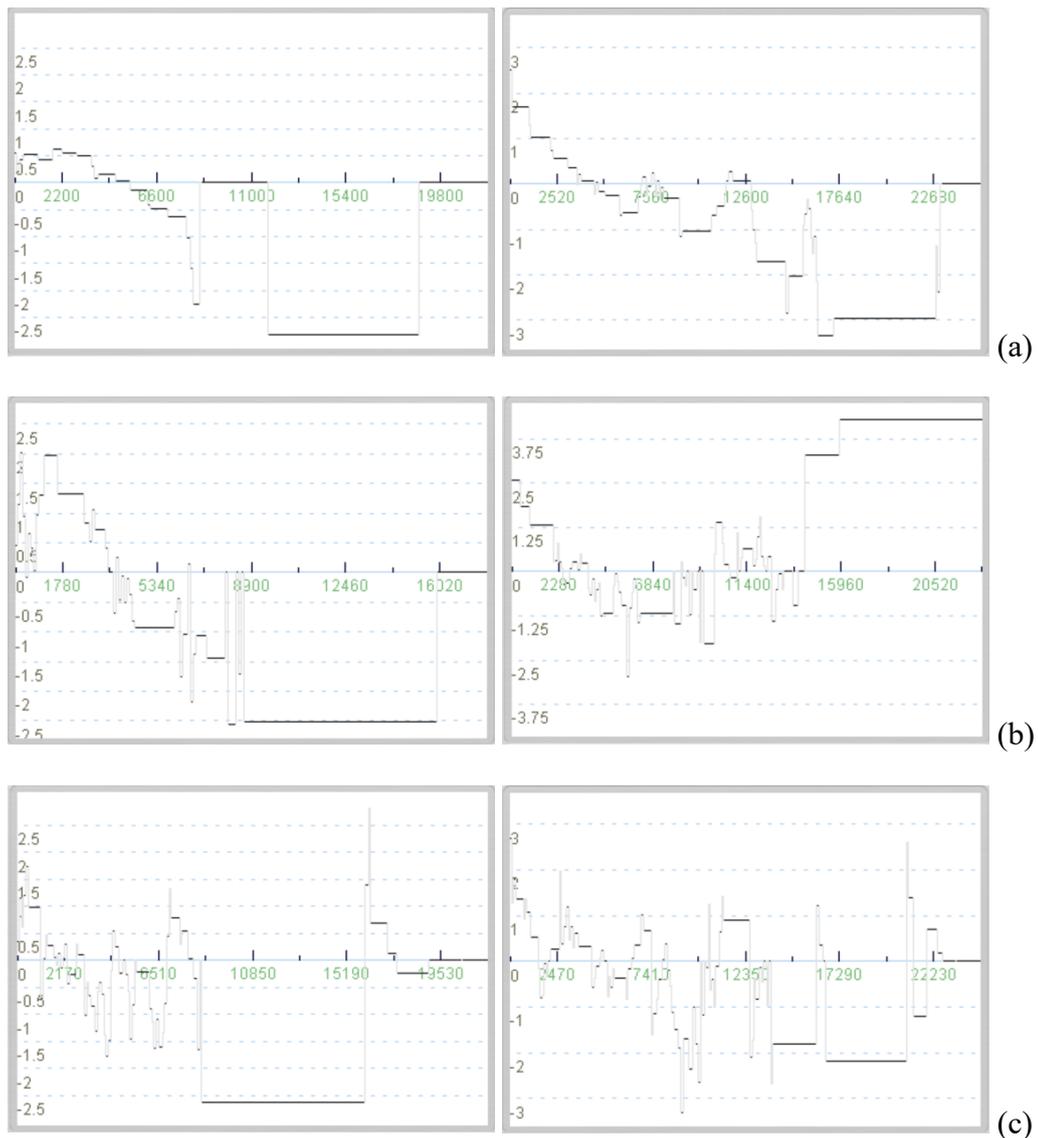


Gráfico 19 – Pesos de Evidência das variáveis estáticas “Distância dos Polos Industriais/Portuários” e “Distância de Polos Comerciais” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6.

Acredita-se que a impulsão observada na faixa final da classe 4 (vegetação arbustiva), assim como a repulsão das classes 3 (pastagem) e 5 (solo/rocha expostos), em áreas mais distantes dos Polos Comerciais, estejam associadas ao processo de urbanização das áreas rurais, com a formação dos núcleos urbanos nas áreas verdes menos antropizadas. É importante destacar que, tais influências observadas não têm representatividade na dinâmica da paisagem, uma vez que 99% das transições urbanas ocorrem nas faixas inicial e intermediária, com até 9 km dos Polos Industriais/Portuários e com até 17 km dos Polos Comerciais, conforme apresentado no Gráfico 20.

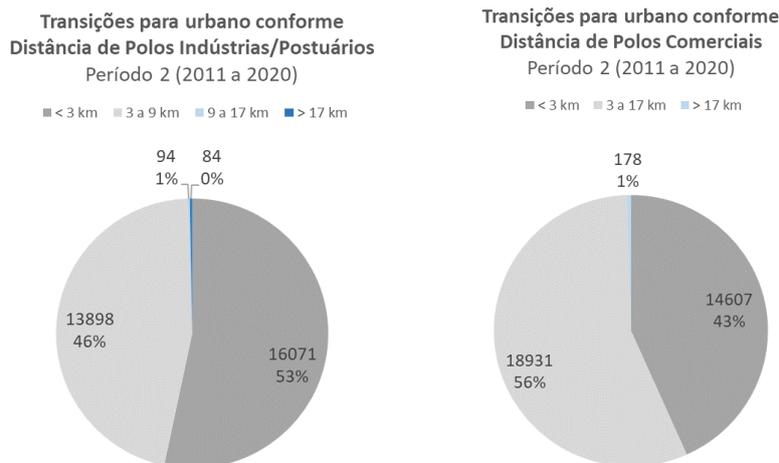
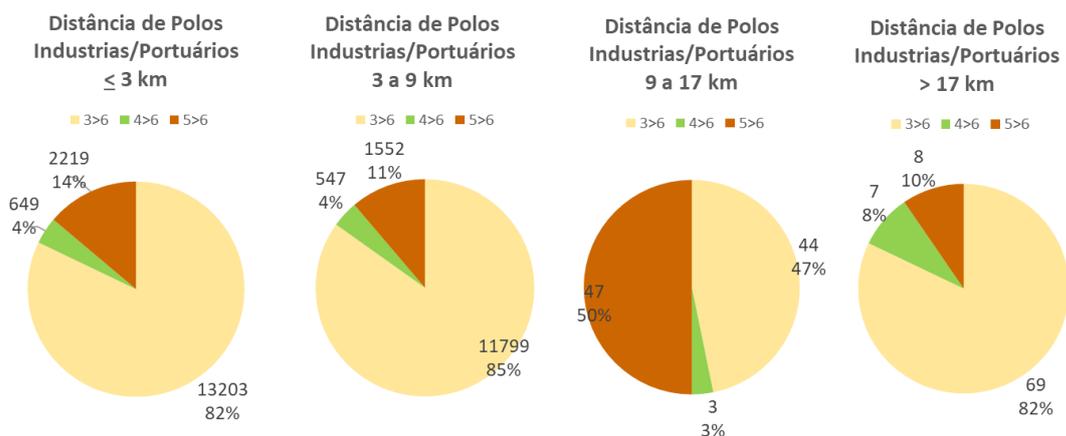


Gráfico 20 – Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de Polos Industriais/Portuários” e “Distância de Polos Comerciais”.

O Gráfico 21 confirma as tendências observadas. Nele é possível identificar um maior percentual de ocorrência da transição 4→6, nas distâncias >17 km dos Polos Comerciais. Apesar da pouca representatividade destas transições na paisagem, considera-se que o surgimento dos fragmentos urbanos em áreas rurais é responsável pelo desencadeamento de todo processo de antropização dessas regiões, associados à diminuição das atividades agrícolas.

Outro ponto de destaque é para a faixa de distância de 9 a 17 km dos Polos Industriais/Portuários, onde observa-se um aumento do percentual da transição 5→6, atribuído ao seu coeficiente maior em relação ao da transição 3→6. Como pode-se observar, o número de ocorrências dessa faixa equivale a apenas 1% do total da paisagem.



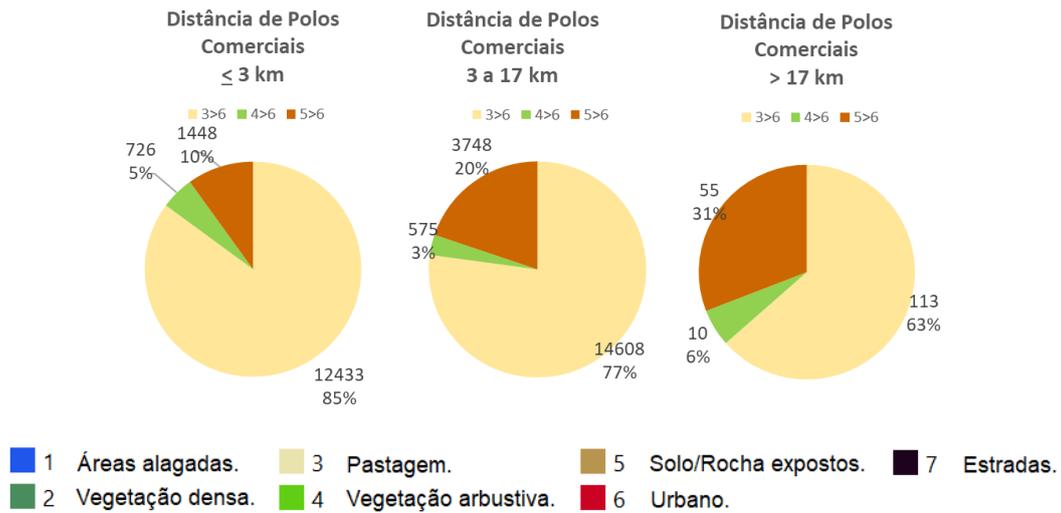
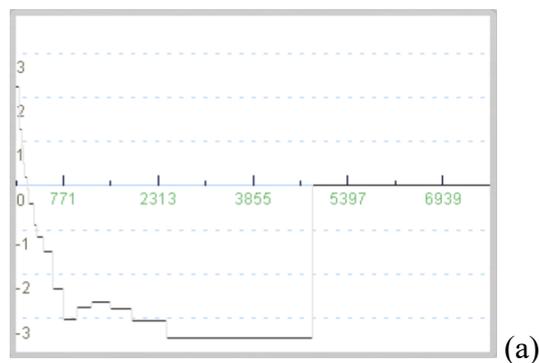


Gráfico 21 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme tipo de transição e faixas de “Distância de Polos Industriais/Portuários” e “Distância de Polos Comerciais”.

4.3.7 Distância de áreas urbanas (distance_to_6)

A variável dinâmica “Distância de áreas urbanas (distance_to_6)” consiste na distância do local até as células urbanas (classe 6) mais próximas, e foi utilizada no modelo para representar a influência das facilidades urbanas.

Em análise ao Gráfico 22, pode-se afirmar que a variável “distance_to_6” exerce uma influência positiva no processo de urbanização das áreas localizadas até 200 m de distância das áreas urbanizadas, com forte influência de impulsão até 60 m, atingindo coeficientes de até cerca de 2.5. Para distâncias maiores que 200 m, os coeficientes assumem uma tendência crescente de repulsão à ocupação urbana, até tornarem-se nulos após 3 km, em média.



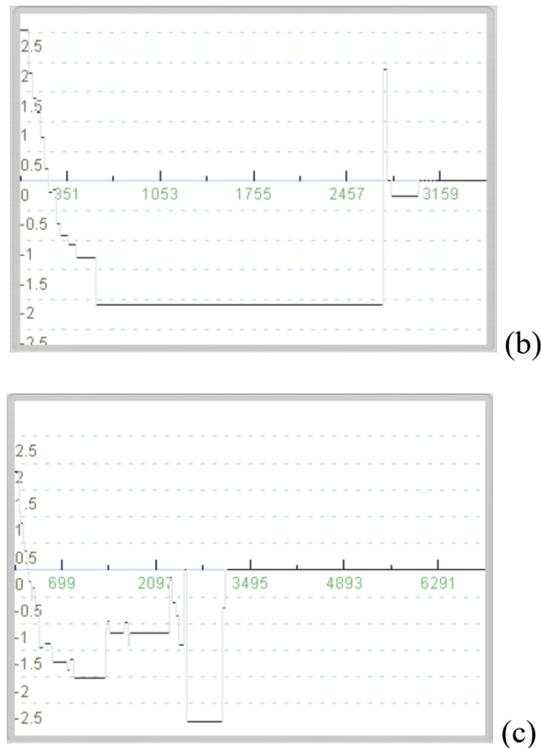


Gráfico 22 – Pesos de Evidência da variável dinâmica “Distância de áreas urbanas (distance_to_6)” para as transições: (a) 3→6; (b) 4→6; e (c) 5→6.

No Gráfico 23, pode-se observar que o maior número de transições para urbano (→6) ocorrem na faixa de distância < 60m, responsável por 61% das ocorrências. Juntamente com a faixa de distância de 60 a 200 m, responsável por 25% das ocorrências, as faixas de distância até 200 m, caracterizadas pela impulsão do processo, são responsáveis por 86% das ocorrências das transições.

Distância de áreas urbanas (classe 6)
Período 2 (2011 a 2020)

■ < 60 m ■ 60 a 200 m ■ 200 m a 3 km

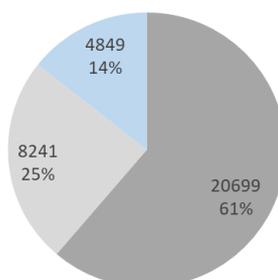


Gráfico 23 - Números e percentuais das ocorrências das transições para urbano, conforme faixas de “Distância de áreas urbanas”.

Na faixa de 200 m a 3 km da variável “Distance_to_6”, observam-se 14% das transições urbanas (→6). Apesar da repulsão imposta pela variável “Distance_to_6” nesta faixa, a ocorrência destas transições se dá pela influência de impulsão das outras variáveis, que no balanço geral entre os pesos de evidência e suas probabilidades totais de ocorrência, tornam-se mais fortes.

No Gráfico 24, de modo a avaliar a distribuição das ocorrências entre os tipos de classe de uso do solo, pode-se afirmar que a urbanização ocorre majoritariamente nas células de pastagem (3→6), com tendência de diminuição para maiores distâncias. Para as transições 4→6 e 5→6 observa-se um aumento dos percentuais atribuído às suas forças de repulsão menores do que a da transição 3→6, em função dos coeficientes dos Pesos de Evidência.

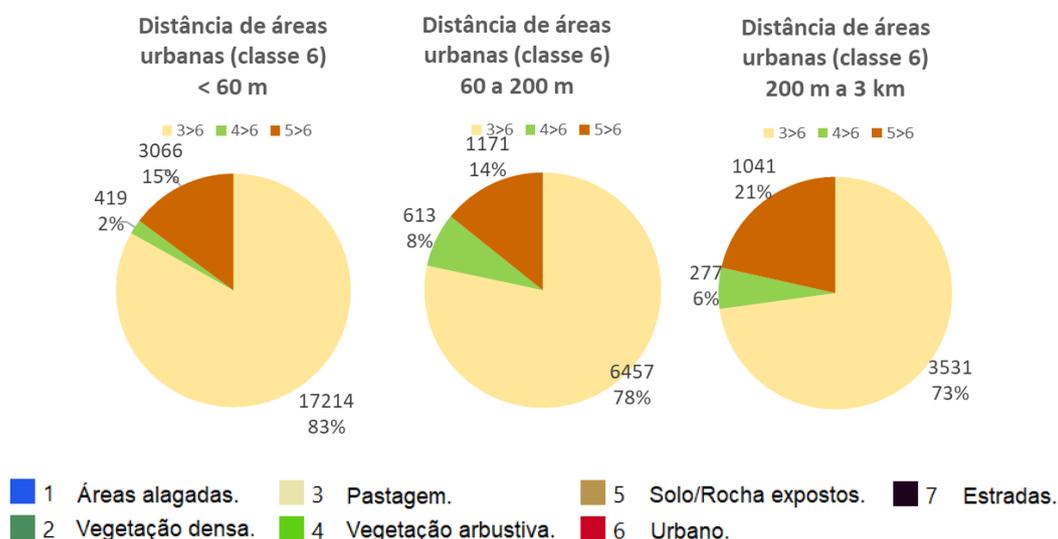


Gráfico 24 – Números e percentuais de células que foram urbanizadas, conforme tipo de transição e faixas de “Distância de áreas urbanas”.

Diante do exposto, a variável “Distância de áreas urbanas (Distance_to_6)” mostrou-se com forte influência no processo de ocupação urbana. As análises demonstram que a dinâmica de desenvolvimento urbano tem forte tendência de expansão e adensamento da mancha urbana, uma vez que os maiores coeficientes dos Pesos de Evidência e os maiores números de transições ocorrem na faixa inicial, de distâncias < 60 m, confirmando o observado visualmente nos Mapas de Paisagem. Esta observação é importante pois representa grande parte da atuação do operador “Expandir” do modelo.

4.3.8 Análise integrada dos Pesos de Evidência das transições urbanas (→6)

4.3.8.1 Tendência geral

De modo geral, a ocorrência das mudanças no solo é resultado do balanço geral das influências de todas as variáveis sobre cada tipo de transição, representadas pelos Pesos de Evidência, além das suas probabilidades de ocorrência (Tabela 8).

Desta forma, tendo em vista a variabilidade significativa dos dados, após as análises individuais dos gráficos de Pesos de Evidência em cada “faixa de tendência”, para cada transição urbana (3→6, 4→6 e 5→6), fez-se necessária a obtenção dos coeficientes médios aproximados, ponderados por suas probabilidades de ocorrência, a fim de comparar os graus de influência de cada variável no contexto geral da paisagem, conforme apresentado na Tabela 10.

Para quantificar os graus de influência em cada “faixa de tendência”, os coeficientes médios dos Pesos de Evidência foram classificados quanto à variabilidade e magnitude dos coeficientes. Quanto à variabilidade os coeficientes foram definidos como:

- + Positivos e sem variabilidade.
- ++ - Com variabilidade e predominantemente positivos.
- + - Nulos ou com variabilidade e tendência à neutralidade.
- + Com variabilidade e predominantemente negativos.
- Negativos e sem variabilidade.

Quanto à magnitude, os coeficientes foram classificados em uma graduação de cores, do verde (+) ao vermelho (-), conforme a legenda da Tabela 10, quantificando o grau de influência, desde a forte impulsão à forte repulsão, respectivamente.

Conforme já apresentado nas análises dos itens 4.3.1 a 4.3.7, de modo geral, com exceção do ISMFI, os gráficos dos Pesos de Evidência de todas as variáveis, para as transições mais representativas da paisagem, são caracterizados por coeficientes positivos nas faixas iniciais, com tendência de decréscimo nas faixas seguintes, tornando-se nulos e/ou negativos, nas faixas intermediárias, até atingirem os valores mínimos nas faixas finais. Após as faixas finais, os coeficientes tornam-se nulos indicando a ausência total da influência da variável no processo de urbanização.

Tais tendências podem ser claramente observadas na Tabela 10, onde todas as variáveis, exceto o ISMFI, apresentaram a mesma transformação gradual das cores verde/branco (+) para o vermelho/amarelo (-), indicando o decréscimo dos coeficientes, conforme o avanço das faixas, da esquerda para a direita.

Tabela 10 – Tendência geral dos coeficientes médios aproximados dos Pesos de Evidência das transições urbanas (3→6, 4→6 e 5→6), conforme as faixas de tendências das variáveis explicativas.

| VARIÁVEIS | FAIXAS | | | | Coeficientes: |
|---------------------------------------------|----------|---------------|---------------|--------------|---------------------------------------------------------|
| | Inicial | intermediária | intermediária | Final | |
| ISMFI | < 20 | 20 a 50 | 50 a 80 | > 80 | |
| | - | --+ | ++- | ++- | acima de 2,5 |
| Altitude | < 5 m | 5 e 60 m | 60 a 150 | > 150 | até 2,5 |
| | ++- | ++- | --+ | - | até 1,75 |
| Declividade | < 1.5% | 1.5 a 8% | | > 8% | até 0,75 |
| | + | + | | - | -0,25 a +0,25 |
| Distância de Rodovias | < 1.2 km | 1.2 a 6 km | | 6 a 10 km | até -0,75 |
| | + | --+ | | --+ | até -1,75 |
| Distância de Vias Locais | < 60 m | 60 a 300 m | | > 300 m | até -2,5 |
| | + | - | | - | abaixo de -2,5 |
| Distância de Ferrovias | < 2 km | 2 a 14 km | | 14 a 20 km | |
| | + | --+ | | --+ | Variabilidade |
| Distância de Polos Industriais / Portuários | < 3 km | 3 a 9 km | | 9 a 17 km | + Positivos e sem variabilidade |
| | + | --+ | | - | ++- Com variabilidade e predominantemente positivos |
| Distância de Polos Comerciais | < 3 km | 3 a 17 km | | > 17 km | + Nulos ou com variabilidade e tendência à neutralidade |
| | + | --+ | | - | +- Com variabilidade e predominantemente negativos |
| Distância de Áreas Urbanas (Distance to 6) | < 60 m | 60 a 200 m | | 200 m a 3 km | - Negativos e sem variabilidade |
| | + | + | | - | |

Este comportamento é considerado natural, tendo em vista que é esperada uma maior influência positiva (impulsão) dos atrativos urbanos nas faixas iniciais, devido à proximidade das facilidades urbanas (centralidades, rodovias, vias locais, ferrovias, polos industriais/portuários, polos comerciais e outros), além dos aspectos biofísicos favoráveis, de baixas altitudes e terrenos planos. Analogamente, nas faixas intermediárias e finais espera-se uma menor influência no processo, tendendo gradualmente à neutralidade e/ou repulsão do processo, quanto maior a distância das facilidades urbanas e mais desfavoráveis se tornam as condições biofísicas para a ocupação.

Na Tabela 10 pode-se destacar como as variáveis mais impulsionadoras do processo: “Distância de áreas urbanas”; “Distância dos polos comerciais”; e “Distância das vias locais”, nas faixas iniciais. Dentre as variáveis mais repulsoras, destacam-se: “Altitude”; “Declividade”; “Distância de vias locais”; “Distância de polos industriais/portuários”; “Distância de polos comerciais”; e “Distância de áreas urbanas”, nas faixas finais.

Ressalta-se ainda que, de modo geral, os coeficientes negativos são maiores que os positivos, indicando que as forças de repulsão são mais atuantes no processo, do que as de impulsão. Em outras palavras, pode-se afirmar que a influência para impedir a

urbanização é mais forte do que a influência para atrair o processo, indicando que a falta dos atrativos urbanos é ainda mais determinante e limitante no processo do que a sua disponibilidade.

4.3.8.2 *ISMFI x demais variáveis*

Na Tabela 10, pode-se observar que os Pesos de Evidência do ISMFI apresentaram coeficientes médios, nas faixas entre ± 0.75 , considerados de pequena magnitude, quando comparados às demais variáveis. Estes números revelam uma pouca influência da segurança contra inundações no processo de urbanização, principalmente nas faixas iniciais e finais, onde esperam-se as maiores influências, de impulsão e repulsão, respectivamente. Conforme discutido no item 4.3.1, apesar da baixa influência, os Pesos de Evidência do ISMFI ainda apresentaram uma tendência contrária à lógica da segurança contra inundações para ocupação urbana, com coeficientes predominantemente negativos na faixa inicial ($ISMFI < 20$) e positivos na faixa final ($ISMFI > 80$). Esta tendência significa uma repulsão da ocupação nas regiões de menor suscetibilidade a inundações e, ainda, impulsão do processo nas regiões de maior suscetibilidade.

Para aprofundar a análise comparativa do ISMFI com as demais variáveis, os Gráficos 25 e 26 apresentam as distribuições estatísticas dos valores do ISMFI correspondente de cada “faixa de tendência”, representadas em forma de gráficos de caixa (box plot), contendo os valores máximos, mínimos e os quartis (1º, 2º e 3º) das amostras, excluindo os valores extremos discrepantes (outliers). É importante reitarar que, conforme analisado no item 4.3.8.1, nos gráficos dos Pesos de Evidência, ao considerar as faixas das variáveis, no sentido da direita para a esquerda (\leftarrow), há uma tendência para a urbanização, aproximando-se das facilidades urbanas e dos aspectos biofísicos favoráveis ao processo. E no sentido oposto, da esquerda para a direita (\rightarrow), há uma tendência contrária, de diminuição da urbanização.

No Gráfico 25, referente às variáveis Biofísicas, observa-se uma pequena tendência de aumento das média, quartis, máximos e mínimos, no sentido da urbanização (\leftarrow). Este aumento indica que as baixas Altitudes e Declividades estão relacionadas aos ISMFI mais altos, conforme sua equação conceitual, porém também relacionadas à maior ocupação urbana.

Nos Gráficos 25 e 26, referentes às facilidades das áreas urbanas, de modo geral, as distribuições dos valores de ISMFI, não apresentam variação significativa nas faixas iniciais e intermediárias, indicando que não há uma relação bem definida do ISMFI com as variáveis nestas faixas, confirmando a sua baixa influência no processo. Adicionalmente, ainda observa-se uma tendência de diminuição dos valores do ISMFI nas faixas finais (da esquerda), demonstrando, mais uma vez, que as regiões com menor ISMFI, correspondem, de fato, às células com menor vocação urbana.

As distribuições da variável ISMFI, apresentadas nos Gráficos 25 e 26, permitem avaliar de forma integrada as tendências gerais da urbanização e reafirmam a hipótese de que, na prática, a influência dos atrativos urbanos se sobrepõe à segurança contra inundações na ocupação. É possível que as ocupações áreas de risco sejam ainda agravadas pela ação de uma população periférica, devido à falta de acesso a terras seguras, em função do seu menor poder aquisitivo e da especulação imobiliária – essa, porém, é uma discussão que ultrapassa o contexto dessa dissertação, demandando investigação complementar.

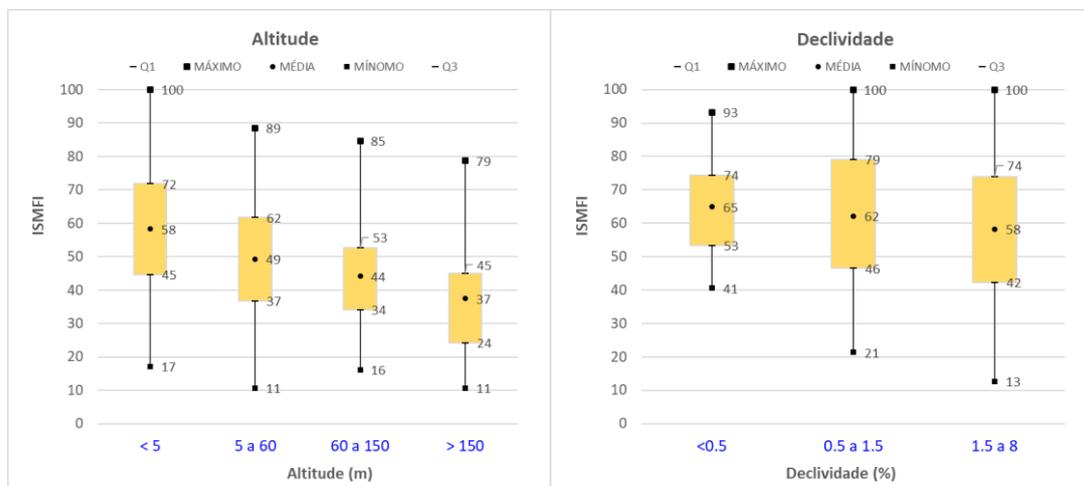


Gráfico 25 – Distribuição da variável ISMFI nas “faixas de tendência” das variáveis biofísicas (Altitude e Declividade).

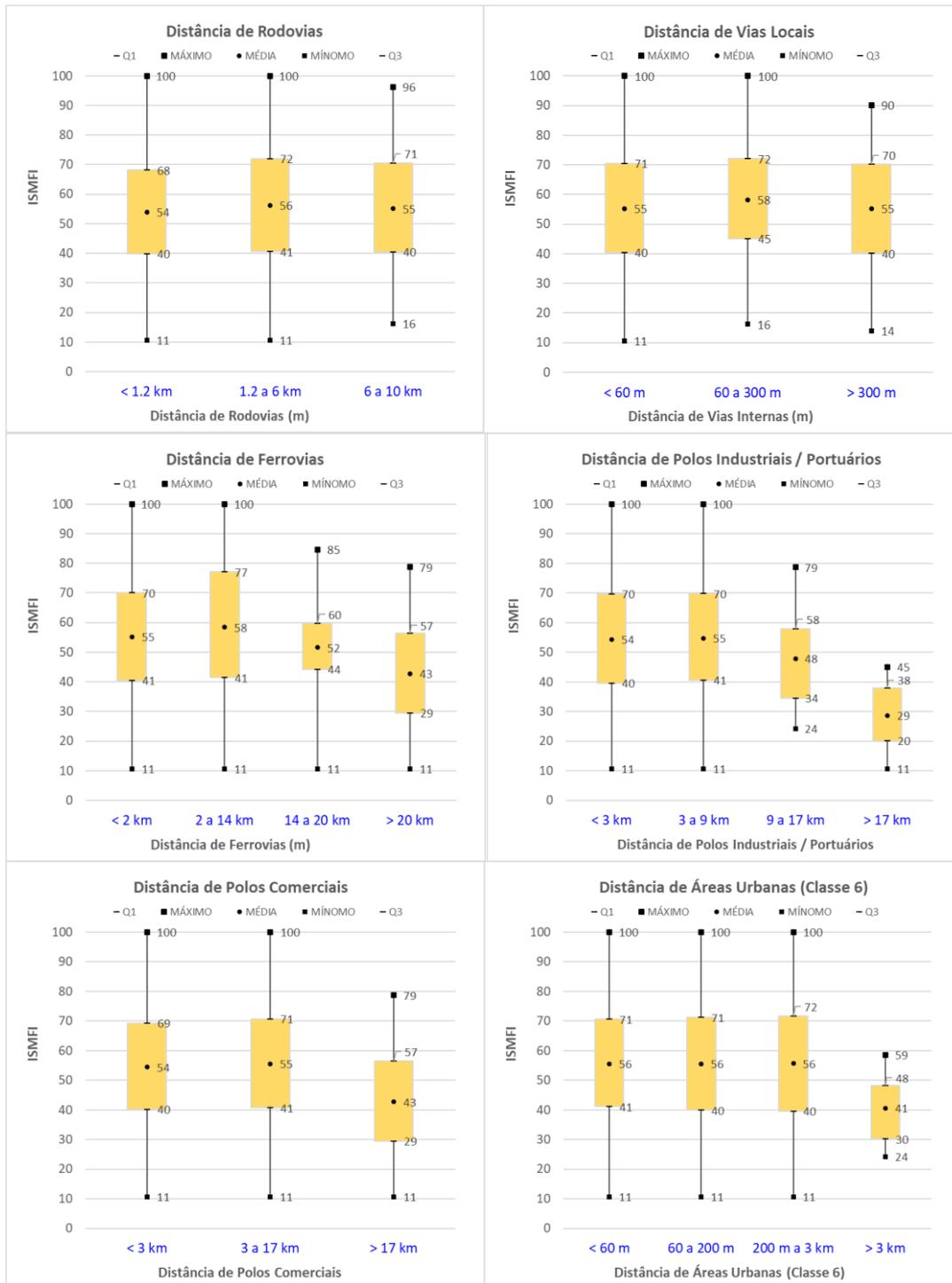


Gráfico 26 - Distribuição da variável ISMFI nas “faixas de tendências” das variáveis relacionadas às facilidades urbanas.

4.4 TESTES DE CORRELAÇÃO

Conforme item 3.1.1.4, para a aplicação do método dos Pesos de Evidência faz-se necessária a confirmação da independência espacial entre os mapas das variáveis (estáticas e dinâmicas), por meio de testes de correlação. Para isso, foram utilizados os

índices “V de Cramer” (V) e a “Incerteza conjunta”, ou Joint Uncertainty (Urs), como indicadores da associação entre as variáveis, onde o valor 0 indica nenhuma associação e o valor 1 indica uma perfeita associação entre os fatores.

Nos resultados dos testes realizados, para todos os pares possíveis das variáveis, e para todos os tipos de transição, foram obtidos os valores máximos dos índices $V = 0.4899$ e $Urs = 0.2769$.

Tendo em vista que, de acordo com Bonham-Carter (1994), os limites dos índices $V < 0.5$ e $Urs < 0.5$, indicam pouca associação (independência) entre as variáveis testadas, pode-se afirmar que não há correlação espacial entre as variáveis adotadas e que o método dos Pesos de Evidência pode ser aplicado para a construção do modelo.

4.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Os resultados e discussões das fases de Calibração e Validação, Simulação de Cenários e Análises de Tendências fazem parte da 2ª Etapa, conforme apresentado na Figura 41.

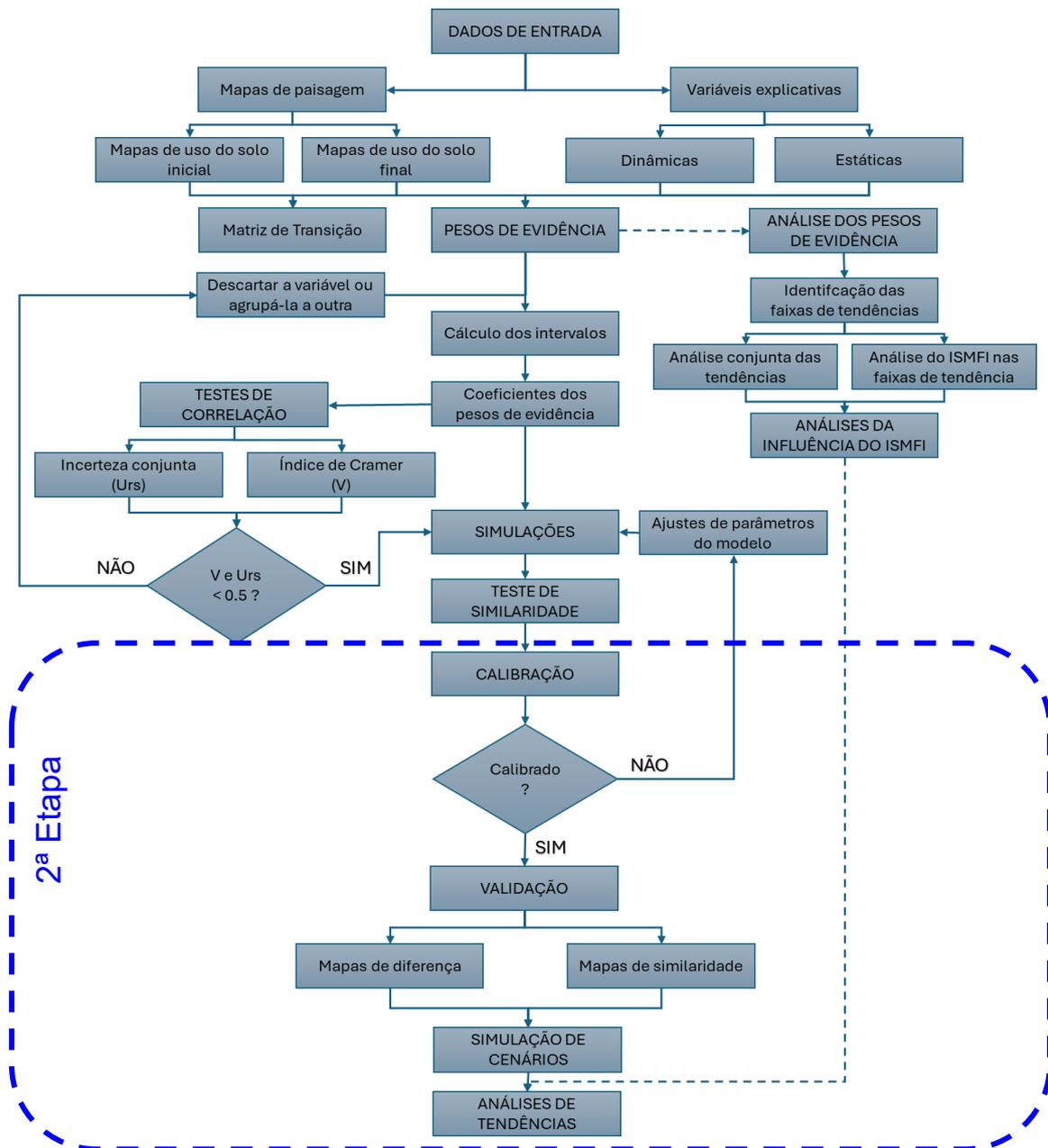


Figura 41 – 2ª Etapa do estudo (fluxograma geral).

4.5.1 Ajuste Inicial do modelo

Na construção do modelo de simulação da paisagem, foi utilizado como ajuste inicial a configuração de parâmetros considerando apenas o efeito da formação de novos fragmentos de classes, obtido somente com o operador “Patcher” e desconsiderando (a princípio) o efeito de expansão, dada pelo operador “Expander”. Para isso, o parâmetro Percentual Expander/Patcher do modelo foi inicialmente adotado com o valor de 0%.

Para representar as dimensões e forma dos novos fragmentos, no ajuste inicial, foram utilizadas as métricas da paisagem: 1) Média 0.09; 2) Variância 0.09; e 3) Isometria

1.0. A média e a variância de 0.09 representam novos fragmentos com as dimensões de um único pixel (30 m x 30 m), referindo-se à sua área em hectares ($900 \text{ m}^2 = 0.09 \text{ ha}$). O parâmetro isometria, que define a forma das manchas, foi adotado como 1.0, se referindo ao formato intermediário entre o menos isométrico (0.0) e mais isométrico (2.0).

Desta forma, com o ajuste inicial de parâmetros e utilizando como entrada o mapa de paisagem observado (2011), foi realizada a primeira simulação da paisagem de 2020, apresentada na Figura 42, juntamente com o mapa observado do mesmo ano.

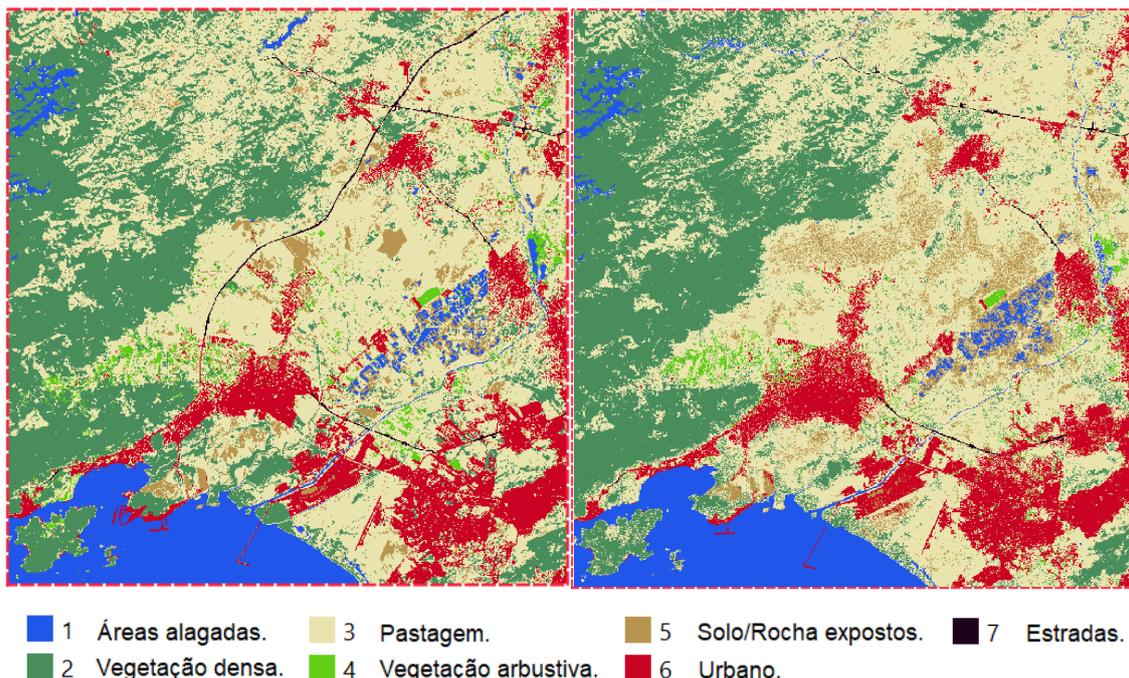


Figura 42 – Mapa de paisagem observado e simulado (ajuste inicial) para o ano de 2020.

Na comparação visual entre os mapas, é possível observar que o mapa simulado é caracterizado por uma maior dispersão dos pixels na área de estudo, das diversas classes, contrastando com as manchas mais compactas do mapa observado. Tais resultados são considerados coerentes com os parâmetros iniciais adotados, uma vez que foram gerados apenas com o operador Patcher, resultando em fragmentos dispersos de dimensões mínimas. Tais diferenças entre os mapas evidenciam a necessidade dos ajustes de calibração e validação do modelo.

4.5.2 Ajustes e testes de similaridade

Conforme apresentado no item 3.1.1.5, na calibração do modelo foram realizados manualmente inúmeros ajustes nos dados e parâmetros, de modo a obter a configuração que represente a dinâmica da paisagem real nas simulações em nível satisfatório.

Os ajustes da calibração incluíram, para cada transição: 1) alterações do percentual “Expander/Patcher”, que definem a quantidade de células alteradas por cada operador; 2) alterações dos parâmetros das métricas da paisagem (média, variância e isometria) de cada operador; 3) Alteração dos intervalos (“Buffers”) dos gráficos dos Pesos de Evidência, eliminando variabilidade em excesso; e 4) Inclusão e exclusão de transições que não estão bem representadas pelos dados de entrada.

Para a calibração das métricas da paisagem, foram analisadas, isoladamente para cada transição, a substituição dos parâmetros iniciais adotados (média 0.09, variância 0.09 e isometria 1.0), pelos valores reais levantados dos mapas observados de 2011 e 2020 (Figura 37), através do software Fragstats 4.2.

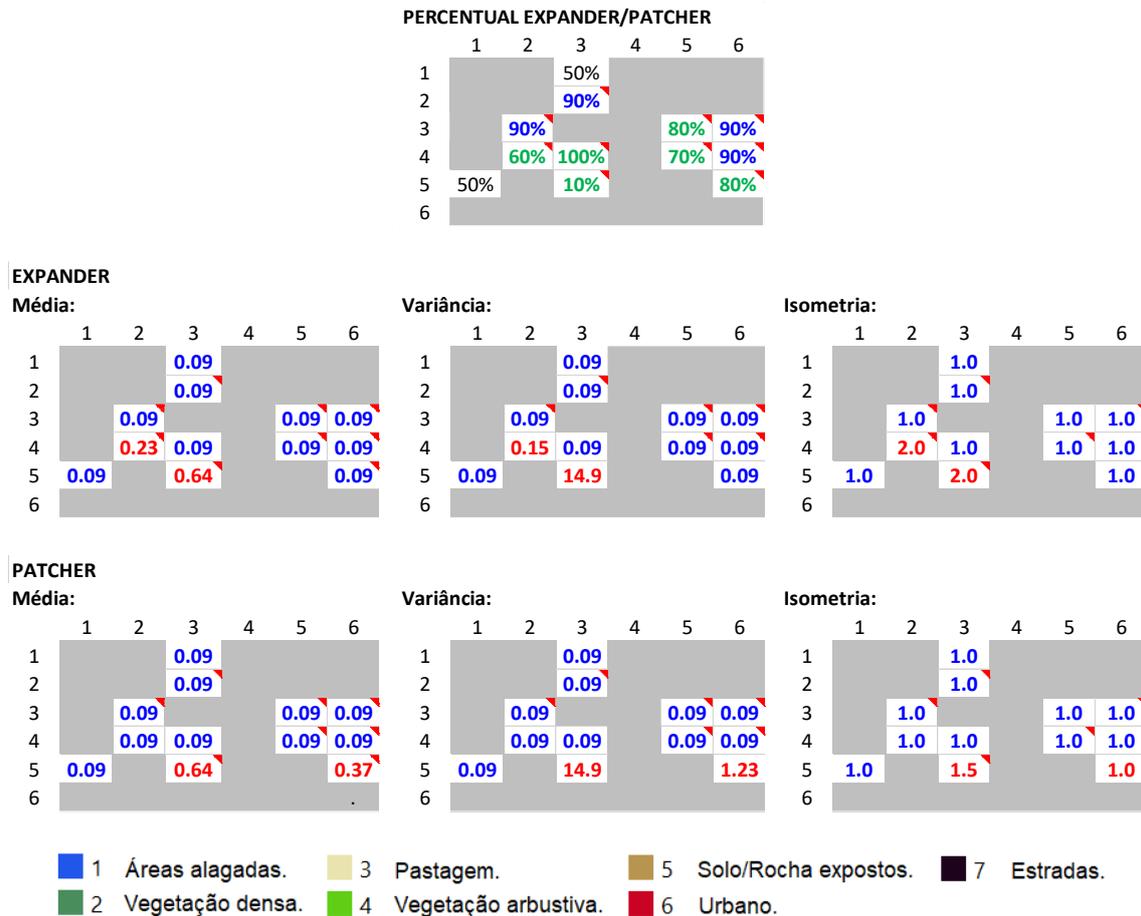
Para a validação do modelo, foram realizados testes de similaridade fuzzy, para cada configuração de parâmetros, por meio da comparação entre os mapas de diferença, em duas vias, obtendo os índices de similaridade máxima e mínima, com função de decaimento exponencial, em janelas de 1x1 a 11x11. Os testes das configurações foram realizados alterando-se um parâmetro por vez.

A comparação entre os mapas é realizada analisando não somente a semelhança exata, célula-a-célula, mas também a semelhança com as células vizinhas, em menor proporção. Essa comparação em contexto de vizinhança baseia-se na proximidade das semelhanças, uma vez que, mesmo mapas sem correspondência célula-a-célula, também podem apresentar similaridade em seus padrões de crescimento. A diminuição do índice de similaridade nas células vizinhas é dada por uma função de decaimento exponencial, conforme Figura 26. É importante também destacar que o teste calcula a similaridade em duas vias, do primeiro mapa para o segundo e do segundo para o primeiro.

“É aconselhável sempre escolher o menor valor de similaridade, uma vez que mapas randômicos tendem a produzir um alto ajuste artificial quando comparados univocamente, porque eles dispersam as mudanças sobre mapa” (SOARES-FILHO, RODRIGUES e COSTA, 2009).

Devido à aleatoriedade contida na execução do modelo, e considerando que simulações realizadas com as mesmas configurações de parâmetros resultam em mapas diferentes, foram realizadas quatro simulações/testes para cada ajuste da calibração, analisando a média dos seus índices de similaridade. Desta forma, após inúmeros ajustes e testes realizados, obteve-se a configuração de parâmetros que apresentou os melhores índices de similaridade máxima e mínima, além da semelhança visual, que está apresentada na Tabela 11. Pode-se observar que os parâmetros do ajuste final incluem Percentuais Expander/Patcher diferentes para cada transição. As métricas da paisagem do ajuste inicial apresentaram os melhores índice de similaridade para a maioria das transições, com exceção das transições 4→2, 4→3 e 5→6. O modelo também apresentou maiores índices de similaridade com a exclusão das transições 2→4, 3→1 e 3→4.

Tabela 11 – Parâmetros do ajuste final das métricas da paisagem.



O Gráfico 27 apresenta os resultados do teste de similaridade do modelo calibrado para janelas de tamanhos 1x1 a 11x11, com índices de similaridade mínima de 0.31 a 0.52, respectivamente.

O índice de similaridade mínima da janela 1x1 indica uma equivalência dos mapas de diferença, correspondendo ao percentual de acerto das transições observadas no período 2, com mais precisão da comparação. Para as janelas maiores, observam-se índices mais altos, tendo em vista a semelhança no contexto de vizinhança por decaimento exponencial representam uma comparação de menor precisão. O modelo calibrado apresentou índice de similaridade mínima de 0.48 para janela de 5x5.

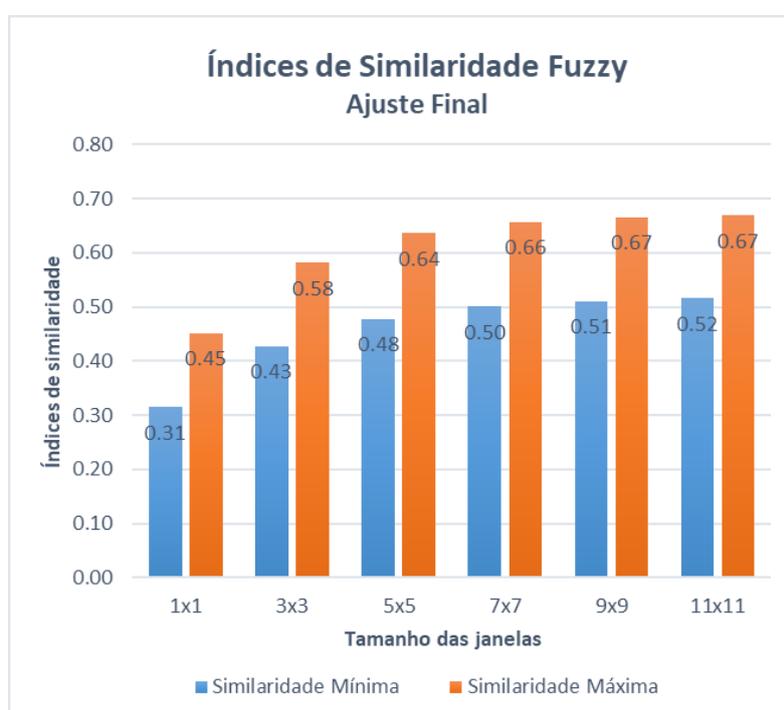


Gráfico 27 – Índices de similaridade máxima e mínima do modelo calibrado.

Para a validação do modelo utilizou-se como critério de aceitação alguns índices de similaridade mínima obtidos em trabalhos similares utilizados como referência, destacando:

- Novaes, Almeida *et al.* (2011), que obtiveram índices próximos a 0.4, indicando um nível bom de compatibilidade entre o cenário simulado e o real, tendo em vista a complexidade do fenômeno simulado;
- Trentin e Freitas (2010) que, em simulações de cenários no município de Americana-SP, obtiveram valores de similaridade mínima a partir de 0.30, considerados baixos

diante da escala de variação, mas aceitáveis por se tratar de uma área urbana com morfologia dispersa;

- Caixeta (2014), que obteve índices de similaridade mínima a partir de 0.45 para janelas de 3x3 no uso da função de decaimento exponencial, em resultados de validação de modelo da dinâmica da mancha urbana em Viçosa-MG;
- Rezende *et al.* (2018), que obtiveram índices de similaridade mínima entre 0.18 e 0.58, para janelas de 1x1 a 11x11, respectivamente, em simulações de uso e cobertura do solo na região do Vale do Paraíba / SP, com similaridade mínima de 0.50 a partir de janelas 5x5; e
- Oliveira *et al.* (2021), obteve índices de similaridade fuzzy adaptados com valores oscilando entre 0.45 e 0.50 para janelas com tamanhos de 3x3 a 5x5, denotando concordâncias aceitáveis.

Diante do exposto, tendo em vista a complexidade da dinâmica simulada, com inúmeras transições e agentes forçantes que se interrelacionam no processo, e ainda, tendo como base os valores de referência, os resultados dos testes de similaridade foram considerados satisfatórios, dentro do enfoque pretendido.

4.5.3 Modelo calibrado

A Figura 43 apresenta o mapa observado, bem como o mapa simulado para o ano de 2020, obtido com o ajuste final do modelo calibrado e validado.

Na comparação entre os mapas simulados das Figuras 42 e 43, obtidos antes e após a calibração, respectivamente, pode-se destacar que a simulação realizada pelo modelo calibrado apresenta maior semelhança visual com o mapa observado, principalmente devido às suas manchas mais compactas, resultantes dos maiores Percentuais Expander/Patcher, conforme apresentado na Tabela 11, simulando a maior ocorrência do fenômeno de expansão.

Comparando os mapas simulado (ajuste final) e observado, da Figura 43, pode-se destacar que, apesar de o modelo não realizar simulações perfeitamente idênticas à paisagem real, de modo geral, o modelo calibrado é capaz de reproduzir as principais tendências da dinâmica da mudança do uso e ocupação do solo, principalmente das manchas urbanas (classe 6), foco do presente estudo.

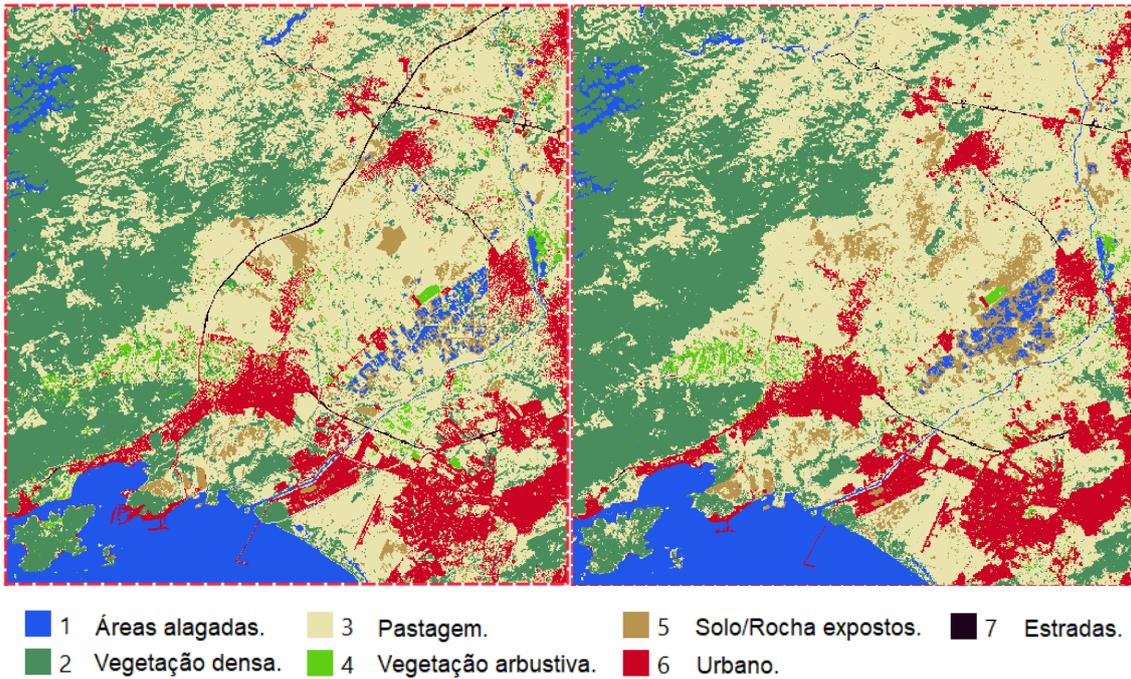


Figura 43 – Mapas de paisagem observado e simulado, obtido com o modelo calibrado, para o ano de 2020.

É importante destacar que o modelo reproduz o comportamento médio da região, observado para cada tipo de transição, sob influência das variáveis explicativas. Por isso, as simulações reproduzem o crescimento orgânico das manchas, a cada iteração, e não reproduzem mudanças pontuais, como grandes empreendimentos, portos, represas, estradas, áreas agrícolas e outros.

A Figura 44 apresenta os mapas dos índices de similaridade fuzzy mínima e máxima, respectivamente, obtidos com a função de decaimento exponencial e janela 5x5, do modelo calibrado. Pode-se observar que o mapa de similaridade mínima apresenta maior quantidade de manchas roxas, referente aos menores índices. Analogamente, o mapa de similaridade máxima apresenta maior quantidade de manchas verdes, referente aos maiores índices.

De modo geral, pode-se afirmar que o modelo se mostrou capaz de identificar as áreas mais propícias para as transições de interesse, de acordo com as suas probabilidades de mudança, indicando as tendências gerais da evolução das manchas da paisagem, especialmente da mancha urbana.

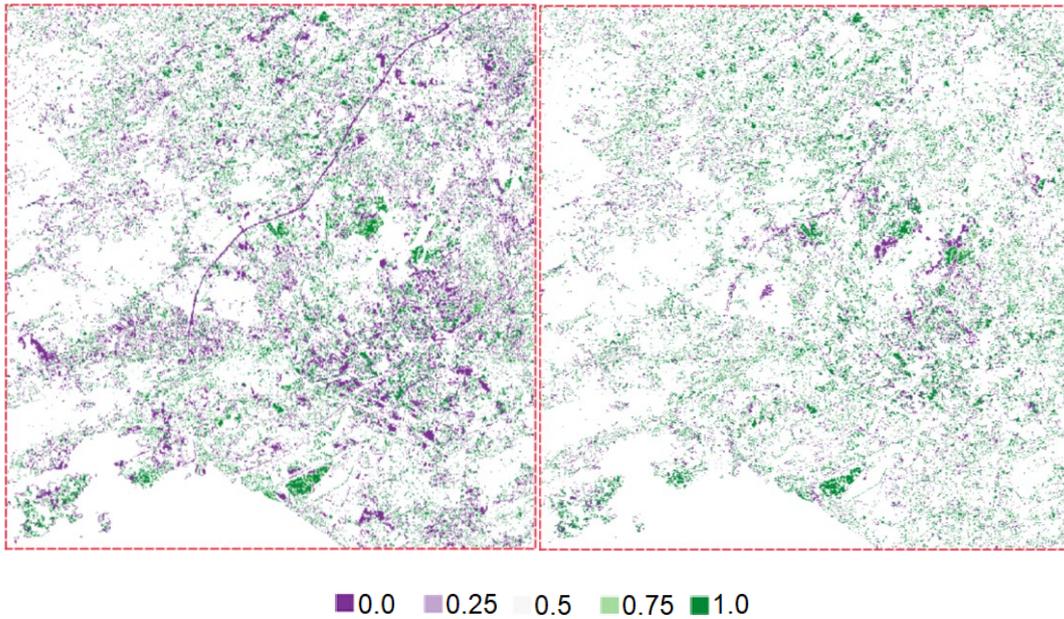


Figura 44 – Mapas de índices de similaridade fuzzy mínima e máxima, respectivamente, com função de decaimento exponencial para janela de 5x5.

4.6 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS E ANÁLISES DE TENDÊNCIAS

No passo seguinte, o modelo calibrado foi utilizado para a realização das simulações dos mapas de uso e ocupação do solo, considerando hipoteticamente a continuidade da dinâmica captada no período 2 (2011 a 2020), em diferentes cenários, para os horizontes de 2030, 2040 e 2050.

Os cenários foram definidos para simular possíveis tendências da dinâmica da paisagem, com ênfase na ocupação urbana, em resposta à implementação de medidas de manejo do uso do solo com controle de ocupação nas regiões com maiores índices de susceptibilidade a inundações. Desta forma, foram definidos dois cenários:

i. Cenário 1 (Sem controle de ocupação):

No Cenário 1, foram realizadas simulações reproduzindo a mesma dinâmica da paisagem captada pelo modelo calibrado, mantendo supostamente a continuidade da conjuntura socioeconômica e biofísica observada no período 2, e sem a implementação de qualquer medida de controle de ocupação das áreas.

ii. Cenário 2 (Com controle de ocupação):

No Cenário 2, as simulações também foram realizadas reproduzindo a dinâmica da paisagem observada no período 2, porém, com a implementação de medidas de controle,

restringindo a ocupação e os impactos nas áreas com os maiores riscos de inundações, definidas pelas regiões com ISMFI > 60, conforme Figura 45.

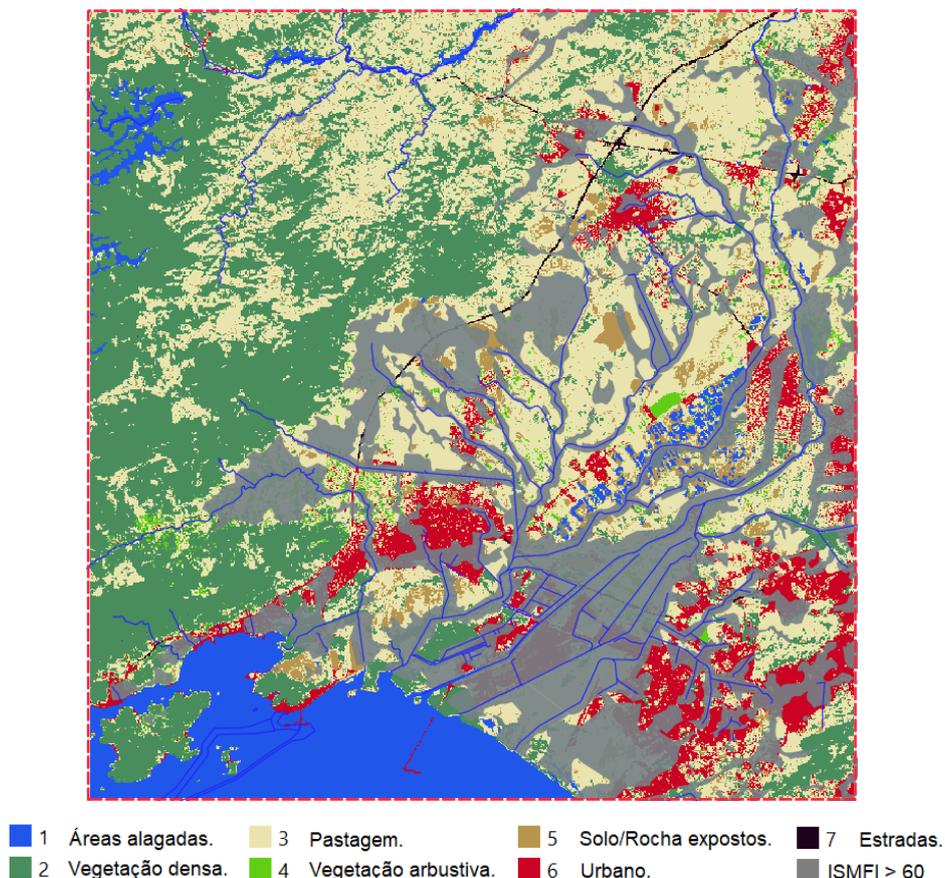


Figura 45 – Mapa da paisagem com indicação das áreas com restrição de ocupação (ISMFI > 60), utilizadas para as simulações do Cenário 2.

É importante destacar que o propósito desta etapa não é de produzir previsões exatas sobre o futuro da dinâmica de ocupação, mas de estimular a análise e a discussão de cenários, para a elaboração e implementação de políticas urbanas.

A Figura 46, apresenta os mapas de uso do solo resultantes das simulações dos Cenários 1 e 2, para os anos 2030, 2040 e 2050, obtidas através do modelo calibrado.

Em uma análise visual dos mapas simulados pode-se observar algumas características comuns em ambos os cenários, evidenciando que o modelo reproduziu as principais tendências da dinâmica apontadas nas análises anteriores:

- Aumento da mancha urbana (classe 6), com forte adensamento, em função da atuação do operador Expandir;
- Geração de novos fragmentos urbanos, principalmente em áreas de solo/rocha expostos próximas às áreas urbanas;

- Aumento da vegetação densa (classe 2) nas áreas menos antropizadas, localizadas nas regiões mais distantes das áreas urbanas (classe 6);
- Diminuição da vegetação densa (classe 2) nas áreas mais antropizadas, localizadas nas regiões mais próximas das áreas urbanas (classe 6); e
- Diminuição da vegetação arbustiva (classe 4), principalmente pela sua transformação em áreas de pastagem (classe 3).

Na comparação visual entre os cenários, pode-se observar que, diferente do cenário 1 (esquerda), os mapas do Cenário 2 (direita) apresentaram uma expansão urbana controlada, impedindo a ocupação das áreas restritas (ISMFI < 60). De modo geral, estas áreas podem ser observadas, em sua maioria, nas proximidades das margens dos cursos d'água, em suas planícies de inundação. Tais áreas mantiveram-se sem alteração do uso do solo, simulando a paralisação da ocupação urbana das regiões mais suscetíveis a inundações, assim como as demais transições associadas.

A seguir serão apresentadas as análises comparativas entre os resultados das simulações dos Cenários 1 e 2, sob os seguintes aspectos observados:

- Classes de uso do solo;
- Classes de uso do solo, conforme riscos de inundação; e
- Células urbanas (Classe 6), conforme riscos de inundação.

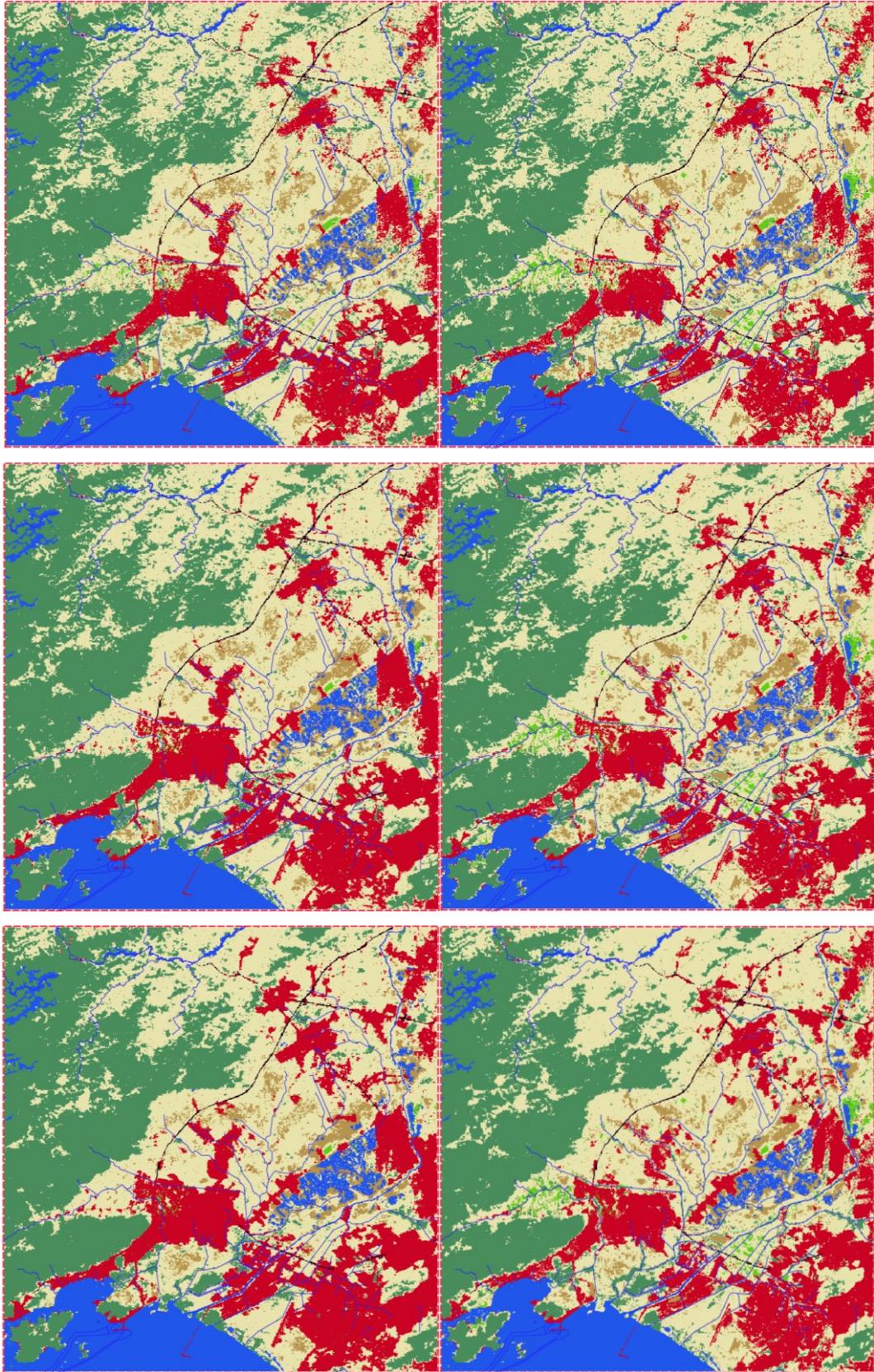


Figura 46 – Mapas de uso do solo simulados para o ano de 2030, 2040 e 2050, respectivamente, nos Cenários 1 (esquerda) e 2 (direita).

4.6.1 Classes de uso do solo

O Gráfico 28 apresenta, para os Cenários 1 e 2, os percentuais das classes de uso do solo nos anos 2000, 2011 e 2020 (observados), e 2030, 2040 e 2050 (simulados), onde pode-se observar um aumento significativo da classe 6 (urbana) ao longo dos anos, indicando a forte tendência de urbanização nos dois cenários, porém com velocidades diferentes. Paralelamente, também se observa a diminuição gradual das classes 2, 3, 4 e 5, como resultado da tendência da transformação geral da paisagem a longo prazo. A classe 1 (áreas alagadas) apresentam uma leve tendência de aumento, atribuídas às atividades extrativistas da região.

É interessante também destacar que os percentuais da classe 6 (urbana) são menores no Cenário 2, evidenciando a efetividade das medidas de manejo do uso do solo no controle da ocupação urbana. Para o horizonte de 2050, por exemplo, observam-se percentuais projetados de 19.58% e 17.4%, para os Cenários 1 e 2, respectivamente, indicando uma desaceleração da ocupação urbana. Conseqüentemente, também se observam maiores percentuais das classes 3, 4 e 5 neste horizonte em virtude da menor transição destas classes para urbano, devido às restrições.

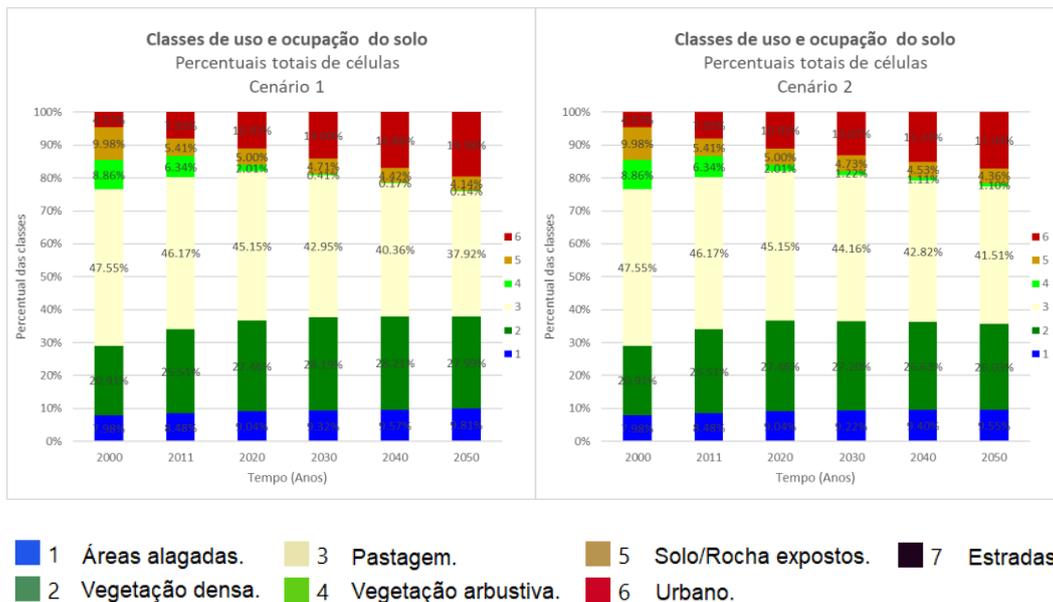


Gráfico 28 – Percentuais totais das classes dos mapas simulados nos Cenários 1 e 2, respectivamente.

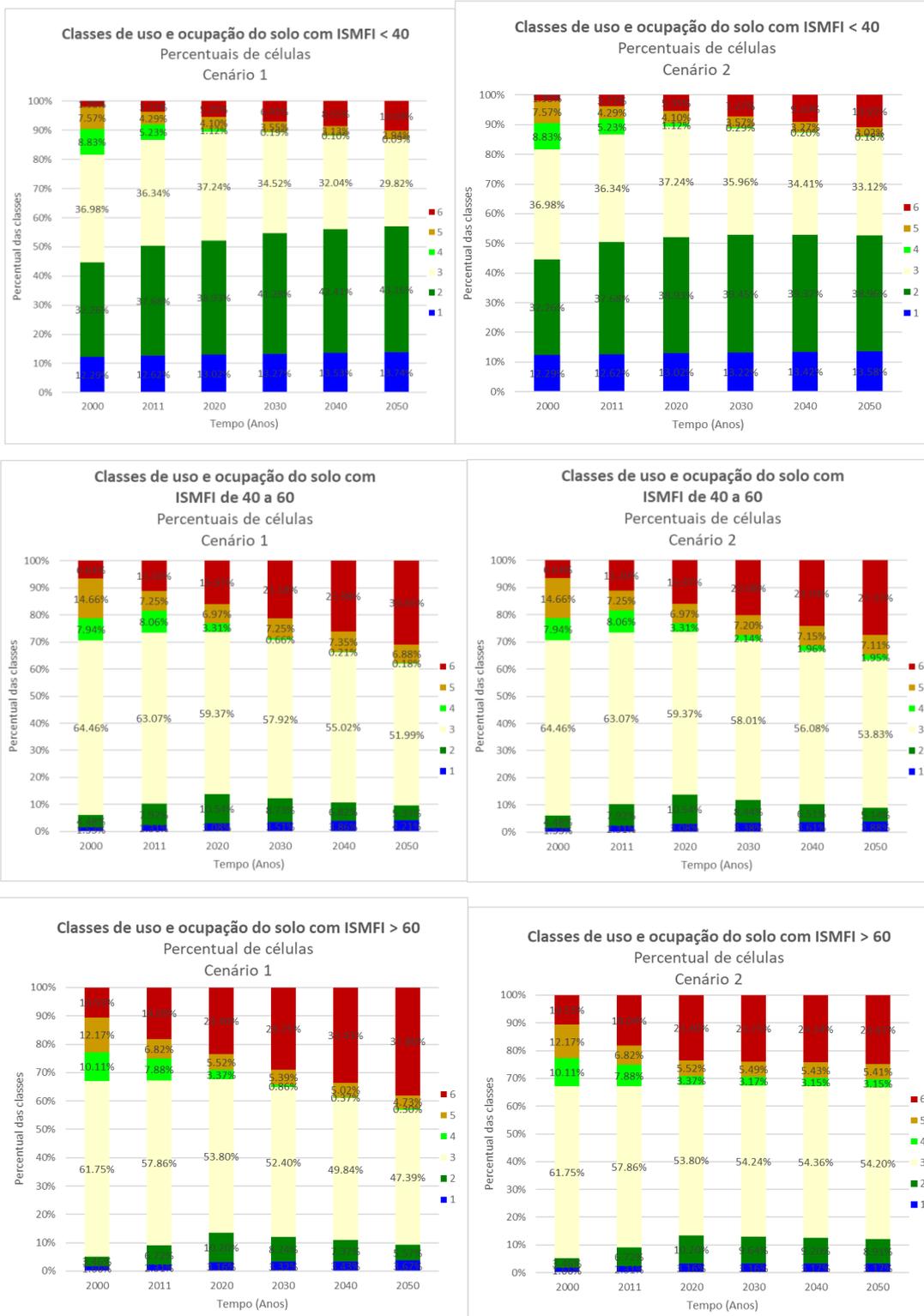
4.6.2 Classes de uso do solo conforme riscos de inundações

De modo a avaliar as tendências da ocupação urbana, nos Cenários 1 e 2, conforme os riscos de inundações, o Gráfico 29, apresenta os percentuais de classes de uso do solo dos mapas observados (2000, 2011 e 2020) e simulados (2030, 2040 e 2050), separadamente, por região de susceptibilidade a inundações: **Baixa a Muito Baixa** (ISMFI < 40); **Média** (ISMFI entre 40 e 60); e **Alta a Muito Alta** (ISMFI > 60).

Conforme já discutido no item 4.3.1, observou-se que na região de maior risco, há uma tendência de maiores percentuais de áreas urbanas (classe 6) e menores percentuais de vegetação densa (classe 2). Analogamente, na região de menor riscos, observa-se o contrário, menores percentuais da classe 6 e maiores percentuais da classe 2.

Tendo em vista que as tendências são contrárias à segurança contra inundações, as medidas de manejo de uso do solo propostas para o Cenário 2, tem o objetivo de promover a inversão da dinâmica observada (Tabela 10), restringindo a ocupação, e seus impactos associados, na área de suscetibilidade Alta a Muito Alta (ISMFI > 60), deslocando a expansão da mancha urbana para as áreas de menor suscetibilidade a inundações e desencadeando inúmeras alterações na paisagem.

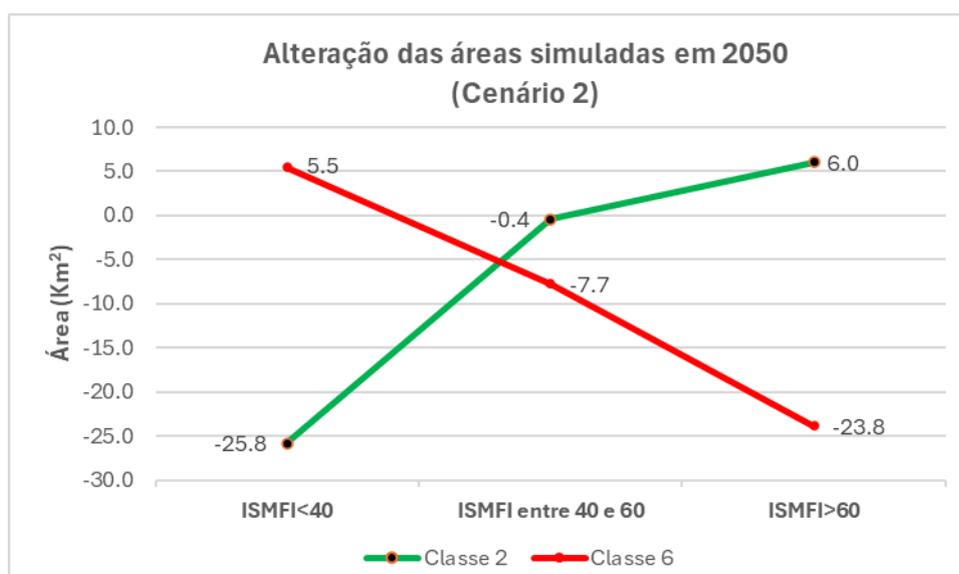
Em análise ao Gráfico 29, do Cenário 1 para o Cenário 2, observa-se uma diminuição significativa das áreas urbanas (classe 6), nas regiões de ISMFI > 60, devido às restrições impostas nas simulações. Tal diminuição é um indicador do deslocamento da ocupação da referida região para as regiões de menor suscetibilidade a inundações, com ISMFI entre 40 e 60 (Média) e ISMFI < 40 (Baixa a Muito Baixa), conforme esperado. Estas mudanças na ocupação urbana promovem um rearranjo na distribuição das células a serem modificadas na paisagem e no balanço das transições, sob influência dos seus Pesos de Evidência, suas probabilidades de ocorrência e das restrições impostas.



- 1 Áreas alagadas.
- 3 Pastagem.
- 5 Solo/Rocha expostos.
- 7 Estradas.
- 2 Vegetação densa.
- 4 Vegetação arbustiva.
- 6 Urbano.

Gráfico 29 – Percentuais das classes de uso do solo observados (2000, 2011 e 2020) e simulados (2030, 2040 e 2050), nos Cenários 1 e 2, conforme regiões de suscetibilidade.

Para a comparação dos cenários, de modo a avaliar os efeitos das medidas de manejo de uso do solo, o Gráfico 30 apresenta a alteração das áreas das classes 2 e 6, do Cenário 1 para o Cenário 2, em 2050, em cada região de suscetibilidade. No estudo, a evolução dos efeitos nas classes 2 e 6, foi considerada a principal indicadora dos impactos das medidas na dinâmica da paisagem, pois representam os estágios inicial e o final do processo de antropização, desde a vegetação densa (classe 2), passando pelos estágios de degradação intermediários (classes 3, 4 e 5), e terminando na ocupação urbana (classe 6) propriamente dita.



- | | | | | | | | |
|---|------------------|---|----------------------|---|----------------------|---|-----------|
| 1 | Áreas alagadas. | 3 | Pastagem. | 5 | Solo/Rocha expostos. | 7 | Estradas. |
| 2 | Vegetação densa. | 4 | Vegetação arbustiva. | 6 | Urbano. | | |

Gráfico 30 – Alteração (acréscimos e reduções) das áreas das classes 2 e 6, simuladas para o ano de 2050, do Cenário 1 para o Cenário 2.

Pode-se observar que há uma alteração significativa das áreas em consequência das medidas de manejo do uso do solo, e que estas apresentam tendências opostas. Na classe 6, observa-se o deslocamento da ocupação urbana das regiões maior suscetibilidade (ISMFI > 60) para as regiões de menor suscetibilidade (ISMFI < 40). Na classe 2, observa-se diminuição de vegetação densa (classe 2) nas áreas de menor suscetibilidade (ISMFI < 40) e aumento nas áreas de maior suscetibilidade (ISMFI > 60).

De forma mais detalhada, seguem as análises das tendências, conforme regiões de suscetibilidade:

i. Alta a Muito Alta (ISMFI > 60)

Na região de ISMFI > 60, inicialmente, destaca-se que, no Cenário 2, os percentuais da classe 6 são menores do que no Cenário 1. No Cenário 2, com a implementação das medidas propostas, os percentuais da classe 6 mantiveram-se praticamente constantes, com 23.75%, 24.14% e 24.62%, nos anos 2030, 2040 e 2050, respectivamente. Enquanto isso, no Cenário 1, com a falta de medidas de controle, o percentual da classe 6 da região atingiu 37.8%, no ano de 2050, por exemplo. Tal diferença de 13.18% indica uma diminuição significativa das ocupações de risco, correspondendo a 26471 células que deixariam de ocupar regiões de suscetibilidade Alta a Muito Alta, em função das medidas de manejo do uso do solo. Essa redução equivale a uma área de 23.8 km². Considerando tal área e a densidade demográfica média de 413.4 hab/km², da cidade de Itaguaí/RJ, de acordo com o Censo de 2022, do IBGE, estima-se um potencial de 9850 pessoas que seriam afastadas das regiões de vulnerabilidade a inundações, até 2050, com a implementação das medidas propostas no Cenário 2.

Os percentuais da classe 2 apresentam tendência oposta à da classe 6, nas regiões de ISMFI > 60. No Cenário 2, em 2050, observa-se um aumento dos percentuais da classe 2, em relação ao Cenário 1, de 5.6% para 8.9%, indicando uma preservação de 6709 células, equivalente a uma área de 6.0 km² de vegetação densa.

Em resumo, pode-se afirmar que, do Cenário 1 para o Cenário 2, simulando a implementação das medidas de controle de ocupação propostas, observou-se uma tendência de diminuição de 23.8 km² das áreas urbanas em região de risco (ISMFI > 60), diminuindo a supressão de vegetação densa na região e gerando um aumento de 6.0 km² de classe 2 preservada, conforme apresentado no Gráfico 30. Esta alteração se deve à restrição de ocupação nas áreas de ISMFI > 60, imposta pelo modelo, e baseado nos Métodos dos Pesos de Evidência, encontra outras áreas com probabilidades de mudança para alocação das transições previamente definidas para a região.

ii. Média (ISMFI entre 40 e 60)

Apesar das restrições de ocupação estarem impostas somente na região de suscetibilidade Alta a Muito Alta (ISMFI > 60), as simulações também revelam efeitos na região de suscetibilidade Média (ISMFI entre 40 e 60). Tendo em vista que grande parte das áreas urbanas estão localizadas nas áreas de suscetibilidade Alta a Muito Alta

(ISMFI > 60), a restrição de ocupação destas regiões impede a atuação plena do operador Expandir, no Cenário 2, restringindo significativamente a expansão da mancha urbana também na região de suscetibilidade Média (ISMFI entre 40 e 60), tendo em vista que são regiões adjacentes.

Comparando o Cenário 2 com o Cenário 1, no ano de 2050, por exemplo, observa-se uma diminuição de 7.7 km² de áreas urbanas, na região de suscetibilidade Média, conforme Gráfico 30. Esta diminuição, apesar de ser consideravelmente menor do que a observada na região de suscetibilidade Alta e Muito Alta, é considerada um reflexo da restrição imposta na região vizinha e do deslocamento do crescimento da mancha urbana para as regiões de menor suscetibilidade.

iii. Baixa a Muito Baixa (ISMFI < 40)

Na região de ISMFI < 40, os resultados da simulação mostraram tendência totalmente oposta à da região de ISMFI > 60, com maiores percentuais da classe 6 e menores percentuais da classe 2, no Cenário 2, em relação ao Cenário 1, indicando o aumento da ocupação urbana e, conseqüentemente, o aumento da supressão vegetal nessas áreas, como reflexos do aumento da antropização dessas regiões.

No ano de 2050, observa-se na região de ISMFI < 40, um aumento de 0.9% no percentual da classe 6, do Cenário 1 para o Cenário 2, equivalente a 6060 células e 5.5 km² de áreas urbanas, geradas nessas regiões de menor risco de inundações. Analogamente, com o aumento de ocupação urbana, observa-se também a diminuição do percentual da classe 2, de 43.2% para 39.0%, indicando 28669 células de vegetação densa a menos, equivalente à área de 25.8 km². De forma resumida, o aumento de 5.5 km² de áreas urbanas na região traz como consequência, uma redução de 25.8 km² de vegetação densa, em função dos impactos das transições associadas a todo processo de antropização, conforme Gráfico 30.

Diante do exposto, pode-se afirmar que o impedimento das transições urbanas impostas pelo modelo nas regiões de ISMFI > 60, causou uma redistribuição geral das mudanças da região, identificando novas áreas para alocação das transições, com base nas probabilidades de mudança, considerando a configuração definida para o cenário 2.

As simulações do modelo indicaram que as medidas de controle de ocupação urbana podem gerar melhorias significativas nas condições de risco de inundações da

população urbana, e como consequência do aumento da antropização, também geram impactos na vegetação. Por isso, as restrições devem ser implementadas juntamente com medidas de preservação, de modo a minimizar as transições antrópicas nas demais regiões, principalmente nas regiões de ISMFI < 40. Para isso, considera-se fundamental que a ocupação seja direcionada através de um planejamento urbano integrado às condições ambientais, prevendo o desenvolvimento das cidades de forma sustentável, sob influência dos atrativos urbanos, da segurança contra inundações e da preservação ambiental.

4.6.3 Células urbanas (Classe 6), conforme riscos de inundações

O Gráfico 31, apresenta as quantidades de células urbanas, observadas nos anos de 2000, 2011 e 2020, e simuladas para os anos 2030, 2040 e 2050, conforme as suposições dos Cenários 1 e 2, respectivamente.

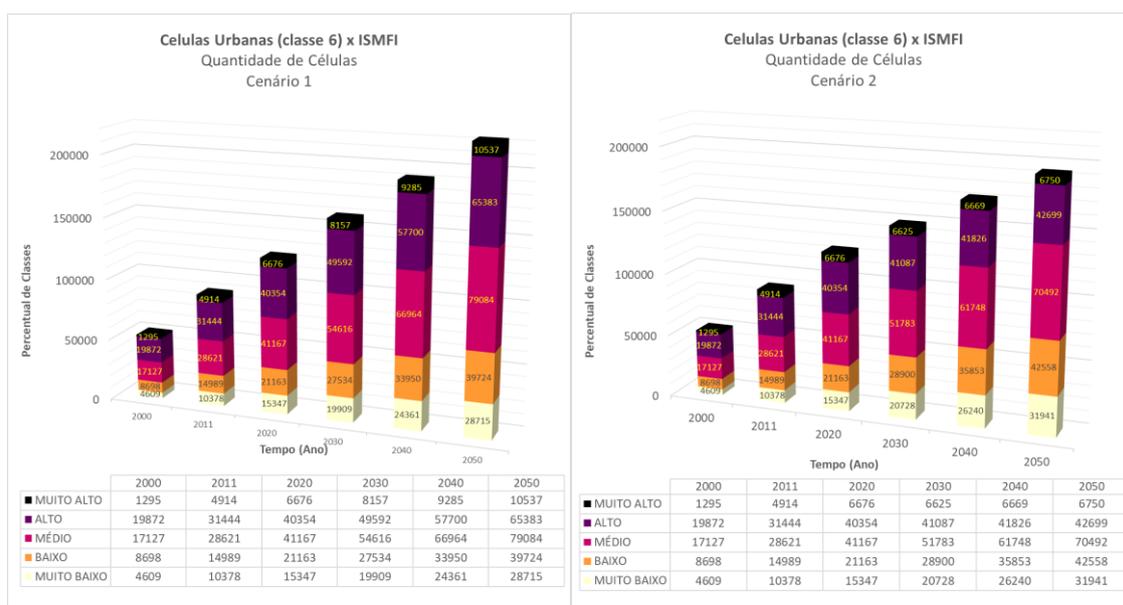


Gráfico 31 – Quantidade de células urbanas (classe 6), conforme ISMFI.

Inicialmente, é importante destacar que, nos dois cenários, as quantidades totais de células urbanas em 2050, são 223443 e 194440, respectivamente, totalizando 29003 células (classe 6) a menos no Cenário 2, em função das medidas de manejo do uso do solo propostas, equivalente a uma redução de 13% de áreas urbanas em toda a paisagem. Mesmo com o aumento da ocupação urbana, observado nas regiões mais seguras (ISMFI

< 40), no Cenário 2, estes dados refletem uma desaceleração do desenvolvimento urbano da região, em função das restrições impostas nas regiões menos seguras (ISMFI > 60).

Analisando especificamente as regiões de ISMFI > 60, as quantidades de células urbanas (classe 6) simuladas para 2050 foram de 75920 e 49449, nos Cenários 1 e 2, respectivamente, correspondendo a uma redução de 26471 células, equivalente à área de 23.8 Km², conforme já apontado no item 4.6.2. Estes números indicam uma tendência de redução de 35% de ocupações urbanas nas regiões de maior suscetibilidade a inundações (ISMFI < 60), em função das medidas propostas no Cenário 2.

De modo a avaliar proporcionalmente a distribuição das células urbanas (classe 6) na paisagem, o Gráfico 32 apresenta os percentuais observados (2000, 2011 e 2020) e simulados (2030, 2040 e 2050), obtidos nas análises dos Cenários 1 e 2.

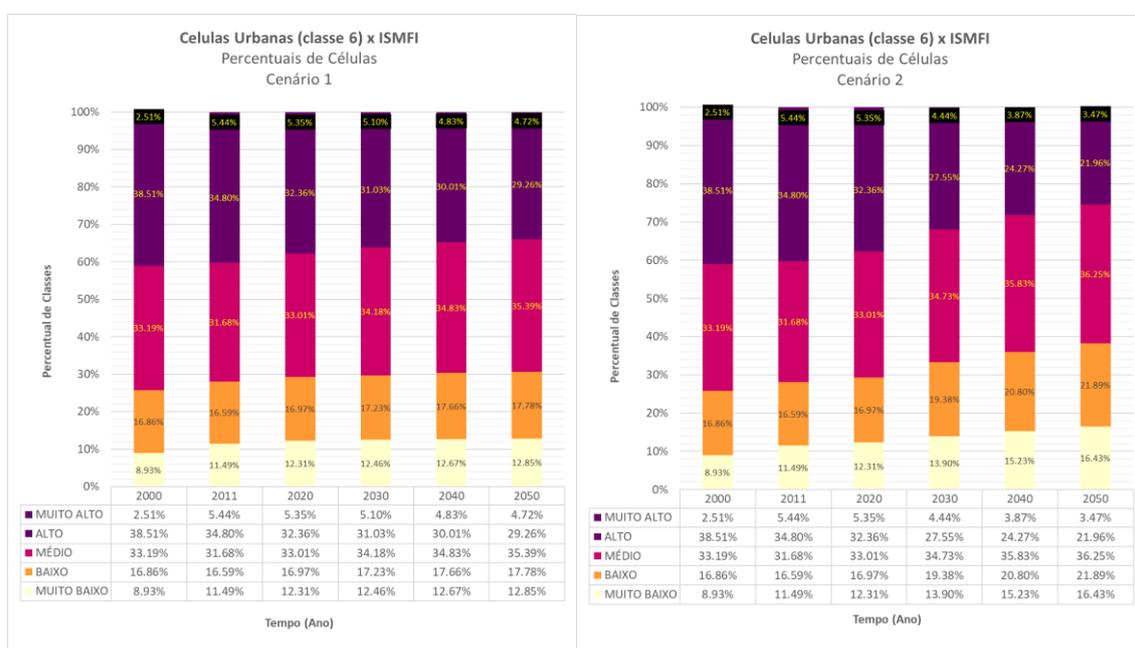


Gráfico 32 – Percentual de células urbanas (classe 6), conforme ISMFI.

Pode-se observar que, nos dois cenários, há uma tendência natural de diminuição dos percentuais das regiões de ISMFI > 60 e, simultaneamente, de aumento dos percentuais das regiões de ISMFI < 40 e ISMFI entre 40 e 60, conforme discutido anteriormente. É importante destacar que a área disponível para ocupação nas regiões de ISMFI > 60 é consideravelmente menor do que nas demais regiões, fazendo com que o avanço da urbanização nessas regiões de ISMFI < 40 e ISMFI entre 40 e 60 aconteça com maior velocidade.

Na comparação entre os Cenários 1 e 2, pode-se observar que no Cenário 2, há maior velocidade da diminuição dos percentuais de ISMFI > 60 e do crescimento dos percentuais nas demais regiões, comprovando que, conforme o objetivo do estudo, as medidas de manejo do uso do solo são capazes de alterar significativamente a dinâmica da ocupação urbana, corrigindo o efeito negativo relacionado à forte influência dos atrativos urbanos para áreas frágeis, em detrimento da segurança contra inundações, no processo.

Apesar de tais efeitos serem considerados bastante significativos para a diminuição da vulnerabilidade a inundações, a longo médio e longo prazo, os resultados também mostraram que é fundamental que tais medidas estejam associadas a outras medidas de preservação ambiental e de infraestrutura urbana, destinadas ao incentivo ao desenvolvimento urbano nas regiões de ISMFI < 40 e ISMFI entre 40 e 60, estimulando os atrativos da urbanização e prevendo condições que favoreçam à ocupação de forma sustentável.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

O crescimento urbano desordenado é um dos principais responsáveis pelo agravamento das inundações e de suas consequências negativas, pela exposição de um maior número de pessoas e estruturas aos riscos de inundação. Adicionalmente, as soluções estruturais tradicionalmente adotadas, destinadas prioritariamente ao condicionamento do escoamento superficial, não são sustentáveis, uma vez que não conseguem acompanhar o crescimento da demanda gerada pela própria urbanização. Nesse sentido, se torna fundamental a implementação de medidas de manejo do uso do solo (não estruturais) com controle de ocupação urbana, devidamente integradas aos Planos Diretores Urbanos (PDU), de modo a diminuir a vulnerabilidade da população às inundações.

Como ferramenta para o planejamento urbano, o presente estudo utiliza um modelo baseado em Autômatos Celulares (CA) para simulação do uso e ocupação do solo da cidade de Itaguaí/RJ e redondezas, apresentando uma metodologia para análise da dinâmica da paisagem com enfoque na transição para a urbanização, avaliando sua relação com os riscos de inundação, representado pelo Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações (ISMFI), bem como os efeitos de medidas de controle de ocupação em cenários futuros.

Na primeira etapa do estudo, através das análises das Matrizes de Transição obtidas pelo modelo, referentes aos períodos 1 (2000-2011) e 2 (2011-2020), foi possível identificar uma paisagem típica de um processo de antropização, decorrente da ocupação desordenada. Constatou-se uma tendência de aumento significativo das áreas urbanas (classe 6), tanto por expansão territorial, quanto por adensamento, principalmente em torno dos eixos viários e das aglomerações urbanas existentes, originadas majoritariamente a partir das áreas de pastagem (classe 3), solo/rocha expostos (classe 5) e vegetação arbustiva (classe 4). Em contraposição a isto, observou-se também uma tendência de recuperação ambiental, com crescimento das áreas de vegetação densa (classe 2), principalmente nas regiões distantes das áreas urbanas. De modo geral, identificou-se uma dinâmica da paisagem com a tendência de transformação das áreas de vegetação arbustiva (classe 4) e solo/rocha expostos (classe 5) em áreas de vegetação

densa (classe 2), pastagem (classe 3) e urbanas (classe 6), representada por “4 e 5 → 2, 3 e 6”.

Entre os períodos 1 e 2, apesar de apresentar uma redução de 6% das mudanças da paisagem a cada ano, com percentuais saindo de 3.16% para 2.97%, observou-se também a tendência de aumento significativo da ocupação urbana em áreas de pastagem (classe 3) e de vegetação arbustiva (classe 4), principalmente nas regiões mais próximas às áreas já urbanizadas, indicando uma clara tendência de intensificação da antropização no longo prazo.

Através da análise dos Pesos de Evidência das variáveis explicativas, foi possível comparar as influências dos principais forçantes do processo, como a proximidade das áreas urbanas (classe 6), rodovias, ferrovias, indústrias, comércio e outros, bem como os aspectos biofísicos, como altitude e declividade, que representam os principais atrativos para a urbanização. Foram identificadas como as variáveis mais impulsoras do processo de ocupação urbana: “Distância de áreas urbanas” (até 60 m); “Distância dos polos comerciais” (até 3 km); e “Distância das vias locais” (até 60 m). E as variáveis mais repulsoras foram: “Altitude” (acima de 150m); “Declividade” (acima de 8%); “Distância de vias locais” (acima de 300 m); “Distância de polos industriais/portuários” (acima de 9 a 17 km); “Distância de polos comerciais” (acima de 17 km); e “Distancia de áreas urbanas” (acima de 200 m a 3 km).

Em especial, na análise dos Pesos de Evidência do ISMFI, constatou-se a baixa influência dos possíveis riscos de inundações (mapeados pelo índice de Susceptibilidade Física a Inundações), quando comparados às demais variáveis, e ainda tendências de repulsão da ocupação nas regiões mais seguras (ISMFI < 20) e atração nas regiões menos seguras (ISMFI > 80), confirmando a hipótese de que a influência dos atrativos urbanos não somente sobrepuja, mas até se contrapõe à lógica da segurança contra inundações no processo. Além da atratividade exercida por áreas mais planas, com fácil acessibilidade e proximidade de centralidades, é possível que as ocupações áreas de risco sejam ainda agravadas pela ação de uma população periférica, devido à falta de acesso a terras seguras, em função do seu menor poder aquisitivo e da especulação imobiliária – essa, porém, é uma discussão que ultrapassa o contexto dessa dissertação, demandando investigação complementar.

Na segunda etapa do estudo, após a calibração do modelo, foram realizadas simulações dos mapas de uso e ocupação do solo, para os anos de 2030, 2040 e 2050, em diferentes cenários, considerando a implementação de medidas de manejo do uso do solo, com o controle de ocupação nas regiões de suscetibilidade a inundações classificadas como Alta a Muito Alta (ISMFI > 60). As simulações revelaram, para o Cenário 2, no ano de 2050, uma tendência de redução de 26471 células nessas regiões, equivalente a uma área de 23.8 km², correspondendo a uma redução de 35% das ocupações urbanas em áreas de risco, como resultado das medidas de manejo propostas, capazes de afastar cerca de 9850 pessoas da vulnerabilidade às inundações, no período simulado.

É importante destacar que as simulações também indicaram uma desaceleração do desenvolvimento urbano no Cenário 2, com diminuição de 13% (19.58% para 17.04%) da classe 6 até 2050, além de uma tendência de aumento da supressão de vegetação densa (classe 2) em regiões de menor risco, em função do deslocamento da ocupação urbana para essas regiões.

Tais resultados comprovam que as medidas de controle são capazes de corrigir grande parte da falha relacionada à falta de influência dos riscos de inundações, e até mesmo à influência dos atrativos urbanos contrária à segurança no processo de urbanização. Entretanto, considerando seus efeitos de desaceleração da urbanização e os impactos na vegetação densa, considera-se fundamental que tais medidas estejam associadas a programas de fomento ao desenvolvimento e de preservação ambiental, integrando Planos Diretores Urbanos (PDU) que promovam a convivência harmônica entre o homem e o meio ambiente, em especial com os cursos d'água, construindo cidades mais resilientes e resistentes às cheias.

5.2 Recomendações

Em continuidade aos estudos realizados, recomenda-se detalhar e aperfeiçoar o modelo em trabalhos futuros, com a inclusão de outras variáveis explicativas que, eventualmente, poderão gerar resultados ainda melhores na calibração, bem como permitir análises complementares importantes para o tema. Sugere-se a inclusão de variáveis forçantes como a distância de serviços de saneamento (água, esgoto e lixo), escolas, hospitais, postos policiais e outras. Além disso, considera-se relevante a inclusão de variáveis que sejam indicadores socioeconômicos, permitindo a análise da sua influência na ocupação urbana e na vulnerabilidade da população a inundações.

Considerando que o avanço da ocupação urbana pode alterar significativamente a permeabilidade do solo, outra recomendação para trabalhos futuros é a inclusão no modelo dos coeficientes de “runoff” do solo, avaliando os impactos nas condições de suscetibilidade a inundações do meio físico.

Um último ponto de destaque para o avanço das pesquisas é a inclusão de análises das tendências do crescimento urbano, considerando o zoneamento dos Planos Diretores Urbanos (PDU), simulando a dinâmica urbana e a vulnerabilidade a inundações, conforme as expectativas futuras estabelecidas pelo poder público, possibilitando diagnósticos e recomendações de correções de rumo no processo de planejamento.

REFERÊNCIAS

ACIOLY, C.; DAVIDSON, F. **Densidade Urbana: Um instrumento de planejamento e gestão urbana.** Rio de Janeiro: MAUAD Consultoria e Planejamento Editorial Ltda, 1998.

AHMED, S. J.; BRAMLEY, G. How will Dhaka grow spatially in future? - Modelling its urban growth with a near-future planning scenario perspective. **International Journal of Sustainable Built Environment** , v. 4, n. 2, p. 359–377., Julho 2015.

ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil.** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos/SP, p. 321. 2004.

ALMEIDA, C. M. D. et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, p. 481-509, 2002.

BATTEMARCO, B. P. **Índice de Resiliência a Inundações aplicado para a avaliação de cenários de urbanização na cidade de Paraty, RJ.** UFRJ / Escola Politécnica (POLI) / Curso de Engenharia Civil. Rio de Janeiro/RJ, p. 102. 2016.

BATTY, M.; JIANG, B.; THURSTAIN-GOODWIN, M. Local movement: agent-based models of pedestrian flows. **Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL):** London, UK, 1998. Disponível em: <<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/225/>>. Acesso em: 21 jul. 2024.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS.** Pergamon. Ontario, p. 305. 1994.

BRASIL. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PEDUI-RMRJ) - Tomo I.** Secretaria de Urbanismo. Rio de Janeiro, p. 311. 2018.

BREARS, R. C. **Nature-Based Solutions to 21st Century Challenges.** [S.l.]: Routledge, 2020.

BUTLER, D.; DAVIES, W. **Urban drainage**. 3.a. ed. Londres: Spon Press, 2011.

CAIXETA, P. R. C. **Modelagem Espacial da Dinâmica da Mancha Urbana de Viçosa-MG**. Universidade Federal de Viçosa (UFV)/DEC/PPGEC. Viçosa/MG, p. 92. 2014.

CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Modelagem de Dados em Geoprocessamento / Curso Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2.a. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1998.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CLARKE, K. C.; GAYDOS, L. J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: longterm urban growth predictions for San Francisco and Baltimore. **International Journal of Geographic Information Science**, 1998, v. 12. p. 699-714.

CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, 1997. p. 247-261.

COPPETEC, F. **PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO RT-03 - Vulnerabilidade a Eventos Críticos**. Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Rio de Janeiro, p. 257. 2014.

CORREIA, E. L. **Modelagem da dinâmica da paisagem: simulação de cenários na região do baixo curso do rio dos Sinos - RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre / RS, p. 126. 2014.

COSTA SILVA, G. Impactos Ambientais Urbanos: O processo de ocupação da Barra da Tijuca, no município do Rio de Janeiro. **Revista Oculum Ensaio**, Campinas/SP, v. 4, n. Wilson Ribeiro dos Santos Junior, p. 34-45, 2005.

COUCLELIS, H. Macrostructure and Microbehavior in a Metropolitan Area. **Environment and Planning B**, 1989. v. 16, p. 141–154.

EMDAT. OFDA/CRED International Disaster Database. **Our World in Data**, 2017. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/natural-disasters#number-of-deaths-by-type-of-natural-disaster>>. Acesso em: 05 março 2021.

EMDAT. Mapping natural disasters from 2000 until 2018. **EM-DAT**, 2019. Disponível em: <https://www.emdat.be/emdat_atlas/sub_html_pages/sub_html_BRA.html>. Acesso em: 11 março 2021.

FARR, D. **Urbanismo Sustentável: Desenho Urbano com a Natureza**. Tradução de Maria do Carmo M. Carvalho. São Paulo: Gustavo Gili, 2013.

FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. New York: John Wiley & Sons, 1986.

FRAGA, J. P. R. **Projeto de Controle de Cheias na Bacia do Rio Trapiche no Município de Itaguaí/RJ apoiado em Modelagem Matemática**. UFRJ/ Escola Politécnica. Rio de Janeiro, p. 119. 2018. Orientador: Marcelo Gomes Miguez.

GEO RISKS RESEARCH. NatCatSERVICE, Munich, 2021. Disponível em: <<https://www.iii.org/graph-archive/218075>>. Acesso em: 13 março 2021.

GODOY, M. M. G.; SOARES-FILHO, B. S. Modelagem da dinâmica de ocupação do solo no bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil. In: ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. M. **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. Cap. 13, p. 286-304.

GONG, J. et al. Patch-based cellular automata model of urban growth simulation: Integrating feedback between quantitative composition and spatial configuration. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 79, 2019.

HOOKE, J. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean. **Geomorphology**, v. 79, 2006. 311-335. Acesso em: 01 out. 2024.

IBGE. **Sinopse Estatística do município de Itaguaí – Estado do Rio de Janeiro**. 1. ed. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1948.

IBGE. Censo 2010. Brazilian Institute of Geography and Statistics., 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 01 out. 2024.

IBGE. **Atlas do Saneamento – 1.a edição**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro/RJ, p. 268. 2011.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. **Relatório sobre a situação da Bacia - Região Hidrográfica II - Guandu**. Comitê do Rio Guandu, Guandu-Mirim e da Guarda. Rio de Janeiro/RJ, p. 53. 2011-2012.

KAUFFMANN, M. O. **Expansão urbana e qualidade de vida: proposta para desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade aplicados à legislação urbanística. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro/RJ, p. 167. 2003.

KEMP, L. D.; G.F., B.-C.; RAINES, G. L. Arc-WofE: Arcview extension for weights of evidence mapping. **Instituto de Geociências**, 1999. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/wofe>>. Acesso em: 10 setembro 2020.

LI, X.; YEH, A. G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS.. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 2, 2000. p. 131-152.

MARGUTI, B. O.; COSTA, M. A.; FAVARÃO, C. B. **Territórios em números: insumos para políticas públicas a partir da análise do IDHM e do IVS de municípios e Unidades da Federação brasileira**. Brasília: IPEA, v. 1, 2017.

MCHARG , I. L. **Design with nature**. New York: John Wiley & Sons, 1969.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem Urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. 1.a. ed. Rio de Janeiro/RJ: Elsevier, v. Unico, 2016.

MIGUEZ, M. G.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P. City Growth and Urban Drainage Alternatives: Sustainability Challenge. **Journal of Urban Planning and Development/American Society of Civil Engineers (ASCE)**, Reston, VA, v. 141, p. 10, Setembro 2015.

MIRANDA, F. M. **Índice de Susceptibilidade do Meio Físico a Inundações como Ferramenta para o Planejamento Urbano**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Rio de Janeiro, p. 177. 2016.

NOVAES, M. R. D. et al. Cenários prognósticos baseados em modelagem dinâmica espacial para o manejo da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba/PR, 05 maio 2011. 0407.

OLIVEIRA, M. D. et al. Modelagem dinâmica da expansão urbana usando autômatos celulares: o caso de Fortaleza-CE. **Urbe Revista Brasileira de Gestão Urbana - Vol 13**, Curitiba/PR, 13, 02 Abril 2021.

PERES, O. M.; POLIDORI, M. C. **Modelos Urbanos baseados em Autômatos Celulares: integrando ambiente natural e o crescimento urbano..** 1º Workshop de Computação Aplicada ao Meio Ambiente da Sociedade Brasileira de Computação.. Bento Gonçalves/RS. 2009.

POLIDORI, M. C. **Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade.** UFRGS – PPGECO. Porto Alegre, p. 532. 2004.

PREFEITURA DE ITAGUAÍ. Especial Itaguaí 200 anos, 2018. Disponível em: <<https://itaguai.rj.gov.br/200anos/>>. Acesso em: 15 março 2020.

REZENDE, F. S. D. **Análise espaço-temporal de mudança de uso e cobertura da terra na região do Vale do Paraíba paulista: desenvolvimento de cenários futuros.** Universidade Federal Fluminense (UFF). Niterói/RJ, p. 96. 2016.

REZENDE, F. S. D. et al. Spatial and Temporal Changes in the Land Use and Cover of the Paraíba Valley in São Paulo, Brazil: Development of Future Scenarios. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife/PE, v. 11, n. 5, p. 1732-1747, Junho 2018.

SANCHEZ, A. et al. Modeling Urban Growth and Land Use Change with Cellular Automata and Genetic Algorithms. **6th International Congress on Environmental Modelling and Software**, Leipzig, 2012.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; FILHO., M. N. M. B. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro/RJ, v. 22, Setembro 2017.

SANTOS, R. F. D. **Vulnerabilidade Ambiental. Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos?** 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 192 p.

SCHUELER, R. **Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs.** Washington, D.C.: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

SERENCO SERVIÇOS DE ENGENHARIA E CONSULTORIA. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Itaguaí (PMSB)**. Prefeitura Municipal de Itaguaí. Itaguaí, p. 590. 2016.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. **Guia Prático do Dinamica EGO – Modelagem de Dinâmica Ambiental Dinamica EGO**. Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte/MG. 2009.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**, 18 janeiro 2013. 1-8.

TÂNGARI, V. R. **Arco Metropolitano: Urbanização e Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2013.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 26, 1970. p. 234-240.

TORRENS, P. M.; O'SULLIVAN, D. Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? **Environment and Planning B**, v. 28, 2001. p. 163-168.

TRENTIN, G.; FREITAS, M. I. C. D. Modelagem da dinâmica espacial urbana: Modelo de Autômato Celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP. **Revista Brasileira de Cartografia N° 62 EDIÇÃO ESPECIAL 01**, 2010.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Estudos Sócio Econômicos dos municípios do estado do Rio de Janeiro**. Secretaria de Planejamento. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

TUCCI, C. E. Urbanização e Recursos Hídricos. In: BICUDO, C. E. D. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Águas do Brasil Análises Estratégicas**. São Paulo: INSTITUTO DE BOTÂNICA, 2010. p. 222.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. 1.a ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), v. único, 2003.

UNESCO. **Nature-Based Solutions for Water**. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Atlas brasileiro de desastres naturais**: 1991 a 2012. Volume Rio de Janeiro. 2.a. ed. Florianópolis/SC: CEPED UFSC, 2013.

VIEIRA, R. D. S. P. et al. Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. **Land Degradation & Development**, p. 1-17, Maio 2020.

VILLELA, L. E. et al. Diferentes Modelos de Crescimento em Itaguaí-RJ, Brasil e Província de Imbabura, Equador. **Desenvolvimento em Questão**, p. 72-98, 2018. Disponível em: <<https://revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/5450>> . Acesso em: 27 março 2021.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns. **Environment and Planning A**, v. 25, 1993. p. 1175-1199.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, 1997. p. 235-246.

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. Vulnerability assessment of low-lying coastal areas and small islands to climate change and sea level rise – Phase 2: Case study St. Lucia. Kingston, Jamaica. **United Nations Environment Programme: Caribbean Regional Co-ordinating Unit**, 1998.

WU, F. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 20, n.6, 1996. p. 367-387.

WU, F. Simland: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 1, 1998. p. 63-82.

XIE, Y. A generalized model for cellular urban dynamics. *Geographical Analysis*, v. 28, n. 4, 1996. p. 350-373.

YEH, A. G.; LI, X. A cellular automata model to simulate development density for urban planning. **Environmental and Planning B**, v. 29, 2002. p. 431-450.

ZEVENBERGEN, C.; FU, D.; PATHIRANA, A. Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China. **Water**, 10(9), 1230, 2018.