

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Aplicação conjunta de modelo de projeção urbana e
mapeamento de áreas aptas à urbanização sustentável no
município de Itajubá (MG).**

Rafaela de Freitas Maltauro

Itajubá, Março de 2018.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Rafaela de Freitas Maltauro

Aplicação conjunta de modelo de projeção urbana e mapeamento de áreas aptas à urbanização sustentável no município de Itajubá (MG).

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientadora: Dra. Nívea Adriana Dias Pons

**Março de 2018
Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Rafaela de Freitas Maltauro

**Aplicação conjunta de modelo de projeção urbana e
mapeamento de áreas aptas à urbanização sustentável no
município de Itajubá (MG).**

**Dissertação aprovada por banca examinadora em 26 de
fevereiro de 2018, conferindo à autora o título de Mestre em
Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Nívea Adriana Dias Pons (Orientadora)

Prof^a. Dr^a. Josiane Palma Lima

Prof^a. Dr^a. Daniela R. T. Riondet Costa

Prof. Dr. Marcela Montaña

**Março de 2018
Itajubá**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pela fé, e pelas oportunidades de crescimento ao longo do meu caminho.

À minha mãe, Alice, pelo amor infinito, pelos ensinamentos, e por sempre estar ao meu lado, me motivando e apoiando.

Ao meu pai, Paulo, pelo amor, pelo suporte, pelo carinho e por me ensinar a sempre ter determinação.

Ao meu irmão, Junior, por ser meu modelo de calma e paciência, sempre me fazendo ver a vida por outra perspectiva.

À minha família Freitas e Maltauro, especialmente aos meus avós que “de vez em sempre” foram meus pais também, me dando muito amor.

Ao Gustavo, pelos anos de parceria e apoio, sempre me motivando a seguir meus sonhos.

Aos meus amigos tão amados de Itajubá, colegas de turma, às Repúblicas Repatetas, Refúgio das Pererecas e Tijolinho, pelas conversas, pelas festas, pelos momentos que vou levar pra sempre. Vocês fizeram esses anos de Itajubá perfeitos.

À minha querida amiga-mestre-oráculo Nete, cujos conselhos e apoio me serviram de suporte para superar meus momentos mais difíceis.

À minha orientadora, Nívea, que desde a iniciação científica vem compartilhando seus ensinamentos e me dando apoio na pesquisa, sempre me motivando.

À UNIFEI, a todos os professores e aos colegas de mestrado envolvidos neste trabalho, muito obrigada por cada ensinamento e por toda a ajuda prestada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa oferecida, a qual me permitiu a dedicação exclusiva à realização deste trabalho.

“Never forget that you are one of a kind. Never forget that if there weren't any need for you in all your uniqueness to be on this earth, you wouldn't be here in the first place. And never forget, no matter how overwhelming life's challenges and problems seem to be, that one person can make a difference in the world. In fact, it is always because of one person that all the changes that matter in the world come about. So be that one person.”

R. Buckminster Fuller

RESUMO

A urbanização no Brasil vem ocorrendo de forma pouco planejada gerando problemas sociais e ambientais. O planejamento sustentável é essencial para melhorar essa realidade, já que visa realizar um desenvolvimento ambiental, social e economicamente equilibrado. Para a concretização deste planejamento, os municípios necessitam, principalmente, da implantação de metodologias de gestão que sejam replicáveis e economicamente acessíveis. Esse trabalho teve o objetivo de aplicar de forma conjunta a modelagem de projeção urbana e o mapeamento de áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável, de modo a auxiliar o planejamento urbano de Itajubá (MG). Para isso, realizou-se um estudo de caso de natureza aplicada com objetivos exploratórios, buscando não somente conhecer a dinâmica histórica e a projeção da expansão urbana para o ano de 2030, mas também identificar os critérios que regem a sustentabilidade urbana para modelar o mapeamento das áreas aptas à expansão. Na primeira etapa do trabalho, aplicou-se o modelo de alteração do uso e ocupação do solo *Land Change Modeler* (LCM – EASTMAN, 2012) sobre a área de estudo. O modelo foi embasado nas imagens classificadas do Landsat 5 e 8 dos anos de 1986, 2001 e 2017, e na rede de transporte e mapa de declividades da cidade de estudo. Na segunda etapa, foi utilizada a análise de decisão multicritério, através do Processo Analítico Hierárquico (AHP), para desenvolver o modelo de priorização de áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável. A avaliação do comportamento histórico e projeção de crescimento para 2030 em Itajubá pôde mostrar que a cidade apresenta características marcantes de crescimento horizontal. Ao contrapor este crescimento com os dados de renda da população, foi possível constatar que as populações de renda mais baixa vêm sendo majoritariamente afastadas das áreas centrais do município. O mapa de potencial de transição de solo não urbano para urbano indicou que o maior potencial ocorre nas áreas próximas das áreas já construídas da cidade, localizadas às margens das estradas de acesso às cidades vizinhas. O modelo de priorização foi estruturado a partir da definição de critérios embasados nos conceitos de sustentabilidade, encontrados na literatura e nas leis que regem a expansão urbana. A hierarquia e ponderação dos critérios foram realizadas com auxílio da matriz par a par, através da análise de especialistas no tema do estudo. A combinação dos critérios foi realizada através da Combinação Linear Ponderada. O mapeamento mostrou que apenas 14% da área total do município, considerando áreas não urbanizadas e já urbanizadas, é apta à urbanização ambientalmente sustentável. A aplicação conjunta dos métodos mostrou que dezessete bairros da cidade estão crescendo e tendem a crescer sobre áreas de baixa aptidão para expansão urbana. Concluiu-se que a tendência de crescimento urbano analisada tende a gerar impactos sociais e ambientais diversos, excluindo populações e aumentando as vulnerabilidades do ambiente. Para melhorar essa realidade, foram propostas melhorias na delimitação das zonas de expansão urbana e nas zonas de adensamento, constantes no atual Plano Diretor do município (ITAJUBÁ, 2003).

Palavras-chave: Expansão Urbana; Urbanização Ambientalmente Sustentável; Modelo de Alteração do Uso e da Cobertura do Solo; Análise de Decisão Multicritério.

ABSTRACT

Urbanization in Brazil has happened under poor means of planning, generating social and environmental problems. Sustainable planning is essential to improve this reality, since it aims at achieving an environmentally, socially and economically balanced development. To accomplish this planning, municipalities need, mainly, the implementation of sustainable management methodologies that are replicable and economically accessible. The objective of this research is to jointly apply the urban projection model and the mapping of suitable areas for an environmentally sustainable urbanization, in order to aid urban planning in the municipality of Itajubá (MG). To accomplish this, a case study of an applied nature was carried out with exploratory objectives, seeking not only to know the historical dynamics and the projection of the urban expansion for the year 2030, but also to identify the criteria that govern the urban sustainability to model the mapping of suitable areas for expansion. In the first stage of the research, the land use and cover change model Land Change Modeler (LCM - EASTMAN, 2012) was applied in the study area. The model was based on Landsat 5 and 8 classified images from the years 1986, 2001 and 2017, and on the transport network and slope map of the studied city. In the second stage, the multicriteria decision analysis was used, through the Hierarchical Analytical Process (AHP), to develop the prioritization model of suitable areas for an environmentally sustainable urbanization. The evaluation of the historical behavior and projection of growth for 2030 in Itajubá was able to show that the city has remarkable characteristics of a horizontal growth. By contrasting this growth with the income data of the population, it was possible to verify that most of the population of low incomes has been living on peripheral areas of the city. The transition potentials map indicated that the transitions from non-urban to urban land have higher probabilities of happening in areas that are close to the city and near access roads to neighbor cities. The prioritization model was structured based on the definition of criteria that were defined from the concepts of sustainability found in the literature and in the laws that govern urban expansion. The hierarchy and weighting of the criteria were carried with the pairwise comparison matrix, through the analysis of specialists in the theme of the study. The combination of the criteria was performed through the Weighted Linear Combination. The mapping showed that only 14% of the total area of the city, considering non-urban and urban areas, is suitable for an environmentally sustainable urbanization. The joint application of the methods showed that seventeen neighborhoods in the city are growing and still tend to grow over areas that are not suitable to receive urban occupations. It was concluded that the analyzed urban growth trend tends to generate diverse social and environmental impacts, excluding populations and increasing environmental vulnerabilities. In order to improve this reality, improvements have been proposed on the delimitation of urban expansion and densification zones from the current Municipal Master Plan (ITAJUBÁ, 2003).

Keywords: Urban Expansion; Environmentally Sustainable Urbanization; Land Use and Cover Change Model; Multicriteria Decision Analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Aplicações do Sistema de Informações Geográficas..... | 14 |
| Figura 2: A operação do Land Change Modeler..... | 19 |
| Figura 3: Estrutura hierárquica de um problema de decisão..... | 23 |
| Figura 4: Funções <i>fuzzy</i> | 26 |
| Figura 5: Metodologia do trabalho proposto..... | 29 |
| Figura 6: Localização da cidade de estudo. | 30 |
| Figura 7: Detalhamento do município de Itajubá, com suas drenagens principais..... | 30 |
| Figura 8: Esquematização da etapa de classificação das imagens de satélite..... | 34 |
| Figura 9: Esquematização da aplicação do LCM..... | 35 |
| Figura 10: Esquematização do modelo aplicado para a seleção de áreas aptas a receber urbanização ambientalmente sustentável. | 37 |
| Figura 11: Classificação do uso e cobertura do solo..... | 43 |
| Figura 12: Mapa de transição de declividade inserido no LCM. | 44 |
| Figura 13: Mapa de distâncias euclidianas da rede de transporte inserido no LCM. | 44 |
| Figura 14: Potencial de transição da cobertura não urbana para cobertura urbana..... | 45 |
| Figura 15: Classificações utilizadas para a validação do modelo..... | 46 |
| Figura 16: Mapas de classificação | 47 |
| Figura 17: Crescimento da área construída de 2001 com relação a 1986..... | 49 |
| Figura 18: Crescimento da área construída de 2017 (real) com relação a 2001. | 50 |
| Figura 19: Crescimento da área construída de 2030 (projetado) com relação a 2017 (real). | 51 |
| Figura 20: População residente em domicílios particulares permanentes, com rendimento nominal mensal domiciliar per capita de até 70 reais por setor censitário..... | 53 |
| Figura 21: Residências do bairro Agonia..... | 54 |
| Figura 22: Delimitação do Condomínio Dr. João Luiz..... | 55 |
| Figura 23: Casas sobre a Rua Coronel Francisco Braz..... | 56 |
| Figura 24: À direita, imagens da Rua Francisco Masseli, e à esquerda, imagens da Rua Professor Souza Nilo..... | 56 |
| Figura 25: Potencial de Transição para as regiões de Itajubá..... | 58 |
| Figura 26: Hierarquia AHP para a priorização de áreas para a urbanização ambientalmente sustentável..... | 62 |
| Figura 27: Matriz de comparação par a par. | 63 |
| Figura 28: Modelo de mapeamento de áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 29: Mapa da distância euclidiana com relação aos pontos de ônibus..... | 65 |
| Figura 30: Mapa das distâncias normalizadas na escala <i>fuzzy</i> | 66 |
| Figura 31: Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo de Itajubá, com enfoque para as áreas adensáveis. | 67 |
| Figura 32: Mapa de áreas densáveis normalizada na escala <i>fuzzy</i> | 68 |
| Figura 33: Mapa da distância euclidiana com relação às calçadas. | 69 |
| Figura 34: Mapa das distâncias normalizado na escala <i>fuzzy</i> | 70 |
| Figura 35: Mapa de altitudes de acordo com os limites propostos no Plano Diretor. | 71 |
| Figura 36: Mapa de altitudes normalizado na escala <i>fuzzy</i> | 72 |
| Figura 37: Mapa pedológico com escala melhorada para 1:25.000..... | 74 |
| Figura 38: Classificação da Capacidade de Uso do Solo..... | 75 |
| Figura 39: Mapa de aptidão do uso do solo normalizado na escala <i>fuzzy</i> | 76 |
| Figura 40: Mancha de inundação | 77 |
| Figura 41: Mapa de inundação normalizado na escala <i>fuzzy</i> | 77 |
| Figura 42: Área de aterro sanitário do município de Itajubá. | 78 |
| Figura 43: Mapa da área de aterro sanitário normalizado através da ferramenta <i>fuzzy</i> | 79 |
| Figura 44: Classificação do uso e cobertura do solo para o ano de 2017. | 80 |
| Figura 45: Mapa de uso do solo e normalização <i>fuzzy</i> | 80 |
| Figura 46: Localização das áreas protegidas de Itajubá..... | 82 |
| Figura 47: Mapa de distâncias. | 82 |
| Figura 48: Mapa de áreas protegidas normalizado na escala <i>fuzzy</i> | 83 |
| Figura 49: Mapa de vulnerabilidade às contaminações hídricas subterrâneas em função da declividade do terreno..... | 84 |
| Figura 50: Mapa de vulnerabilidade às contaminações hídricas subterrâneas em função da profundidade e permeabilidade dos solos. | 85 |
| Figura 51: Mapa de vulnerabilidade às contaminações hídricas subterrâneas em função da declividade, profundidade e permeabilidade dos solos..... | 86 |
| Figura 52: Mapa de aptidão à urbanização por vulnerabilidade à infiltração normalizado na escala <i>fuzzy</i> | 87 |
| Figura 53: Modelo de mapeamento e processos de normalização e combinação..... | 88 |
| Figura 54: Mapa de aptidão à urbanização em função de cidades ambientalmente sustentáveis. | 89 |
| Figura 55: Mapa de aptidão à urbanização em função da estabilidade do solo. | 89 |
| Figura 56: Mapa de aptidão à urbanização em função das vulnerabilidades dos recursos hídricos. . | 90 |

| | |
|---|-----|
| Figura 57: Mapeamento final das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável sobre o município do Itajubá. | 91 |
| Figura 58: Mapeamento das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável na parte norte de Itajubá..... | 92 |
| Figura 59: Mapeamento das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável na parte sul de Itajubá..... | 93 |
| Figura 60: Mapeamento de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável junto à projeção de crescimento urbano. | 94 |
| Figura 61: Zoom sobre a área número 1. | 95 |
| Figura 62: Zoom sobre a área número 2. | 95 |
| Figura 63: Zoom sobre a área número 3. | 96 |
| Figura 64: Zoom sobre a área número 4. | 96 |
| Figura 65: Zoom sobre a área número 5. | 97 |
| Figura 66: Zoom sobre a área número 6. | 97 |
| Figura 67: Proposta de redefinição das zonas de expansão urbana para o município de Itajubá. | 99 |
| Figura 68: Zona de Adensamento (ZAD) e mapa de inundações da CPRM (2014). | 101 |
| Figura 69: Sugestão de novas áreas passíveis de adensamento para o município de Itajubá. | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Escala de comparação dos critérios | 24 |
| Tabela 2: Índice de Aleatoriedade (RI)..... | 25 |
| Tabela 3: Banco de Dados | 33 |
| Tabela 4: Nível de concordância das imagens classificadas..... | 42 |
| Tabela 5: Ocupação urbana nos anos estudados. | 48 |
| Tabela 6: Relação dos atributos da paisagem para a confecção do mapa de solos..... | 73 |
| Tabela 7: Determinação das classes de uso do solo para fins agrícolas. | 74 |
| Tabela 8: Faixas de aptidão à urbanização em função da capacidade de uso do solo | 75 |
| Tabela 9: Classe de Vulnerabilidade à contaminação subterrânea | 84 |
| Tabela 10: Classes de aptidão para a urbanização em função da vulnerabilidade de contaminação dos recursos hídricos..... | 86 |
| Tabela 11: Área de cada classe de aptidão no mapeamento final..... | 91 |
| Tabela 12: Comparação entre a ZEU delimitada e a ZEU proposta para manutenção da sustentabilidade..... | 99 |

ABREVIACÕES

AHP – Processo Analítico Hierárquico

AIA – Área de Interesse Ambiental

APP – Área de Proteção Permanente

BNH – Banco Nacional de Habitação

CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais

CPRM- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DN – Número Digital

DEM – Modelo Digital de Elevação do Terreno

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

LCM – *Land Change Modeler*

LPGS – *Level 1 Product Generation System*

LUCC – *Land Use and Cover Change*

MCDA – Análise de Decisão Multicritério

MLP – *Multi-Layer Perceptron*

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

ONU – Organização das Nações Unidas

REDD – Redução de Emissões de Desmatamento e Degradação de Florestas

REM – Radiação Eletromagnética

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SLEUTH - *Slope, Land Use, Exclusion, Urban Extent, Transportation and Hillshade*

SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação

TOA – Topo de Atmosfera

UNFPA – *United Nations Population Fund*

UFLA – Universidade Federal de Lavras

UFV – Universidade Federal de Viçosa

USGS – *United States Geological Survey*

WLC – Combinação Linear Ponderada

ZAD – Zona de Adensamento

ZEU – Zona de Expansão Urbana

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS..... | 5 |
| 2.1. Objetivos Gerais | 5 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 5 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 6 |
| 3.1. A Expansão das Cidades e seus Impactos | 6 |
| 3.2. A Sustentabilidade Urbana..... | 10 |
| 3.3. As Geotecnologias Aplicadas na Gestão Urbana | 13 |
| 3.4. A Modelagem de Alteração do Uso e da Cobertura do Solo | 15 |
| 3.4.1. A operação do modelo <i>Land Change Modeler</i> (LCM)..... | 19 |
| 3.5. Análise de Decisão Multicritério..... | 21 |
| 3.5.1. Método de análise e ponderação hierárquica | 23 |
| 3.5.2. Normalização de critérios | 25 |
| 3.5.3. Método de combinação de critérios | 26 |
| 4. METODOLOGIA | 28 |
| 4.1. Método de Pesquisa..... | 28 |
| 4.2. A Cidade de Estudo..... | 29 |
| 4.3. Elaboração do Banco de Dados Geográficos | 32 |
| 4.4. Classificação do Uso e da Cobertura do Solo | 33 |
| 4.5. Projeção do Crescimento Urbano..... | 35 |
| 4.6. Mapeamento da Aptidão à Urbanização Ambientalmente Sustentável | 36 |
| 4.7. Adequação dos Zoneamentos de Áreas de Expansão e Adensamento..... | 38 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| 5.1. Classificação do Uso e da Cobertura do Solo | 39 |
| 5.1.1. Pré-processamento das imagens..... | 39 |
| 5.1.2. Classificação das imagens..... | 41 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.2. | Projeção do Crescimento Urbano..... | 43 |
| 5.2.1. | Aplicação do modelo <i>Land Change Modeler</i> (LCM)..... | 43 |
| 5.2.2. | Análise do comportamento histórico e da projeção urbana..... | 47 |
| 5.3. | Mapeamento da Aptidão à Urbanização Ambientalmente Sustentável..... | 58 |
| 5.3.1. | Definição e hierarquia dos critérios..... | 59 |
| 5.3.2. | Ponderação dos critérios..... | 62 |
| 5.3.3. | Aplicação do modelo de mapeamento..... | 64 |
| 5.3.4. | Combinação dos critérios e análise do mapeamento..... | 87 |
| 5.4. | Aplicação conjunta da Projeção e do Mapeamento de Aptidão..... | 93 |
| 5.5. | Adequação dos Zoneamentos de Áreas de Expansão e Adensamento..... | 98 |
| 5.5.1. | Análise das zonas de expansão..... | 98 |
| 5.5.2. | Análise das zonas de adensamento..... | 100 |
| 6. | CONCLUSÃO..... | 103 |
| | REFERÊNCIAS..... | 107 |

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das cidades é uma questão inerente a grande parte dos países latinos americanos. De acordo com estudo realizado pela ONU (2015a), os países latinos abrigam uma população urbana de mais de 80% de sua população total, ocupando o segundo lugar no ranking dos países com maior população urbana no mundo.

O mesmo ocorre para o processo de expansão urbana no Brasil, onde o crescimento urbano passou a ser intensificado a partir da década de 1950 com os fortes avanços da industrialização e a necessidade de atrair mão de obra para locais mais próximos das empresas. Muitos trabalhadores rurais passaram a deixar o campo, migrando para as áreas urbanas em busca de melhores condições de vida e a procura de trabalho regulamentado que, até então, não existia para o trabalho rural (MARICATO, 2003).

Devido à expansão urbana, o planejamento urbano torna-se essencial. Ao lidar com os diferentes interesses dos agentes envolvidos na urbanização, o planejamento urbano acaba encontrando dificuldades em respaldar os fatores ambientais, que visam a sustentabilidade ambiental urbana, de modo que geram diversos impactos sociais e ambientais. No contexto social, podem ser mencionados problemas como o da desigualdade, ocupações irregulares, más condições de transporte público e maiores índices de violência. No meio ambiente, os impactos podem ser descritos como poluições (do meio aquático, do ar e do solo), desestabilidade do solo devido ao mau uso, formação de ilhas de calor, perda de solos plantáveis, entre outros (MENDONÇA; CUNHA; LUÍS, 2016).

De acordo com Santoro (2014), agentes políticos, industriais e imobiliários são os principais agentes que influenciam no funcionamento inadequado das leis que permeiam o planejamento, o uso e a cobertura do solo. Esse impedimento, segundo a autora, leva a ocorrência de diversos problemas urbanísticos, fora os impactos ambientais e sociais supracitados. Maricato (2003) destaca que o problema da urbanização insustentável e sem planejamento é tão forte e recorrente no país que, a partir da década de 80, o crescimento das periferias brasileiras passou a ser maior do que o crescimento de municípios centrais em regiões metropolitanas.

Portanto, o desenvolvimento sustentável, que é definido como o balanceamento do desenvolvimento econômico com a qualidade de vida e a manutenção do meio ambiente, depende, fundamentalmente, do planejamento urbano para se concretizar (SHEN et al., 2012). O planejamento urbano sustentável é baseado, como destaca Pivo (1996), em seis princípios básicos como o de cidades completas, densas, coordenadas, preservadas, confortáveis e

colaborativas, que visam equilibrar todos fatores atrelados na urbanização. O autor mostra que esses princípios de planejamento estimulam melhorias diversas no ambiente urbano, trazendo avanços na saúde, no transporte, no ambiente, na economia, entre tantos outros fatores destacados pelo autor.

Visando atender a esses princípios de cidades sustentáveis, destaca-se, no Brasil, a aplicação do Plano Diretor, regulamentado através do Estatuto da Cidade (Lei Federal 10.257/2001), como ferramenta essencial de gestão urbana. O Plano Diretor busca, de forma democrática, estabelecer normas para o desenvolvimento sustentável de cada município. O Plano deve atender, imprescindivelmente, aos princípios constitucionais de que sejam cumpridas: a função social da cidade, a função social da propriedade urbana, a gestão democrática e a sustentabilidade ambiental.

Realizado junto ao Plano Diretor, o zoneamento ambiental também é utilizado como uma ferramenta vital para a gestão urbana. Ele permite que o município seja dividido em áreas de interesse específico, baseando-se na capacidade de suporte e aptidão do meio ambiente em que essas áreas serão inseridas. O zoneamento é especialmente importante, pois ele não permite que utilizações ambientalmente incompatíveis do solo sejam alocadas sobre uma mesma área, além de definir zonas especiais de proteção e conservação ambiental (BRAGA, 2001; MONTAÑO, 2005).

Juntamente com o Plano Diretor e o zoneamento ambiental, as geotecnologias surgem como ferramentas valiosas para auxiliar o planejamento urbano sustentável, uma vez que permitem a geração de dados analíticos que facilitam o gerenciamento público. As utilizações de técnicas de geoprocessamento e do sensoriamento remoto permitem a interação georreferenciada de dados distintos, como os de dados vetoriais (rede de esgoto, rede elétrica, transporte, entre outros) e de dados *raster* (imagens de satélite, classificações diversas, modelos numéricos do terreno, entre outros). Essa interação permite analisar o dinamismo urbano histórico de forma eficientemente rápida, atualizada, georreferenciada, de baixo custo e através de metodologias replicáveis (FITZ, 2010; BENZA et al., 2016).

Atrelados aos SIG e ao Sensoriamento Remoto estão os modelos de alteração do uso e cobertura do solo. Com os modelos de alteração é possível, não só analisar o comportamento histórico urbano, mas também realizar a geração de cenários futuros. Baseando-se na classificação do uso e ocupação do solo de épocas anteriores, os modelos projetam os cenários, permitindo a análise prévia de potenciais impactos. Esses modelos permitem que sejam realizados, portanto, três tipos de análise no que concerne a gestão urbana: a

constatação dos fatores que regem a transição de mudanças do uso e da cobertura do solo, a análise da eficiência de políticas urbanas já implantadas e, a inferência preventiva de novas políticas, quando constatadas tendências de potenciais impactos no futuro (SECUMA, 2012; MOGHADAM; HELBICH, 2013).

Ainda, atrelados às geotecnologias, estão os Sistemas de Informação Geográfica (SIG ou *Geographic Information System- GIS*) aplicados junto à Análise de Decisão Multicritério (ou *Multi-Criteria Decision Analysis*), denominado sistema GIS-MCDA. O sistema GIS-MCDA pode ser um vital facilitador do processo decisório no planejamento urbano sustentável. O GIS-MCDA permite que sejam combinados e ponderados todos os critérios envolvidos na tomada de decisão na gestão de um município, permitindo que as alternativas e decisões geradas sejam confiáveis e embasadas em uma comparação criteriosa e fundamentada (JELOKHANI-NIARAKI; MALCZEWSKI, 2015). Um exemplo de aplicação do GIS-MCDA no planejamento sustentável é sua utilização no mapeamento de áreas de interesse específico, como no zoneamento ambiental, onde, a partir da análise dos critérios envolvidos, determina-se a seleção das áreas de interesse.

Dessa forma, visando minimizar os impactos ambientais e sociais oriundos do crescimento urbano que ocorre sem o devido planejamento ambientalmente sustentável, é proposta, através desse trabalho, a aplicação conjunta da predição futura de uso do solo com o mapeamento realizado através da análise de decisão multicritério. Essa aplicação conjunta permite que as áreas urbanas que estejam avançando sobre locais vulneráveis ou inapropriados para a ocupação, como as áreas de proteção ou áreas de risco, sejam destacadas, permitindo que gestores públicos possam dar mais atenção a essas áreas, realizando uma gestão urbana de forma dinâmica e preventiva.

O tipo de aplicação proposta neste trabalho possibilita também que gestores possam acompanhar periodicamente o comportamento urbano no tempo presente e suas tendências nos tempo futuros. Desse modo, é possível antever potenciais impactos ao meio ambiente, como por exemplo, através do crescimento urbano em direção às áreas de baixa aptidão à ocupação urbana sustentável, minimizando os consequentes prejuízos sociais e ambientais provenientes da ocupação inadequada.

Além disso, a replicabilidade e o baixo custo das metodologias utilizadas permitem que os municípios de médio porte, que possuem recursos mais limitados, possam tornar seu planejamento urbano mais eficiente (FELIX, 2017).

O presente trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos. O capítulo 1, aqui apresentado, traz a introdução, contextualização e justificativa do tema. O capítulo 2 apresenta os objetivos, geral e específicos, do trabalho desenvolvido. O capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica, sendo discutidos a expansão urbana e seus impactos, a sustentabilidade ambiental dentro do contexto urbano, a aplicação das geotecnologias no planejamento sustentável, os modelos de alteração do uso e ocupação do solo e a análise de decisão multicritério. O capítulo 4 traz a descrição da metodologia utilizada. O capítulo 5 apresenta os resultados e as discussões obtidos em cada etapa do trabalho, sendo que são apresentados e discutidos: os resultados das classificações do uso e da cobertura do solo para os diferentes anos de estudo; os resultados do crescimento histórico e projeção urbana; os resultados do mapeamento das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável; os resultados da aplicação conjunta dos métodos de projeção e mapeamento; e as propostas de melhoria na delimitação das zonas de expansão urbana e adensamento urbano do Plano Diretor da cidade de Itajubá. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Aplicar, de forma conjunta, a modelagem de projeção urbana e o mapeamento de áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável na cidade de Itajubá (MG), de modo a auxiliar o planejamento urbano e desenvolvimento sustentável do município.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento histórico e projeção de crescimento urbano para o ano de 2030 na cidade de Itajubá, através da aplicação do modelo de alteração de uso do solo, *Land Change Modeler*;
- Mapear as áreas de aptidão à ocupação urbana sustentável na cidade de Itajubá através da elaboração de modelo de análise de decisão multicritério para a priorização de áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável;
- Propor melhorias na delimitação das zonas de expansão urbana e zonas de adensamento disponibilizadas no Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo do Plano Diretor do município de Itajubá (Lei complementar 008 de 2003).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada neste trabalho é dividida em cinco momentos. Primeiramente, a problemática urbana é contextualizada, destacando a urbanização brasileira e aos problemas ambientais e sociais que são originados com ela. Em seguida, é discutido sobre a sustentabilidade urbana e os principais instrumentos utilizados para que essa sustentabilidade seja alcançada. No terceiro subcapítulo, discute-se acerca das geotecnologias, contextualizando as ferramentas do geoprocessamento e do sensoriamento remoto, utilizadas vitalmente ao longo deste trabalho. No quarto subcapítulo, discorre-se sobre a modelagem utilizada na simulação urbana, tratando-se dos modelos de alteração do uso e da cobertura do solo, dando enfoque, especialmente, ao tipo de modelo utilizado neste trabalho. Finalmente, no último subcapítulo, é contextualizada a análise de decisão multicritério atrelado aos sistemas de informação geográfica, de modo a mostrar sua operação e aplicação.

3.1. A Expansão das Cidades e seus Impactos

O crescimento populacional acelerado é um impasse que vem sendo debatido há tempos por autoridades mundiais sob diferentes perspectivas. Durante a década de 1960, como demonstrado por Ehrlich (1968), a expansão demográfica era temida em virtude de seu impacto sobre a produção alimentícia. Em virtude das tecnologias da época que não permitiam a produção rápida de alimentos, o autor explicita a necessidade em se controlar o crescimento populacional, a fim de que fossem evitadas situações de insegurança e crise na produção alimentícia. Atualmente, com o avanço tecnológico na agricultura, essa barreira na produção foi superada, havendo, hoje, uma produção de alimentos de forma bastante acelerada. Assim, nos dias atuais, a expansão não é mais vista como uma contribuinte exclusiva para a crise agrícola e sim como uma ameaça ao meio ambiente como um todo, em função dos impactos diversos que ela gera. O crescimento populacional, aliado ao crescimento econômico e aos novos padrões de consumo, ameaça e impacta de forma a degradar os solos, desmatar florestas, alterar o clima e, ainda, poluir ar e água, além dos impactos sociais que serão discutidos mais a frente (UNFPA, 2012; ONU, 2015a).

Em estudo prognóstico para a população mundial, a ONU (2015b) afirma que, embora as taxas de crescimento populacional venham diminuindo de forma intensa, o número absoluto de pessoas tende a aumentar, atingindo o valor de 9.7 bilhões de pessoas em 2050, estimulando, conseqüentemente, o crescimento das cidades. De acordo com o estudo, estima-

se que, atualmente, 54% da população mundial viva em áreas urbanas. O crescimento urbano, aliado às recentes diminuições em densidade populacional, indica a ocorrência do processo de urbanização, onde as pessoas cada vez mais buscam se alocar em centros urbanos (SONG et al., 2016).

No Brasil, o processo de urbanização foi intensificado a partir da segunda metade do século XX com o avanço da industrialização (REIS-FILHO, 2012). Como destaca Maricato (2003), no início do século XX, no Brasil, as áreas rurais passaram a representar um “Brasil arcaico” enquanto as cidades eram vistas como símbolo de avanço e modernidade. Além disso, o trabalho urbano, ao ser regulamentado, passou a ser visto como ponto atrativo para muitos trabalhadores, de modo que a migração do campo para a cidade se tornou acentuada a partir de 1950 (MARICATO, 2003). Desde então, a população urbana brasileira vem crescendo de forma acelerada, especialmente se comparada ao processo de urbanização em países europeus (REIS-FILHO, 2012). Enquanto que, no fim do século XIX, a população urbana limitava-se a 6% do total de habitantes, na atualidade, cerca de 85% da população brasileira é denominada como vivendo em áreas urbanizadas (IBGE, 2010; REIS-FILHO, 2012).

Como mostram Shen et al. (2012), a urbanização traz consigo pontos positivos como a diversidade, a eficiência de mercado, mais empregos, educação e melhorias na saúde. De acordo com os autores, muitas vezes são esses fatores que acabam atraindo cada vez mais as populações rurais para o meio urbano.

No entanto, atrelado aos avanços da urbanização no Brasil, a dinâmica excludente econômica e imobiliária passou a criar um processo desigual de ocupação territorial, resultando uma “periferização” de grande parte dos trabalhadores (SOUSA, 2012). Desde o final do século XIX, o mercado imobiliário exerceu um papel fundamental no processo de afastar do centro da cidade a massa trabalhadora oriunda do campo (MARICATO, 2003). As áreas menos atrativas ao mercado imobiliário, como à beira de córregos, encostas de morro, locais susceptíveis a enchentes, áreas de risco e áreas de preservação, passaram a ser ocupada por esses trabalhadores, dando origem a diversos problemas urbanos (MARICATO, 2003).

Mendonça, Cunha e Luís (2016) defendem, assim como discutido anteriormente, que as áreas de menor risco a desequilíbrios ambientais são invariavelmente mais valorizadas pelo mercado imobiliário. Essa valorização, como explicam os autores, tornam essas áreas mais caras, incentivando as populações mais pobres a se sujeitarem à ocupação de locais de maior vulnerabilidade e, conseqüentemente, mais baratos.

Um processo similar é apontado por Santoro (2014) ao relatar a flexibilização das leis urbanas ocorridas através da história brasileira. A autora explica que o forte interesse de agentes econômicos, imobiliário e políticos na realidade brasileira impactam diretamente nessa atitude de flexibilização legal. É mencionado no estudo que políticas de urbanização, como a Lei de Parcelamento do Solo (Lei Federal nº 6.766/79) e o Estatuto da Cidade (Lei Federal nº 10.257/01), quando esbarram nos interesses desses agentes, acabam sofrendo flexibilização, dando margens para a concretização de uma urbanização incompleta e desigual. Essa negligência ocorre de forma análoga ao processo de exclusão, discutido por Maricato (2003), onde, a fim de impedir a ocupação das populações mais pobres nas áreas centrais da cidade, a classe mais baixa é estimulada a morar em áreas mais afastadas (áreas rurais ao redor das cidades) ou áreas menos valorizadas (como em áreas de risco ou áreas protegidas). A autora aponta que a invasão urbana sobre as áreas rurais é um fator ruim, pois, dentre os impactos ambientais que causam, essa ocupação sustenta um ciclo vicioso, já que a urbanização tende a ocorrer em locais adjacentes às áreas já urbanizadas, ou seja, a ocupação sobre a área rural tende a ser cada vez maior.

Outro exemplo citado por Santoro (2014) são os programas de habitação governamental que, ao prever puramente a habitação, deixou de lado a infraestrutura necessária para acomodá-la. A autora aponta que o programa facilita a aquisição do local a ser habitado sem considerar se esse local possui ou não infraestrutura urbana. Santoro (2014) retrata, de forma semelhante à urbanização da área rural que, ao habitar um local sem infraestrutura, cedo ou tarde a administração da cidade acaba tendo que prover esses serviços urbanos a essas áreas. Desse modo, a autora mostra que as áreas urbanas vão se estendendo, e incentivando a expansão horizontal a sua volta. Santoro (2014) conclui que, decorrente dos interesses de agentes como o mercado imobiliário, o setor industrial e o governo, a expansão urbana horizontal é cada vez maior, impactando o ambiente e gerando desigualdades diversas no ambiente urbano. Segundo Maricato (2003), a lista de impactos negativos gerados na urbanização insustentável é ampla e envolve impactos ambientais e impactos sociais sobre a população.

Segundo Maricato (2000), a dinâmica de ocupação horizontal tampouco incentiva a ocupação dos vazios urbanos, que são locais já servidos com infraestrutura, que se valorizam em função de seus arredores urbanos e ao mesmo tempo permanecem inutilizados ou subutilizados. De acordo com a autora, a não ocupação desses vazios estimula a população à ocupação horizontal, penalizando tanto os cidadãos excluídos quanto todos os contribuintes

que têm de arcar com os gastos públicos oriundos das novas infraestruturas necessárias nessas novas áreas ocupadas.

De acordo com Farias (2011), o crescimento horizontal nas cidades ocorre em função da influência imobiliária sobre a dinâmica urbana nas cidades. De acordo com o autor, a área urbana passa a ser vista como mercadoria que está em constante valorização e monopolização, sem levar em consideração que a terra é um bem necessário à sobrevivência. Dessa forma, pode-se dizer que a alta valorização central (embasada na infraestrutura urbana, nas áreas de lazer e nos serviços urbanos, comumente encontrados próximos ao centro) acaba por excluir as populações que não têm condições de aquisição dessa área, incentivando-as à ocupação horizontal nas áreas periféricas urbanas.

A desigualdade social é notoriamente constatada no estudo realizado por Souza (2014). Ao analisar o processo de urbanização na cidade de Marabá (PA), o autor pôde mostrar a evolução e os principais motivos da expansão e como foram formados os núcleos urbanos dispersos dentro da cidade. O autor constatou, do mesmo modo que Santoro (2014), a pouca seriedade no que diz respeito à aplicação das políticas de uso e cobertura do solo. Souza (2014) mostra como a indústria, o mercado imobiliário e a pouca ação governamental agiram durante a formação de Marabá. O autor explicita que esses três agentes agem de forma a contornar as políticas urbanas de modo a acabar incentivando a expansão insustentável, que gera núcleos de ocupação dispersos pela cidade. Esse processo de expansão horizontal, como constata o autor, tem relação íntima com a desvalorização da cidade como habitat humano, em que a cidade passa a ser vista como uma mercadoria, sem considerar a qualidade de vida de sua população. Além disso, o autor comenta que, entre os núcleos dispersos formados, a ocupação irregular acaba sendo estimulada, aumentando as desigualdades sociais, e incentivando o mercado informal necessário à subsistência dessas populações excluídas.

Sánchez (2001) conclui seu estudo mostrando que cenários como os descritos anteriormente, vão totalmente contra as iniciativas de planejamento urbano, e acabam por favorecer os processos de exclusão social, exclusão das minorias e o crescimento horizontal das cidades, principalmente em função da ocupação pelas periferias. Maricato (2003) evidencia o problema quando avalia que, a partir da década de 80, o processo de crescimento das periferias no país passou a ser maior do que o próprio processo de crescimento urbano dentro das grandes metrópoles.

Mendonça, Cunha e Luís (2016) explicam que todo esse processo de urbanização horizontal e não planejada impacta o ambiente das mais diferentes formas. Os autores

mencionam que locais de risco ou áreas protegidas, ao se tornarem alvo de ocupação urbana, tornam-se cada vez mais sensíveis, tendo suas vulnerabilidades e riscos de desastres potencializadas. Em função do crescimento horizontal urbano, os autores citam problemas de poluição do ar, alteração e mau uso do solo (aumentando sua susceptibilidade à erosão, deslizamentos e contaminações), problemas de poluição e abastecimento de água, saneamento falho, geração excessiva de resíduos sólidos, formação de ilhas de calor, entre tantos outros problemas gerados pela urbanização intensa. Além desses problemas, destaca-se também que a expansão horizontal tem potencial impacto sobre as áreas agriculturáveis (TEWOLDE; CABRAL, 2011).

Com o intuito de se sanar ou, pelo menos, minimizar os impactos ambientais produzidos na urbanização, faz-se necessária a aplicação dos conceitos de sustentabilidade urbana no desenvolvimento das cidades (SHEN et al., 2012).

3.2. A Sustentabilidade Urbana

De acordo com Felix (2017), o termo sustentabilidade ainda é muito discutido, de modo que ainda não há um consenso sobre a definição do termo. No entanto, ainda de acordo com a autora, seja qual for o enfoque destinado ao termo “sustentabilidade”, o termo “equilíbrio” sempre estará atrelado ao seu significado.

Shen et al. (2012) definem a sustentabilidade urbana como um cenário onde os recursos naturais são utilizados de forma eficiente e a qualidade de vida é mantida dentro dos limites possíveis de exploração do meio ambiente. Os autores apontam que todos os impactos, sociais e ambientais, gerados na urbanização sem planejamento, representam uma barreira vital para a concretização do desenvolvimento sustentável na esfera urbana. Os autores abordam que vários fatores são utilizados para promover a sustentabilidade urbana.

Pivo (1996), ao estudar a região de *Mainstreet Cascadia*, que abrange estados do oeste do Canadá (Alberta, British Columbia e Yukon) e Estados Unidos (Washington, Oregon, Idaho e Montana), destaca seis princípios essenciais que servem de modelo para outras cidades, a fim de que haja a promoção da sustentabilidade urbana, sendo eles:

a) Cidades densas, onde aponta que uma cidade compacta é capaz de ser mais independente, provendo infraestruturas urbanas à menor custo e maior diversidade de serviços. Esse adensamento incentiva a não utilização de carros, já que os serviços ficam mais próximos, e oferece menor pressão à invasão de áreas rurais e de proteção quando comparada ao crescimento horizontal das cidades;

b) Cidades completas, onde o autor mostra que as cidades balanceadas em oferta de emprego, moradia, entretenimento etc., oferecem maior oportunidade aos seus habitantes de estarem mais próximos de seus trabalhos e afazeres, dependendo menos dos meios de transporte emissores de poluentes;

c) Cidades com áreas de conservação, onde mostra que áreas de interesse ambiental, cultural, ou sensíveis devem ser preservadas e respeitadas, a fim de se manter tanto as funções ecológicas do meio ambiente, quanto se evitar situações de perigo ou vetorização de doenças (devido à ocupação em áreas sensíveis a deslizamento ou alagamento, por exemplo);

d) Cidades confortáveis, onde o autor aborda a necessidade de espaços públicos e acessíveis a pedestres, uma vez que, além de inibir a utilização de automóveis, proporciona a oportunidade de compartilhar espaços com outros cidadãos;

e) Cidades coordenadas, onde o autor enfoca a necessidade da sinergia entre as pessoas no desenvolvimento da comunidade, ressaltando a importância de que vizinhanças operem juntas para resolver problemas da cidade;

f) Cidades colaborativas, onde o autor aborda a importância da participação popular nas tomadas de decisão da cidade, promovendo a interação popular como meio de atingir o desenvolvimento sustentável das cidades.

Alguns destes princípios de sustentabilidade ambiental urbana são implantados no Brasil através da legislação. No país, visa-se essa sustentabilidade através das leis de controle da expansão urbana, que é regida pela Lei Federal 10.257/2001, conhecida como o Estatuto da cidade, e a Lei Federal 6.766/1979, que trata do Parcelamento do Solo Urbano. Além disso, os municípios possuem sua legislação individual acerca da expansão, destacando-se o Plano Diretor Municipal, instrumento de grande importância para realizar a sustentabilidade urbana no Brasil.

O Plano Diretor, instaurado através dos artigos 182 e 183 da Constituição Federal, e regulamentado através do Estatuto da Cidade (Lei Federal 10.257/2001) é uma ferramenta fundamental para o planejamento municipal, sendo um instrumento obrigatório para cidades com mais de 20.000 habitantes. O Plano Diretor é também obrigatório para cidades que se localizam sobre áreas metropolitanas ou de aglomerações urbanas, ou municípios que possuam interesse turístico ou que abriguem empreendimentos ou atividades que possam

causar significativo impacto ambiental a nível regional ou nacional (BRASIL, 2001; FELIX, 2017).

Lacerda et al. (2005) apontam que o Plano Diretor possui tanto natureza estratégica quanto natureza normativa. Natureza estratégica, pois as propostas são elaboradas pela própria cidade, com embasamento no conhecimento que esta possui sobre si e no objetivo futuro que deseja atingir e, também, porque suas propostas devem atender a prazos estipulados no Plano. A natureza normativa refere-se ao fato de que o Plano tem poder de lei dentro do município. Os autores enfocam que, independente da natureza, o Plano Diretor deve atender imprescindivelmente aos princípios constitucionais de que sejam cumpridas: a função social da cidade, a função social da propriedade urbana, a gestão democrática e, a sustentabilidade ambiental. O princípio da sustentabilidade ambiental embasa-se no dever que a cidade possui de equilibrar o desenvolvimento urbano e a preservação ambiental, com o objetivo de que o ambiente e as vidas humanas não sofram com os impactos negativos gerados no desequilíbrio (LACERDA et al., 2005). Os autores explicam que, para que esses princípios sejam atendidos, o município deve utilizar instrumentos e ações com base na participação popular durante a produção do Plano.

Para cumprir com seu objetivo de prover funcionalidade social à cidade e à propriedade de forma sustentável, o Plano Diretor utiliza-se do instrumento auxiliar de zoneamento que, embora não vinculado diretamente ao Plano Diretor, torna-se essencial para sua concretização (MONTAÑO, 2005). O Zoneamento Ambiental, criado com a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei Federal 6.938/1981, regulamentado com o Decreto 4.297/2002), permite que o município seja dividido em áreas de interesse específico baseando-se na capacidade de suporte e aptidão dessas áreas (BRAGA, 2001; MONTAÑO, 2005). O zoneamento é realizado em dois momentos: o macrozoneamento que delimita o município em zona urbana e zona rural, e o zoneamento propriamente dito, que subdivide cada macrozona em áreas de interesse específico (BRAGA, 2001).

De acordo com Braga (2001), o zoneamento é particularmente importante à sustentabilidade da urbanização, pois permite que seja realizada a combinação dos critérios ambientais necessários à alocação de cada tipo de uso do solo dentro do município. Além disso, o autor destaca a importância do zoneamento em separar a alocação dos tipos de uso do solo ambientalmente incompatíveis sobre uma mesma área, além de apontar a importância do zoneamento na definição de zonas especiais de proteção ambiental.

3.3. As Geotecnologias Aplicadas na Gestão Urbana

As geotecnologias podem ser definidas como os recursos que permitem a interação de informações espaciais de diferentes campos do conhecimento, de modo a integrar as técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e as aplicações do SIG (OLIVEIRA; SANTOS; PEREHOUSKEI, 2016). Ela vem sendo empregada de forma consistente na avaliação de mudanças no uso e cobertura do solo há muitos anos. No entanto, as recentes melhorias nas geotecnologias (como a disponibilização gratuita de SIG e de imagens de qualidade) têm aumentado seu potencial de aplicação em estudos de planejamento, monitoramento urbano, de dinâmica de uso e cobertura do solo e da urbanização (TEWOLDE; CABRAL, 2011).

De acordo com Felix (2017) os municípios brasileiros, principalmente os de médio porte que possuem recursos mais limitados, carecem de estudos e metodologias que possam melhorar seu planejamento urbano, tornando-o mais acessível e prático. Portanto, a aplicação de metodologias baseadas nos estudos geotecnológicos permite que essa necessidade seja suprida ao possibilitar a replicabilidade e baixo custo (MONTAÑO, 2005; BENZA et al., 2016).

Uma das geotecnologias que ganha destaque em utilização é o geoprocessamento. O geoprocessamento é definido, de acordo com Câmara e Davis (2001), como sendo uma “disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica”. De acordo com os autores, essa disciplina pode abranger a abordagem de áreas distintas que buscam estudar informações baseadas em sua localidade.

Dentro da disciplina Geoprocessamento, existe uma técnica computacional denotada de Sistema de Informações Geográficas (SIG). O SIG permite que sejam realizadas análises de dados georreferenciados diversos em um ambiente virtual (CÂMARA; DAVIS, 2001).

Dentro da literatura, o SIG é definido de diferentes formas. Liu (2006) define o SIG como sendo um software habilitado a modelar informações matemáticas georreferenciadas contidas em um banco de dados único, aliado a diferentes planos de informações. Lillesand, Kiefer e Chipman (2007) o definem como um sistema computacional apto a cruzar informações e características diversas de uma forma georreferenciada, podendo, portanto, facilitar o mapeamento e a apresentação cartográfica de dados distintos sobre um local de interesse.

Uma esquematização das diversas aplicações do SIG, com base nas definições de Longley et al. (2005), Liu (2006), Lillesand, Kiefer e Chipman (2007) e Fitz (2010), pode ser vista na Figura 1.



Figura 1: Aplicações do Sistema de Informações Geográficas.

Essa dinâmica provida pelo SIG o torna uma ótima ferramenta para fornecer documentos cartográficos atualizados referentes a mapeamentos e zoneamentos urbanos, monitoramentos de áreas de risco, redes de eletricidade, de água, de esgoto, de transporte, entre outros atributos necessários para o planejamento urbano (FITZ, 2010). Destaca-se ainda, a aplicação de dados cadastrais dentro do SIG, como dados censitários, socioeconômicos, de saúde e turismo, que podem ser incorporados ao mapeamento, ampliando ainda mais a aplicabilidade do sistema (CÂMARA; DAVIS, 2001). A capacidade de relacionar dados de campos distintos que, fora de um ambiente virtual seria um processo complicado e demorado, torna o SIG um sistema de destaque e excelente para o processamento de dados (LONGLEY et al., 2005).

Outra aplicação das geotecnologias é realizada por meio das técnicas de Sensoriamento Remoto. Campbell e Wynne (2011) definem o sensoriamento remoto como sendo a técnica de obtenção de dados e descrição de informações da superfície terrestre ou aquática, através de

um sensor aéreo ou espacial que é capaz de captar a radiação eletromagnética (REM) refletida ou emitida por um alvo na superfície, transformando-a em uma imagem ou matriz.

As imagens disponibilizadas através do sensoriamento remoto são encontradas em diferentes resoluções espaciais, espectrais, temporais e radiométricas, e permitem que sejam elaborados, sobre elas, uma gama de estudos que envolvem áreas da meteorologia, da agricultura, do uso do solo, de estudos urbanos, de estudos ambientais, entre outros (FLORENZANO, 2007).

O sensoriamento remoto aplicado através da utilização de satélites vem sendo amplamente utilizado nos estudos ambientais, em função de possuir uma metodologia objetiva, automatizada e de fácil replicabilidade (BENZA et al., 2016). Benza et al. (2016) destaca ainda sua grande aplicação em estudos relativos a mudanças no uso e na cobertura do solo, tão necessários para análises históricas e auxílio na tomada de decisão.

Destaca-se a utilização de imagens do satélite Landsat para a aplicação de estudos referentes à análise da cobertura e uso do solo. Coulter et al. (2016) e Mohadam e Helbich (2013) definem algumas das vantagens obtidas em se utilizar imagens do satélite, sendo estas:

a) As imagens são disponibilizadas de forma gratuita através da plataforma *EarthExplorer* do USGS (*United States Geological Survey*);

b) As imagens possuem alta resolução temporal, ou seja, a aquisição de dados ocorre com intervalo temporal de 16 dias, permitindo assim que imagens de qualidade, sem a presença de nuvens, possam ser obtidas;

c) Uma vez que o primeiro satélite Landsat foi lançado em 1972 (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009), o imageamento por este satélite permite a realização de estudos que cobrem um grande período temporal;

d) As imagens possuem, também, uma resolução espacial de 30 metros, considerada uma resolução média, mas que pode apresentar bons resultados para estudos de escala urbana.

3.4. A Modelagem de Alteração do Uso e da Cobertura do Solo

A modelagem da projeção da expansão urbana é realizada a partir de modelos que simulam a alteração do uso e da cobertura do solo (SECUMA, 2012). De acordo com Montañó (2005) e Secuma (2012), esses modelos, denominados em inglês como *Land Use and Cover Change (LUCC) Models*, vêm sendo amplamente difundidos como ferramenta de

planejamento urbano, uma vez que permitem fazer a interação de diferentes componentes do espaço que regem a dinâmica urbana.

Com o intuito de se estabelecer uma urbanização ambientalmente sustentável, faz-se necessário o equacionamento do desenvolvimento econômico, ambiental e social, e a manutenção da qualidade de vida (MONTAÑO, 2005). De acordo com Montaña (2005), tal equação envolve critérios diversos que interagem de uma forma complexa. Segundo o autor, a utilização de ferramentas como os modelos de alteração do uso e da cobertura do solo é vital para realizar essa interação e gerar resultados confiáveis no processo de tomada de decisão no âmbito de se estabelecer uma urbanização ambientalmente sustentável.

De acordo com Moghadam e Helbich (2013), a modelagem da simulação das alterações do uso e da cobertura do solo pode beneficiar o planejamento urbano na tomada de decisão de duas principais formas. Primeiramente, segundo os autores, os modelos de simulação contribuem na avaliação da eficiência de políticas já existentes, uma vez que permitem a análise de cenários passados. Em segundo, os autores apontam a contribuição dos modelos de simulação na inferência de novas políticas, de forma preventiva, já que eles possibilitam a simulação do uso e cobertura em cenários futuros. Exemplificando esta segunda contribuição dos modelos, caso seja constatada uma tendência de crescimento urbano em direção a uma área de preservação, ou área de risco, é possível que sejam tomadas medidas preventivas para evitar esse avanço.

Além desses dois benefícios, Secuma (2012) ressalta ainda a importância dos modelos de simulação em analisar os diversos fatores que levam à alteração do uso e da cobertura do solo (os chamados *driving factors*), já que alguns modelos permitem a identificação, não só de fatores espaciais, como declividades ou proximidade de áreas já construídas, ou rodovias, como também fatores econômicos e sociais, como por exemplo, a valorização de determinadas áreas, o poder de compra dos cidadãos, a distribuição da população, entre outros.

Atualmente, diversos tipos de modelos de simulação do uso e cobertura do solo são disponibilizados para o estudo de cenários futuros em ambiente SIG (ASPINALL, 2004; SECUMA, 2012; MOHADAM; HELBICH, 2013; SALES et al., 2016). Dentre os modelos utilizados, Secuma (2012) destaca os modelos “Geomod”, “*Slope, Land Use, Exclusion, Urban Extent, Transportation and Hillshade*” (SLEUTH), e *Land Changer Modeler* (LCM) como sendo os mais utilizados na modelagem urbana. Além destes, Tewolde e Cabral (2011) destacam os modelos operados através do SIG IDRISI, que também possuem ampla utilização

na modelagem urbana, sendo estes o LCM, o Markov Chain, o CA_Markov, o GEOMOD e o STCHOICE (EASTMAN, 2012).

Os inúmeros modelos permitem uma aplicação diversificada dentro de várias áreas do conhecimento, possibilitando uma simulação baseada, por exemplo, na sustentabilidade ambiental, nos interesses imobiliários, nos estímulos financeiros e sociais e, também, com a associação de todos esses fatores quando são utilizados modelos mais complexos (SECUMA, 2012).

De acordo com Aspinall (2004), modelos de diferentes embasamentos são utilizados para a modelagem da simulação do uso e da cobertura do solo. O autor destaca os seguintes meios de modelagem:

a) Modelos Estocásticos, que são baseados em matrizes de transição, tal qual a Cadeia de Markov;

b) Modelos de Otimização, incluindo modelos de base social e econômica direcionados à simulação de oferta e demanda e às análises de entrada e saída;

c) Modelos Dinâmicos, que podem ser tanto os modelos baseados em processos, como o modelo autômato celular, quanto os modelos baseados em agentes que agregam os modelos estocásticos e os baseados em processos;

d) Modelos Empíricos, que vem sendo mais amplamente utilizados na modelagem de modificação do uso e da cobertura do solo e são modelos baseados na análise histórica das mudanças do solo.

Os modelos empíricos, como descritos por Aspinall (2004), promovem um mecanismo exploratório durante a análise, por isso, são eficientes em identificar os fatores que levam à ocorrência das mudanças no solo. Segundo Montañó (2005), os modelos empíricos supõem que as interações constatadas nos tempos passados vão se manter da mesma forma no futuro.

Dentre os modelos empíricos, o *Land Change Modeler* (LCM), desenvolvido por Eastman no ano de 2006, traz a possibilidade de se trabalhar com modelagens diversas, destacando-se na sua utilização para análise de mudanças no uso e na cobertura do solo, simulação futura destas mudanças (tanto florestal quanto urbana) e, também, através de sua ferramenta de mitigação climática, chamada de Redução de Emissões de Desmatamento e Degradação de Florestas (REDD) (EASTMAN; TOLEDANO, 2017).

Diversos trabalhos vêm sendo realizados com a aplicação do LCM.

Com o objetivo de melhorar a conservação biológica, Khoi e Murayama (2011) utilizam o LCM para modelar os padrões de desmatamento no Parque Nacional TamDao, no Vietnã, que sofre com a exploração madeireira ilegal. Dessa forma, os autores propõem um modelo de simulação de áreas suscetíveis ao desmatamento que serve como ferramenta de auxílio para a gestão do parque.

Buscando analisar os benefícios oriundos da conservação de florestas de pântanos turfosos ricos em carbono na Indonésia, Fuller, Hardiono e Meijaard (2011) utilizam o LCM, junto a sua ferramenta REDD, para projetar o desmatamento neste tipo de florestas para o ano de 2020, bem como para avaliar as emissões de carbono oriundas desse tipo de desmatamento.

Uddinet al. (2015), ao utilizarem o LCM para estudar os impactos do desmatamento sobre a região do Monte Kailash, no Nepal, observaram que, tanto as mudanças no uso e cobertura do solo, quanto a fragmentação de florestas, tem impactado na degradação, na biodiversidade, nos ecossistemas e na qualidade de vida da população regional. A partir do uso do LCM, os autores puderam também realizar a sugestão de alguns pontos de melhoria para a gestão da área de estudo.

Dentro desse contexto, destaca-se o trabalho realizado por Secuma (2012), onde, através da utilização do LCM, o autor realiza a modelagem e a simulação do crescimento urbano da província de Luanda. Baseando-se nas imagens Landsat classificadas dos anos de 1993, 2000 e 2008, o autor projeta a ocupação urbana para o ano de 2040, de modo a poder prever as áreas com maiores concentrações de crescimento. O autor menciona que os resultados obtidos são vitais para a melhoria do planejamento urbano na cidade, uma vez que o estudo permite realizar medidas preventivas nas políticas de crescimento.

No intuito de se melhorar o planejamento urbano com a utilização do LCM, destaca-se também o trabalho de Tewolde e Cabral (2011). Os autores afirmam que os modelos de projeção são essenciais para analisar os padrões e dinâmicas urbanas em períodos passados e para fazer inferências sobre os cenários futuros, permitindo uma atuação preventiva no planejamento urbano. Ao analisar o crescimento urbano e simular a expansão futura sobre uma cidade africana com o LCM, os autores constatarem a influência de três principais agentes na urbanização insustentável: o forte crescimento populacional; a deficiência nas políticas de planejamento urbano; e a limitação técnica-operacional dos operadores de modelos de simulação de alterações do uso e da cobertura do solo. Tewolde e Cabral (2011) concluem que o crescimento da cidade tende a atingir áreas de agricultura e com potenciais

agriculturáveis, de modo a impactar na produção alimentícia na cidade. Vale considerar, dessa forma, que a realidade retratada pelos autores assemelha-se, em grande parte, à realidade urbana constatada na literatura brasileira. De acordo com os autores, a maior utilização dos modelos e a melhor capacitação de gestores públicos na utilização desta tecnologia permitiria a realização de uma urbanização mais controlada e sustentável.

3.4.1. A operação do modelo *Land Change Modeler* (LCM)

O LCM disponibiliza a operação de três métodos empíricos distintos para o mapeamento de mudanças (EASTMAN; TOLEDANO, 2017). Segundo Eastman e Toledano (2017), é possível trabalhar através da Regressão Logística, através do *SimWeight*, e através do método de inteligência artificial, utilizando a Rede Neural Artificial do tipo Perceptron Multicamada (MLP). No entanto, como enfatizam os autores, a Regressão Logística possui um enfoque mais didático e o método *SimWeight* ainda é uma técnica experimental de *Machine Learning*. Desse modo, os autores aconselham que seja feita a utilização do MLP para o mapeamento de mudanças futuras, que é também a técnica *default* do modelo, e a técnica que será aplicada para a simulação neste trabalho.

O LCM opera em três etapas gerais de análise. A esquematização dessas etapas encontra-se na Figura 2.

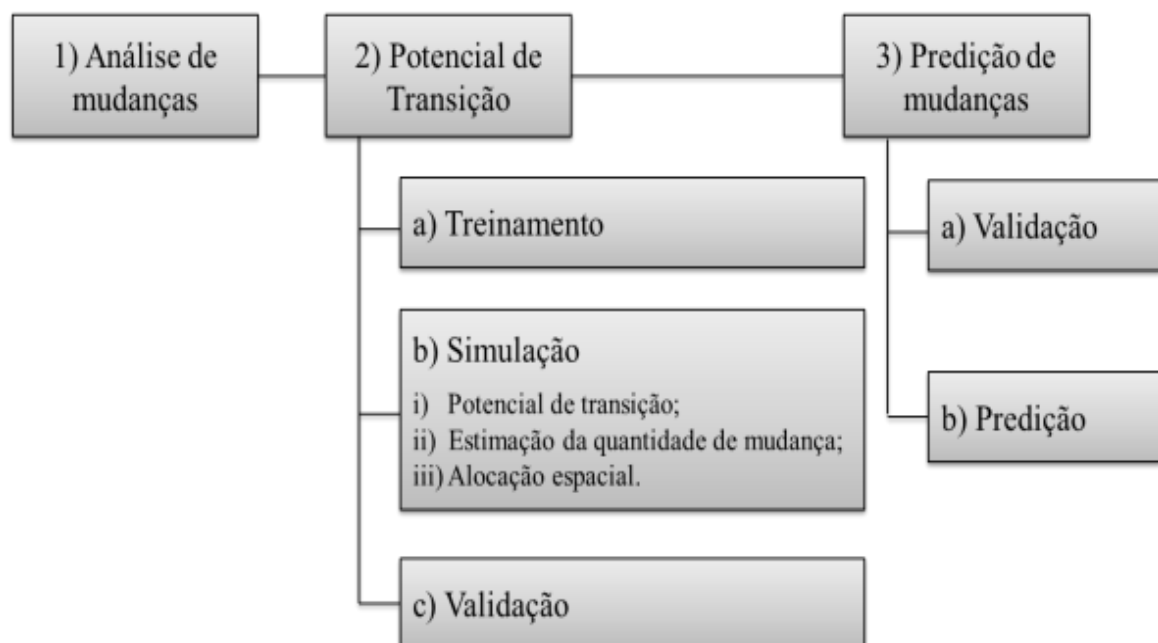


Figura 2: A operação do Land Change Modeler.

Primeiramente, de acordo com Secuma (2012), o modelo realiza a Análise de Mudanças (1). Nessa análise, são inseridas as imagens classificadas referentes aos tempos passados do local de estudo. Segundo o autor, nessa etapa, o LCM compara as imagens classificadas, provendo uma análise da quantidade de ganhos e perdas que ocorreram sobre as classificações registradas nos dois momentos.

A etapa de Potencial de Transições (2), por sua vez, como ressaltam Eastman e Toledano (2017), é dividida em três momentos: a fase de treinamento (a), a fase de simulação (b) e a fase de validação (c).

A fase de Treinamento “a”, realizada através do MLP, examina cada mudança constatada entre as duas imagens classificadas, de modo a analisar um número de pixels aleatórios que passaram pela transição de uma classe para outra, classificando esses pixels como “pixel de mudança” e, de modo a analisar os pixels que eram elegíveis a passar pela transição, mas não passaram, classificando esses pixels como “pixels de persistência” (EASTMAN; TOLEDANO, 2017).

A fase de Simulação “b” é subdividida em: i) Potenciais de Transição, ii) Estimação da Quantidade de Mudanças e iii) Alocação Espacial dessas mudanças. Na etapa “b”, além das imagens classificadas, já inseridas no modelo, são inseridos também os mapas de transição, conhecidos também como *driving factors* que são os fatores que mais influenciam na mudança do uso e cobertura do solo. Segundo Eastman e Toledano (2017), a etapa “i”, de potencial de transições, trata-se de um mapeamento contínuo de 0 a 1, que expressa o potencial de um pixel passar da transição de uma classe para outra. Ainda de acordo com os autores, a etapa “ii”, de Estimação da Quantidade de Mudanças, opera através da análise de Cadeias de Markov, que indicam a quantidade de mudança que pode ocorrer entre as classes em transição. A cadeia de Markov trata-se de uma matriz (Classes x Classes), que retrata a tendência de uma classificação se tornar outra dentro do período de estudo, em que, na diagonal da matriz, se expressa a persistência desta classe não se modificar (OLMEDO et al., 2015). Na etapa “iii”, de Alocação de Mudanças, o LCM utiliza os processos “i” e “ii” para alocar as mudanças de acordo com a probabilidade que o pixel tem de sofrer a alteração, ou seja, passarão por transições os pixels que tiverem mais probabilidade de transicionar (EASTMAN; TOLEDANO, 2017).

Na etapa “c” de validação do modelo, o MLP utiliza os pixels coletados na etapa de treinamento “a”. Destes pixels coletados, metade é utilizada para treinar o modelo, e a outra metade é utilizada para validar a qualidade do modelo (EASTMAN; TOLEDANO, 2017).

Durante esta etapa, o MLP cria uma função multivariada que regerá a transição de mudanças no modelo (EASTMAN, 2012).

Na etapa final (3), de Predição de Mudanças, o LCM realiza duas etapas. A etapa “a” de Validação e a etapa “b” de Predição.

Na etapa de Validação “a”, o LCM valida o modelo como um todo, através da comparação de duas imagens. Por exemplo, supondo que o treinamento foi realizado a partir de uma imagem no tempo “ t_0 ” e uma imagem no tempo “ t_1 ”, resultando na simulação do tempo “ t_2 ”. Na etapa de Validação da Predição de Mudanças, será necessário que o operador insira no LCM a classificação real da imagem referente ao tempo “ t_2 ”, de modo que o LCM valide se a modelagem está apta ou não para realizar a predição.

Finalmente, com o treinamento e predição validados, o LCM pode realizar a Predição “b” para um tempo futuro desejado.

3.5. Análise de Decisão Multicritério

Malczewski e Rinner (2015) explicam que o SIG, de forma independente, se mostra uma boa ferramenta de planejamento e apoio à tomada de decisão. Essa afirmação, como apontam os autores, é embasada no fato de que a plataforma SIG consegue analisar e sobrepor critérios de diferentes setores de atividade dentro de uma região georreferenciada, indicando áreas apropriadas ou de interesse para determinados fins. No entanto, de acordo com os autores, quando esses critérios possuem ponderação, ou seja, quando a escolha de um critério favorece ou desfavorece a escolha de outro critério, o SIG, por si só, é incapaz de promover a análise necessária para a escolha de um local de interesse. Nesse momento, ainda de acordo com os autores, a integração dos conceitos da Análise de Decisão Multicritério (MCDA) ao SIG permite que a incapacidade de ponderação seja superada, permitindo que a tomada de decisão seja perfeitamente realizada, de modo a comparar e ponderar apropriadamente os critérios necessários na tomada de decisão. O sistema GIS-MCDA pode, portanto, ser uma ferramenta valiosa no processo de planejamento, permitindo aos gestores públicos e governantes avaliar e priorizar decisões e alternativas na resolução de problemas organizacionais (JELOKHANI-NIARAKI; MALCZEWSKI, 2015).

Segundo Malczewski e Rinner (2015), o sistema GIS-MCDA baseia-se em três elementos fundamentais, sendo eles: a) os tomadores de decisão, que podem ser definidos como grupos, organizações ou partes individuais que possuem o interesse de realizar a seleção ou determinar a aptidão de um lugar no espaço, tendo sua escolha baseada em determinados

critérios; b) as alternativas, que são geradas no sistema em função dos objetivos e critérios avaliados, e são definidas como as opções a serem escolhidas; e c) os critérios, que são selecionados em função do objetivo da análise, e são ponderados e combinados entre si de modo a gerar uma alternativa para a solução do problema.

Segundo Malczewski e Rinner (2015), o critério é um termo geral que inclui as definições dos objetivos (geral e específico do problema de decisão) e dos atributos (fatores e restrições que serão pesados para atingir o objetivo) a serem ponderados e comparados para que seja realizada a análise MCDA. Ainda, de acordo com os autores, os critérios para atender aos padrões da análise multicritério, devem ser suficientemente abrangentes, cobrindo todas as variações que o problema possa depender. Os critérios devem ser operacionais e possuir a habilidade de se decompor em menores critérios, a fim de se simplificar a análise. Além disso, os autores aconselham trabalhar sempre com o menor número de critérios possível para que não haja redundância na análise.

Por ser um sistema de tamanha qualidade na tomada de decisão, o GIS-MCDA vem sendo amplamente utilizado na seleção de áreas de interesse específico. Zambonet al. (2005) utilizaram o sistema para selecionar áreas aptas à alocação de usinas termelétricas no estado de São Paulo, baseando-se nos critérios tecnologia, transporte, linhas de transmissão, poluição, água e reservas naturais. Jelokhani-Niaraki e Malczewski (2015) aplicam o sistema na cidade de Teerã (Irã) para selecionar áreas aptas à alocação de estacionamentos, a partir dos critérios de distância de rodovias, distância de locais recreativos, distância de centros administrativos, preço de terrenos urbanos, população e tamanho das áreas. Meng e Malczewski (2015) utilizam o GIS-MCDA para avaliar a acessibilidade à parques públicos no município de Calgary (Canadá) através dos critérios de número de parques e distâncias dos parques e comunidades.

A utilização do sistema para a seleção de áreas adequadas a receber estruturas urbanas, como se realiza neste trabalho, vem sendo aplicada em diversos estudos. Montañó (2005) utiliza o GIS-MCDA para analisar a capacidade do solo em receber cobertura urbana no município de São Carlos (SP). Para tal, Montañó utiliza como critérios a capacidade suporte do solo, a vulnerabilidade do solo às contaminações subterrâneas, e as formações geológicas do município. Campesan et al. (2017), de forma análoga, também utilizaram o sistema para determinação de áreas adequadas a alocação de cobertura urbana na cidade de Santa Lúcia (SP), tendo seu estudo baseado nos atributos declividade, distância de corpos hídricos, renda per capita, densidade demográfica, vertente de crescimento, distância da área urbana e uso e

cobertura da terra. Castro et al. (2015) aplicam o GIS-MCDA para a seleção de áreas aptas a receber a instalação de uma universidade na cidade de Patos de Minas (MG), através da utilização dos critérios de área, declividade, perímetro urbano e zoneamento ambiental. Myagmartseren, Buyandelger, e Brandt (2017) utilizam o sistema para selecionar áreas aptas a sediar novos desenvolvimentos de forma sustentável e, para isso, baseiam-se nos critérios declividade, distâncias de áreas urbanas, tipo de solo, distância de rodovias, distância de rios, cobertura de vegetação e aspecto.

Como apontam Malczewski e Rinner (2015), a vertente da análise MCDA que busca realizar a seleção de locais de interesse, trabalha através de uma sequência de processos na análise multicriterial. Os autores definem a necessidade de se determinar o método MCDA, os métodos de ponderação, e os métodos de combinação dos critérios a serem avaliados.

3.5.1. Método de análise e ponderação hierárquica

O Processo Analítico Hierárquico, conhecido no inglês como *Analytic Hierarchy Process* (AHP), foi desenvolvido por Saaty no final da década de 1970 (LIMA, 2007). O método de análise AHP, permite relacionar os objetivos e critérios de uma forma hierárquica, como exemplificado na Figura 3, onde no nível superior encontra-se o objetivo principal do problema decisório, seguido dos objetivos específicos que são avaliados em função dos atributos e geram as alternativas finais do problema (SAATY, 1987).

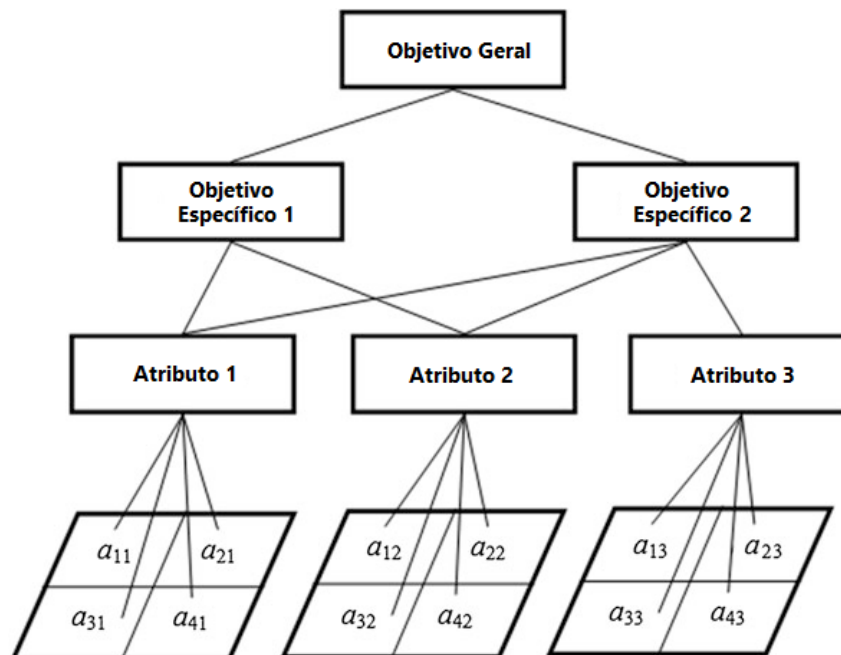


Figura 3: Estrutura hierárquica de um problema de decisão. a_{ik} é o valor do k -ésimo atributo (critério) associado com a i -ésima alternativa ($k = 1, 2, 3$, e $i = 1, 2, 3, 4$). Adaptado de Malczewski e Rinner (2015).

Para realizar a ponderação dos critérios e objetivos através do método AHP, Saaty (1987) sugere a realização da matriz de comparação par a par, através da participação de especialistas e tomadores de decisão, onde são definidos os graus de importância para cada critério. O autor aponta que a comparação par a par possibilita que especialistas utilizem suas experiências e conhecimentos no assunto do problema de decisão e atribuam pesos aos critérios em análise. Além disso, Lima (2007) menciona que a comparação par a par permite que a definição dos pesos, que pode ser muitas vezes complexa perante a quantidade de critérios, seja aproximada a um método de comparação mais intuitivo do ser humano, já que restringe a comparação a ser realizada em pares, de dois em dois elementos.

Para realizar a atribuição de pesos através da comparação par a par no método AHP, Saaty (1990) propõe a utilização de uma matriz $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ (onde $n \times n$ equivale a critério \times critério). Essa matriz é recíproca, ou seja, cada valor de importância (a_{ij}), atribuído à comparação dos critérios, equivale a $a_{ij} = a_{ji}^{-1}$, quando $i \neq j$, sendo que a diagonal da matriz, quando $i = j$ (comparação de um critério com ele mesmo), é $a_{ij} = 1$. Como a matriz é recíproca, apenas a parte superior ou inferior da matriz precisa ser avaliada. Por exemplo, supondo o critério sobre a linha $i = 1$, tenha uma importância de valor 3 em relação ao critério sobre a coluna $j = 2$, então $a_{12} = 3$ e $a_{21} = 1/3$.

Para realizar a atribuição de importância, Saaty (1990) indica a utilização da Tabela 1. Essa atribuição de importância é realizada através dos tomadores de decisão e especialistas na área do problema decisório.

Tabela 1: Escala de comparação dos critérios. Adaptado de Lima (2007).

| 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|------------------------------|
| Extremamente menos importante | Bastante menos importante | Muito menos importante | Pouco menos importante | Igual importância | Pouco mais importante | Muito importante | Bastante mais importante | Extremamente mais importante |

Valores 2, 4, 6 ou 8: Valores intermediários.

Para atribuir pesos à matriz de comparação par a par $A = [a_{ij}]$, faz-se o cálculo da matriz de pesos A_w . O cálculo de A_w , como descreve Lima (2007), realiza-se ao somar os valores de cada coluna de A , e dividir cada a_{ij} pelo somatório de sua coluna, chega-se a matriz de comparação normalizada. Nessa matriz normalizada, como mostra a autora, chega-se ao valor dos pesos (w) ao realizar a soma de cada linha e dividir a soma pelo número de critérios avaliados no sistema.

Para analisar se os pesos encontrados são consistentes e se estão dentro de limites aceitáveis, realiza-se o cálculo de Grau de Consistência (CR) através da Equação 1, Índice de Consistência (CI) através da Equação 2, e autovalor máximo $\lambda_{\text{máx}}$ através da Equação 3.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Equação 1: Cálculo do Grau de Consistência.

Onde, RI é o índice de Consistência Aleatória, obtido através da Tabela 2.

Tabela 2: Índice de Aleatoriedade (RI). Adaptado de Lima (2007).

| n | RI | n | RI | n | RI |
|---|------|----|------|----|------|
| 1 | 0,00 | 6 | 1,24 | 11 | 1,51 |
| 2 | 0,00 | 7 | 1,32 | 12 | 1,48 |
| 3 | 0,58 | 8 | 1,41 | 13 | 1,56 |
| 4 | 0,90 | 9 | 1,45 | 14 | 1,57 |
| 5 | 1,12 | 10 | 1,49 | 15 | 1,59 |

Para valores de n = 1, 2, ..., 15

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

Equação 2: Cálculo do Índice de Consistência.

Sendo, n o número de critérios e $\lambda_{\text{máx}}$ o máximo autovalor.

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{1}{n} \left(\frac{w'_1}{w_1} + \frac{w'_2}{w_2} + \dots + \frac{w'_n}{w_n} \right)$$

Equação 3: Cálculo do máximo autovalor.

Onde, $w' = A \times w$.

Para que a ponderação seja dita consistente, o valor de CR deve ser menor que 0,1, caso contrário, recomenda-se uma reavaliação das importâncias na matriz de ponderação par a par (LIMA, 2007).

3.5.2. Normalização de critérios

A normalização dos critérios é realizada com o intuito de equalizar a escala de medidas de todos os fatores envolvidos no processo de decisão (FELIX, 2017). Um método

comumente utilizado para a normalização é o método *fuzzy* que converte os diferentes valores de uma determinada escala em outra escala comparável com valores normalizados que variam, por exemplo, de 0 a 1 (LIMA, 2007). Essa conversão pode ser realizada através de diferentes funções *fuzzy*, sendo que a escolha da função utilizada depende da natureza de cada critério (LIMA, 2007). Na Figura 4, podem ser vistas as funções utilizadas para a normalização através das funções lineares e sigmoidais.

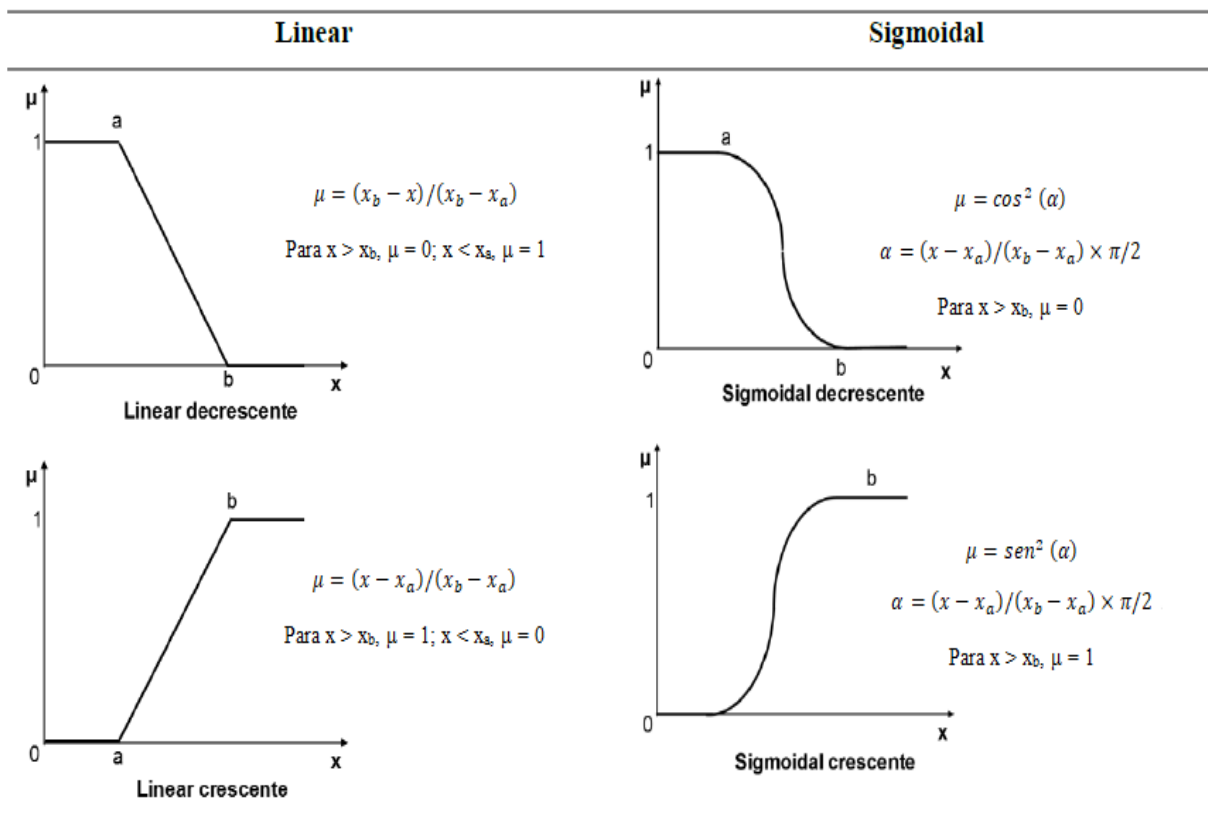


Figura 4: Funções *fuzzy*. Adaptado de Felix (2017).

3.5.3. Método de combinação de critérios

A combinação dos critérios é realizada ao fim do processo de análise. A abordagem utilizada trata-se da combinação linear ponderada, uma regra de combinação compensatória, conhecida no inglês como *Weighted Linear Combination* (WLC). O WLC opera de forma a atribuir pesos a cada critério, permitindo que, na tomada de decisão, os critérios possam se combinar aos pesos a eles atribuídos, obtendo-se um resultado ponderado da seleção de uma alternativa no problema decisório (MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Esta abordagem permite que os fatores sejam considerados de forma contínua na análise da tomada de decisão. Por exemplo, no caso da seleção de uma área de interesse específico, se um critério aponta

que determinado local é impróprio para a seleção da área de interesse, mas os outros critérios, ao serem ponderados, apontam que aquela área seja própria, essa área não será excluída, mas sim, será apenas uma área de baixo interesse (EASTMAN, 2012). Isso ocorre, pois, na análise de ponderação, os fatores podem se compensar, de acordo com os pesos a eles atribuídos, numa forma de negociação para determinar locais de interesse baixo, médio e alto, de acordo com o determinado pelo tomador de decisão (EASTMAN, 2012). O mapa final proposto nessa abordagem decisória, portanto, é um mapa de risco médio, não sendo nem livre de riscos nem um mapa extremamente arriscado (EASTMAN, 2012).

4. METODOLOGIA

4.1. Método de Pesquisa

A metodologia deste trabalho possui natureza aplicada, uma vez que busca empregar o conhecimento para a solução do problema do planejamento urbano. A pesquisa tem objetivos exploratórios, pois busca, primeiramente, conhecer o comportamento presente e futuro do crescimento urbano na cidade de Itajubá. Além disso, tem o objetivo exploratório de identificar, através da bibliografia analisada, os critérios que regem a urbanização ambientalmente sustentável com a finalidade de estruturar o modelo final de priorização de áreas (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009).

A metodologia do trabalho foi constituída de duas partes principais. Primeiramente foi realizada a modelagem e a projeção do crescimento e expansão urbana para a cidade de Itajubá, através do modelo *Land Change Modeler* (LCM). Em seguida, realizou-se a metodologia de mapeamento das áreas aptas à expansão sustentável, através da análise de decisão multicritério, com a aplicação do método do Processo Analítico Hierárquico (AHP). Finalmente, foi realizada comparação entre os métodos utilizados e o Zoneamento do Uso e Ocupação do solo, proveniente do Plano Diretor do município (ITAJUBÁ, 2003) com o objetivo de sugerir melhorias nos zoneamentos de áreas de expansão e áreas de adensamento urbano.

A presente pesquisa exploratória classifica-se como um estudo de caso, uma vez que busca, através da aplicação dos modelos, analisar o comportamento da cidade de estudo (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009). A metodologia geral do trabalho pode ser visualizada no esquema da Figura 5.

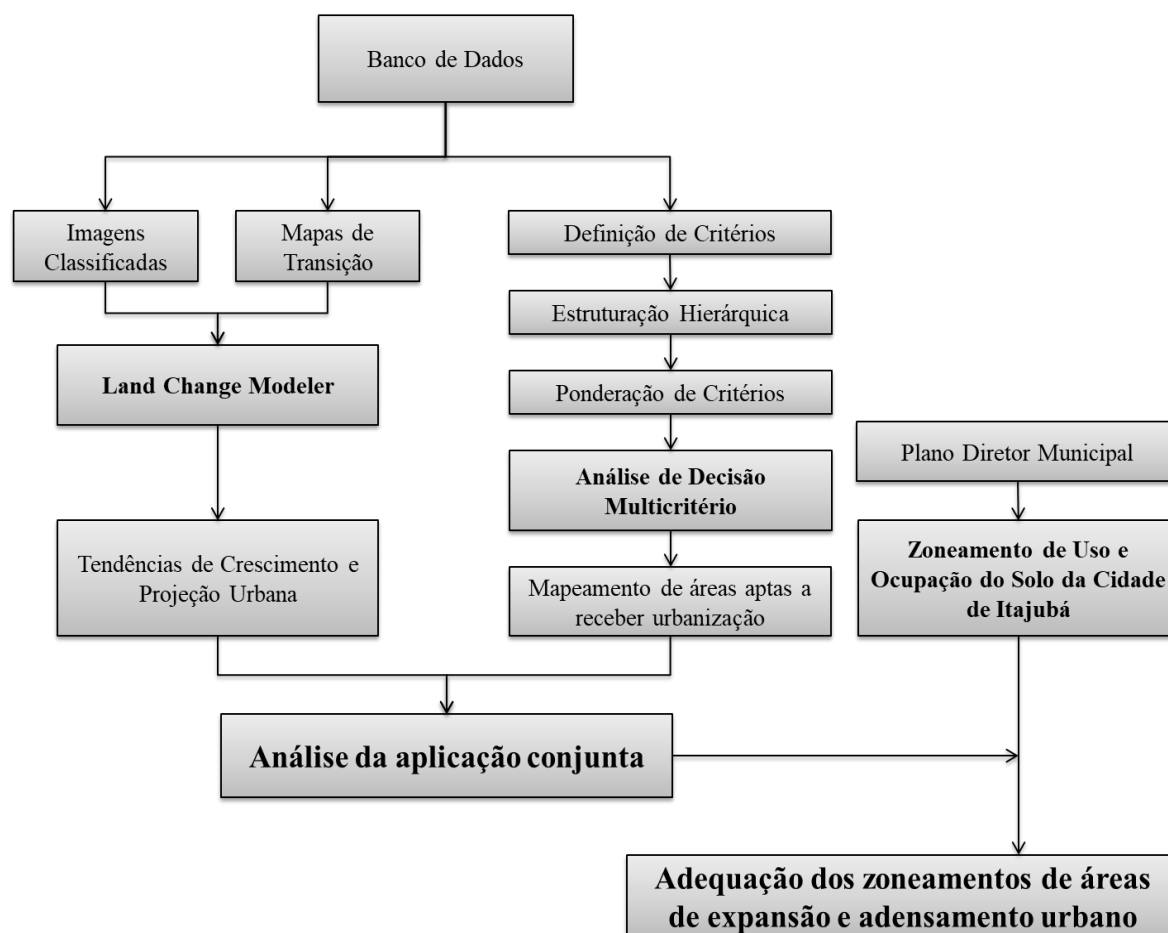


Figura 5: Metodologia do trabalho proposto.

4.2. A Cidade de Estudo

Itajubá, cidade foco da aplicação deste estudo, é localizada no sul do estado de Minas Gerais, próxima às cidades de Pouso Alegre (70 km), São Lourenço (79 km), Guaratinguetá (87 km) e Campos do Jordão (99 km). A cidade de Itajubá situa-se sobre a sub-bacia do Rio Sapucaí que, por sua vez, encontra-se dentro da bacia do Rio Grande (CBH SAPUCAÍ, s.d.). Sua localização pode ser visualizada na Figura 6.

Itajubá está sob as coordenadas de latitude 22°30'30" S e longitude 45°27'20" W. Tem altitude máxima de 1.915 m, localizada na pedra de Santa Rita e altitude mínima de 832 m, na cota do rio Sapucaí. Apresenta uma área total de 294,84 Km², seu relevo é predominantemente montanhoso, os principais rios que cortam o município são o Rio Sapucaí, Rio Lourenço Velho, Ribeirões das Anhumas e José Pereira (IBGE, 2010). A cidade é detalhada na Figura 7.



Figura 6: Localização da cidade de estudo.

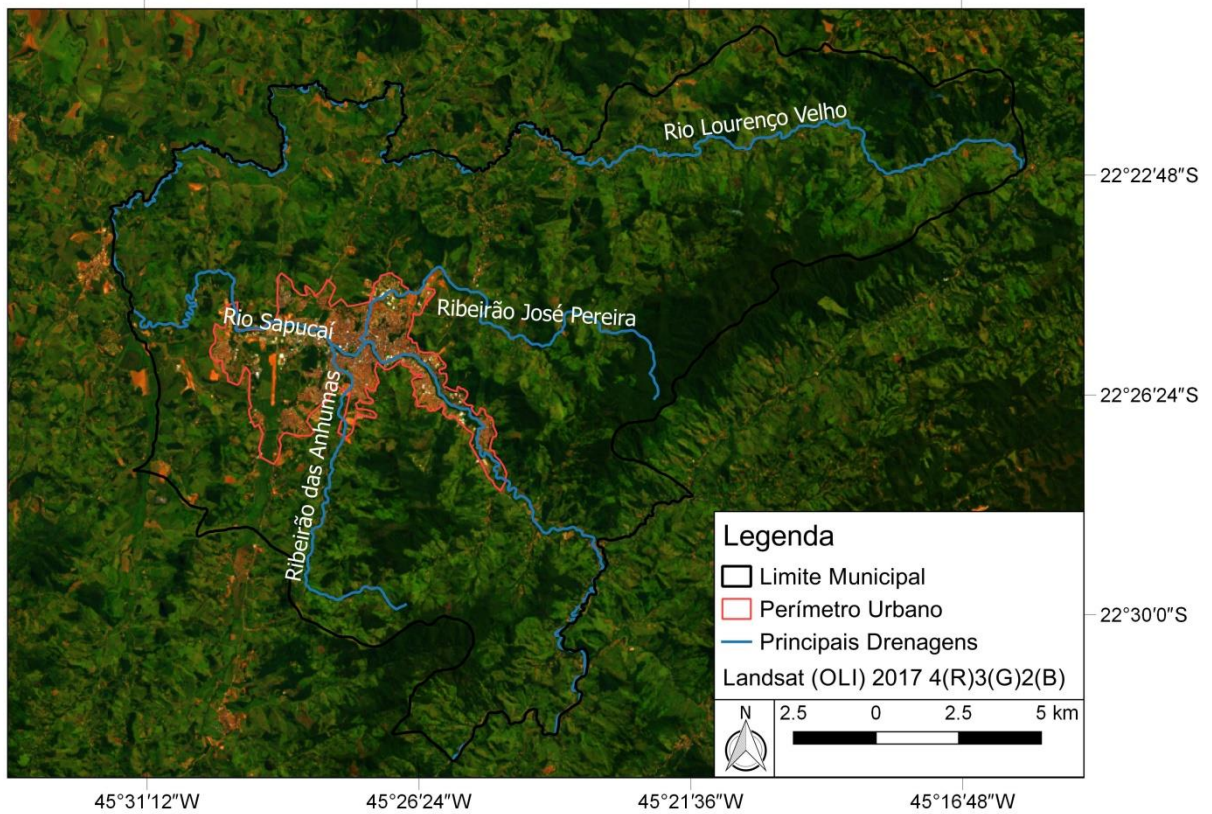


Figura 7: Detalhamento do município de Itajubá, com suas drenagens principais.

A ocupação urbana do município, como explica Felix (2017), ocorreu de forma similar à ocupação de diversas cidades brasileiras, onde a urbanização tem sua origem às margens de rios, em virtude da topografia favorável à ocupação que essas áreas apresentam. Itajubá, desde sua fundação, em 1819, realizou suas primeiras instalações, predominantemente, às margens planas do Rio Sapucaí e do Ribeirão José Pereira, consolidando seu desenvolvimento municipal, mas também ficando vulnerável à ocorrência de inundações provenientes das cheias dos rios mencionados (OLIVEIRA, T.; OLIVEIRA, G.; BARBOSA, 2015; FELIX, 2017).

A primeira inundação registrada em Itajubá ocorreu apenas dois anos após a fundação da cidade, no ano de 1821 (OLIVEIRA, T., OLIVEIRA, G. e BARBOSA 2015). Felix (2017) aponta que existem também alguns registros acerca de inundações no período de 1872 até 1929, ressaltando que os estudos referentes ao tema na cidade são baseados, principalmente, nas cheias de 1935, 1940, 1945 e 1957, devido à maior riqueza de informações referentes a esses anos. Ao analisar o período referente ao século XXI, são destacadas as cheias de maior magnitude ocorridas na cidade, como sendo as dos anos de 2000, 2007 e 2009, sendo a cheia do ano 2000 a maior a ocorrer desde o ano de 1957 (OLIVEIRA, T., OLIVEIRA, G. e BARBOSA, 2015).

Como apontam Oliveira, T., Oliveira, G. e Barbosa (2015), grandes inundações como as retratadas acima, causam grande prejuízo humano e material na região. Os autores apontam algumas medidas de remediação e prevenção da ocorrência e dos impactos dessas cheias, destacando a seriedade do Plano Diretor como mitigador do problema. Segundo os autores, para minimizar os eventos e impactos das inundações, é fundamental a adoção de um Plano Diretor embasado nos estudos de inundações que estabeleça não só medidas de remediação, mas que também mapeie com seriedade as áreas de expansão urbana e as áreas vulneráveis à ocorrência de enchentes.

Em Itajubá, as leis municipais que tratam o tema de expansão urbana são: a Lei Municipal 1.774/1991 que trata do parcelamento do solo urbano e a Lei Complementar 008/2003, do Plano Diretor que, dentre outros assuntos, trata em seu zoneamento, das Áreas de Interesse Ambiental (AIA). Além destas leis, o Plano Diretor aborda também, em seu Art. 41, as zonas de expansão urbana (ZEU), cujas restrições de ocupação são relacionadas às cotas mínimas e máximas de altitude na cidade, a fim de que sejam preservadas as várzeas e os topos.

4.3. Elaboração do Banco de Dados Geográficos

Primeiramente, para a realização do projeto, foi feita a confecção do banco de dados geográficos no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). Para a obtenção das imagens, foram definidos quatro períodos distintos (1986, 2001, 2017 e 2030) para serem estudados em função, primeiramente, de se representar um intervalo de tempo similar entre os períodos de embasamento do modelo e o período de simulação e, secundamente, em função da qualidade das imagens Landsat referentes a esses anos.

As imagens utilizadas para a realização dos estudos foram do satélite Landsat, em função dos benefícios de sua utilização, sendo utilizado o sensor TM do Landsat 5 para os anos de 1986 e 2001 e o sensor OLI do Landsat 8 para 2017. As imagens foram gratuitamente adquiridas por meio da plataforma Earth Explorer no portal online do USGS (*United States Geological Survey*). Todas as imagens foram obtidas sob a órbita-ponto 218/076 e são imagens já ortorretificadas e tratadas radiometricamente pelo USGS a nível L1TP (*Level 1 Standard Terrain Correction Product*) através do *Level 1 Product Generation System* (LPGS) (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009).

Além das imagens, foram também adquiridos, gratuitamente, o vetores correspondentes à rede de transporte da cidade de Itajubá, obtida através da plataforma *OpenStreetMaps*. Foi utilizado o Modelo Digital de Elevação do Terreno (DEM), com resolução de 30 metros, obtido através do projeto TOPODATA, realizado em território nacional sobre os dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). A rede hidrográfica utilizada foi obtida através do portal de dados geográficos do IBGE (IBGE, 2016), em escala de 1:250.000.

Foram adquiridos o mapa de solos, em escala 1:650.000 do estado de Minas Gerais (UFV-CETEC-UFLA-FEAM, 2010), e o mapa de solos, em escala 1:25.000 da sub-bacia do Ribeirão José Pereira, desenvolvido por Lima (2012).

Foi utilizado o mapa dos pontos de ônibus da cidade de Itajubá, elaborado pelo grupo de pesquisa LOGTRANS da Universidade Federal de Itajubá; o mapa de Divisão de Bairros, disponibilizado através da Prefeitura Municipal de Itajubá; o Zoneamento do Uso e Ocupação do solo, disponibilizado no endereço eletrônico da Prefeitura Municipal de Itajubá (ITAJUBÁ, 2003); o mapa de inundações foi proveniente do Serviço Geológico Brasileiro/CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais); o mapa de aterro sanitário foi traçado de acordo com a localização do aterro sanitário de Itajubá, sobre o GoogleMaps; e a delimitação das unidades de conservação, foi obtida de acordo com o SNUC (BRASIL, 2000) através do portal de geoprocessamento do ICMBio (2016).

Os dados geográficos inseridos no SIG foram todos reprojatados para o Sistema de Coordenadas Geográficas UTM e DATUM SIRGAS2000. Os dados coletados, bem como suas características, podem ser visualizados na Tabela 3:

Tabela 3: Banco de Dados

| Banco de Dados | Fonte | Data | Modelo de Dado Espacial | Resolução espacial | Escala |
|--|---------------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------|-----------|
| Imagens Landsat (TM para 1986 e 2001, e OLI para 2017) | US GeologicalSurvey | 1986, 2001, 2017 | Raster | 30 m | - |
| Modelo Digital de Elevação | TOPODATA | 2009 | Raster | 30 m | - |
| Rede de Transporte / Calçadas | OpenStreetMap | 2016 | Vetor | - | - |
| Linhas de Drenagem | IBGE | 2015 | Vetor | - | 1:250.000 |
| Mapa de Solos | UFV-CETEC-UFLA-FEAM | 2010 | Vetor | - | 1:650.000 |
| Mapa de Solos | Lima (2012) | 2012 | Vetor | - | 1:25.000 |
| Pontos de ônibus | Grupo de Pesquisa LOGTRANS – UNIFEI | 2015 | Vetor | - | - |
| Divisão de Municípios | Prefeitura Municipal de Itajubá | - | Vetor | - | - |
| Zoneamento – Plano Diretor | Plano Diretor do Município de Itajubá | 2003 | Impresso | - | - |
| Mapa de Inundações | CPRM | 2014 | Vetor | - | - |
| Mapa de áreas de aterro sanitário | GoogleMaps | 2017 | Vetor | - | - |
| Limite das Unidades de Conservação | ICMBio | 2016 | Vetor | - | - |

4.4. Classificação do Uso e da Cobertura do Solo

A classificação das imagens referentes aos anos de 1986, 2001 e 2017 foi realizada para atender às duas etapas principais deste trabalho. Primeiramente a classificação foi usada como base para realizar a projeção futura da urbanização em Itajubá. Em seguida, a classificação foi utilizada como critério no mapeamento das áreas aptas à urbanização no município, através da análise de decisão multicritério.

Portanto, para prover um trabalho com resultados confiáveis, foi necessária a realização de uma classificação satisfatória que passou pelas etapas de pré-processamento das imagens, classificação e validação das classificações. Na Figura 8, as etapas realizadas neste processo são esquematizadas.

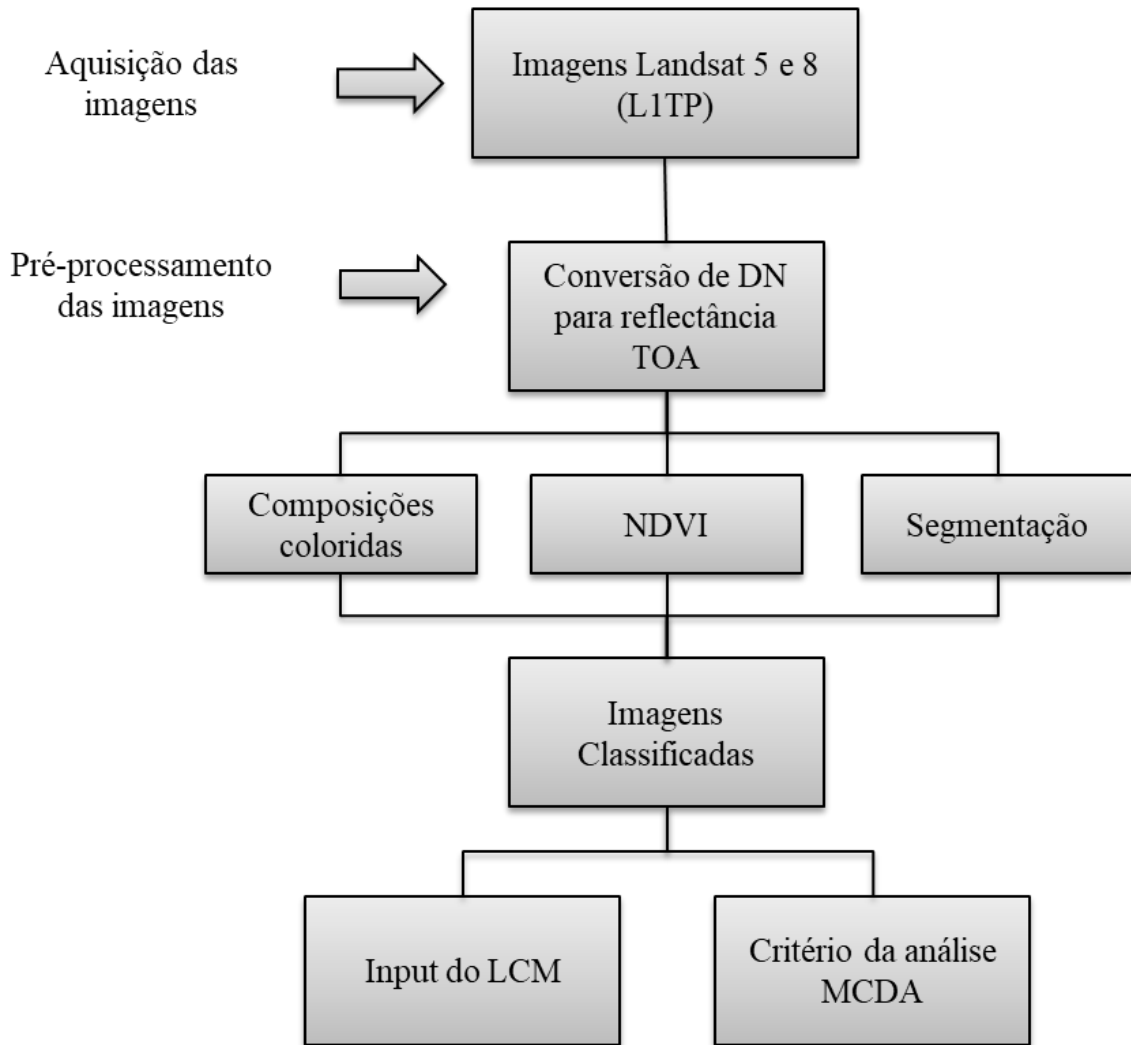


Figura 8: Esquemática da etapa de classificação das imagens de satélite.

O pré-processamento das imagens foi realizado para melhorar a qualidade da imagem a ser classificada. Nesta etapa, os valores crus (DN) de cada pixel foram transformados em valores de reflectância de topo de atmosfera (TOA), diminuindo os efeitos de espalhamento da luz que ocorrem na obtenção da imagem.

Após o pré-processamento, realizou-se o cálculo do NDVI, para que ele fosse incluído na etapa de classificação. O NDVI permite um melhor destaque das assinaturas espectrais dos alvos, fazendo com que haja uma melhor separação e identificação dos objetos na imagem a ser classificada.

Paralelamente ao NDVI foram realizadas as composições coloridas, que auxiliam as etapas de classificação e de segmentação das imagens.

As imagens foram classificadas nos atributos de água, área construída, pastagem, vegetação de dossel fechado e solo exposto. Após realizar a classificação, foi realizada a etapa

de pós-classificação, onde possíveis erros de classificação foram corrigidos. Com as correções, as imagens pós-classificadas foram validadas através da utilização do índice Kappa, desenvolvido por Landis e Koch (1977). O índice Kappa é obtido através da comparação entre amostras de referência da classificação, obtidas a partir das imagens de satélite e a imagem classificada. Uma vez que o índice tenha apresentado valores aceitáveis, de acordo com o descrito por Landis e Koch (1977), os mapas finais de classificação foram validados e aceitos para dar procedência na análise.

4.5. Projeção do Crescimento Urbano

O LCM, que tem sua operação explicada no item 3.4.1, foi utilizado como modelo de projeção da expansão urbana. A esquematização do modelo de predição pode ser visualizada na Figura 9.

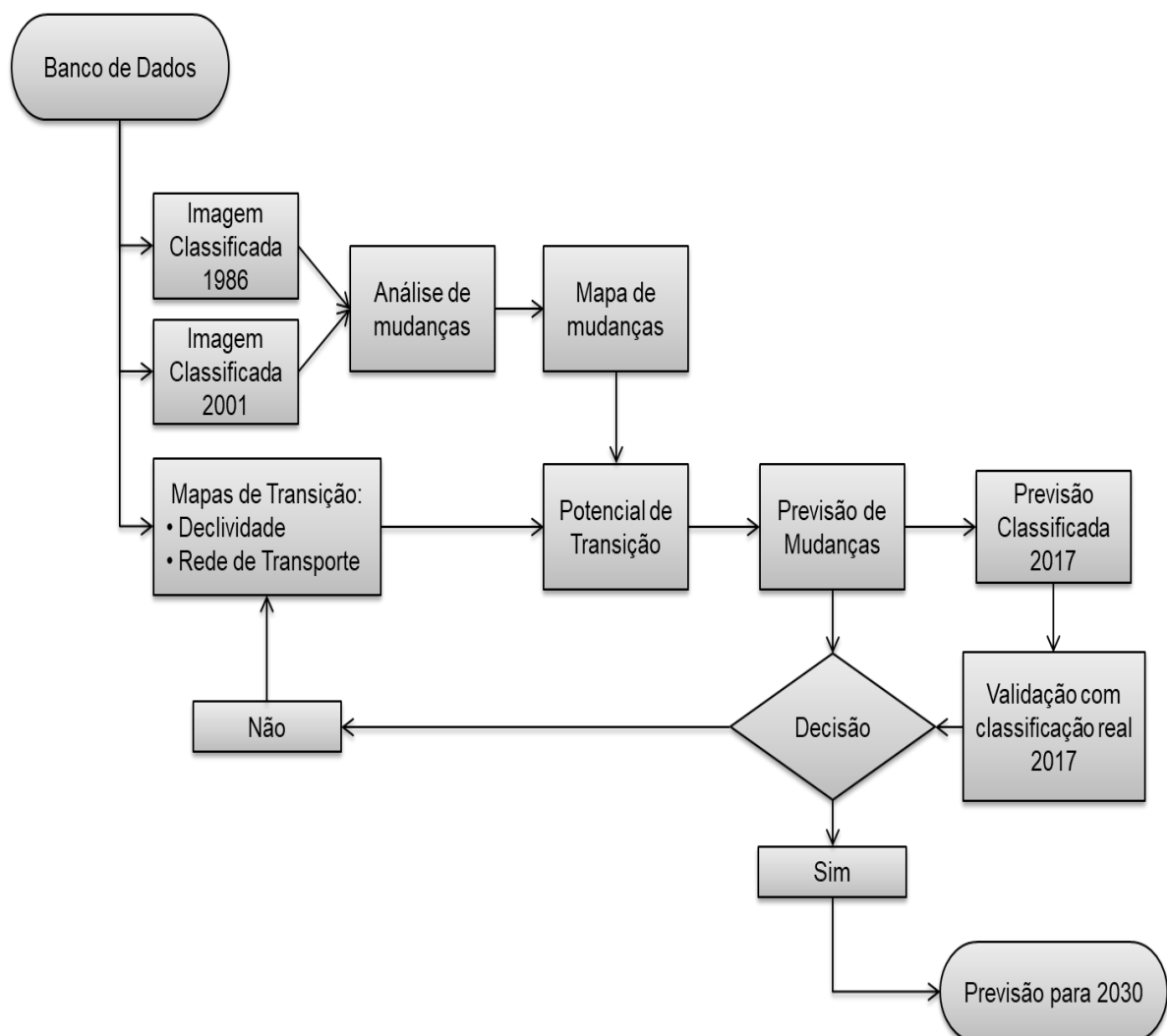


Figura 9: Esquematização da aplicação do LCM.

Os dados inseridos no LCM foram: as imagens classificadas referentes ao ano de 1986 e 2001 e os mapas de transição, conhecido também como *driving factors*, já que são os fatores que “regem” as mudanças de uso e ocupação do solo. Os mapas de transição utilizados foram o mapa de declividades e o mapa de distância euclidiana da rede de transporte de Itajubá, já que estes se mostraram os agentes que mais influenciam a transição do solo não urbano para o solo urbano, de acordo com a análise proposta no próprio LCM. À princípio foram também inseridos os *driving factors* de distância dos recursos hídricos, mas como este mapa não apresentou, de acordo com a avaliação do LCM, grande interferência no dinamismo urbano, optou-se por retirá-lo, utilizando para a modelagem apenas a declividade e distância da rede de transporte.

Para realizar a primeira etapa do LCM, a etapa de análise das mudanças, o LCM compara as classificações de uso e cobertura do solo dos anos de 1986 e 2001. As classificações inseridas nessa etapa, a fim de prover objetividade no LCM, foram imagens classificadas apenas nas classes de “área construída” e “área não construída”.

Em seguida, foi realizada a segunda etapa do LCM, a etapa do Potencial de Transições. Nesta etapa, a fim de tornar a modelagem mais clara e objetiva, foi assumido que não houve mudanças no sentido de “área construída” para “área não construída”, de modo que, assumiu-se, que as áreas construídas podem apenas crescer, e não diminuir. Nesta etapa foram inseridos também os *driving factors* do crescimento de Itajubá, que foram os mapas de declividade e o mapa de distância euclidiana da rede de transporte de Itajubá.

Na terceira etapa, após ter sido realizada a predição de mudanças para o ano de 2017, foi realizada a etapa de validação da simulação, onde foram comparadas as mudanças reais ocorridas na imagem classificada de 2017 com as mudanças previstas para o mesmo ano. A comparação entre as duas imagens classificadas foi feita através da utilização do Índice Kappa (LANDIS; KOCH, 1977), que, a partir da comparação das imagens gera um índice que aprova ou não a concordância entre elas, validando ou não o modelo. Com o modelo validado, foi feita a simulação para o uso e cobertura do solo para o ano de 2030, com o objetivo de se manter uma análise periódica de em torno de 15 anos.

4.6. Mapeamento da Aptidão à Urbanização Ambientalmente Sustentável

A etapa de mapeamento de aptidão foi realizada através da aplicação da técnica de análise de decisão multicritério. A esquematização da etapa pode ser vista na Figura 10.

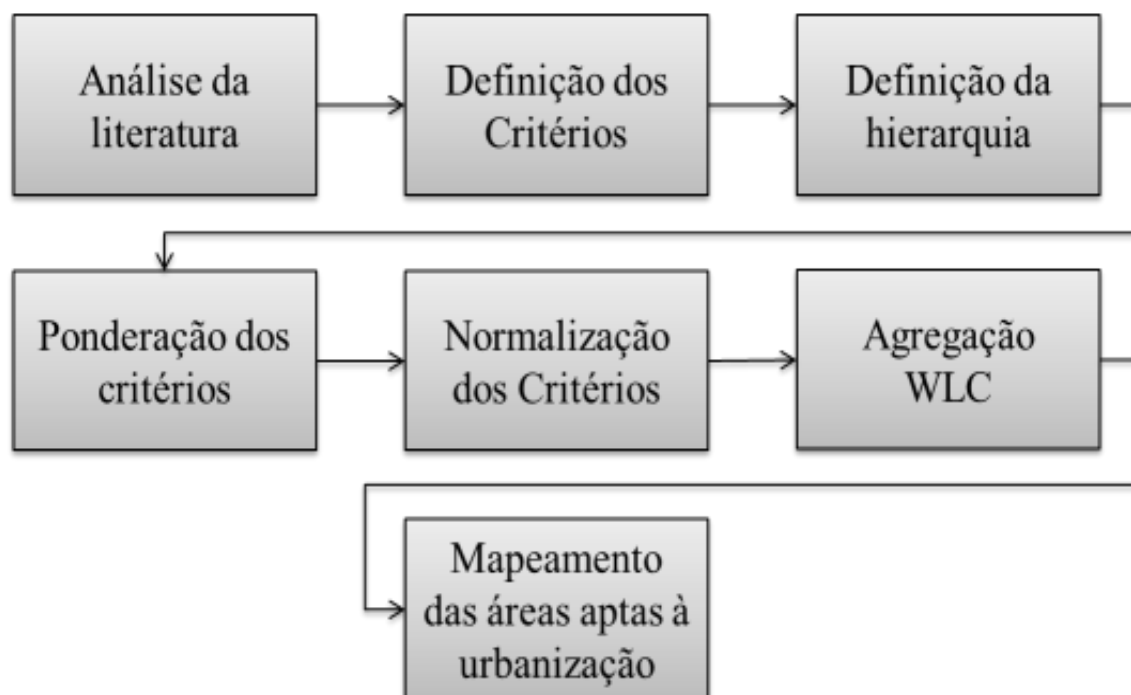


Figura 10: Esquematização do modelo aplicado para a seleção de áreas aptas a receber urbanização ambientalmente sustentável.

Para a realização do mapeamento das áreas aptas a receber expansão urbana sustentável, foi realizado o estudo da literatura, de modo a identificar os critérios que têm influência no processo decisório da urbanização. Esses critérios foram determinados visando a sustentabilidade e minimização de impactos ambientais gerados na urbanização. A identificação desses critérios foi baseada, principalmente, nos trabalhos de Pivo (1996), ao definir cidades sustentáveis; no trabalho de Montañó (2005), ao analisar a capacidade de suporte do solo para receber cobertura urbana e as vulnerabilidades do solo; na Lei Federal 6.766/1979, que rege o parcelamento do solo; no Código Florestal (Lei Federal 12.651/2012), que define as Áreas de Preservação Permanente (APP); na Lei Municipal 1.774/1991 de parcelamento do solo; na Lei Complementar 008/2003 que define o Plano Diretor Municipal e o zoneamento da cidade.

Com os critérios determinados, foi realizada a hierarquia do processo decisório (AHP). A hierarquia foi proposta com a finalidade de distinguir o objetivo, os critérios e os subcritérios que embasam a decisão de selecionar áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável.

Tendo sido definida a hierarquia, foram atribuídos pesos aos critérios e subcritérios em estudo. A metodologia utilizada na atribuição dos pesos foi através da matriz par a par, que

foi submetida a especialistas das áreas de engenharia ambiental, engenharia civil, direito, pedologia e meio ambiente (SAATY, 1987).

A normalização dos atributos foi realizada através da função fuzzy linear, com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014), assim como realizado na metodologia de (Felix 2017). A normalização foi feita com a escala de 0 a 1, sendo que os valores próximos a 0 indicam as áreas mais aptas à urbanização ambientalmente sustentável, enquanto os valores mais próximos de 1 indicam as áreas menos aptas à urbanização ambientalmente sustentável.

Com os pesos atribuídos, a agregação dos critérios foi realizada de acordo com a técnica WLC. A aplicação da combinação foi realizada através da ferramenta *Weighted Sum*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta permite realizar a sobreposição de imagens *raster*, de modo que cada *raster* é multiplicado pelo peso a ele atribuído, gerando a soma ponderada de cada pixel da imagem final (FELIX, 2017).

4.7. Adequação dos Zoneamentos de Áreas de Expansão e Adensamento

Para propor as melhorias nas delimitações das zonas de expansão (ZEU) e adensamento urbano (ZAD) do Zoneamento de Uso e Ocupação do Solo, constante no Plano Diretor da cidade de Itajubá, utilizou-se o mapeamento de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável realizado através da análise multicritério.

As propostas de delimitação foram feitas a partir de recortes realizados sobre as classes de aptidão “muito alta”, “alta” e “média alta” do mapeamento de aptidão realizado.

Para a proposta de novas delimitações das zonas de expansão, o recorte das áreas aptas foi realizado sobre as zonas de expansão (ZEU) dispostas no Zoneamento do Plano Diretor. Dessa forma, foram sugeridas novas zonas de expansão baseando-se nas áreas já delimitadas pela ZEU do plano.

Para a proposta de áreas passíveis de adensamento, esse recorte foi realizado com base no perímetro urbano da cidade. Dessa forma, foram sugeridas todas as áreas passíveis de estudo de adensamento que se encontram dentro do perímetro urbano.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo é elaborado para apresentar e discutir os resultados obtidos ao longo da dissertação. No primeiro tópico, é apresentado o resultado da classificação do uso e ocupação do solo para os anos de estudo. No segundo tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos individualmente na aplicação do modelo LCM. No terceiro tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos individualmente na aplicação do modelo de mapeamento de áreas de interesse através da técnica de análise de decisão multicritério. No quarto tópico os resultados do LCM e do mapeamento são cruzados, de modo a analisar o comportamento da dinâmica de urbanização em relação à aptidão à urbanização das áreas que vêm sendo ocupadas.

Com os resultados obtidos e com o intuito de melhorar a realidade da urbanização em Itajubá, são realizadas sugestões que podem ser implantadas no novo Plano Diretor do município, que atualmente, se encontra em fase de revisão. Dessa forma, no quinto e no sexto tópico são sugeridas melhorias nas delimitações das Zonas de Expansão Urbanas (ZEU) e das Zonas de Adensamento Urbano (ZAD), respectivamente, do Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo do Plano Diretor de Itajubá.

5.1. Classificação do Uso e da Cobertura do Solo

A etapa de classificação das imagens de satélite é base para a realização das etapas de projeção da urbanização futura, através da aplicação do modelo LCM, e para a etapa de mapeamento da aptidão à urbanização, através da análise de decisão multicritério. A classificação das imagens é dividida em duas fases. Primeiramente realiza-se o pré-processamento de cada banda de interesse das imagens do Landsat 5 e Landsat 8. Em seguida, com as bandas pré-processadas, é realizada a classificação do uso e ocupação do solo sobre a região de estudo.

5.1.1. Pré-processamento das imagens

Para a obtenção de resultados satisfatórios e confiáveis ao longo da aplicação deste trabalho, foi realizada a etapa de pré-processamento das imagens antes de realizar a etapa de classificação. O pré-processamento é especialmente importante para que o modelo LCM apresente resultados satisfatórios na análise e na projeção da urbanização.

Embora as imagens adquiridas já tenham passado por processos de correção geométrica e radiométrica, através do programa LPGS, Chander, Markham e Helder (2009) destacam que, ao utilizar imagens de diferentes sensores, é necessário realizar a etapa do pré-processamento para normalizar os valores de radiância das imagens. Os autores ressaltam que esta normalização é essencial para tornar as imagens comparáveis umas as outras. Além disso, o pré-processamento é essencial para diminuir os efeitos de espalhamento da luz que ocorrem de forma variada para cada imagem em função das diferentes posições do sol nos dias e horários de aquisição (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009; EASTMAN, 2012).

Segundo Eastman (2001), os efeitos de espalhamento da luz agem especialmente na região do espectro que possui comprimento de onda menor, como os raios UV ou o visível de cor azul. Por esse motivo, optou-se por não trabalhar com as bandas com comprimento de onda menor que a cor azul para ambos os satélites utilizados. Além disso, foram excluídas da classificação a banda termal 6 do Landsat 5 e as bandas termais 10 e 11 do Landsat 8, uma vez que essas bandas registram informações termais, não necessárias para a metodologia da classificação.

O pré-processamento é realizado de acordo com as equações propostas por Chander, Markham e Helder (2009) e pelo USGS, onde realiza-se a conversão dos valores crus (número digital– DN) obtidos nas imagens para valores de reflectância no topo da atmosfera (TOA). Para realizar a conversão foram utilizadas a Equação 4, Equação 5 e Equação 6.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda}$$

Equação 4: Conversão de DN para radiância para TM5 (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009)

Onde:

L_{λ} : Radiância espectral na abertura do sensor [W/(m² srμm)]

Q_{cal} : Valor do pixel calibrado quantificado [número digital]

Q_{calmin} : Valor do pixel mínimo calibrado quantificado correspondente à $LMIN_{\lambda}$ [número digital]

Q_{calmax} : Valor do pixel máximo calibrado quantificado correspondente à $LMAX_{\lambda}$ [número digital]

$LMIN_{\lambda}$: Radiância espectral no sensor dimensionado para Q_{calmin} [W/(m² srμm)]

$LMAX_{\lambda}$: Radiância espectral no sensor dimensionado para Q_{calmax} [W/(m² srμm)]

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s}$$

Equação 5: Conversão de radiância para reflectância planetária de topo da atmosfera para TM5 (CHANDER; MARKHAM; HELDER, 2009)

Onde:

ρ_λ : Reflectância planetária de topo da atmosfera [sem unidade]

π : constante matemática ~3,14159

d: distância sol-Terra [unidades astronômicas]

ESUN $_\lambda$: Irradiância solar média exoatmosférica [W/(m² μm)]

θ_λ : ângulo zênite solar [graus]

$$\rho_\lambda = \frac{M_\rho \cdot Q_{cal} + A_\rho}{\sin(\theta_{SE})}$$

Equação 6: Conversão de DN para reflectância para OLI (USGS, 2017)

Onde:

ρ_λ : Reflectância planetária de topo da atmosfera [sem unidade]

M_ρ : Fator multiplicativo de re-escala específico de cada banda encontrado no metadado da imagem (REFLECTANCE_MULT_BAND_x)

A_ρ : Fator aditivo de re-escala específico de cada banda encontrado no metadado da imagem (REFLECTANCE_ADD_BAND_x)

Q_{cal} : Valor do pixel calibrado quantificado [número digital]

θ_{SE} : Ângulo de elevação do sol [graus]

As correções foram realizadas sobre as bandas de cada ano de estudo através da calculadora *raster* no SIG IDRISI Selva.

Com as equações aplicadas, as bandas normalizadas foram utilizadas para a etapa de elaboração do NDVI e da classificação.

5.1.2. Classificação das imagens

Com as imagens convertidas de DN para valores de reflectância TOA, foram feitas as composições coloridas pra cada ano de estudo. Como recomendado, para melhor eficácia em estudos urbanos, foi utilizada a composição falsa cor 4(R)5(G)3(B) para o Landast 5 e 5(R)6(G)4(B) para o Landsat 8 (SECUMA, 2012).

Além das bandas pré-processadas, foi utilizado, para a classificação, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das imagens adquiridas. O NDVI permite um melhor destaque das assinaturas espectrais dos alvos, permitindo a separação e identificação dos objetos a serem classificados (FENGLER et al., 2012). Trata-se de uma operação *raster* realizada sobre as bandas do visível vermelho com as bandas do infravermelho próximo de cada satélite e é determinado pela Equação 7.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

Equação 7: Cálculo do NDVI, onde NIR é a banda referente ao infravermelho próximo, e Red é a banda referente ao vermelho.

A classificação das imagens foi realizada no SIG IDRISI Selva por meio do algoritmo de segmentação, onde as imagens são classificadas de forma supervisionada por regiões.

As imagens de 1986, 2001 e 2017 foram classificadas em cinco qualidades de uso, sendo essas: a) água: como sendo corpos aquáticos registrados nas imagens; b) áreas construídas: representadas por áreas de superfície impermeável, como ruas e rodovias, casas e prédios; c) pastagem: como sendo vegetações rasteiras, de agricultura ou pasto; d) vegetação de dossel fechado: como sendo as áreas de vegetação mais densa como, por exemplo, matas remanescentes conservadas ou áreas de reflorestamento; e) solo exposto: definido como áreas de solo descoberto por qualquer tipo de vegetação.

Após classificadas as imagens, realizou-se uma pós-classificação onde foram feitas pequenas correções manuais sobre áreas classificadas de forma errônea. Após as correções, as imagens classificadas foram validadas através da utilização do índice Kappa (LANDIS; KOCH, 1977).

O índice Kappa é um índice de concordância desenvolvido por Landis e Koch (1977) que é calculado a partir da matriz de erro resultante da comparação de uma imagem de referência com uma imagem classificada. A comparação para a validação foi feita usando como referência as amostras recolhidas na etapa de supervisão da classificação e as imagens pós-classificadas. Os resultados de validação da classificação podem ser vistos na Tabela 4, onde nota-se que a classificação final do uso e da cobertura do solo obtém um nível de concordância “quase perfeita” de acordo com a metodologia de Landis e Koch (1977).

Tabela 4: Nível de concordância das imagens classificadas

| Ano | Índice Kappa | Nível de Concordância |
|------|--------------|-----------------------|
| 1986 | 0.9228 | Quase Perfeita |
| 2001 | 0.9763 | Quase Perfeita |
| 2017 | 0.9841 | Quase Perfeita |

A classificação final pode ser vista na Figura 11, onde são dispostas as cartas de 1986 (10a), 2001 (10b) e 2017 (10c).

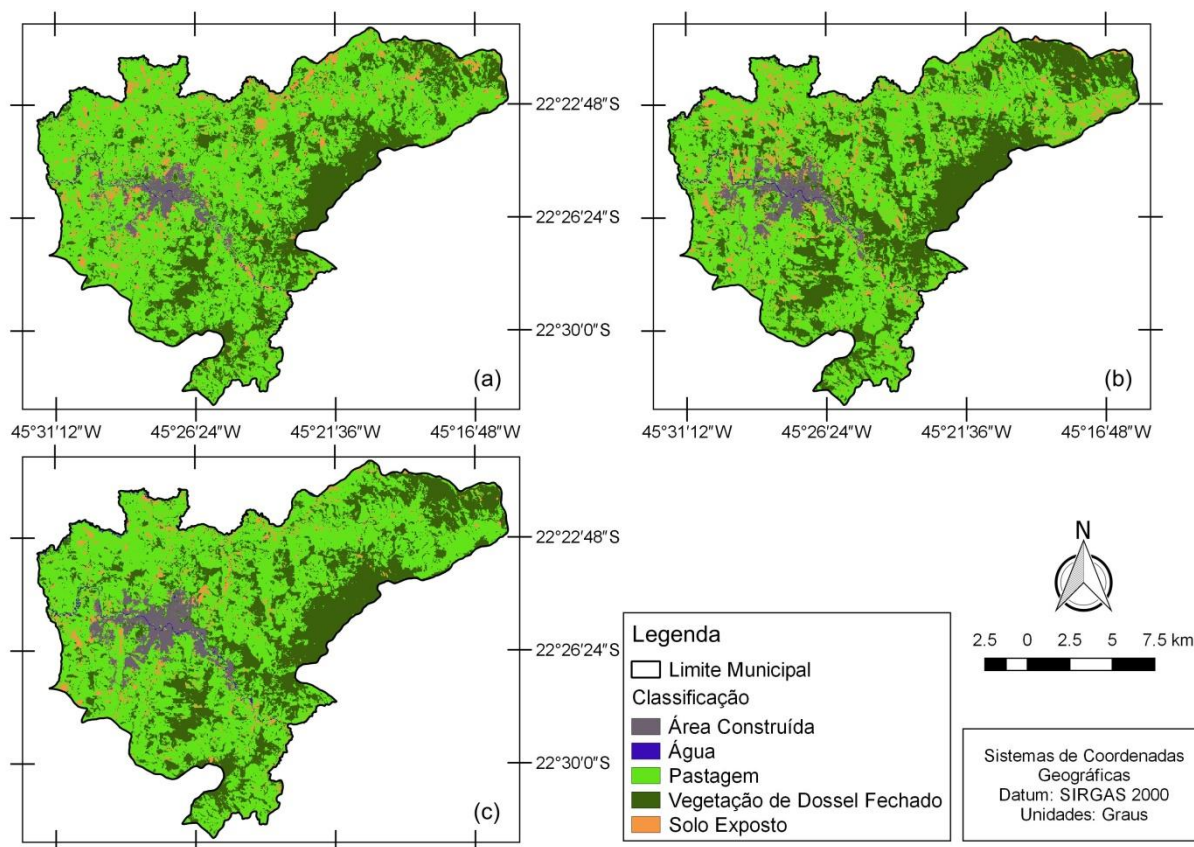


Figura 11: Classificação do uso e cobertura do solo. (a) classificação do ano de 1986; (b) classificação do ano de 2001; (c) classificação de ano de 2017.

5.2. Projeção do Crescimento Urbano

O presente capítulo aborda a aplicação do modelo de alteração do uso e cobertura do solo, o *Land Change Modeler* (LCM), utilizado para analisar o comportamento histórico e a projeção futura da urbanização em Itajubá. Primeiramente, na primeira sessão do capítulo é abordada a aplicação do modelo LCM. Na segunda sessão do capítulo, discute-se a análise realizada sobre os resultados obtidos com o modelo aplicado.

5.2.1. Aplicação do modelo *Land Change Modeler* (LCM)

Para realizar a simulação da expansão urbana, as imagens classificadas, dispostas na Figura 11, tiveram suas cinco classes convertidas em apenas duas, a classe de solo não construído e a classe de solo construído. Essa alteração foi realizada com o intuito de obter uma modelagem mais limpa e objetiva, já que se avalia apenas o crescimento urbano de Itajubá, desconsiderando-se as alterações das outras classes.

Primeiramente, no LCM, são inseridas as classificações de área construída e área não construída para os anos de 1986 e 2001. Assim, o LCM analisa as mudanças ocorridas entre as duas imagens, gerando dados de perdas e ganhos entre os anos em análise.

Em seguida, para gerar as matrizes de transição na etapa “Potencial de Transições” no LCM, foi necessária a inserção dos mapas de transição de declividade e de distância da rede de transporte, que podem ser vistos na Figura 12 e Figura 13, respectivamente. Os mapas de transição representam os *driving factors* da expansão urbana, sendo inseridos no LCM para que o modelo possa ser treinado para a projeção.

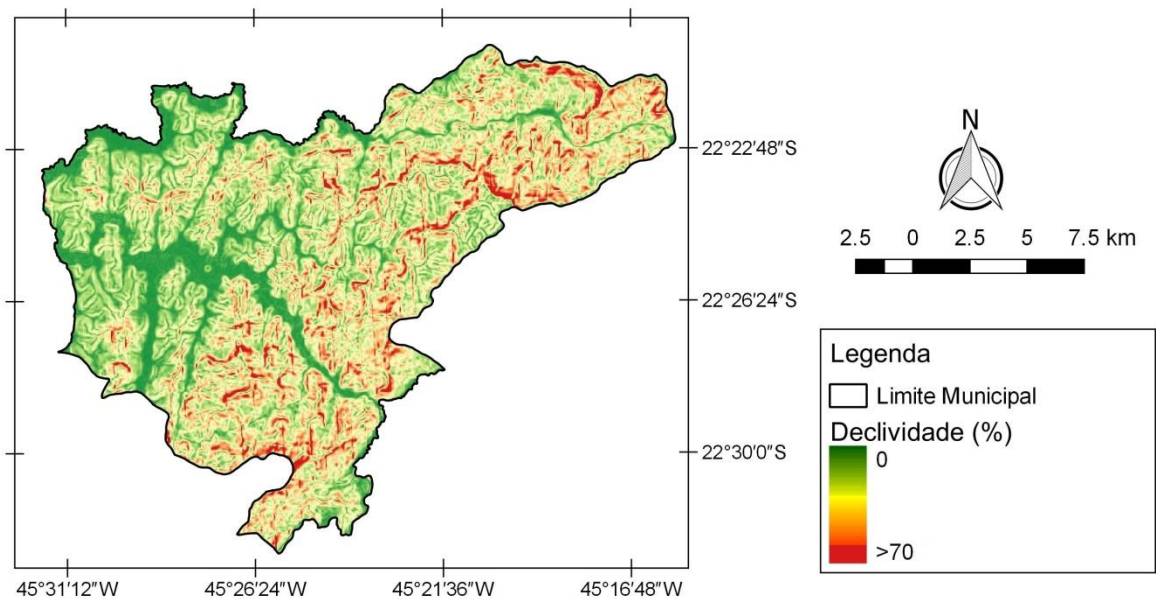


Figura 12: Mapa de transição de declividade inserido no LCM.

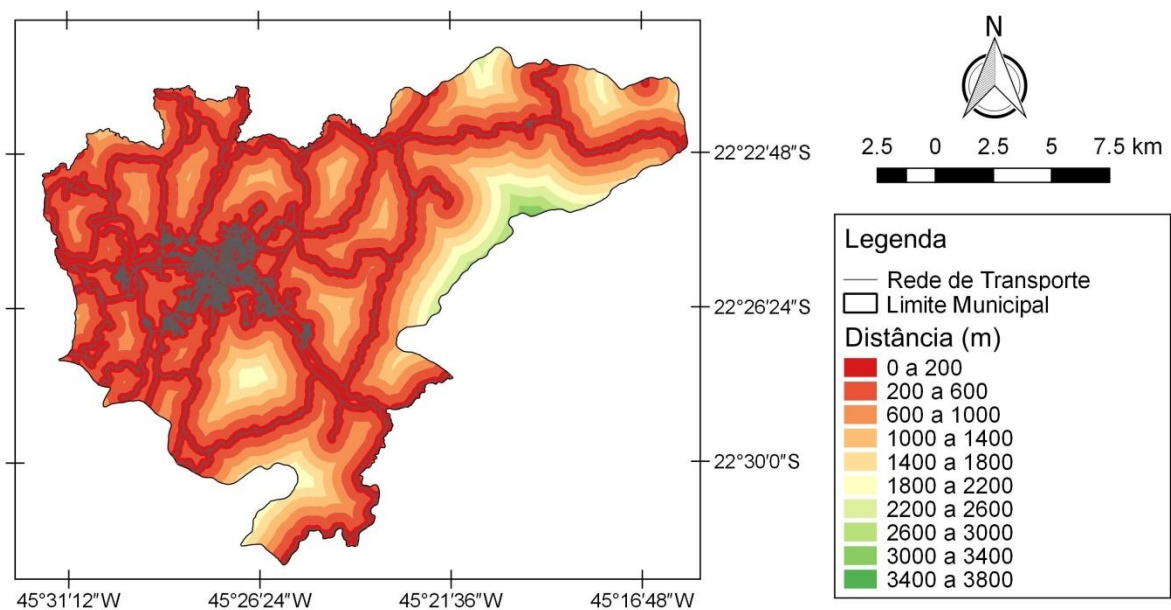


Figura 13: Mapa de distâncias euclidianas da rede de transporte inserido no LCM.

Com os mapas de transição e as imagens classificadas inseridos no LCM, o modelo produz seu primeiro *output*, exposto na Figura 14, que representa o potencial de transição da área de estudo. O mapa de potencial de transição representa a probabilidade que uma área tem de mudar de não construída para área construída. De acordo com a Figura 14 é possível analisar que, baseado na tendência de alterações do uso do solo na cidade de Itajubá, a transição de área não urbana para área urbana, tem maior potencial de ocorrência em áreas mais planas e em áreas próximas da rede de transporte.

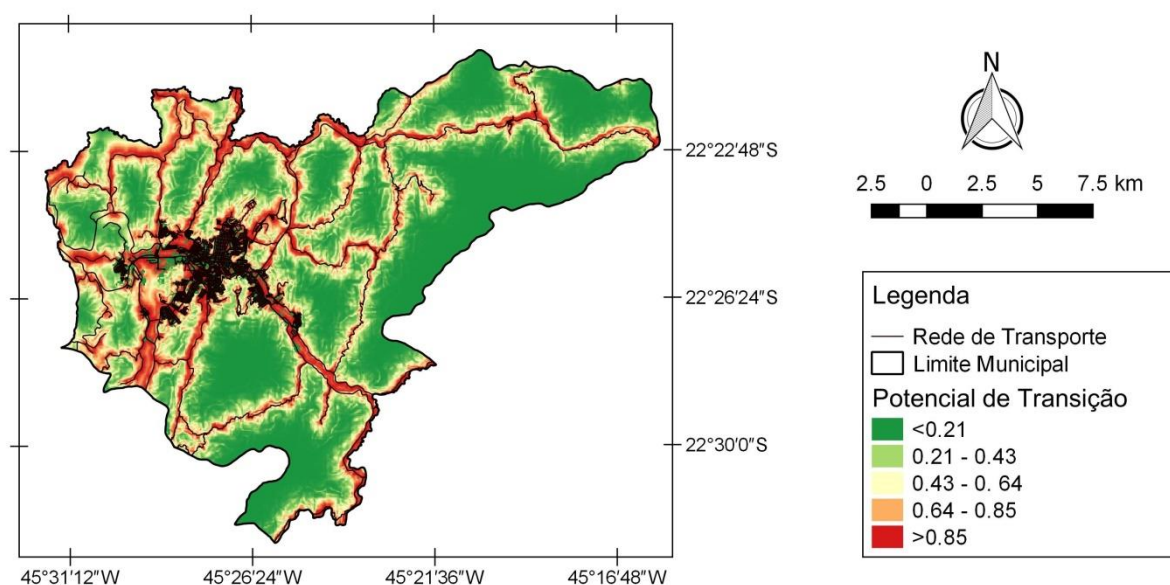


Figura 14: Potencial de transição da cobertura não urbana para cobertura urbana.

Com o potencial de transição produzido, realizou-se a projeção da área construída para o ano de 2017, que pode ser visto na Figura 15. Essa etapa é fundamental para que seja feita a validação do modelo, onde compara-se a imagem de classificação real do ano de 2017 com a imagem projetada para 2017.

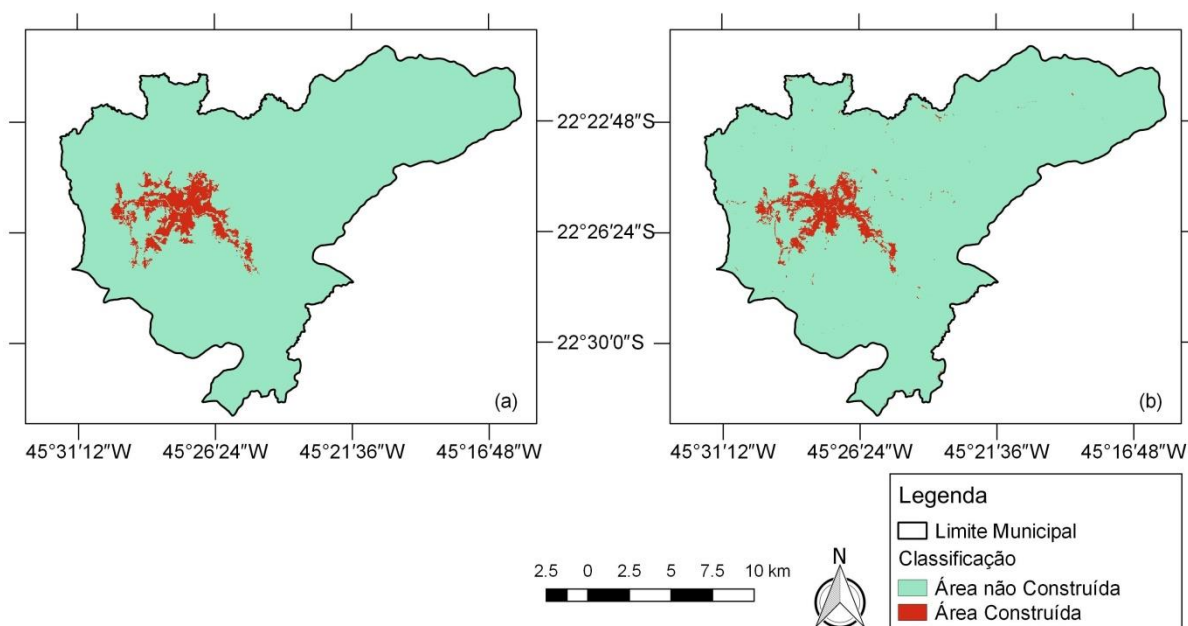


Figura 15: Classificações utilizadas para a validação do modelo, onde (a) representa a classificação real para o ano de 2017, e (b) representa a classificação projetada para o ano de 2017.

A validação é realizada através da ferramenta *validate* do SIG IDRISI Selva, que gera o índice Kappa. Com a ferramenta, as imagens de 2017 (real e projetada) são comparadas, gerando como resposta a matriz de erro que permite calcular o valor de concordância do índice Kappa. Na etapa de validação do modelo, foram realizadas sucessivas melhorias na classificação das imagens de satélite, de modo a melhorar o valor do Kappa final do LCM, obtendo um valor final do índice de 0,7561, que classifica a concordância do modelo como sendo “substancial”. De acordo com Eastman (2012), valores de Kappa próximos a 0,8 são tidos como ótimos valores para dar procedência à etapa de projeção da urbanização futura.

Portanto, com o modelo de simulação validado, foi projetada a imagem classificada para o ano de 2030. A Figura 16 mostra as imagens classificadas no período de estudo e a classificação projetada para o ano de 2030.

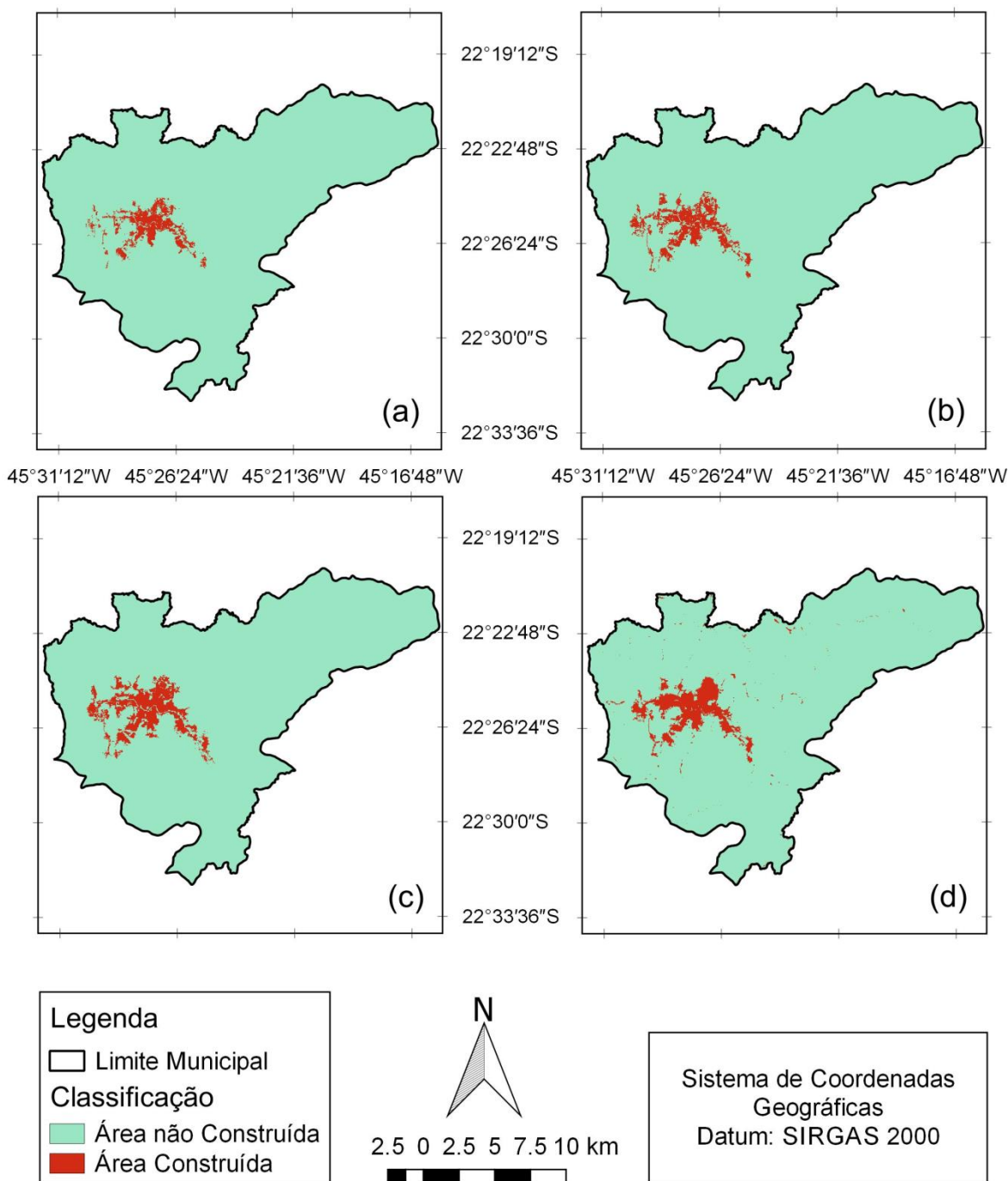


Figura 16: Mapas de classificação. (a) Classificação referente a 1986; b) Classificação referente a 2001; c) Classificação referente a 2017; d) Projeção referente a 2030.

5.2.2. Análise do comportamento histórico e da projeção urbana

Com os mapas gerados na Figura 16, é possível constatar visualmente que houve o crescimento da cobertura de área construída ao longo dos anos. Para mensurar esse crescimento, foi elaborada a Tabela 5, onde são representadas as quantidades de área construída e área não construída sobre a cidade de Itajubá.

Tabela 5: Ocupação urbana nos anos estudados.

| | Área não Construída | Área Construída | Aumento com relação ao ano anterior |
|-----------------------|---------------------|---|-------------------------------------|
| | Km ² | | % |
| 1986 | 286,70 | 7,92 | - |
| 2001 | 283,92 | 10,70 | 35,10 |
| 2017 real | 280,81 | 13,81 | 29,09 |
| 2017 Projetada | 282,53 | 12,09 | 12,99 |
| | 278,54 | 16,08 (projeção com base no valor real) | 16,44 |
| 2030 Projetada | a | a | a |
| | 280,54 | 14,08 (medição realizada na projeção) | 1,96 |

Na Tabela 5 é possível notar, ao comparar as áreas construídas dos mapas de 2017 (real e projetado), que o modelo subestimou o crescimento dessa classe em 12,45% ao projetar o crescimento de 2017. Dessa forma, considerando que o modelo propague a taxa de subestimação para projetar o ano de 2030, é possível inferir que a quantidade de área construída para 2030, medida no mapa com 14,08 km², possa alcançar até 16,08 km².

Além das quantificações de área, a Tabela 5 apresenta a taxa de crescimento, em porcentagem, dos períodos de estudo. Nota-se que o período que apresentou maior crescimento foi entre 1986 e 2001 onde houve um crescimento de 35,10% da cobertura de área construída, enquanto o período com menor crescimento foi o período entre 2017 (real) e a projeção para 2030, que apresentou aproximadamente 2% de crescimento, sendo que com a correção da área projetada, essa taxa de crescimento pode atingir 16,44%.

Com os mapas da Figura 16, foram elaborados os mapas das Figuras 17, 18 e 19. A elaboração desses mapas consistiu na subtração de *rasters*, através da calculadora *raster*, do ano de referência com o ano posterior ao da referência, ou seja, para a Figura 17, foi subtraído o mapa de 1986 do mapa de 2001, para a Figura 18, foi subtraído o mapa de 2001 do mapa de 2017 (real), e para a Figura 19, foi subtraído o mapa 2017 (real) do mapa projetado para 2030.

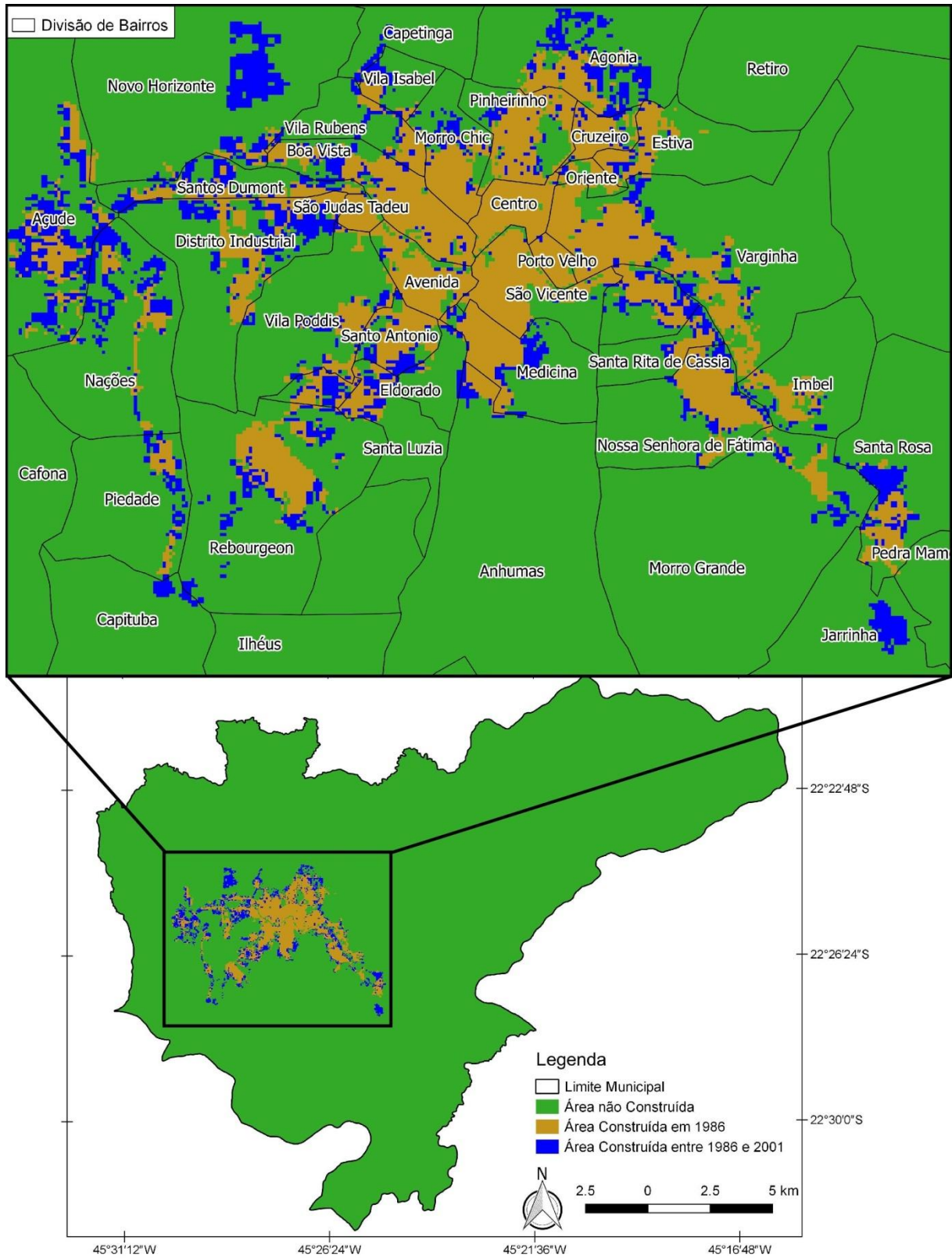


Figura 17: Crescimento da área construída de 2001 com relação a 1986.

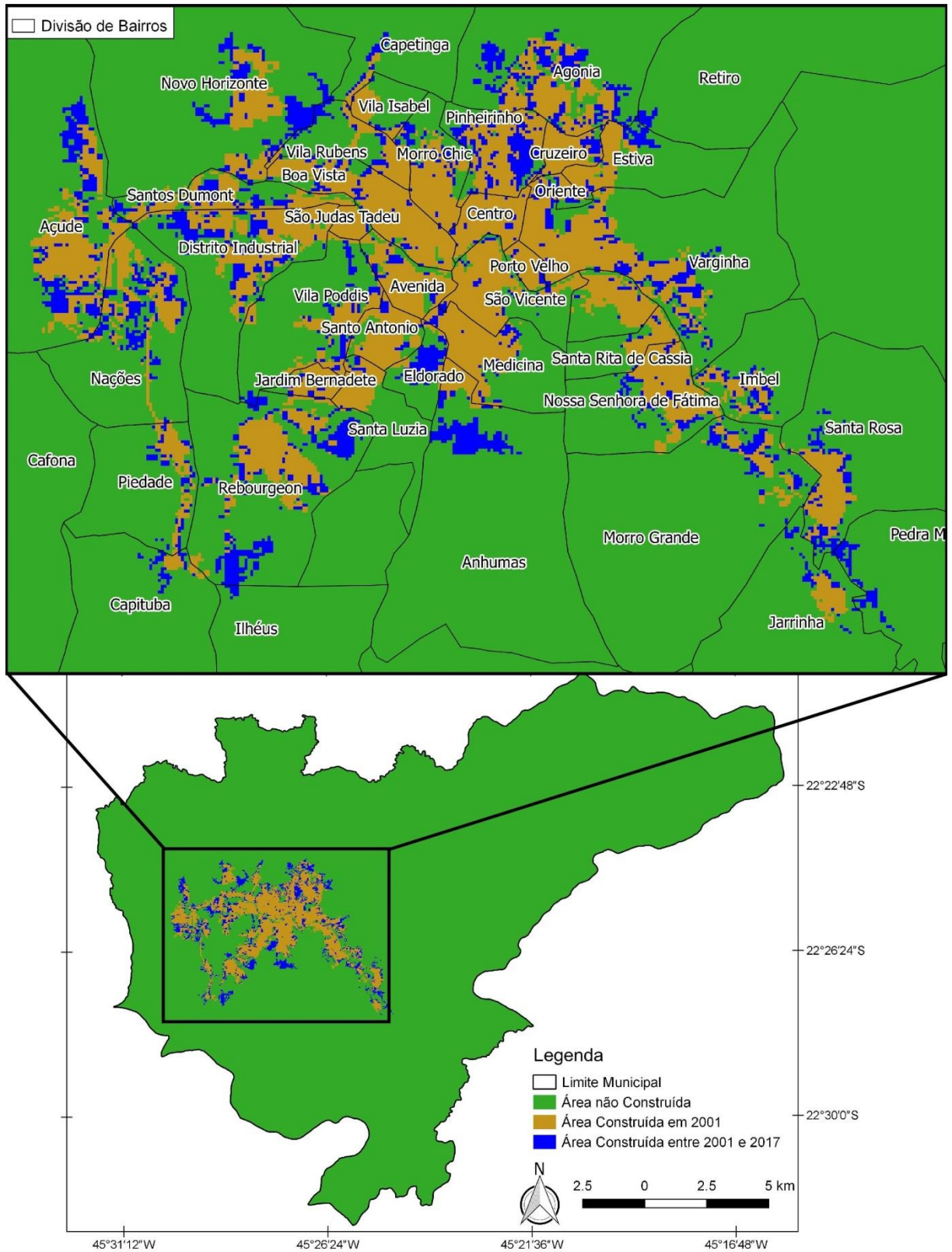


Figura 18: Crescimento da área construída de 2017 (real) com relação a 2001.

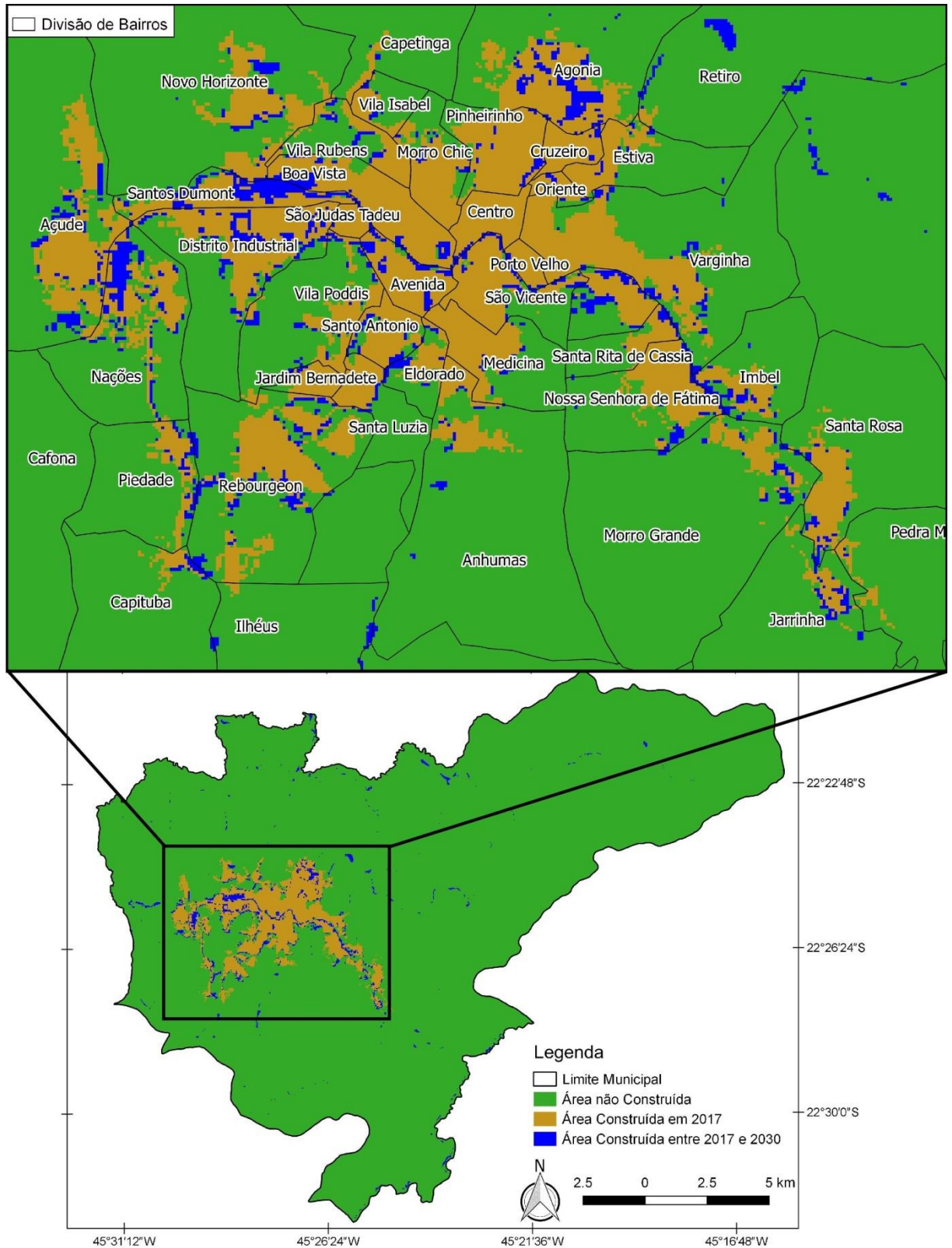


Figura 19: Crescimento da área construída de 2030 (projetado) com relação a 2017 (real).

Portanto, os mapas mostram o crescimento de área construída referente aos três períodos de estudo, sendo que sobre cada zoom são mostrados os bairros do município.

Analisando as figuras, é possível notar um acentuado crescimento por toda a região periférica da cidade ao longo de todos os períodos.

A Figura 17, assim como mostra a Tabela 5, foi o período que apresentou maior crescimento de área construída, sendo que o crescimento ocorre majoritariamente do tipo horizontal e ao redor de toda a área construída de 1986. Para o período, é possível notar o surgimento dos bairros Agonia, Açude, Novo Horizonte, Nações e Jarrinha, que, anteriormente a 1986, apresentavam pouca ou nenhuma área construída.

Na Figura 18, embora o crescimento tenha sido um pouco mais baixo, também é possível notar um forte crescimento horizontal. Destaca-se o crescimento considerável do bairro Açude, Novo Horizonte, Agonia, Pinheirinho, Rebourgeon, Distrito Industrial, Nações e Anhumas. Para o período entre 2001 e 2017, da Figura 18, ressalta-se o aumento em área construída na região do bairro Pinheirinho (área popularmente conhecida como BPS) como sendo o único crescimento central expressivo entre todos os períodos analisados.

Na Figura 19, nota-se que há previsão de crescimento também horizontal sobre os bairros próximos Açude, Nações, Piedade, Agonia, Retiro (área ao redor da prefeitura municipal), Rebourgeon, Santa Luzia, Jarrinha e Novo Horizonte. Ressalta-se que o modelo LCM projetou a ocorrência de urbanização sobre o Rio Sapucaí. Essa projeção ocorre na modelagem, pois locais mais planos e próximos às áreas já urbanizadas são potenciais áreas para a transição de área não construída para área construída. No entanto, devido à proteção ambiental exigida na legislação, espera-se que essa transição não ocorra na realidade.

Portanto, notou-se que dentre os bairros centrais, apenas a área do BPS, dentro do bairro Pinheirinho, apresentou crescimento expressivo ao longo dos anos. O crescimento de áreas construídas, em sua grande maioria, ocorreu sobre os bairros nas extremidades de Itajubá, tanto para os anos passados quanto para a projeção de 2030. Esse aumento periférico caracteriza a dinâmica de crescimento urbano sob a forma horizontal que, de acordo com estudos realizados em diversas cidades brasileiras, ocorre sob forte influência do mercado imobiliário e gera diversos impactos no ambiente e na sociedade (MARICATO, 2000; FARIAS, 2011; SOUZA, 2014).

Dessa forma, conhecendo a teoria da dinâmica típica de crescimento de cidades brasileiras, analisou-se o rendimento populacional dos bairros que apresentaram maior crescimento nos períodos de estudo, destacados nas Figuras 17, 18 e 19, com o intuito de

analisar se a realidade de crescimento do município de Itajubá também condiz com a exclusão social urbana mencionada na literatura.

Para a análise, exposta na Figura 20, foram utilizados o mapa dos bairros de Itajubá e o mapa de rendimento nominal mensal per capita por setor censitário realizado durante o Censo de 2010 (IBGE, 2010). A análise censitária apresentada elenca a quantidade populacional, por setor censitário, que no ano de 2010 possuía rendimento nominal de até 70 reais por mês, considerado então um valor que indica a renda baixa da população.

A Figura 20 permite constatar que as áreas centrais da cidade apresentam menor quantidade de habitantes com renda considerada baixa (menor que 70 reais ao mês). Dessa forma, constata-se que as áreas com maior população com renda de até 70 reais, se encontram nas áreas mais afastadas do centro, indicando a baixa renda da população periférica sobre Itajubá.

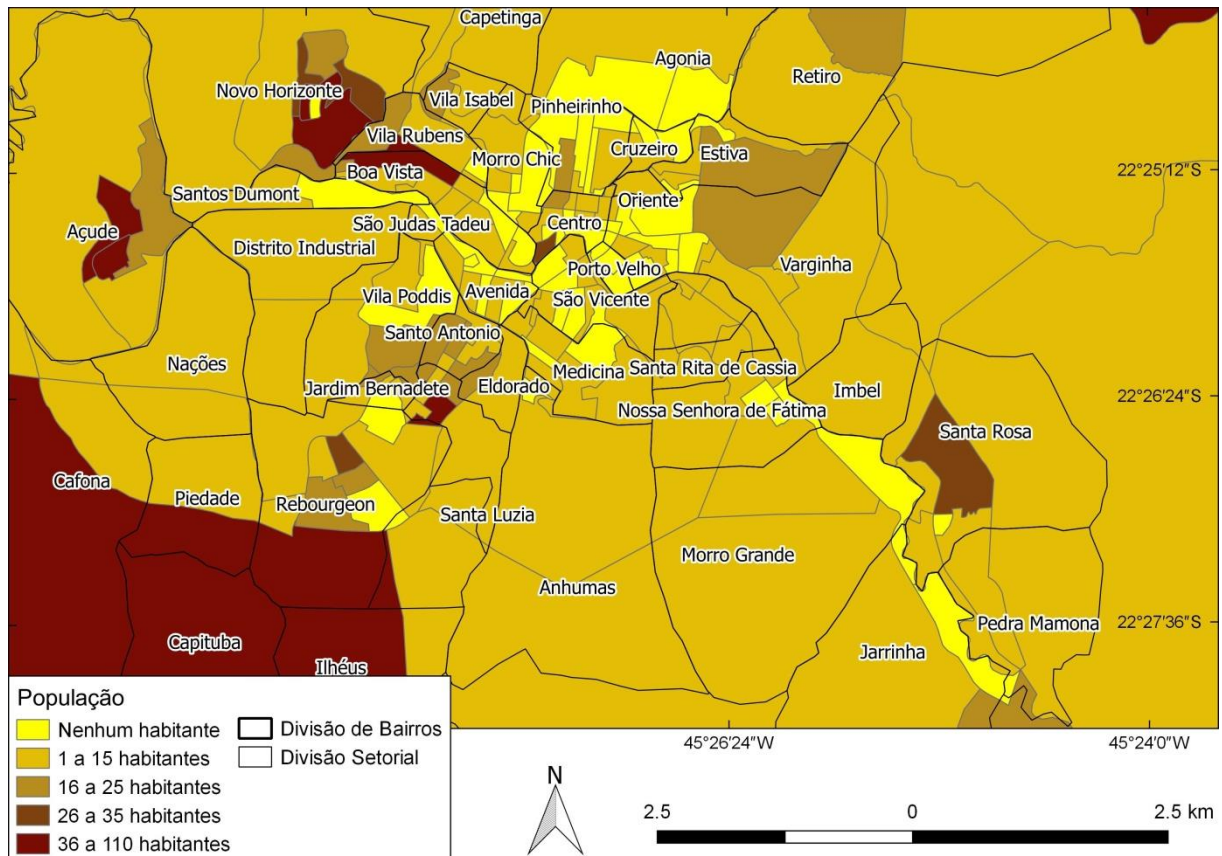


Figura 20: População residente em domicílios particulares permanentes, com rendimento nominal mensal domiciliar per capita de até 70 reais por setor censitário. Adaptado de IBGE (2010).

Destacam-se os bairros Açude, Agonia, Anhumas, Capetinga, Capituba, Distrito Industrial, Estiva, Jarrinha, Nações, Novo Horizonte, Piedade, Pinheirinho, Rebourgeon,

Santa Luzia, Santa Rosa, Vila Isabel e Vila Rubens, como sendo os bairros que mais apresentaram crescimento (histórico e/ou projetado).

Desses dezessete bairros destacados como sendo os de maior crescimento histórico e projetado, apenas dois bairros apresentam populações de renda mais alta, sendo estes os bairros Agonia e Pinheirinho.

O bairro Agonia apresenta um intenso crescimento durante os períodos de estudo e, ao contrário dos bairros anteriormente citados, apresenta poucos moradores de baixa renda, de acordo com o Censo 2010 (IBGE, 2010). Dessa forma, o bairro Agonia se destaca como um bairro periférico de exceção à regra por ser um bairro de padrão mais alto, bem como se constata através de suas construções, que são marcadas por casas de alto padrão, como pode ser visto na Figura 21. Ressalta-se que, no entanto que embora não esteja em uma região central, o bairro se encontra em uma região favorecida pela presença da Universidade Federal de Itajubá ao sul, e a presença da Prefeitura Municipal e Parque da Cidade a leste. Vale mencionar que, popularmente, no município, a área sudoeste da Agonia é conhecida também como bairro Pinheirinho.



Figura 21: Residências do bairro Agonia (área popularmente conhecida como Pinheirinho). Fonte: Google Street View (2011).

O único bairro central a apresentar crescimento expressivo foi o bairro Pinheirinho, na área sudeste, conhecido popularmente como BPS (que engloba as Ruas Coronel Francisco Braz, Silvestre Ferraz, Prof. Tigre Maia e Simão Mauad), e área noroeste do bairro (que engloba as ruas Francisco Masseli, São Judas Tadeu, Professor Souza Nilo e Mario Braz). De acordo com a análise do Censo (IBGE, 2010) sobre o bairro, nota-se que são poucos os setores censitários que apresentam habitantes de baixa renda. De acordo com as Figuras 22 e 23, é possível notar que grande parte do crescimento sobre a área sudeste do Pinheirinho cresceu em função da construção do condomínio de alto padrão Dr. João Luiz (Figura 22) e das casas, também de alto padrão da Rua Coronel Francisco Braz (Figura 23).

Ainda no Pinheirinho, é possível notar que, sobre a área noroeste, o crescimento também ocorre notoriamente através da construção de casas de padrão mais elevado. Essas construções podem ser visualizadas com as Figuras 24 e 25, que mostram casas sobre as Ruas Francisco Masseli e Professor Souza Nilo.

Esse tipo de crescimento comprova o discutido na literatura, mostrando a forte influência que o mercado imobiliário exerce sobre a ocupação na cidade.



Figura 22: Delimitação do Condomínio Dr. João Luiz. Fonte: Google Earth (2017).



Figura 23: Casas sobre a Rua Coronel Francisco Braz. Fonte: Google Street View (2011).

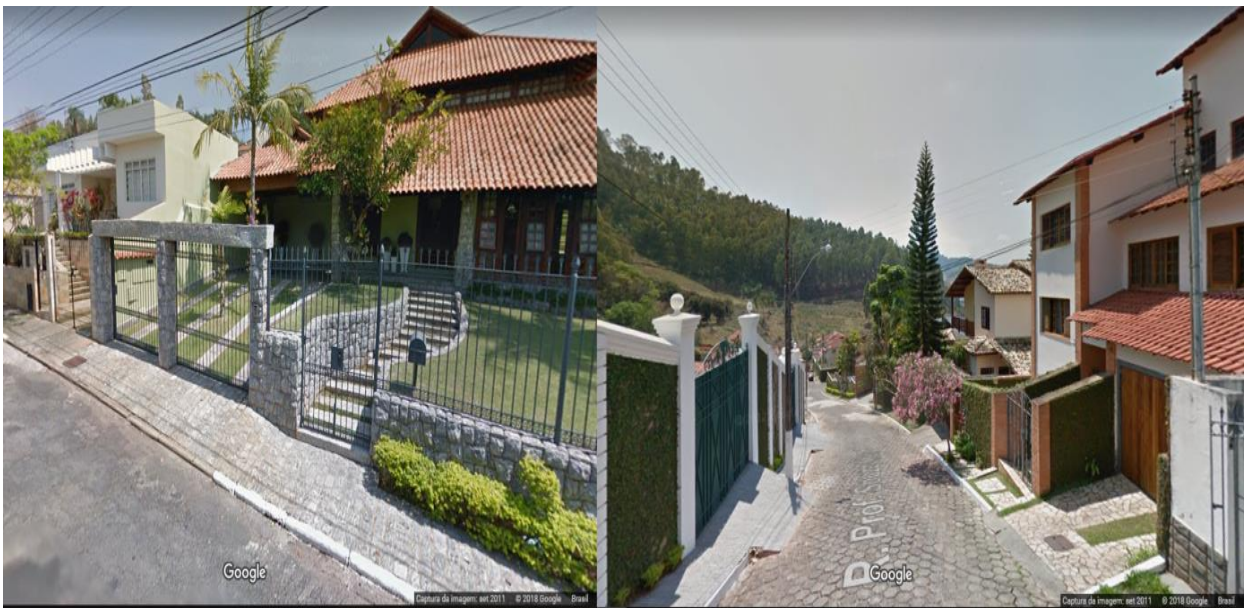


Figura 24: À direita, imagens da Rua Francisco Masseli, e à esquerda, imagens da Rua Professor Souza Nilo. Fonte: Google Street View (2011).

Portanto, ao analisar o comportamento da urbanização em Itajubá, é constatado o forte estímulo à ocupação periférica por pessoas de renda mais baixa, enquanto a ocupação de pessoas com renda mais alta é estimulada nas regiões centrais da cidade. Essa ocupação horizontal, como Maricato (2003) discute, pressiona as áreas rurais e acaba por incentivar que

cada vez mais áreas periféricas sejam ocupadas, assim como pode ser constatado na análise, já que todos os períodos se mostraram com forte horizontalização.

Locais menos valorizados no mercado imobiliário, e conseqüentemente mais acessíveis para as populações mais pobres, são normalmente áreas ambientalmente mais instáveis e comumente apresentam problemas de infraestrutura urbana, como más condições de saneamento (como o lançamento de esgoto a céu aberto), coleta de lixo falha e transporte coletivo e ativo deficientes (MARICATO, 2003; MENDONÇA; CUNHA; LUÍS, 2016). Embora existam poucos estudos específicos que comprovem essas deficiências para Itajubá, alguns dos bairros destacados no presente trabalho (por apresentarem alto crescimento e presença de populações de renda mais baixa) podem ser encontrados na literatura como sendo bairros mais suscetíveis à enchentes, deslizamentos de terra, e problemas infraestruturais (como lançamento de esgoto in natura ou em corpos hídricos, e problemas de mobilidade urbana) nos trabalhos de Ribeiro (2013), CPRM (2014), Oliveira, T, Oliveira, G. e Barbosa (2015) e Felix (2017).

Pode-se concluir, dessa forma, que o descaso do gerenciamento público, e a pouca seriedade no seguimento da legislação de uso e ocupação do solo, acaba por estimular a propagação das desigualdades sociais. Além disso, esse descaso aumenta os gastos públicos em função da constante necessidade de fornecer novas infraestruturas urbanas nas áreas periféricas que vão sendo ocupadas. Ressalta-se também que esse descaso acaba por gerar diversos problemas no meio ambiente, através de impactos ambientais e da exposição à vulnerabilidades que essas populações excluídas ficam submetidas.

Além da análise da projeção do crescimento para o ano de 2030, destaca-se a importância da análise do potencial de transição, apresentado pelo modelo LCM, como dado fundamental na estruturação preventiva de diretrizes para o planejamento urbano sustentável, já que permite o conhecimento das áreas que apresentam maior probabilidade de serem urbanizadas.

O potencial de transição, mostrado na Figura 25, é um cálculo realizado no LCM que analisa a probabilidade que os pixels da área analisada possuem de passar de área não construída para área construída, em função das imagens classificadas e mapas de transição inseridos no modelo. De acordo com a Figura 25, é possível visualizar as áreas que apresentam um grande potencial de transicionar de uma área não construída para uma área construída, sendo que em azul são expostas as áreas com potencial entre 50 e 70%, e em vermelho, encontram-se as áreas com potencial de transição maior que 70%. De acordo com a

modelagem realizada através do LCM, constata-se que áreas mais planas, mais próximas de áreas já construídas e próximas à rede de transporte são potenciais candidatas a passar pela transição de urbanização.

Portanto, com a Figura 25, é possível notar que há um forte potencial de urbanização, de mais de 70%, sobre as áreas em direção a cidade de Piranguinho, em direção a Piranguçu, em direção a Delfim Moreira e Wenceslau Braz, a Maria da Fé, na região da Prefeitura e na região do Aeroporto. Dessa forma, essas regiões destacam-se quanto à necessidade de atenção dos gestores públicos, para que diretrizes de urbanização ambientalmente sustentável possam pautar de forma preventiva o desenvolvimento dessas áreas.

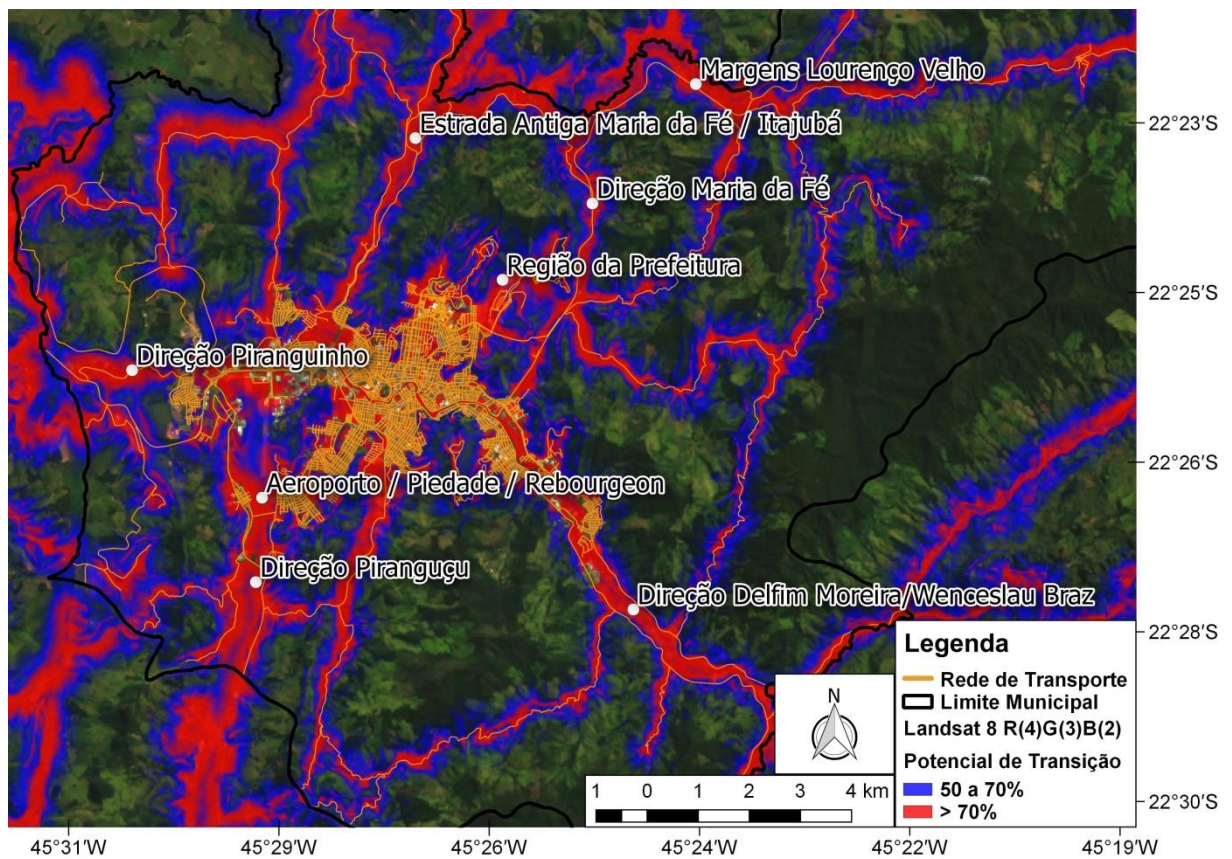


Figura 25: Potencial de Transição para as regiões de Itajubá.

5.3. Mapeamento da Aptidão à Urbanização Ambientalmente Sustentável

O presente capítulo aborda o modelo de análise de decisão multicritério aplicado neste trabalho para a priorização de áreas para a expansão urbana sustentável no município de Itajubá. Na primeira sessão do capítulo, discute-se como foi realizada a determinação dos

fatores analisados, contextualizando a literatura da qual foram embasados. Em seguida, discute-se sobre o método de atribuição de importância e a atribuição de pesos dos critérios. A terceira sessão deste capítulo consiste na aplicação do modelo, onde os critérios são medidos e normalizados. Na sessão final, ainda sobre a aplicação do modelo, os critérios são ponderados e combinados, de forma a definir as áreas de expansão, também se discute, de forma breve, sobre os resultados obtidos na modelagem.

5.3.1. Definição e hierarquia dos critérios

Os critérios foram definidos a partir da revisão da literatura. Com a revisão realizada, foram selecionados os fatores físicos que estão relacionados à sustentabilidade urbana. A definição desses fatores foi realizada visando a minimização de impactos ambientais associados à expansão urbana e também a manutenção de condições ambientais saudáveis dentro da cidade.

Os trabalhos utilizados para a definição dos fatores foram os trabalhos de: Pivo (1996), que define os conceitos de uma cidade sustentável baseando-se no crescimento da região de *Mainstreet Cascadia* (Canadá/Estados Unidos); Montañó (2005), que estuda a alocação de áreas aptas à expansão urbana baseando-se em uma análise física e de capacidade do solo sobre a cidade de São Carlos (SP); nas leis que regem o parcelamento do solo (Lei Federal 6.766/1979, Lei Municipal 1.774/ 1991); no Plano Diretor do município de Itajubá (Lei Complementar 008/2003) que além de prover informações sobre o parcelamento do solo para fins urbanos, define também o Zoneamento do Uso e Ocupação do solo sobre a cidade; e no Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012) que trata das Áreas de Preservação Permanente (APP).

Dessa forma, é resumido no Quadro 1, o conteúdo acerca da sustentabilidade urbana abordado na literatura e nas leis que serão englobados neste trabalho. Ressalta-se que, nas leis utilizadas, existem ressalvas para a permissão da edificação sobre as áreas abordadas no quadro. No entanto, como busca-se realizar um estudo embasado puramente na sustentabilidade, de modo a evitar ao máximo os impactos ambientais, essas ressalvas não serão consideradas.

Quadro 1: Revisão da literatura para a definição dos critérios.

| Trabalho Base | Definição de urbanização ambientalmente sustentável |
|---|---|
| Pivo (1996) | Pivo, como exposto na Revisão Bibliográfica, item 3.2 deste trabalho, define cidades sustentáveis a partir de seis princípios básicos (cidades densas, completas, conservadas, confortáveis, coordenadas e colaborativas). Para atingir a sustentabilidade urbana, o autor aponta a importância de estimular o transporte coletivo, a mobilidade de pedestres e bicicletas, a manutenção de áreas protegidas, e a identificação de locais aptos ao adensamento urbano. |
| Montaño (2005) | Montaño aponta que a sustentabilidade urbana é concretizada quando a expansão ocorre sobre áreas pedologia e declividade necessárias para evitar a desestabilização do solo. O autor aponta também a necessidade da preservação dos recursos hídricos na expansão sustentável, de modo a evitar que águas superficiais e subterrâneas sejam contaminadas com a poluição oriunda do processo de urbanização. |
| Lei Federal 6.766/1979 - Parcelamento do Solo Urbano | Ao tratar do parcelamento do solo, a lei indica que não é apropriado o parcelamento de áreas: a) terrenos alagadiços e sujeitos a inundação; b) sobre locais aterrados com materiais nocivos à saúde; c) sobre declividades maiores que 30%; d) sobre terrenos com condições geológicas impróprias; e) sobre áreas de preservação. Define como área não edificante às margens de 30 metros ao redor do Sapucaí, e 15 metros ao redor dos outros rios. |
| Lei Municipal 1.774/1991 - Parcelamento do Solo Urbano | Não permite o parcelamento do solo em: a) terrenos alagadiços e/ou sujeitos à inundação; b) terrenos que tenham sido aterrados com material nocivo à saúde pública; c) terrenos com declividade média superior a 45%; d) terrenos onde as condições geológicas não aconselham a edificação; e) em áreas de interesse especial definidas por Lei Municipal, tais como: áreas de preservação de recursos naturais ou paisagísticos; f) no topo dos morros, montes, montanhas e serras destinados à preservação de matas naturais; g) em terrenos onde a poluição impeça condições mínimas de assentamento. |
| Lei Complementar Municipal 008/2003 - Plano Diretor | Define as Áreas de Interesse Ambiental (AIA), que são destinadas a proteção de recursos naturais ou paisagísticos. As AIA compreendem seis categorias que englobam APP, tratamento de margens de rios, conservação de praças e jardins públicos, locais de lazer, conservação da cobertura vegetal, e a delimitação do Horto Florestal. Define que as Zonas de Expansão Urbana (ZEU) não deverão ocupar os limites entre as cotas de 845 metros, no mínimo, e 950 metros, no máximo, para que sejam protegidas as várzeas e os topos. Não permite o parcelamento do solo em áreas: a) alagadiças ou sujeitas à inundação; b) alagadiças ou contínuas a mananciais, cursos d'água, represas e demais recursos hídricos; c) necessárias à preservação ambiental, como as áreas de cobertura vegetal significativa, topos dos morros e matas ciliares, à defesa do interesse cultural e/ou paisagístico, como as Áreas de AIA, definidas pelo zoneamento; d) necessárias à implantação de planos, programas e projetos essenciais ao desenvolvimento do município; e) sem condições de acesso e/ou atendimento por infraestrutura básica adequada; f) cujas condições geológicas e hidrológicas não aconselhem a edificação; g) cuja declividade natural seja igual ou superior a 30%; h) que tenham sido aterradas com material nocivo à saúde pública; i) que apresentem condições sanitárias inadequadas devido à poluição. |
| Lei Federal 12.651/2012 - Código Florestal | Define as Áreas de Preservação Permanente (APP), como “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”. |

É possível notar a sobreposição de ideias e definições acerca da sustentabilidade em cada trabalho. Por exemplo, ao passo que Pivo (1996) aponta a necessidade da preservação de áreas protegidas, é o Plano Diretor que define quais são essas áreas. Por esse motivo, para realizar a definição de cada critério, os trabalhos foram sobrepostos de modo a extrair de cada um deles os fatores que mais contribuem para a urbanização ambientalmente sustentável.

Além disso, as leis utilizadas muitas vezes abordam um conteúdo similar, mas com diferentes níveis de restrição. Para realização de um trabalho objetivo e que leve em condição a segurança jurídica, valorizou-se as leis mais restritivas na definição dos critérios.

Com o estudo da literatura realizado, os conceitos de sustentabilidade urbana foram trabalhados de modo a agrupá-los em um determinado número de critérios. Esse processo de geração dos critérios foi realizado de acordo com o proposto por Malczewski e Rinner (2015). Os autores defendem que, para a realização de uma análise sólida e consistente, os critérios devem ser suficientemente abrangentes, operacionais, mínimos (o menor número de critérios possível) e divisíveis (habilidade de se decompor em menores critérios).

Os critérios gerados são dispostos no Quadro 2, onde são brevemente descritos e têm sua escala de valorização para a sustentabilidade explicada.

Quadro 2: Descrição dos critérios utilizados.

| Crítérios | Descrição | Escala de Sustentabilidade |
|---------------------------------|--|--|
| Acesso ao Transporte Coletivo | Mapeia, através da análise das distâncias necessárias para ter acesso aos pontos de ônibus, a acessibilidade ao transporte público. | Áreas mais próximas são mais valorizadas para a urbanização. |
| Áreas Adensáveis | Engloba as áreas urbanas passivas de adensamento de acordo com o Plano Diretor. | Áreas adensáveis são mais valorizadas para a urbanização. |
| Acesso ao Transporte Ativo | Mapeia, através da análise das distâncias necessárias para ter acesso a calçadas, a acessibilidade ao transporte não motorizado, como o de pedestres e de bicicletas. | Áreas mais próximas de calçadas são mais valorizadas para a urbanização. |
| Altitude | Identifica as áreas de altitude adequada, de acordo com a legislação, para receber ocupações urbanas. | Áreas com altitudes permitidas na lei são mais valorizadas para a urbanização. |
| Capacidade de Uso do Solo | Descreve a capacidade de utilização do solo com embasamento nas características pedológicas e topográficas da cidade. | Áreas com solos de capacidade mais alta são mais valorizadas para a urbanização. |
| Áreas Alagáveis | Locais sujeitos a ocorrência de inundação. | Áreas inundáveis são menos valorizadas para a urbanização. |
| Áreas de Aterro Sanitário | Áreas onde materiais nocivos já tenham sido aterrados. | Áreas aterradas com materiais nocivos são menos valorizadas para a urbanização. |
| Uso do Solo | É definido pelo uso e cobertura do solo, definidos na etapa de classificação de imagens como “área construída”, “água”, “pastagem”, “vegetação de dossel fechado” e “solo exposto”. | Áreas de vegetação de dossel fechado e água são menos valorizadas para a urbanização. Pastagens e solo exposto são mediamente valorizados, e áreas construídas são muito valorizadas. |
| Áreas Protegidas | Engloba as áreas de proteção da cidade. São delimitadas as Áreas de Preservação Permanente (APP – de margem e de nascente), as áreas de AIA, delimitadas no Plano Diretor, e as Unidades de Conservação (Reserva Biológica da Serra dos Toledos e APA Serra da Mantiqueira) delimitadas de acordo com o SNUC (BRASIL, 2000). | Áreas mais próximas às áreas de proteção são menos valorizadas para a urbanização. |
| Proteção das Águas Subterrâneas | Define, com base na permeabilidade e profundidade dos solos, a vulnerabilidade que estes apresentam quanto à contaminação subterrânea. | Áreas com maior vulnerabilidade são menos valorizadas para a urbanização. |

Com os critérios definidos, foi realizada a hierarquia de operação através do Processo Analítico Hierárquico (AHP), disposto na Figura 26. Na hierarquia, os critérios são agrupados por afinidade em níveis diferentes de importância.

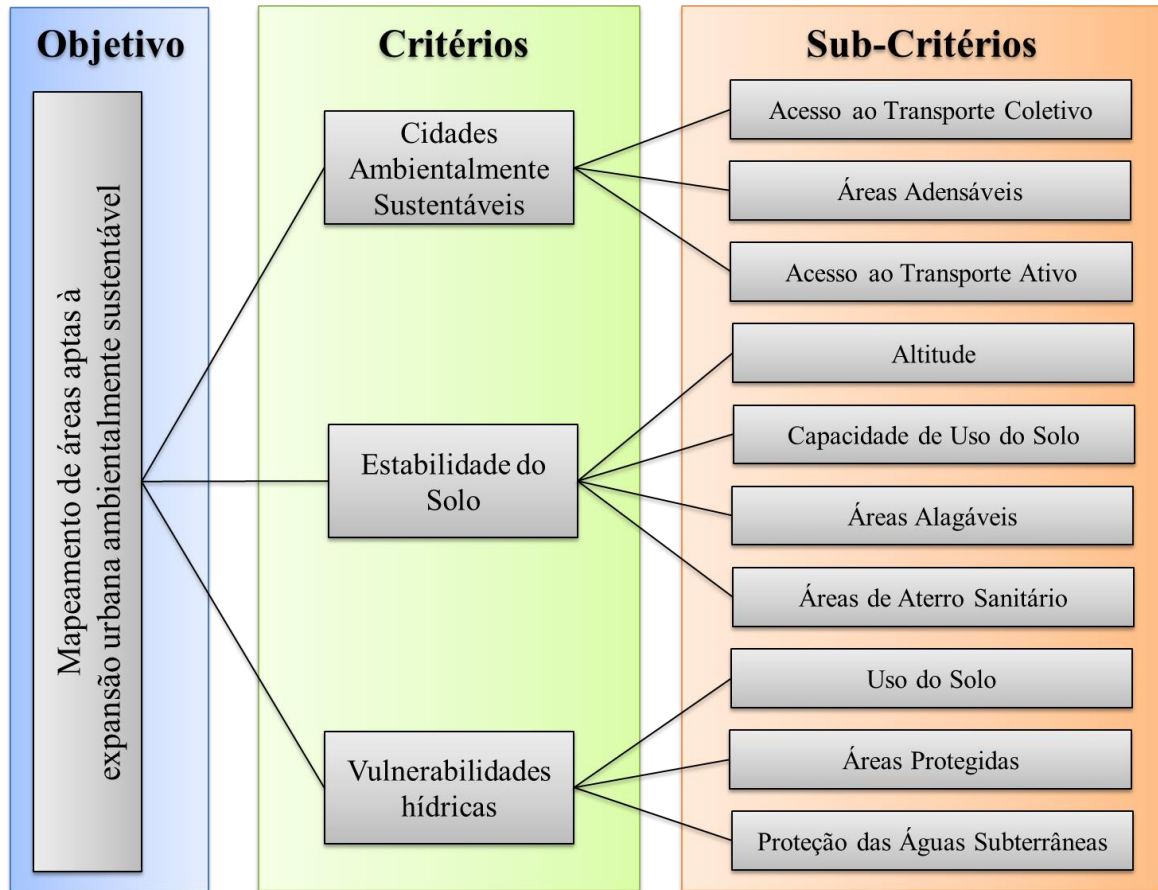


Figura 26: Hierarquia AHP para a priorização de áreas para a urbanização ambientalmente sustentável.

5.3.2. Ponderação dos critérios

A ponderação dos critérios foi realizada através da atribuição de importâncias na matriz par a par no método AHP. O método, descrito no item 3.5, tem como objetivo tornar comparações complexas de inúmeros critérios em uma comparação mais simples, já que permite que a comparação seja feita de forma par a par. As matrizes de comparação foram entregues para especialistas das áreas de: pedologia, engenharia civil, engenharia ambiental, direito e meio ambiente. Os especialistas consistiam de mestrandos, doutorandos e professores. A análise perante o ponto de vista de cada profissional é essencial para que o estudo não seja tendencioso.

As matrizes entregues para avaliação continham uma explicação detalhada de cada critério, bem como a indicação de como cada critério seria utilizado. Além disso, junto à

planilha, cada especialista recebeu a instrução de como realizar o preenchimento das matrizes, sendo dado enfoque à necessidade de que o grau de consistência estivesse dentro do valor permitido pelo método.

Um exemplo da matriz par a par entregue para os especialistas pode ser vista na Figura 27, onde ilustra-se a aplicação do método para a atribuição de importância aos subcritérios do critério “cidade sustentável”. Foi elaborada uma matriz para cada conjunto de critérios, ou seja, todos os subcritérios de cada critério foram analisados no método par a par, sendo que, na última avaliação, realiza-se a comparação entre todos os critérios.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | |
|----|---|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Qual é a importância relativa dos critérios abaixo para a | | | | | | | | |
| 2 | priorização de áreas para a expansão urbana? | | | | | | | | |
| 3 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| 4 | Extremamente menos importante | Bastante menos importante | Muito menos importante | Pouco menos importante | Igual importância | Pouco mais importante | Muito importante | Bastante mais importante | Extremamente mais importante |
| 5 | Valores 2, 4, 6 ou 8: Valores intermediários. | | | | | | | | |
| 6 | Somente os campos em rosa devem ser preenchidos | | | | | | | | |
| 7 | | Acesso ao Transporte Coletivo | Áreas Adensáveis | Acesso ao Transporte Ativo | | | | | |
| 8 | Acesso ao Transporte Coletivo | 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 9 | Áreas Adensáveis | 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 10 | Acesso ao Transporte Ativo | 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | |
| 22 | Grau de Consistência da Avaliação | | | | 0 Julgamentos Consistentes | | | | |
| 23 | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | |

Mede a acessibilidade à mobilidade de pedestres e bicicletas

São priorizadas as áreas mais próximas à calçadas.

Figura 27: Matriz de comparação par a par.

A análise de cada especialista gerou um peso resultante da atribuição de importância para cada critério. Esses pesos foram reunidos de forma a obter o peso médio final referente a cada critério a ser utilizado no modelo.

Com a hierarquia elaborada e os pesos atribuídos, chegou-se a Figura 28, onde se encontra a estruturação final do modelo de mapeamento de áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável dentro do município de Itajubá.

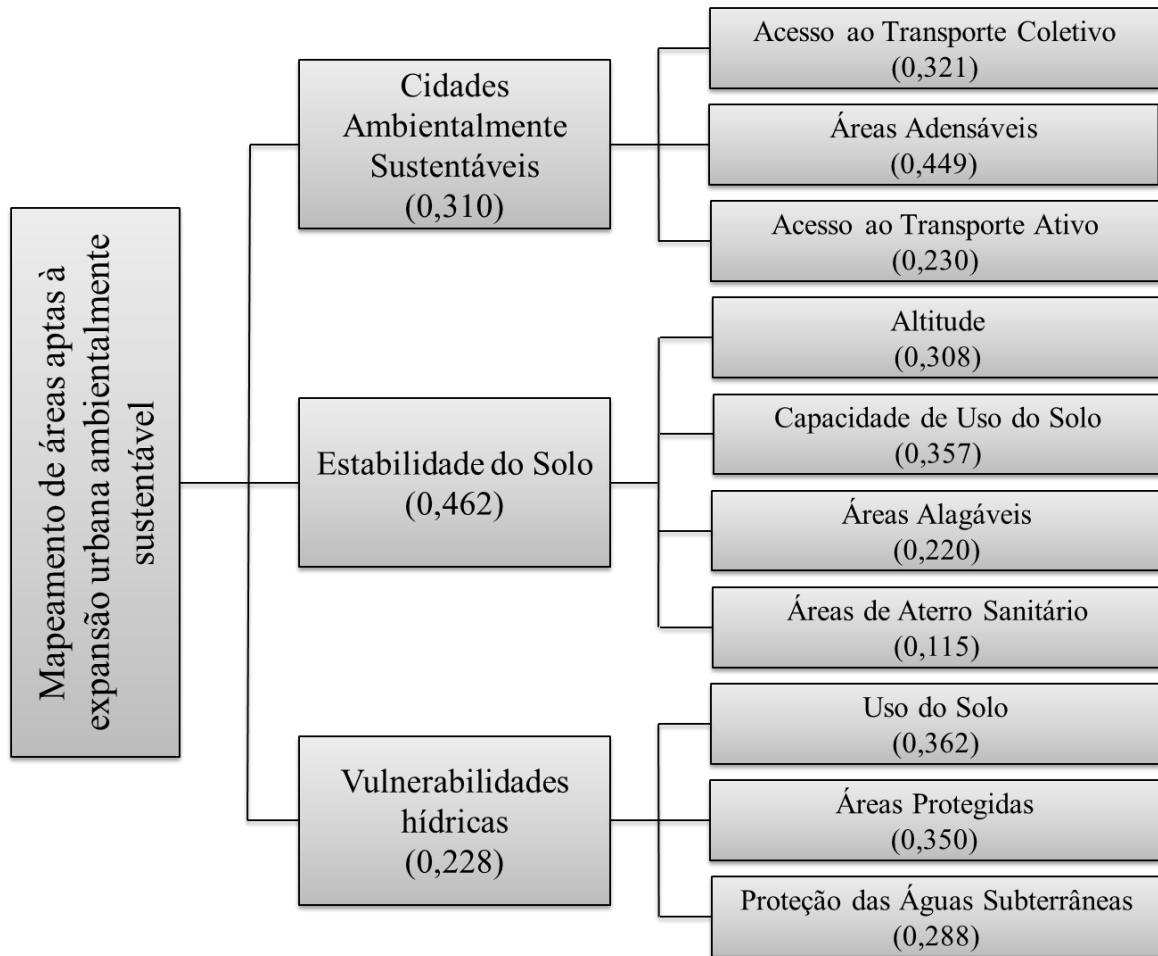


Figura 28: Modelo de mapeamento de áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável.

5.3.3. Aplicação do modelo de mapeamento

O mapeamento da aptidão à expansão foi realizado sobre cada critério em, basicamente, dois passos. Primeiramente foram delimitadas as áreas de interesse para cada critério de modo a medir a aptidão da urbanização em função de cada critério. Em seguida, cada medição foi normalizada para permitir a agregação de todos os critérios e o mapeamento final das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável.

5.3.3.1. Acesso ao transporte coletivo

De acordo com Pivo (1996), o transporte coletivo é vital para que a cidade possa se tornar mais sustentável. Segundo o autor, o fácil acesso a esse meio de transporte permite que as cidades dependam menos de veículos automotores individuais, diminuindo as emissões de efluentes gasosos. Além disso, o autor aponta que as cidades com alta acessibilidade ao transporte coletivo são estimuladas a se tornar mais completas, confortáveis e coordenadas.

Para avaliar o subcritério “acesso ao transporte coletivo”, utilizou-se como referência a acessibilidade ao transporte por ônibus em Itajubá. Para medir a acessibilidade, foram utilizados os 340 pontos de ônibus existentes na cidade, sendo que os dados dos pontos de ônibus foram coletados do Grupo de Pesquisa LOGTRANS – UNIFEI, no ano de 2015.

Para realizar a medição, foi calculado o Mapa de Distância Euclidiana sobre os pontos de ônibus, através da ferramenta *Euclidian Distance* no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A distância euclidiana permite que seja realizado o cálculo da menor distância que cada pixel na área possui com relação a cada ponto de ônibus existente. O mapa de distância euclidiana foi reclassificado, de acordo com a Figura 29, de modo a valorizar, assim como aponta Felix (2017), como áreas mais aptas à urbanização ambientalmente sustentável, as distâncias mais próximas e desvalorizar as maiores distâncias.

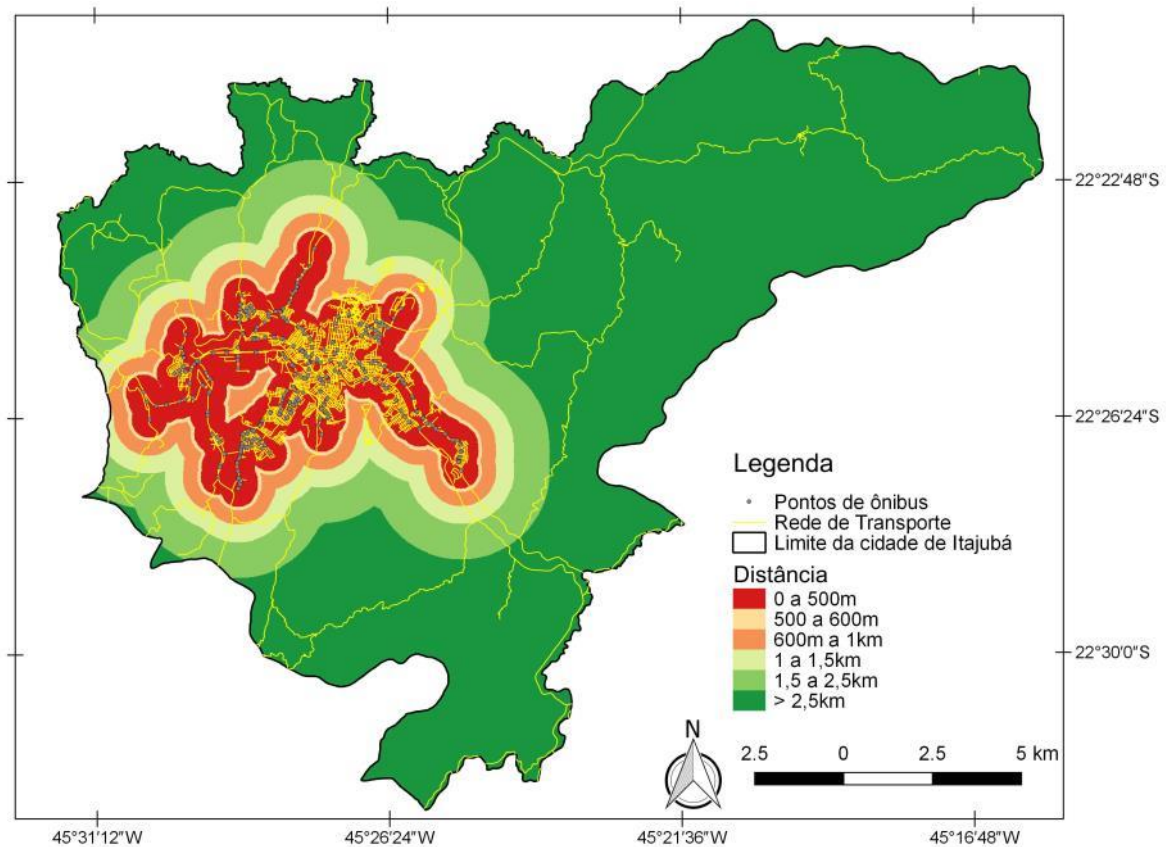


Figura 29: Mapa da distância euclidiana com relação aos pontos de ônibus.

Com a carta da Figura 29, foi realizada a normalização dessas distâncias a fim de padronizar a escala de medição. A normalização, disposta na Figura 30, foi realizada com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy linear* que padroniza uma escala de 0 a 1 para as distâncias, onde os valores mais próximos de 0 são as menores distâncias, portanto, apresentando maior aptidão

para a urbanização, e os valores próximos de 1 são as maiores distâncias, apresentando, portanto, menor aptidão para a urbanização.

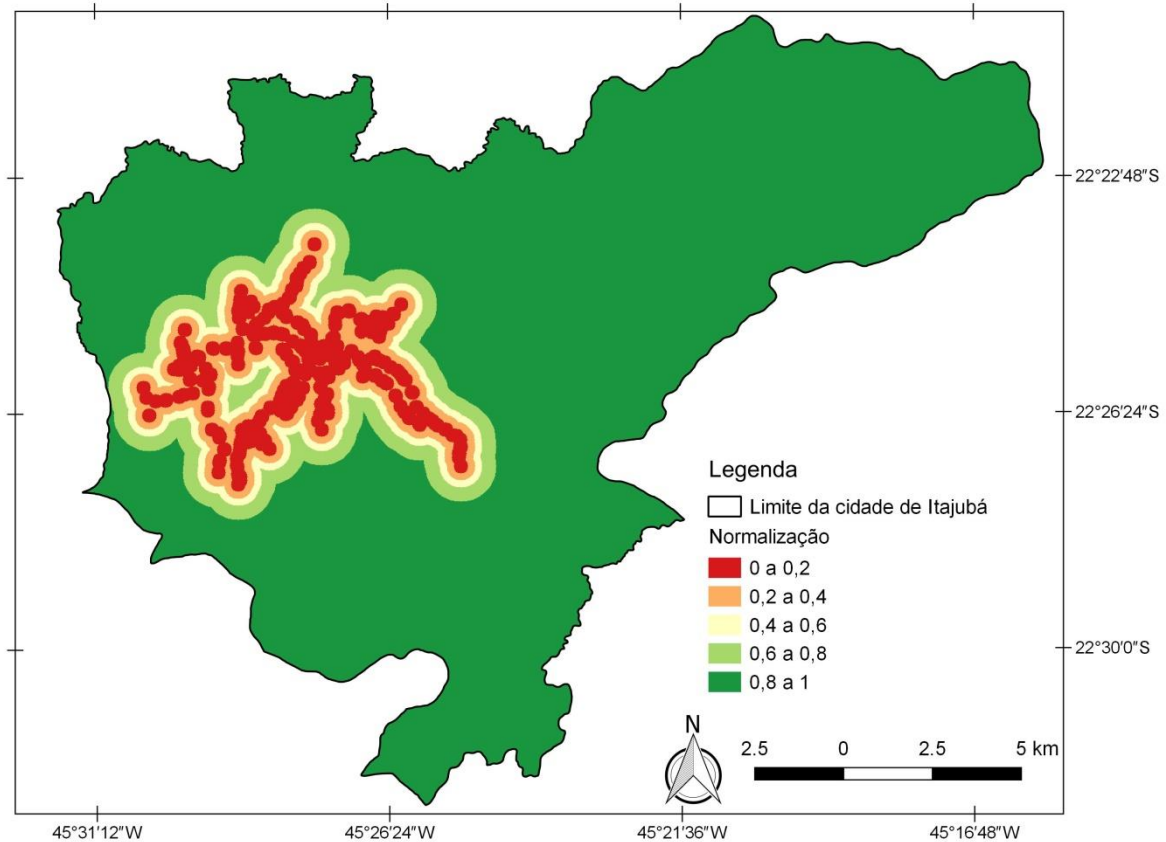


Figura 30: Mapa das distâncias normalizadas na escala *fuzzy*.

5.3.3.2. Áreas adensáveis

A análise das áreas adensáveis foi realizada a partir do estudo de Pivo (1996) que define que cidades mais densas são capazes de ofertar infraestruturas urbanas mais baratas e mais completas, além de diminuir o potencial de crescimento horizontal dos centros urbanos. Como explica o autor, as áreas mais densas são capazes de oferecer mais diversidade de serviços e lazer, de modo que são diminuídos os impactos ambientais em função do estímulo ao transporte ativo e às pressões da expansão horizontal. Através das diretrizes de adensamento propostas pelo Plano Diretor (ITAJUBÁ, 2003), as áreas adensáveis visam o aumento da densidade populacional através de construções verticalizadas de forma controlada sobre áreas que já possuam infraestrutura urbana como eletricidade, saneamento e estrutura viária.

Para analisar o “adensamento” da cidade, utilizou-se o Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo, disponível no Plano Diretor do município de Itajubá. De acordo com o Zoneamento da cidade, as áreas urbanas destinadas para projetos de adensamento urbano são denominadas como ZAD.

O Zoneamento de Itajubá pode ser visto na Figura 31, onde as áreas azuis representam o zoneamento de forma geral, e as áreas em vermelho são as áreas denominadas de ZAD.

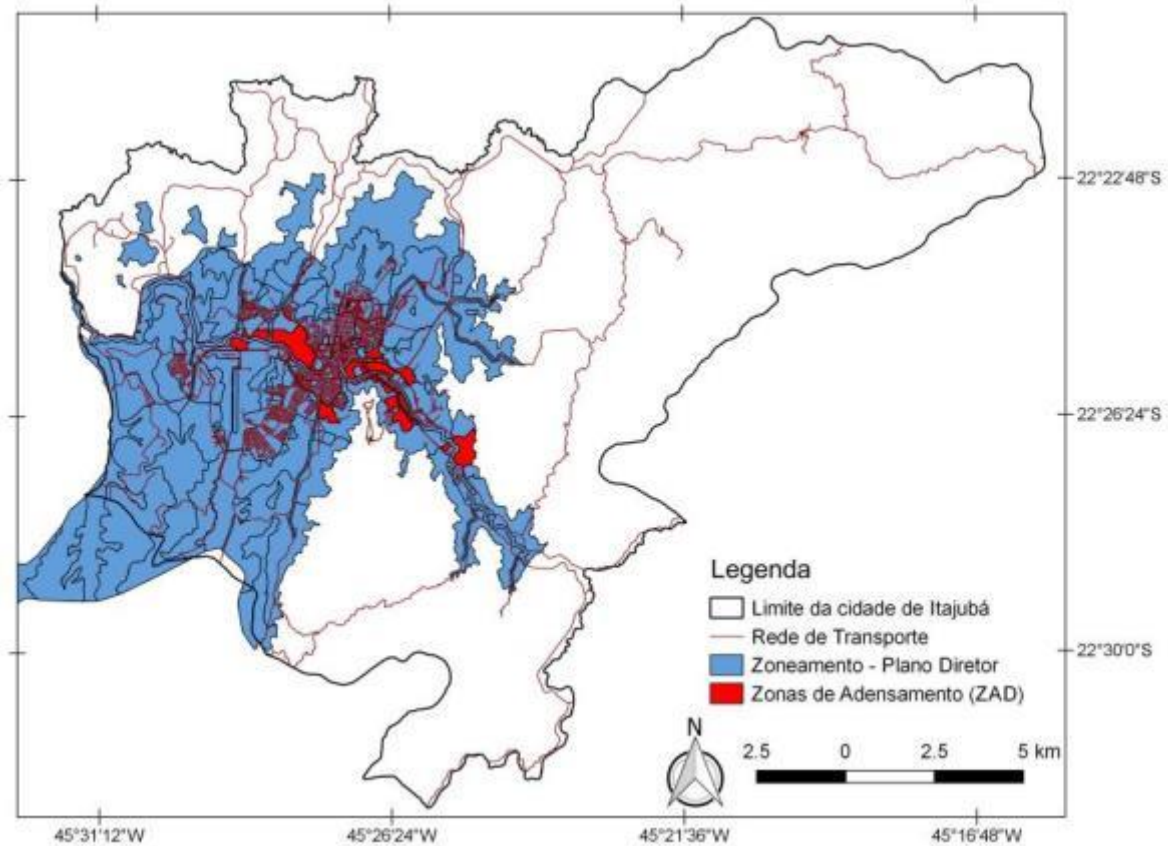


Figura 31: Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo de Itajubá, com enfoque para as áreas adensáveis.

Com as áreas adensáveis definidas, foi realizada a normalização da escala de valores, disposta na Figura 32. A normalização foi realizada com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS. A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy* linear que padroniza uma escala de 0 a 1 para o mapa, onde os valores 0 representam as áreas adensáveis e, portanto, aptas a urbanização, e os valores 1 representam as áreas não adensáveis, representando, portanto, áreas não aptas a urbanização.

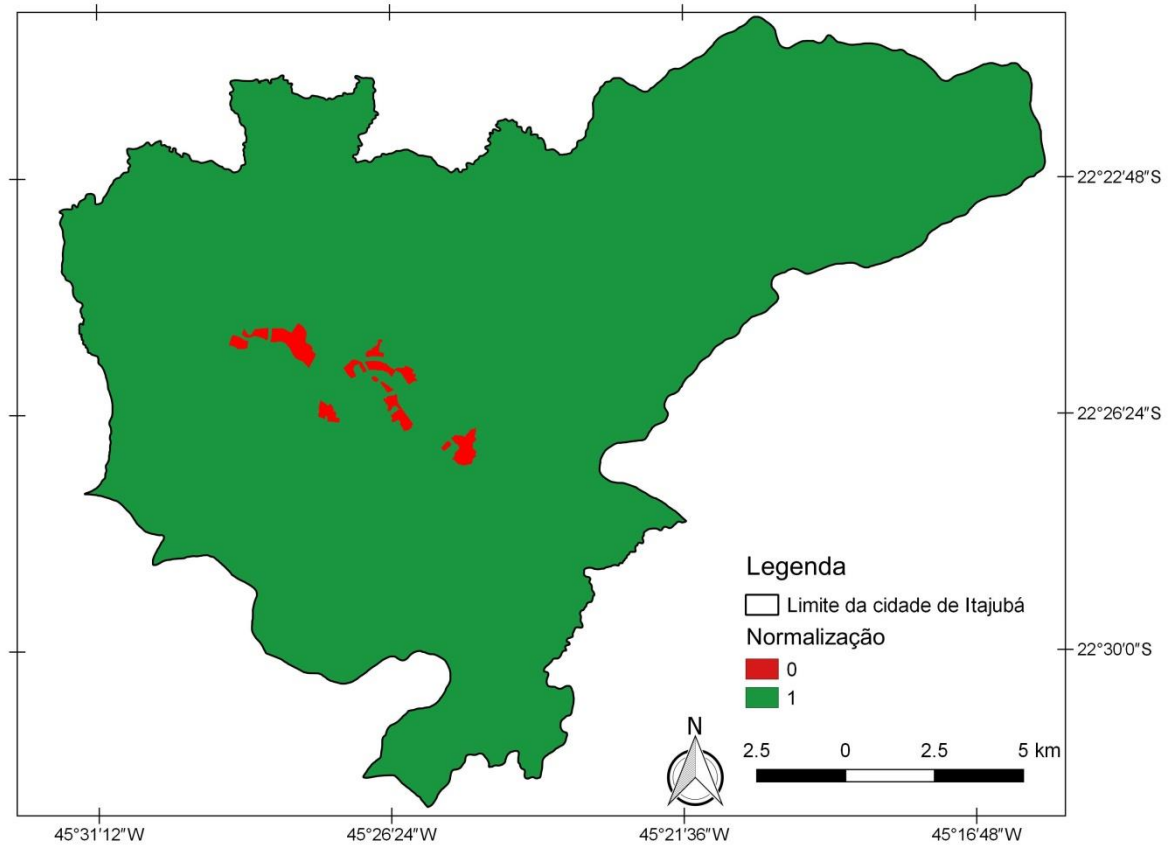


Figura 32: Mapa de áreas adensáveis normalizada na escala *fuzzy*.

5.3.3.3. Acesso ao transporte ativo

O transporte ativo, como aponta Felix (2017), caracteriza-se como a mobilidade através de veículos não motorizados, como por exemplo, a mobilidade de pedestres (transporte a pé) e de bicicletas. A análise do acesso ao transporte ativo foi realizada a partir do estudo de Pivo (1996) que define que cidades confortáveis são capazes de ofertar um ambiente de livre acesso para pessoas que estão a pé ou que sejam usuárias de bicicletas. Além disso, o autor aponta também, a potencial diminuição de efluentes gasosos em função da utilização do transporte ativo.

Para avaliar o subcritério “acesso ao transporte ativo”, utilizou-se como referência a acessibilidade à utilização das calçadas em Itajubá. Para medir a acessibilidade, foram utilizadas as calçadas mapeadas pelo projeto *OpenStreetMap*.

Para realizar a medição, foi calculado o Mapa de Distância Euclidiana sobre as calçadas do município. A distância euclidiana permite que seja realizado o cálculo da menor distância que cada pixel na área possui com relação a cada calçada existente. O mapa de distância euclidiana foi reclassificado, de acordo com a Figura 33, de modo a valorizar, assim como

aponta Felix (2017), de modo a valorizar como áreas mais aptas à urbanização ambientalmente sustentável, as áreas mais próximas, e desvalorizar as maiores distâncias.

Com a carta da Figura 33 foi realizada a normalização das distâncias, a fim de padronizar a escala de medição. A normalização, disposta na Figura 34, foi realizada com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy linear* que padroniza uma escala de 0 a 1 para as distâncias, onde os valores mais próximos de 0 são as menores distâncias, portanto apresentando maior aptidão para a urbanização, e os valores próximos de 1 são as maiores distâncias, apresentando, portanto, menor aptidão para a urbanização.

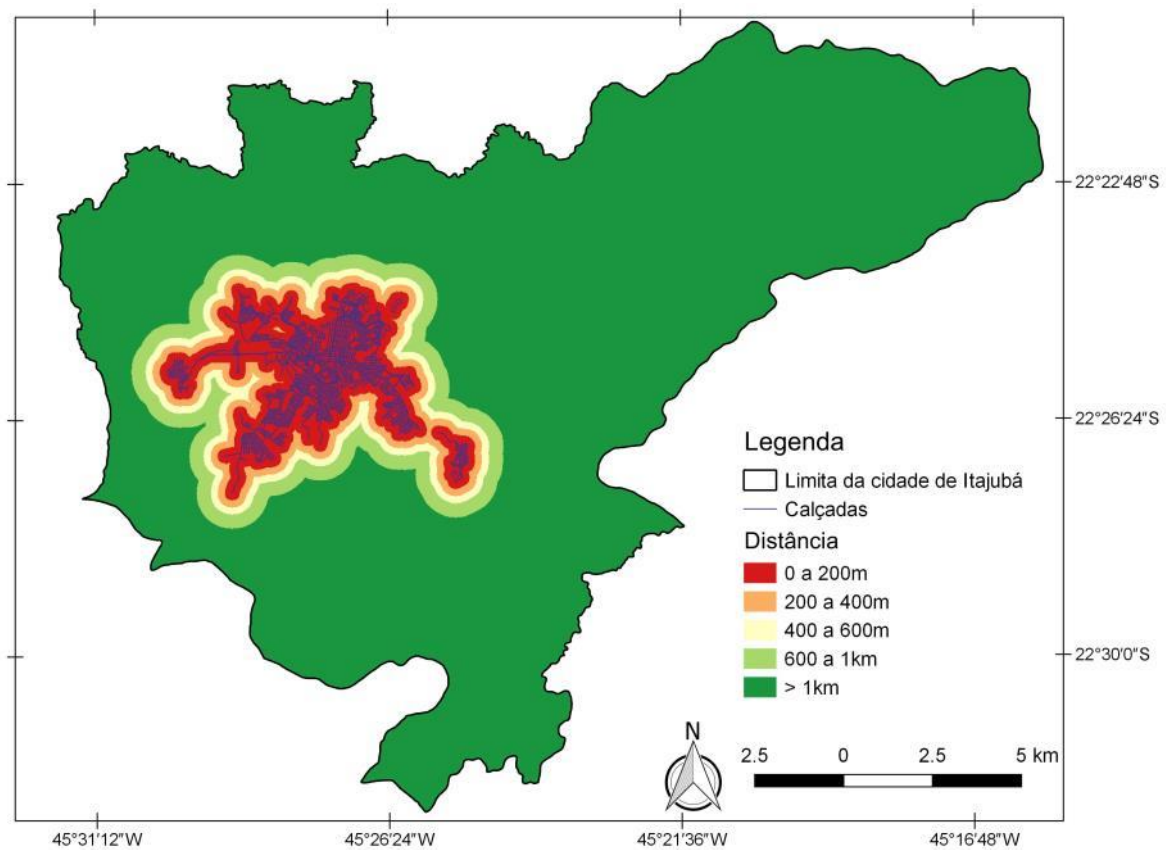


Figura 33: Mapa da distância euclidiana com relação às calçadas.

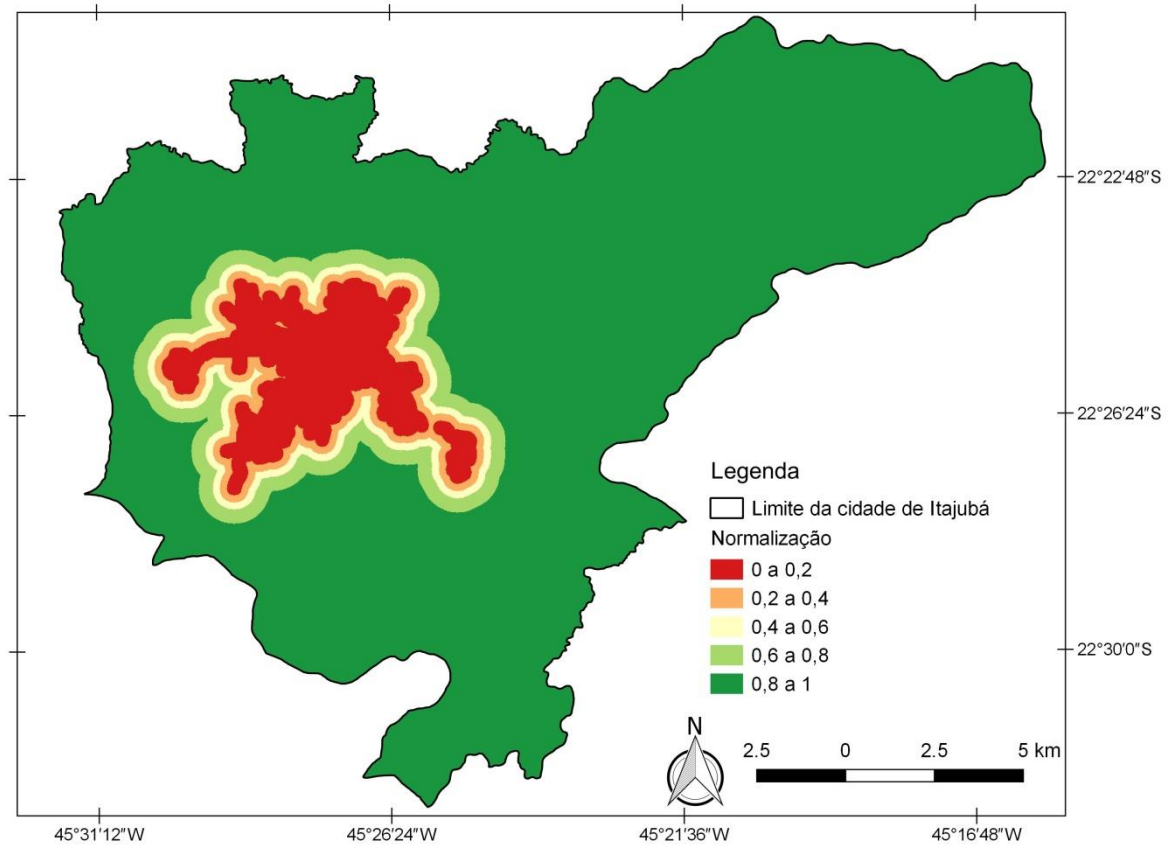


Figura 34: Mapa das distâncias normalizado na escala *fuzzy*.

5.3.3.4. Altitude

O subcritério “altitude” foi determinado em função do estabelecido pelo Plano Diretor do Município de Itajubá (Lei Complementar 008/2003). De acordo com o Plano, as zonas destinadas para expansão urbana (denominadas como ZEU no Plano Diretor), devem estar entre as altitudes de 845 e 950 metros, com a finalidade de preservar e proteger as áreas de várzea e as áreas de topo de morro.

Para realizar a medição deste subcritério, a carta de altitudes foi reclassificada de acordo com as faixas de altitude de interesse, de acordo com o mostrado na Figura 35.

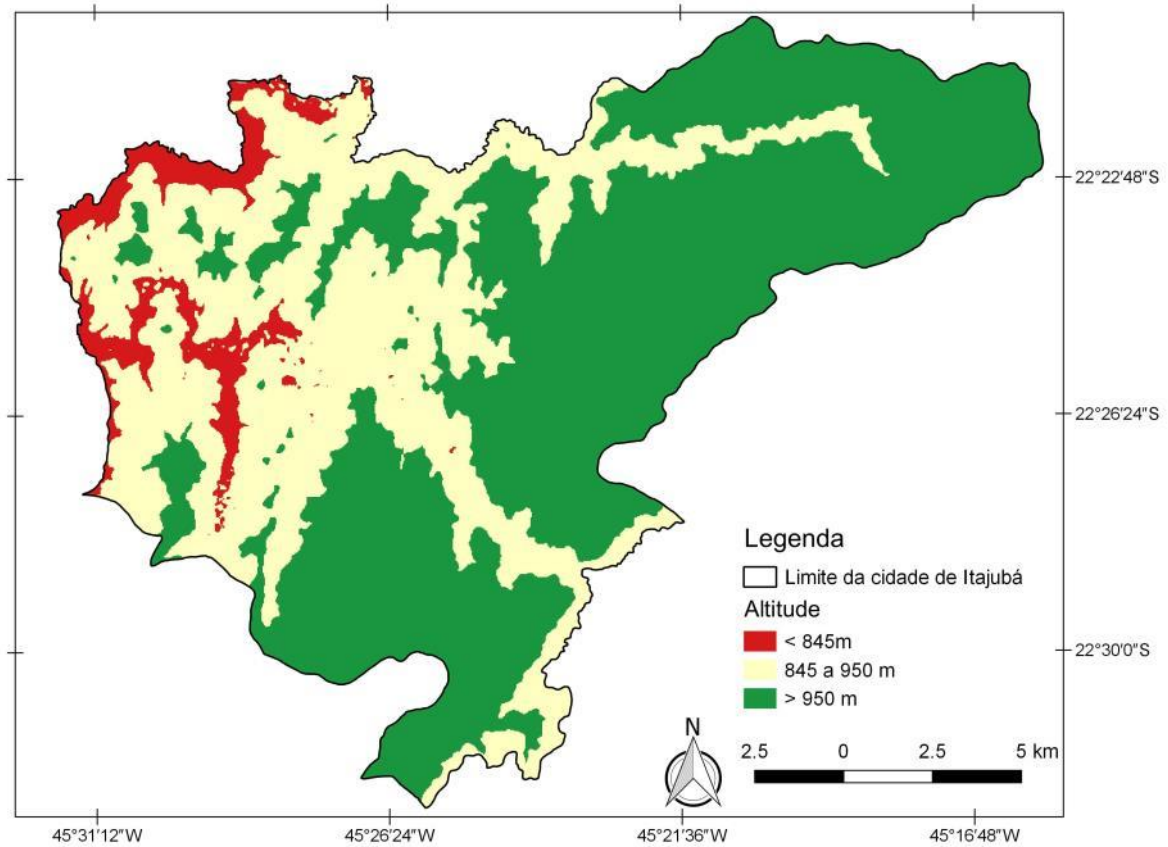


Figura 35: Mapa de altitudes de acordo com os limites propostos no Plano Diretor.

Com a Figura 35, foi realizada a normalização da medição, a fim de padronizar a escala de medição. A normalização, disposta na Figura 36, foi realizada com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy linear* que padroniza uma escala de 0 a 1 para a medição, onde os valores de 0 apresentam as áreas de aptidão para a urbanização, enquanto os valores de 1 apresentam as áreas sem aptidão para a urbanização.

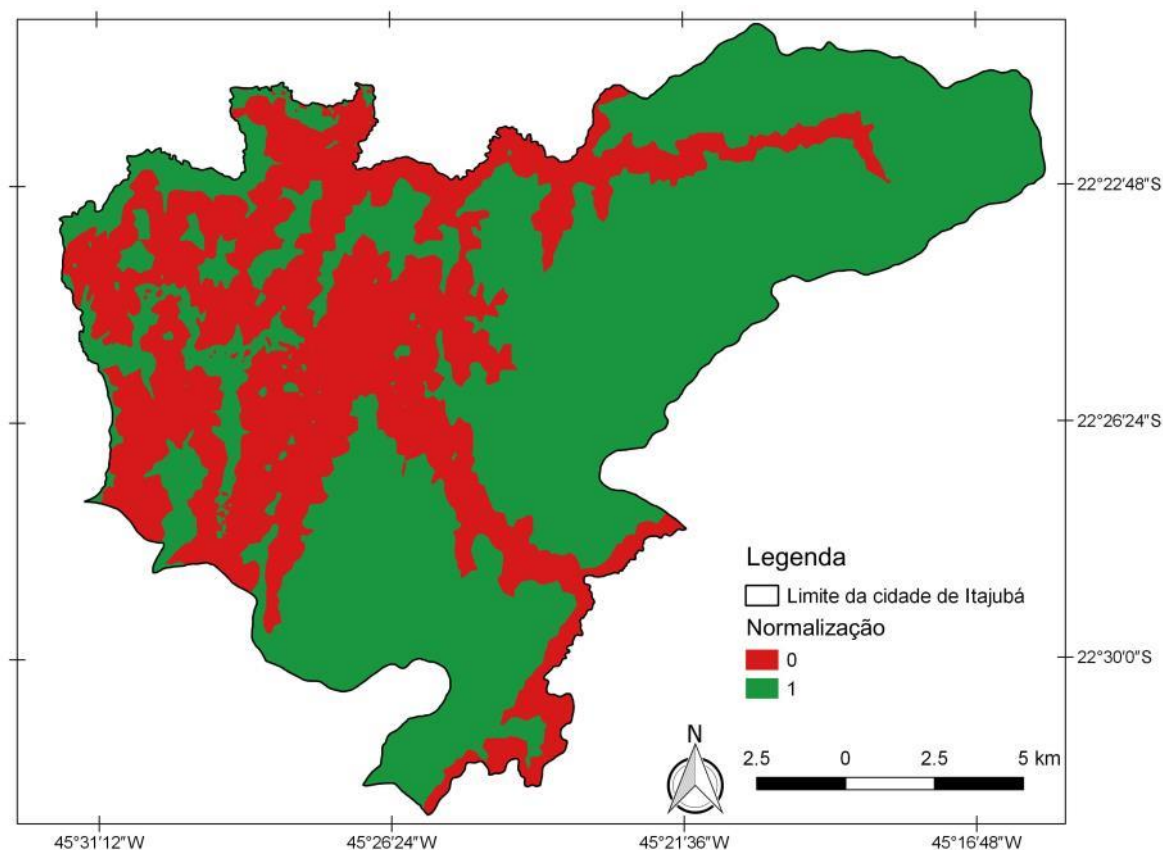


Figura 36: Mapa de altitudes normalizado na escala *fuzzy*.

5.3.3.5. Capacidade de uso do solo

O subcritério “capacidade de uso do solo” é determinado em função do trabalho de Montañó (2005) e da Lei Municipal 1774/1991, que determinam que as condições geológicas do terreno sejam aptas a receber urbanização.

Para analisar a capacidade de uso do terreno, Montañó (2005) propõe a utilização da capacidade de uso do solo para fins agrícolas como sendo equivalente à capacidade do solo para sediar a urbanização. Segundo o autor, essa equivalência é permitida, pois tanto a capacidade para fins agrícolas quanto para fins de urbanização são medidas pela capacidade de um tipo de solo suportar trabalho mecânico em função da declividade do terreno.

Para realizar a análise de capacidade de uso, são necessários os mapas de solo (mapa pedológico) e de declividade referentes à cidade de Itajubá. O mapa de declividade é obtido a partir do mapa de altitudes disponibilizado pelo projeto TOPODATA, como expresso no item do banco de dados.

No entanto, o mapa pedológico disponível para a área de estudo, desenvolvido pela FEAM (UFV; CETEC; UFLA; FEAM, 2010), não possui uma escala boa o suficiente para ser utilizado. A escala de 1:650.000, apresentada pelo mapa, não representa de forma detalhada o

bastante a pedologia que possibilita a realização de um estudo confiável sobre a área do município de Itajubá. Por esse motivo, o mapa pedológico precisou passar por uma etapa de melhoramento de escala, que teve sua metodologia baseada na análise aplicada por Lima (2012).

Para melhorar a escala do mapa pedológico, foram utilizados: o mapa de altitudes; o mapa de declividades; as linhas de drenagem do município; o mapa pedológico do estado de Minas Gerais, desenvolvido pela FEAM, na escala 1:650.000 (UFV; CETEC; UFLA; FEAM, 2010) recortado sobre a cidade; e o mapa pedológico, na escala de 1:25.000, desenvolvido por Lima (2012) sobre a sub-bacia do Ribeirão José Pereira (bacia que cobre parte da cidade de estudo).

Com as altitudes e as linhas de drenagem, foi gerada, através da ferramenta *Vertical Distance to Chanel Network* do SAGA GIS, a altitude em relação às linhas de drenagem. Essa medição permite inferir o quão suscetível o terreno está ao acúmulo de água sobre o solo.

Dessa forma, utilizou-se a Tabela 6, proposta por Lima (2012), para relacionar os atributos da paisagem com a definição da pedologia para a região.

Tabela 6: Relação dos atributos da paisagem para a confecção do mapa de solos. Adaptado de Lima (2012).

| Relevo | Altitude em relação às linhas de drenagem | Solo FEAM (1:650.000) | Solo Lima (2012) (1:25.000) |
|--|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Plano (0 a 3%) | < 5m | - | GleissoloHáplico - GX |
| Montanhoso (>45%) | - | - | CambissoloHáplico - CX |
| Plano (0 a 3%) /Suave ondulado (3 a 8%) | > 5m | Argissolo Vermelho - PVd1 | Latossolo Vermelho - LV |
| Ondulado (8 a 20%) /Forte ondulado (20 a 45%) | - | Argissolo Vermelho - PVd1 | Argissolo Vermelho - PV1 |
| Ondulado (8 a 20%) /Forte ondulado (20 a 45%) | - | Argissolo Vermelho-Amarelo - PVAd8 | Argissolo Vermelho-Amarelo - PVA |
| Plano (0 a 3%) /Suave ondulado (3 a 8%) | > 5m | Argissolo Vermelho-Amarelo - PVAd8 | Latossolo Vermelho-Amarelo - LVA |

Com a Tabela 6, realizou-se o mapeamento dos tipos de solo, na escala de 1:25.000, presentes em Itajubá. Esse mapeamento pode ser visualizado na Figura 37.

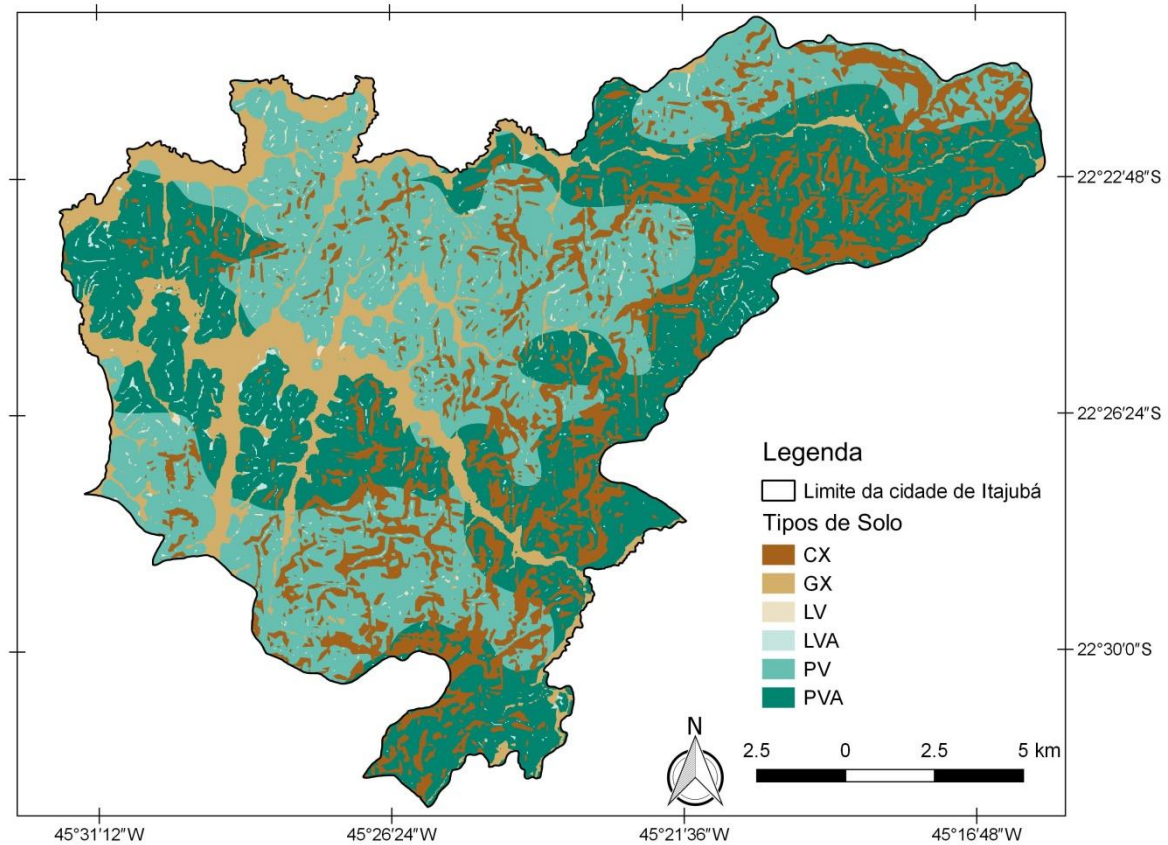


Figura 37: Mapa pedológico com escala melhorada para 1:25.000.

Com o mapeamento da Figura 37 e com as definições de classificação proposta nos trabalhos de Montaño (2005) e Flauzino et al. (2016), foi elaborada a Tabela 7, que relaciona os tipos de solos encontrados na região com a declividade que se encontram e com as classes de capacidade de utilização a que pertencem. A Tabela 7 é aplicada para construir a carta de classificação da Figura 38.

Tabela 7: Determinação das classes de uso do solo para fins agrícolas.

| | Intervalos de Declividade | | | | | |
|----------------------------------|---------------------------|------------|-----------|------------|-------------|-------------|
| | 0 a 3% | 3 a 8% | 8 a 20% | 20 a 45% | 45 a 75% | >75% |
| Cambissolo Háptico (CX) | Classe III | Classe IV | Classe IV | Classe VI | Classe VII | Classe VIII |
| Gleissolo Háptico (GX) | Classe V | Classe V | Classe VI | Classe VI | Classe VIII | Classe VIII |
| Latossolo Vermelho (LV) | Classe III | Classe III | Classe IV | Classe VII | Classe VIII | Classe VIII |
| Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) | Classe III | Classe III | Classe IV | Classe VII | Classe VIII | Classe VIII |
| Argissolo Vermelho (PV) | Classe II | Classe II | Classe IV | Classe VI | Classe VII | Classe VIII |
| Argissolo Vermelho Amarelo (PVA) | Classe II | Classe II | Classe IV | Classe VI | Classe VII | Classe VIII |

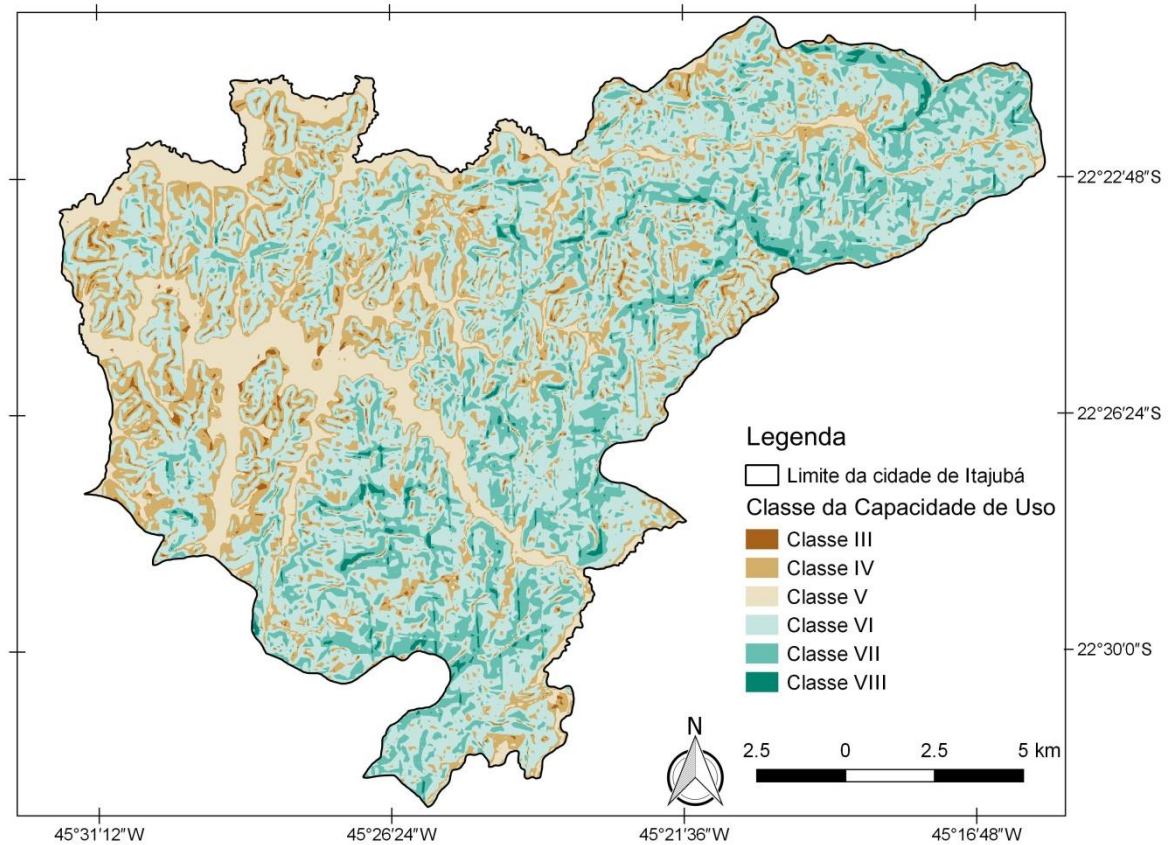


Figura 38: Classificação da Capacidade de Uso do Solo.

Com as classificações da capacidade de uso, Montaño (2005) aponta que a atividade agrícola intensiva (associada às práticas de cultivo) pode ser realizada nas classes de I a IV. Portanto, o autor assume que a urbanização, de forma análoga à capacidade agrícola, pode ser realizada dentro dessa mesma faixa. Dessa forma, o autor emprega a Tabela 8, de modo a explicitar a faixa de aptidão à urbanização que cada classe de capacidade de uso apresenta.

Tabela 8: Faixas de aptidão à urbanização em função da capacidade de uso do solo. Fonte: Montaño (2005).

| Faixa de aptidão para urbanização ambientalmente sustentável | Capacidade de Uso Solo |
|---|-------------------------------|
| SEM APTIDÃO | Classes V a VIII |
| BAIXA | Classe IV |
| MÉDIA | Classe III |
| ALTA | Classes I e II |

Com a Tabela 8, é realizada a medição de aptidão à urbanização da área de estudo. Essa medição é normalizada, através da ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy linear* que padroniza uma escala de 0 a 1 para o mapa, onde os valores 0 representam as áreas de maior aptidão a urbanização,

enquanto os valores 1 representam as áreas de menor aptidão. A normalização pode ser vista na Figura 39.

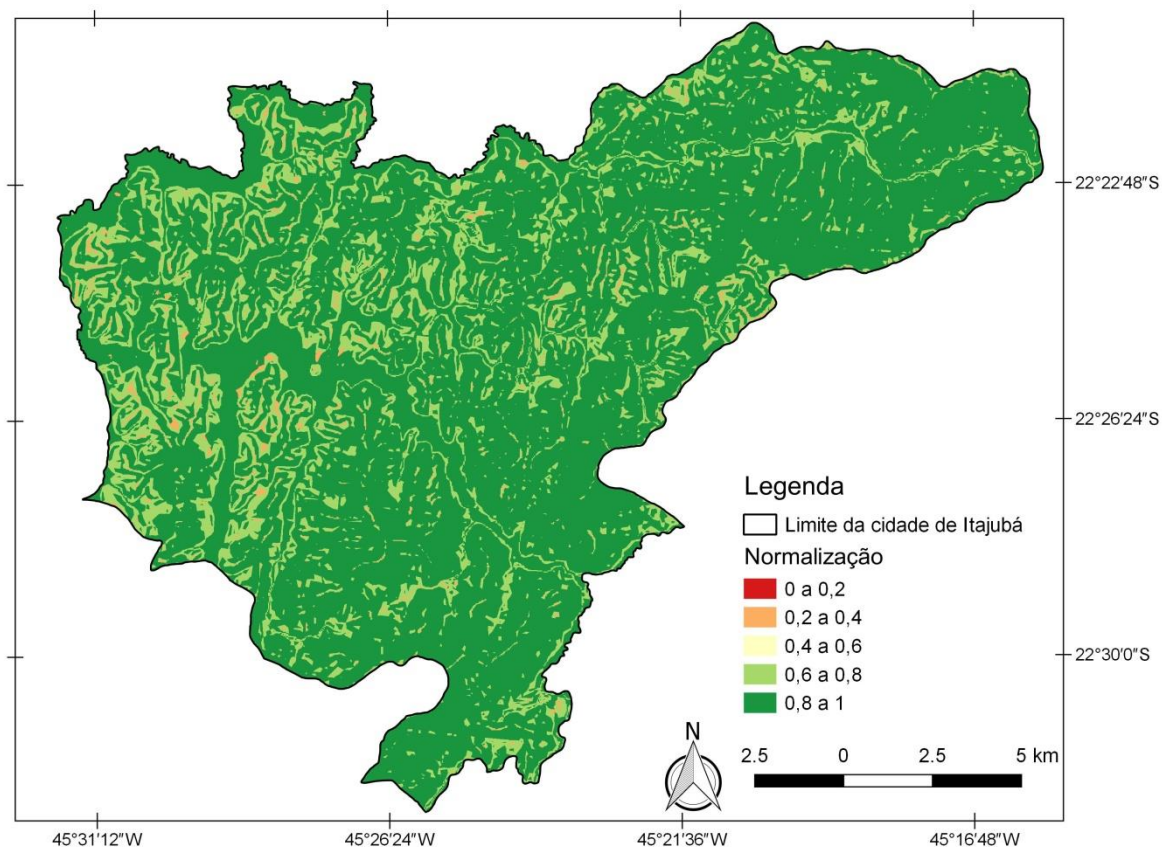


Figura 39: Mapa de aptidão do uso do solo normalizado na escala *fuzzy*.

5.3.3.6. Áreas alagáveis

O subcritério de áreas alagáveis foi determinado em função da Lei Federal 6.766/1979 e da Lei Municipal 1.774/1991 que definem que as áreas de urbanização não devem estar em locais sujeitos à ocorrência de inundações. Para avaliar o subcritério, utilizou-se como referência o mapa de inundações realizado por CPRM (2014), descrito anteriormente.

A medição foi realizada de modo a distinguir as áreas inundáveis como áreas não aptas à urbanização, e as demais áreas como áreas aptas. A Figura 40 ilustra a área ocupada pela mancha de inundação na cidade.

Com a carta da Figura 40, foi realizada a normalização das áreas alagáveis, a fim de padronizar a escala de medição. A normalização, disposta na Figura 41, foi realizada com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy* linear que padroniza uma escala de 0 a 1 para as distâncias, onde os valores 0 representam as áreas de aptidão para a urbanização, enquanto os valores 1 representam as áreas sem aptidão para a urbanização.

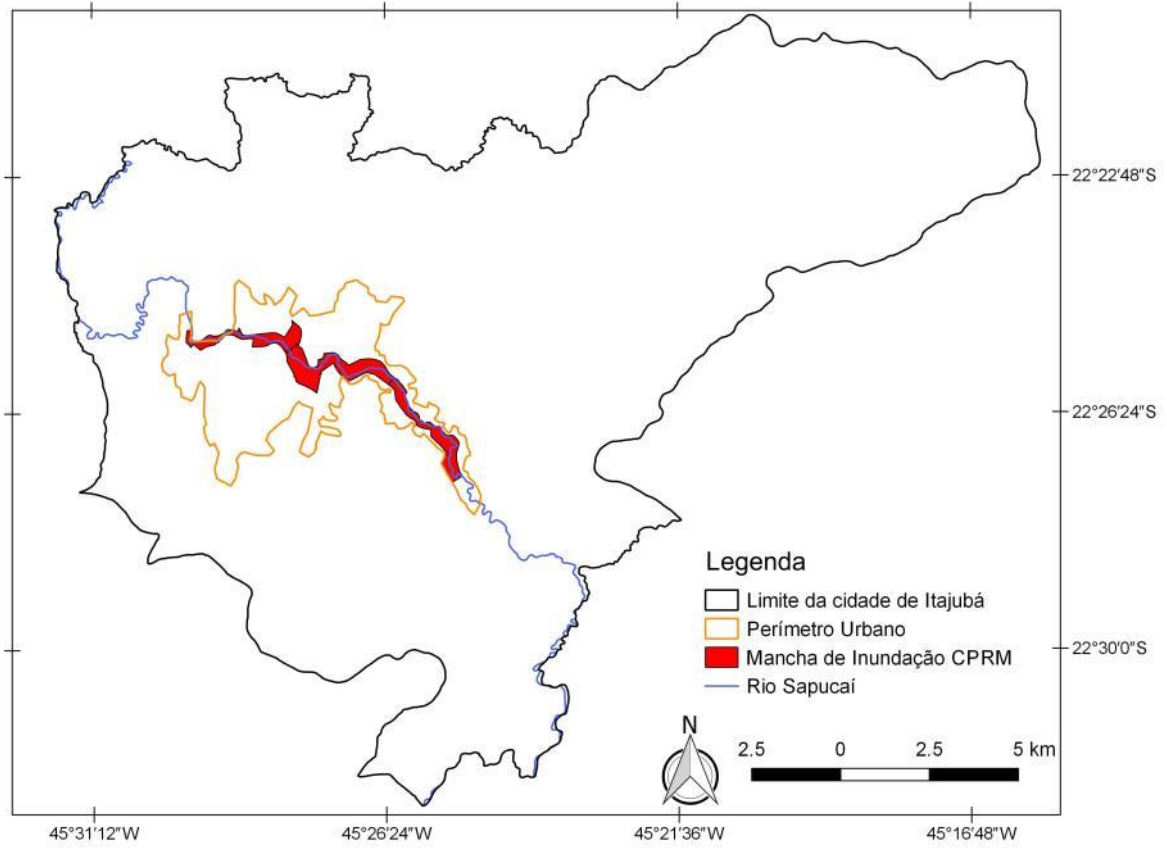


Figura 40: Mancha de inundação. Adaptado de CPRM (2014).

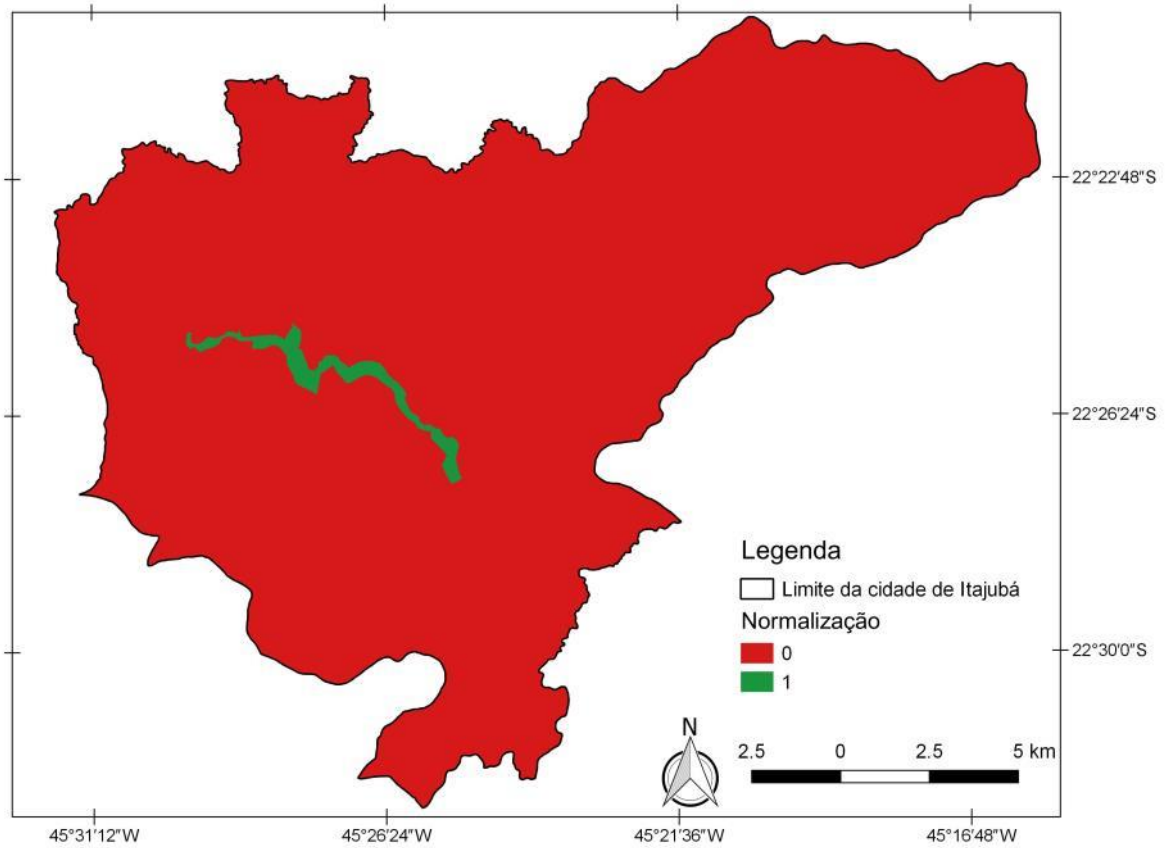


Figura 41: Mapa de inundação normalizado na escala *fuzzy*.

5.3.3.7. Área de aterro sanitário

O subcritério “área de aterro sanitário” foi determinado em função da Lei Federal 6.766/1979 e da Lei Municipal 1774/1991, que define que as áreas de urbanização não devem estar localizadas sobre áreas que já tenham sido aterradas com materiais nocivos. Para avaliar o subcritério, foi realizado o traçado do aterro municipal com base em sua localização e na imagem Landsat8, de 2017, utilizada no trabalho.

A medição foi realizada de modo a distinguir a área de aterro como área não apta à urbanização, e as demais áreas como áreas aptas. A Figura 42 ilustra a área ocupada pelo aterro sanitário da cidade.

Com a carta da Figura 42, foi realizada a normalização das áreas de aterro. A normalização, disposta na Figura 43, foi realizada com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy linear* que padroniza uma escala de 0 a 1 para as distâncias, onde os valores 0 representam as áreas de aptidão para a urbanização, enquanto os valores 1 representam as áreas sem aptidão para a urbanização.

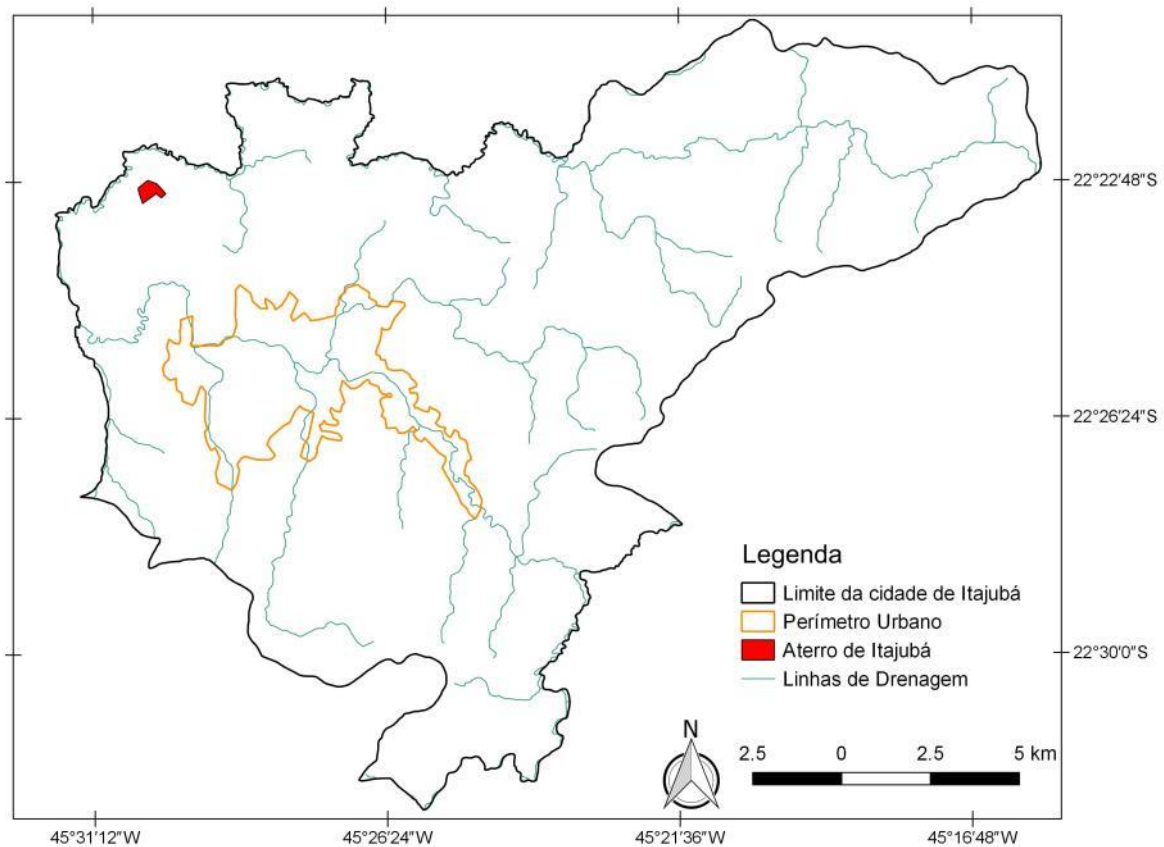


Figura 42: Área de aterro sanitário do município de Itajubá.

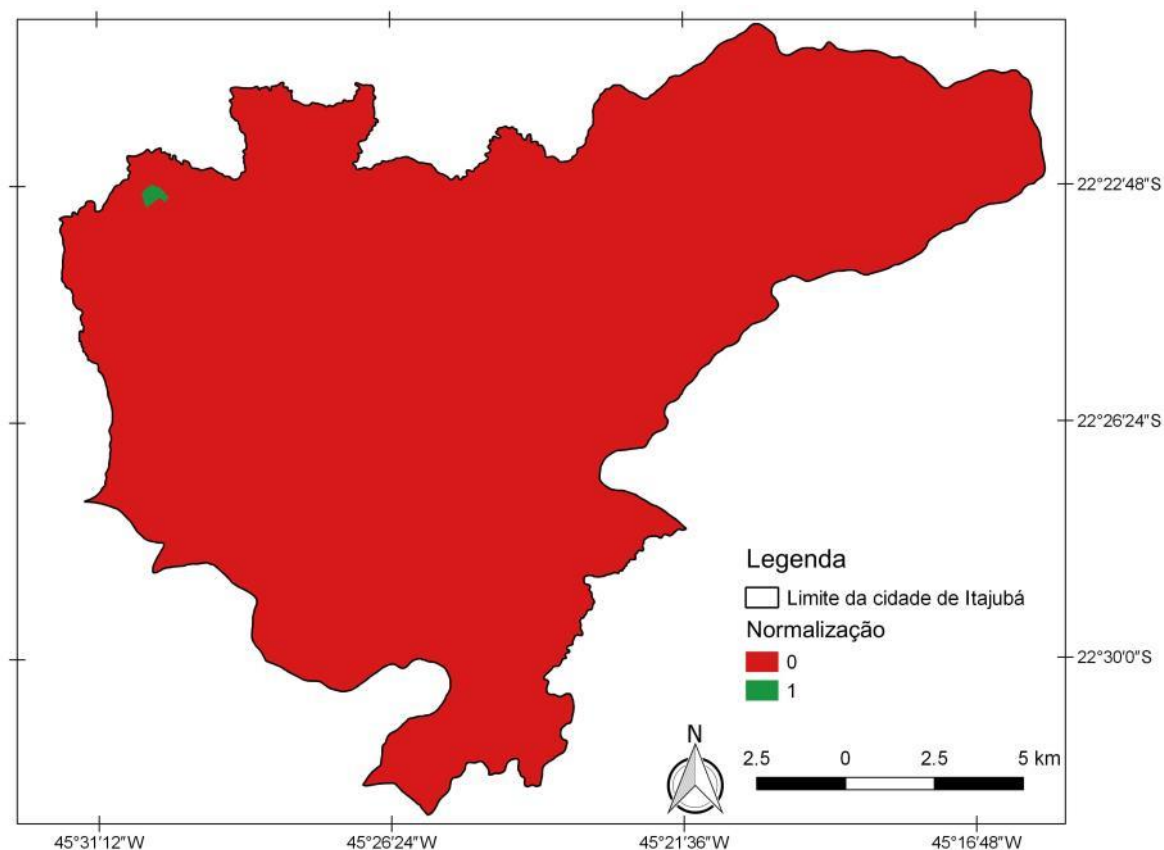


Figura 43: Mapa da área de aterro sanitário normalizado através da ferramenta *fuzzy*.

5.3.3.8. Uso do solo

A avaliação do uso do solo é realizada a fim de valorizar as áreas já urbanas para a urbanização, de modo a obter uma valorização do conceito de adensamento da cidade. Este subcritério foi determinado em função do trabalho de Pivo (1996) que mostra que cidades mais densas oferecem menos pressão à invasão de áreas de proteção e áreas rurais. A classificação utilizada é a mesma apresentada no item 5.1.2 deste trabalho e pode ser visualizada na Figura 44.

A medição deste subcritério foi realizada de modo a distinguir três níveis de valorização à urbanização: as áreas de vegetação de dossel fechado e água foram caracterizadas como áreas não aptas à urbanização; as áreas de pastagens e solo exposto foram caracterizadas como mediamente aptas à urbanização; e as áreas urbanas foram caracterizadas como altamente aptas à urbanização. A mediação foi normalizada através da ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy linear* que padroniza uma escala de 0 a 1 para as distâncias, onde os valores 0 representam as áreas de aptidão para a urbanização, enquanto os valores 1 representam as áreas sem aptidão para a urbanização. A normalização realizada pode ser vista na Figura 45.

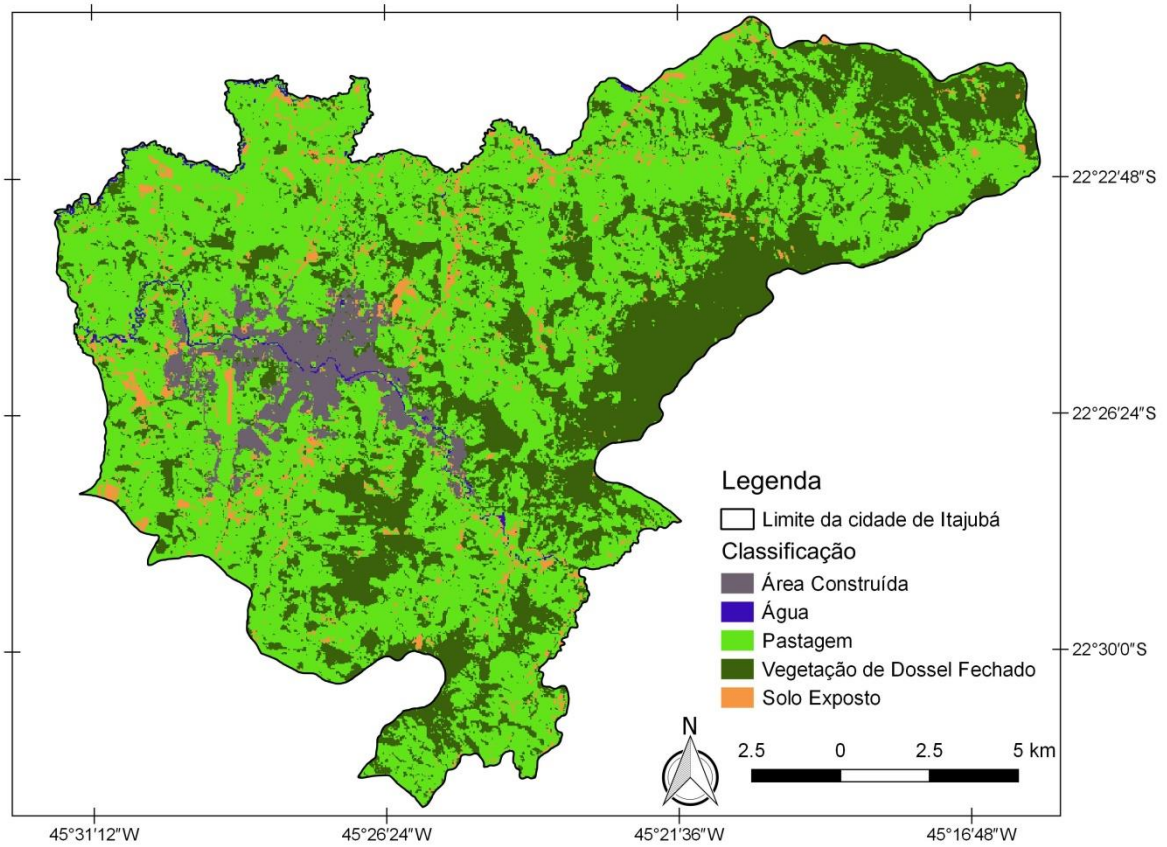


Figura 44: Classificação do uso e cobertura do solo para o ano de 2017.

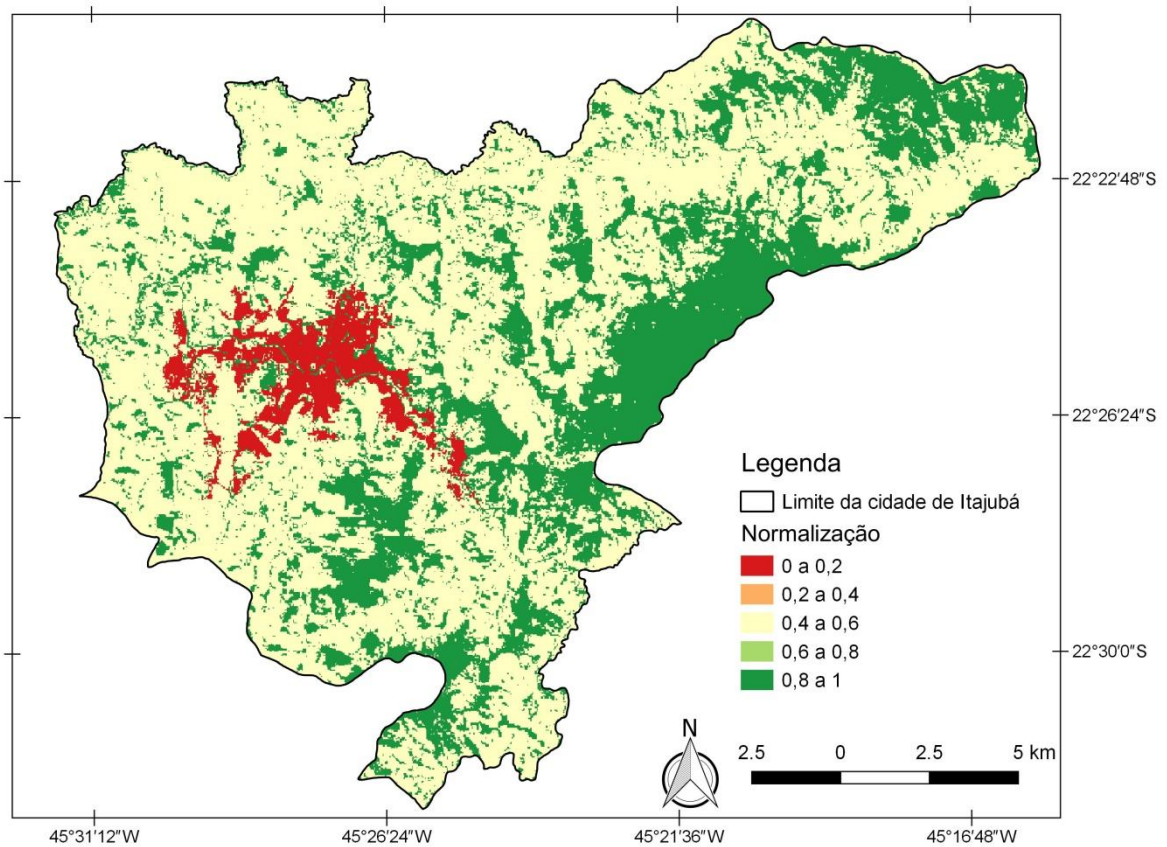


Figura 45: Mapa de uso do solo e normalização fuzzy.

5.3.3.9. Áreas ambientalmente protegidas

O subcritério de áreas protegidas foi escolhido em função do trabalho de Pivo (1996), da Lei Federal 6.766/1979, Lei Municipal 1.774/1991, Lei Federal 12.651/2012 e do Plano Diretor do município de Itajubá. A literatura ressalta que as áreas de interesse ambiental, cultural, paisagístico, de lazer, ou sensíveis devem ser preservadas e respeitadas, a fim de se manter as funções ecológicas do meio ambiente. Além disso, a preservação dessas áreas contribui para maior segurança urbana contra os desastres ambientais (como deslizamentos e inundações) e contra a vetorização de doenças, já que mantém o ambiente e seus organismos equilibrados.

A delimitação das áreas protegidas foi embasada nas Áreas de Preservação Permanente (APP – de margem e de nascente), de acordo com o Código Florestal, nas Áreas de Interesse Ambiental (AIA), de acordo com o Plano Diretor da cidade, e nos limites das Unidades de Conservação, de acordo com o SNUC (BRASIL, 2000), da Reserva Biológica da Serra dos Toledos e da Área de Proteção Ambiental (APA) Serra da Mantiqueira. A localização dessas áreas pode ser visualizada na Figura 46.

As áreas de APP foram delimitadas de acordo com o Código Florestal e de acordo com o Plano Diretor, que prevê o *buffer* de 50 metros ao redor das nascentes, 50 metros ao redor do Rio Sapucaí, e 30 metros ao redor dos demais afluentes.

A medição deste subcritério foi realizada através do mapa de distância das áreas de proteção. O mapeamento da distância foi escolhido com o intuito de se preservar não só essas áreas, mas também os arredores dessas áreas, já que a ocupação dos arredores de áreas protegidas também se mostra um fator de potencial impacto ambiental (WITTEMYER et al., 2008). Para realizar a medição, foi calculado o Mapa de Distância Euclidiana sobre as áreas protegidas, através da ferramenta *Euclidian Distance* no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A distância euclidiana, mostrada na Figura 47, permite que seja realizado o cálculo da menor distância que cada pixel na área possui com relação às áreas protegidas.

Com a medição, foi realizada a normalização das áreas aptas e não aptas, a fim de padronizar a escala de medição. A normalização, disposta na Figura 48, foi realizada com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). A ferramenta foi aplicada através da função *fuzzy* linear que padroniza uma escala de 0 a 1 para as distâncias, onde os valores 0 representam as áreas de aptidão para a urbanização, enquanto os valores 1 representam as áreas sem aptidão para a urbanização.

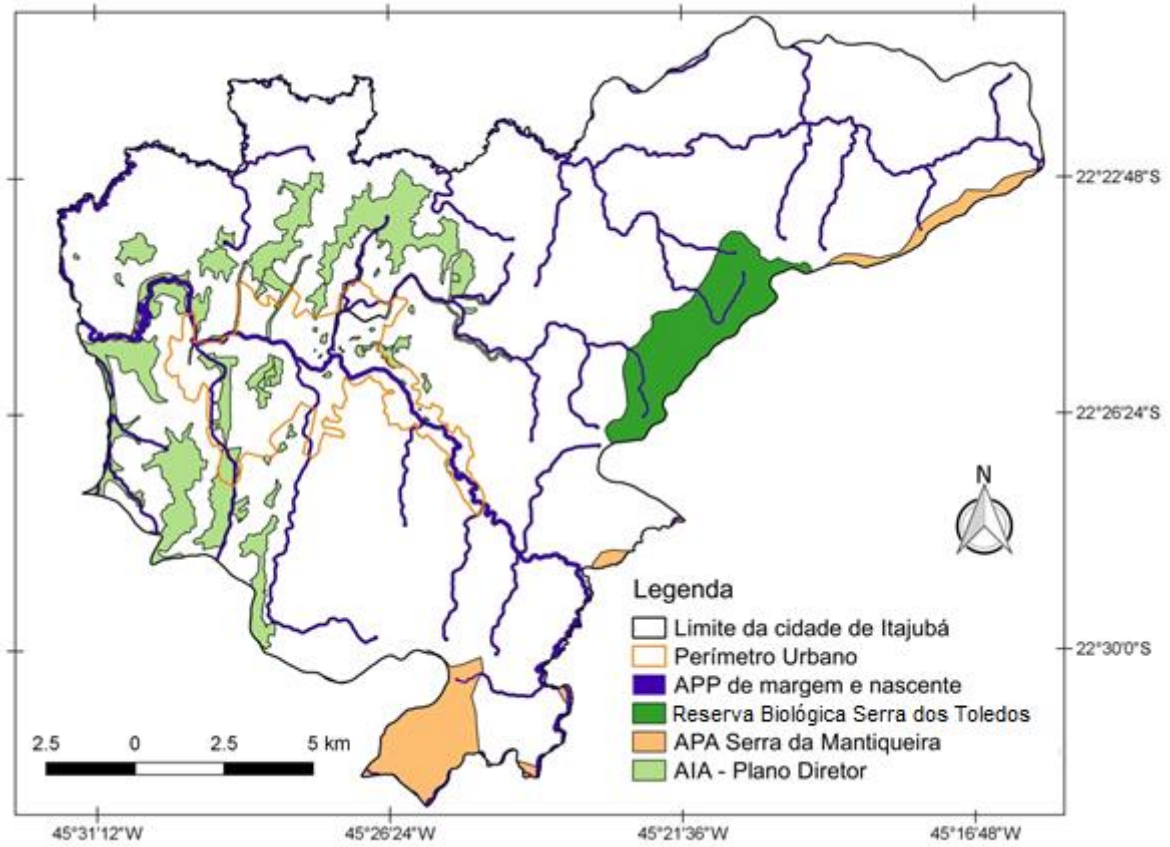


Figura 46: Localização das áreas protegidas de Itajubá.

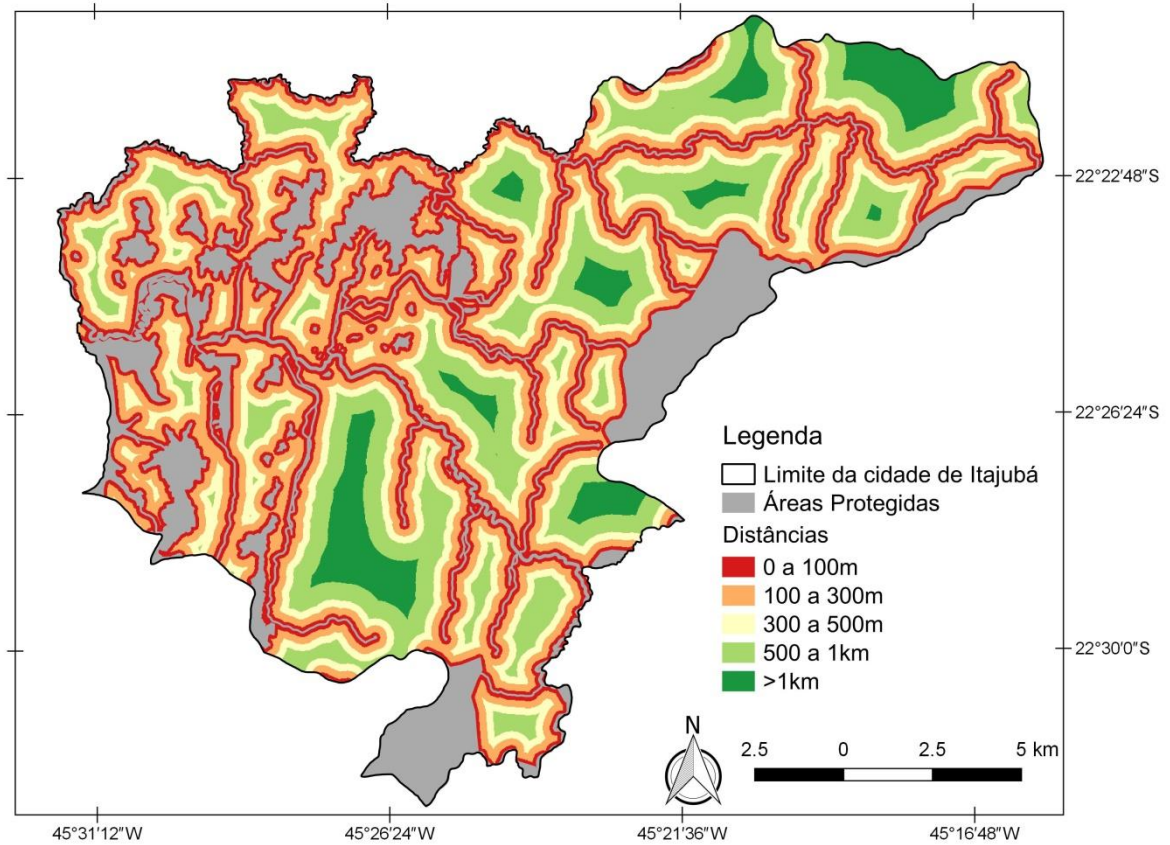


Figura 47: Mapa de distâncias.

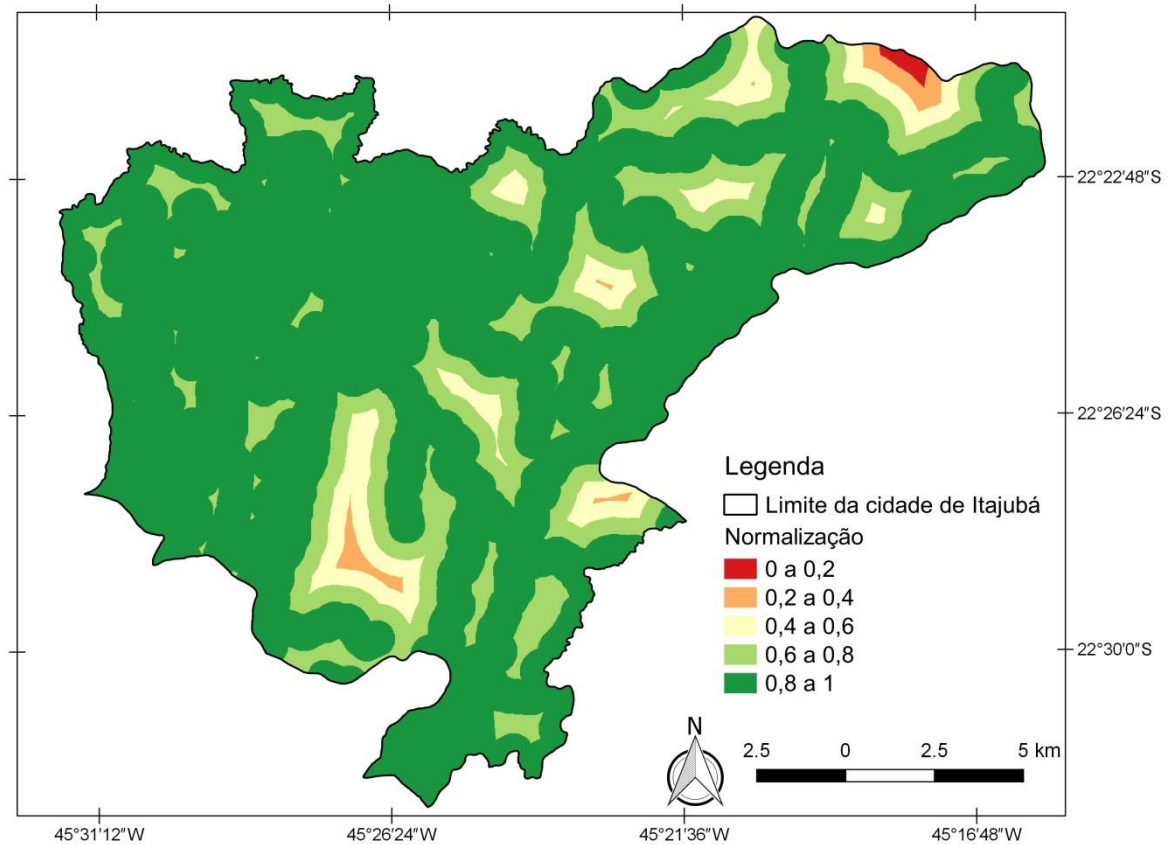


Figura 48: Mapa de áreas protegidas normalizado na escala *fuzzy*.

5.3.3.10. Proteção das águas subterrâneas

O subcritério “proteção das águas subterrâneas” foi determinado com base no trabalho de Montañó (2005). O autor aponta a importância de conservação das áreas mais vulneráveis à ocorrência de infiltração com o objetivo de impedir que contaminantes provenientes das áreas urbanas alcancem as águas subterrâneas. O autor propõe o mapeamento das áreas vulneráveis à infiltração de resíduos com base nas cartas de tipo de solo e de declividade da região de estudo.

Para realizar o mapeamento, Montañó (2005) propõe a Tabela 9, onde são relacionadas a classe de vulnerabilidade com as faixas de declividade, profundidade e permeabilidade do solo para cada tipo de solo. Como os itens permeabilidade e profundidade dos solos não são conhecidos a fundo para o local de estudo, por segurança, optou-se por englobar os gleissolos como alta permeabilidade e profundidade rasa, enquanto os outros tipos de solos foram englobados como média profundidade e permeabilidade.

Tabela 9: Classe de Vulnerabilidade à contaminação subterrânea. Adaptado de Montañó (2005)

| | | Classe de Vulnerabilidade | Tipo de solo |
|--|-----------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Intervalo de Declividade | > 15% | Baixa | Independente |
| | 5 a 15% | Média | |
| | <5% | Alta | |
| Profundidade e Permeabilidade do solo | Moderadamente Profundo a Profundo | Média | CX, LV, LVA, PV, PVA |
| | Rasos | Alta | GX |

A partir da Tabela 9, são gerados dois mapas distintos, o mapa de vulnerabilidade à infiltração em função da declividade (Figura 49), e o mapa de vulnerabilidade à infiltração em função da profundidade e permeabilidade do solo (Figura 50). Esses dois mapas são normalizados com a ferramenta *Fuzzy Membership*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014), através da função *fuzzy linear*, que padroniza uma escala de 0 a 1 para a vulnerabilidade. Nessa escala, os valores mais próximos de 0 representam as áreas mais vulneráveis à contaminação, enquanto os mais próximos de 1 representam as áreas menos vulneráveis.

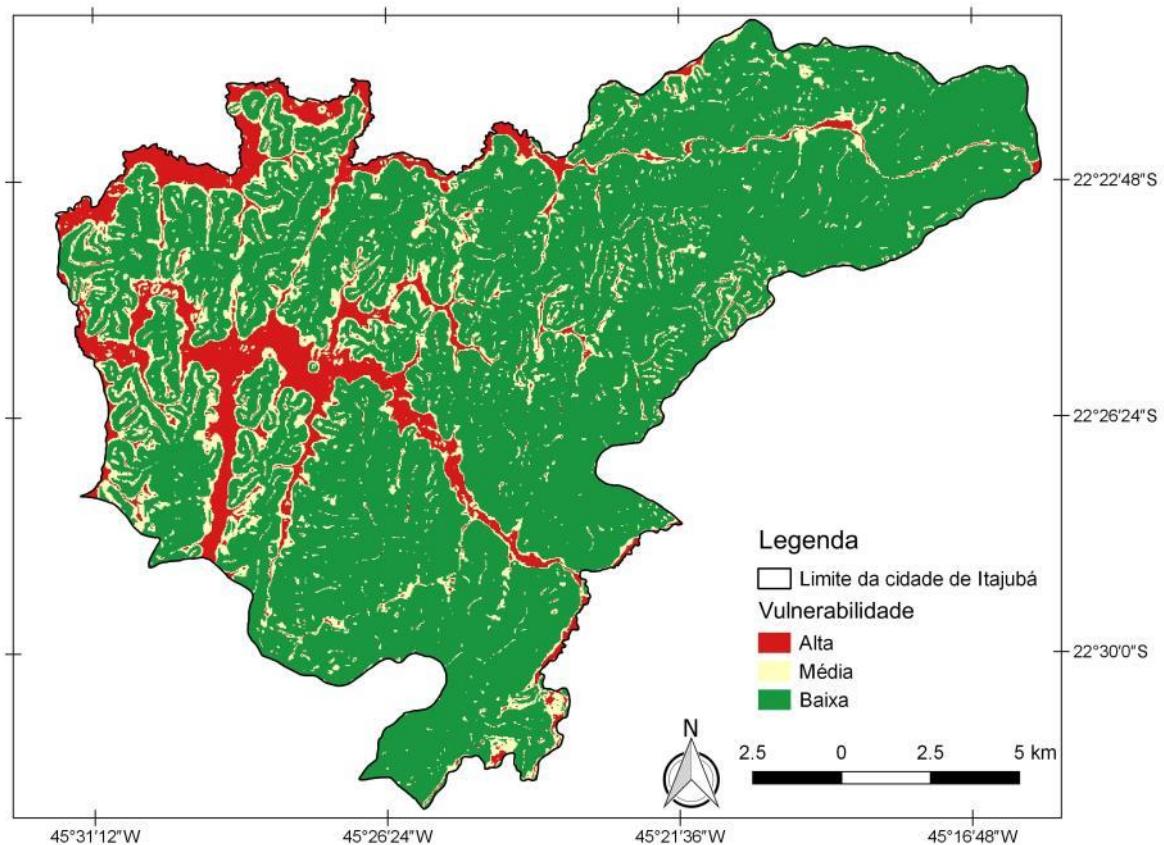


Figura 49: Mapa de vulnerabilidade às contaminações hídricas subterrâneas em função da declividade do terreno.

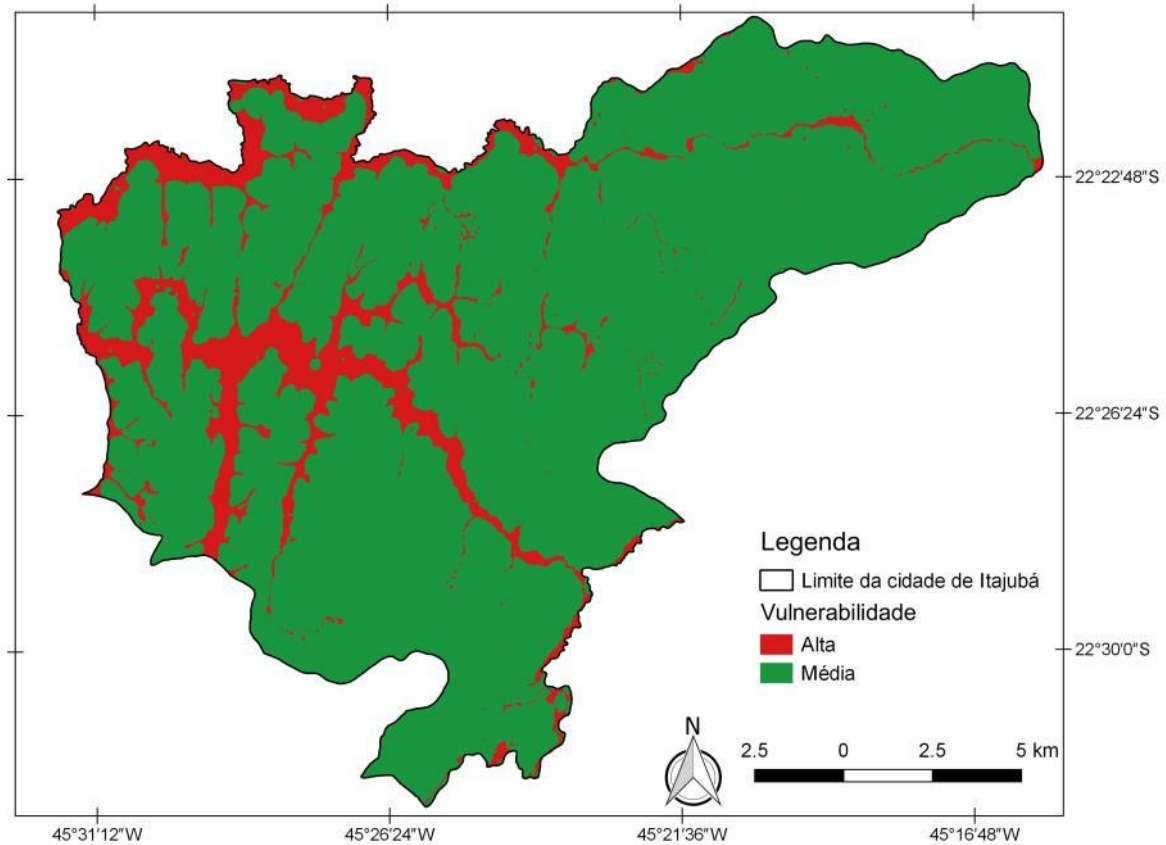


Figura 50: Mapa de vulnerabilidade às contaminações hídricas subterrâneas em função da profundidade e permeabilidade dos solos.

As cartas de vulnerabilidade em função da declividade e em função da profundidade e permeabilidade são agregadas através da ferramenta *Weighted Sum*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). Os pesos utilizados para a soma (0,6 para a profundidade e permeabilidade, e 0,4 para a declividade) são baseados no trabalho de Montañó (2005). A ferramenta utilizada permite que cada pixel de cada *raster* inserido na soma seja multiplicado pelo peso ao *raster* atribuído, obtendo a soma ponderada dos *rasters* em estudo.

O *raster* obtido na ponderação pode ser visto na Figura 51, onde as vulnerabilidades são divididas em baixa, média e alta vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos.

Após a ponderação da vulnerabilidade da Figura 51, Montañó (2005) apresenta a Tabela 10 a qual relaciona a classe de vulnerabilidade à contaminação com a classe de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável.

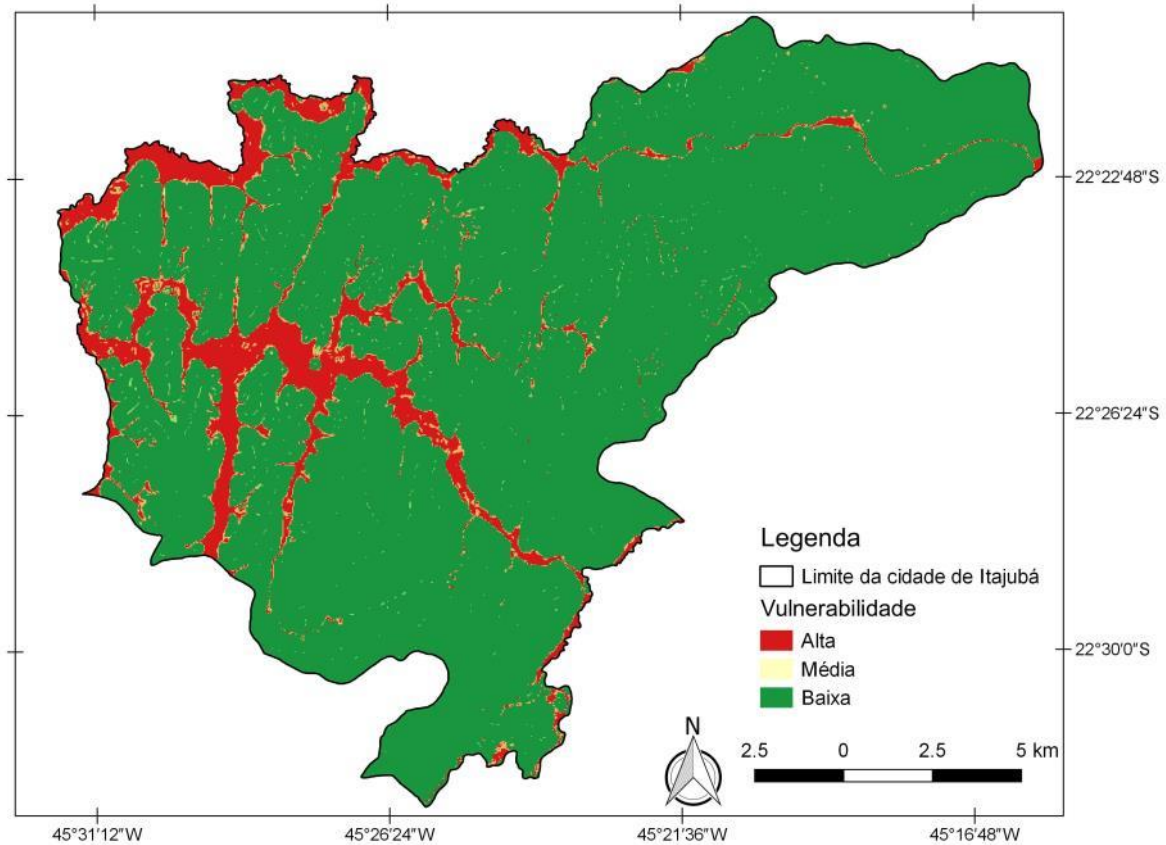


Figura 51: Mapa de vulnerabilidade às contaminações hídricas subterrâneas em função da declividade, profundidade e permeabilidade dos solos.

Tabela 10: Classes de aptidão para a urbanização em função da vulnerabilidade de contaminação dos recursos hídricos. Adaptado de Montañó (2005).

| Classe de Vulnerabilidade | Classe de aptidão para urbanização |
|---------------------------|------------------------------------|
| Alta | Baixa |
| Média | Média |
| Baixa | Alta |

Com a Figura 51 e com a Tabela 10, é produzida a carta da Figura 52, que apresenta, já de forma normalizada, o nível de aptidão à urbanização em função da vulnerabilidade à contaminação hídrica subterrânea do solo. Na Figura 52, os valores mais próximos de 0 representam as áreas de maior aptidão para a urbanização, enquanto os valores mais próximos de 1 representam as áreas com menor aptidão para a urbanização.

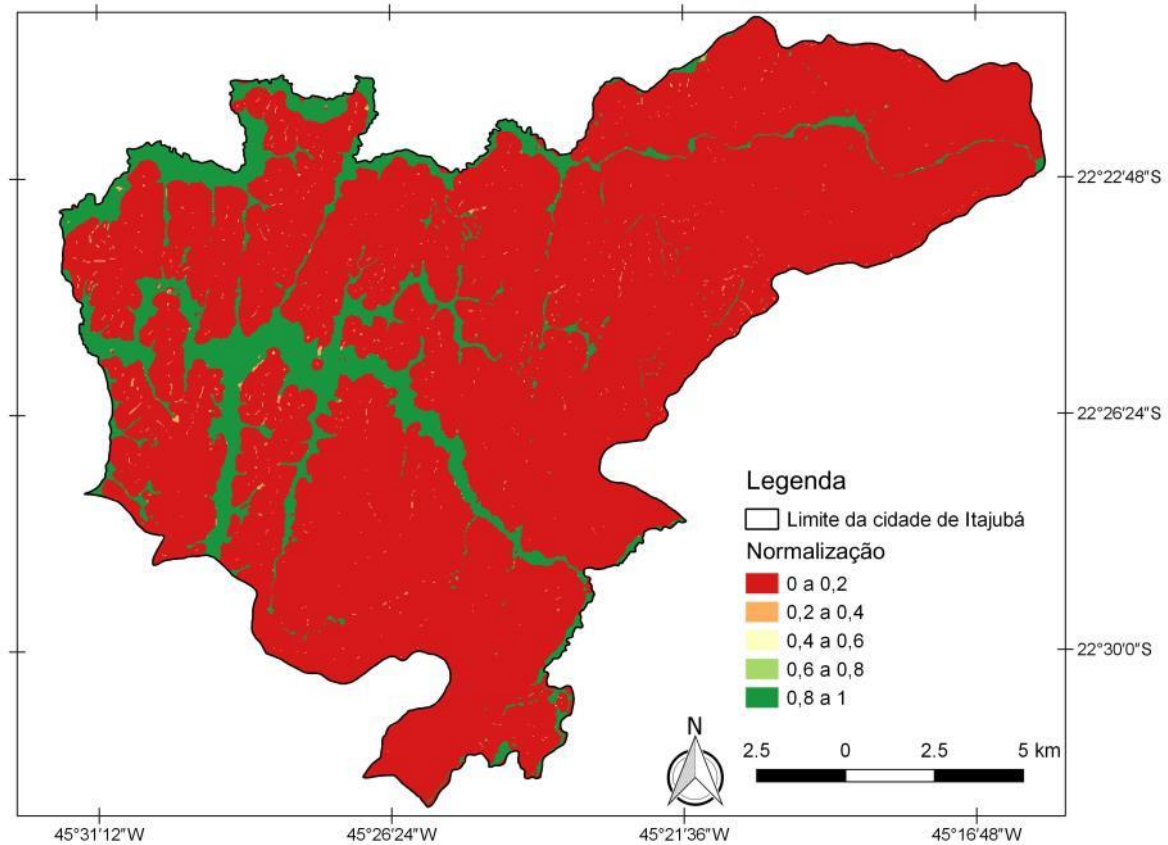


Figura 52: Mapa de aptidão à urbanização por vulnerabilidade à infiltração normalizado na escala *fuzzy*.

5.3.4. Combinação dos critérios e análise do mapeamento

Com a estruturação do modelo pronta e com os critérios normalizados, realiza-se a combinação dos atributos. A combinação é realizada através do método de Combinação Linear Ponderada (WLC), que permite que cada *raster* normalizado seja multiplicado pelo peso a ele atribuído, e então sejam somados para fornecer o resultado final da análise.

A esquematização do modelo com os processos de normalização e combinação envolvidos pode ser visto na Figura 53.

De acordo com a Figura 53, as normalizações dos subcritérios “acesso ao transporte coletivo”, “áreas adensáveis” e “acesso ao transporte ativo” foram combinados com metodologia WLC através da ferramenta *Weighted Sum*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). Essa combinação é realizada com os pesos atribuídos a cada subcritério, demonstrados no item 5.3.2 (Figura 28). A combinação gera o mapa de aptidão à urbanização em função do critério “Cidades Ambientalmente Sustentáveis”, que pode ser visto na Figura 54.

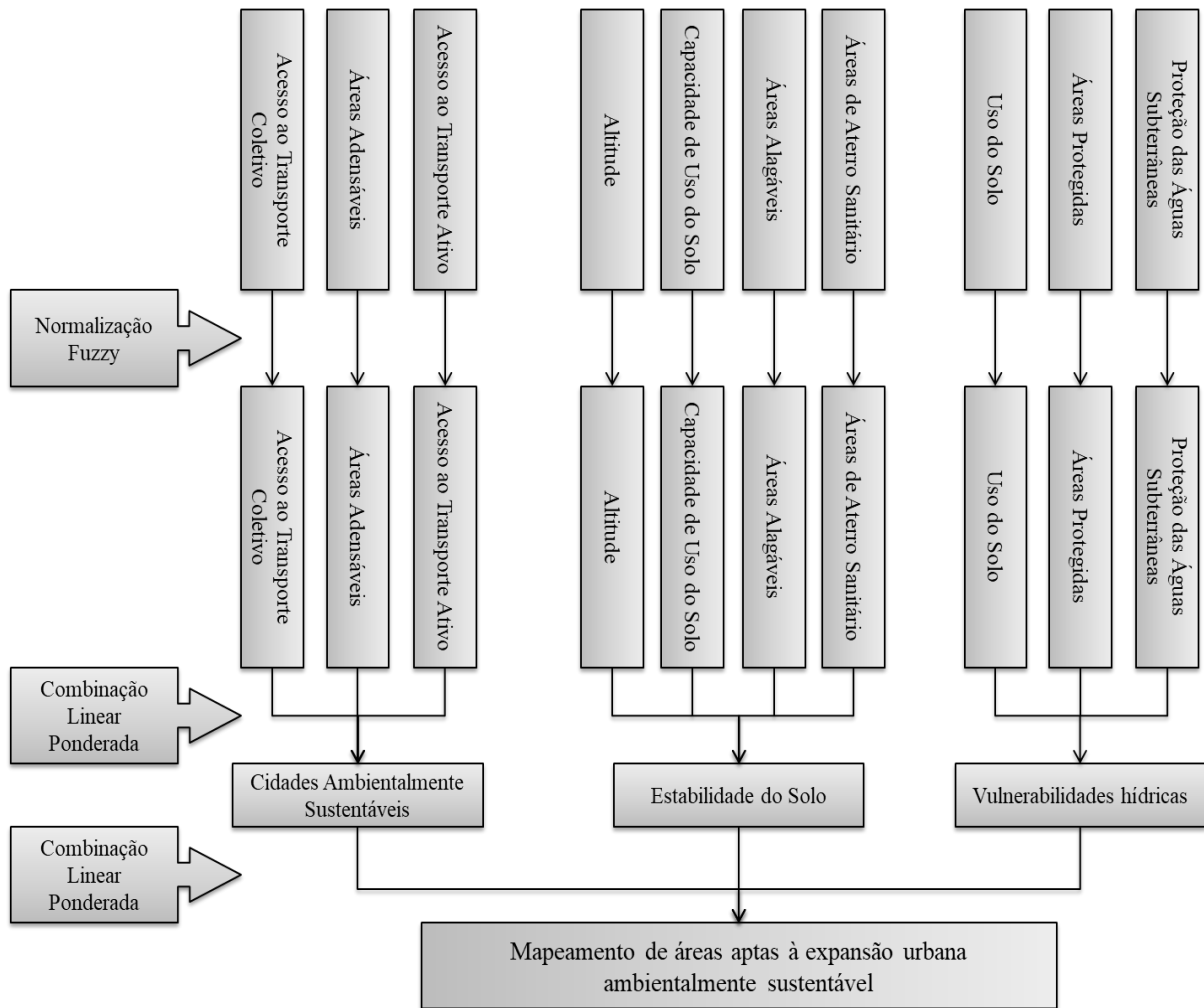


Figura 53: Modelo de mapeamento e processos de normalização e combinação.

Novamente, de acordo com a Figura 53, as normalizações dos subcritérios “altitude”, “capacidade de uso do solo”, “áreas alagáveis” e “áreas de aterro sanitário” foram combinados com metodologia WLC através da ferramenta *Weighted Sum*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). Essa combinação é realizada com os pesos atribuídos a cada subcritério, demonstrados no item 5.3.2 (Figura 28). A combinação gera o mapa de aptidão à urbanização em função do critério “Estabilidade do Solo”, que pode ser visto na Figura 55.

Ainda, de acordo com a Figura 53, as normalizações dos subcritérios “uso do solo”, “áreas protegidas” e “proteção das águas subterrâneas” foram combinados com metodologia WLC, através da ferramenta *Weighted Sum*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). Essa combinação é realizada com os pesos atribuídos a cada subcritério, demonstrados no item 5.3.2 (Figura 28). A combinação gera o mapa de aptidão à urbanização em função do critério “Vulnerabilidades Hídricas”, que pode ser visto na Figura 56.

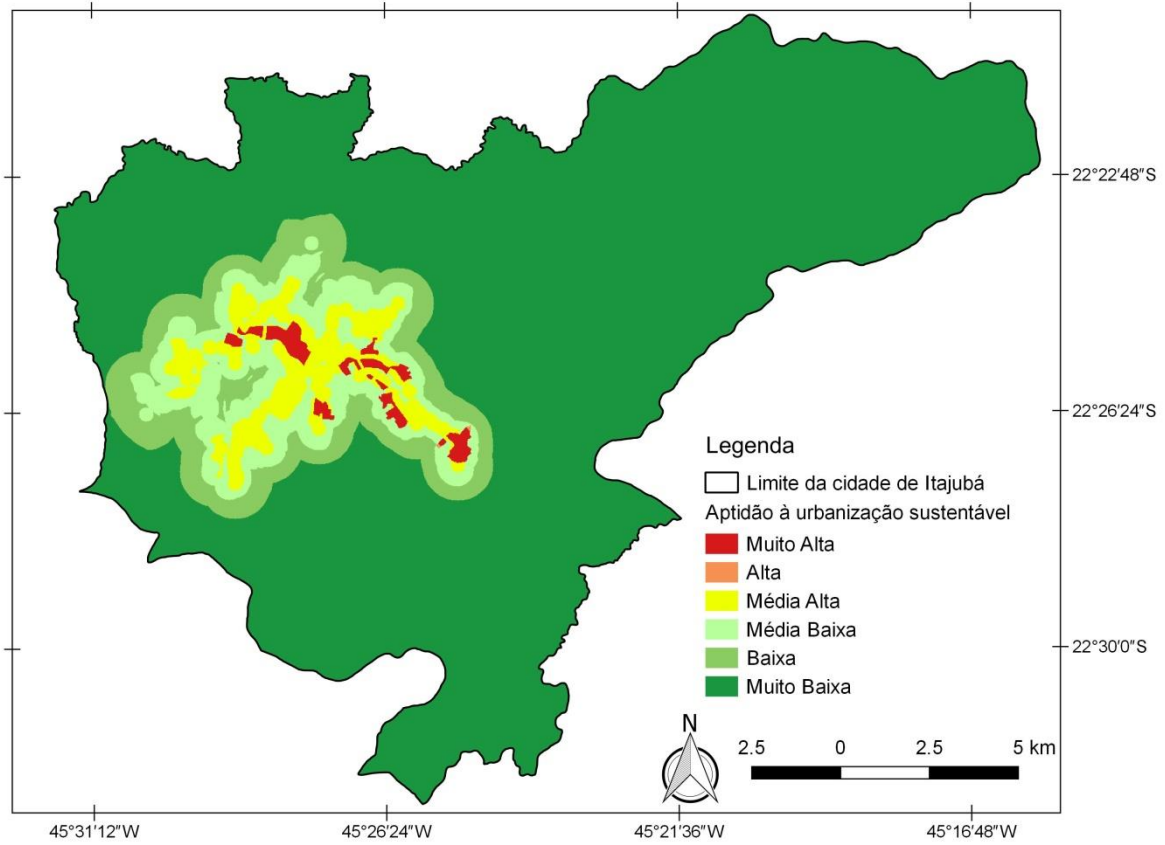


Figura 54: Mapa de aptidão à urbanização em função de cidades ambientalmente sustentáveis.

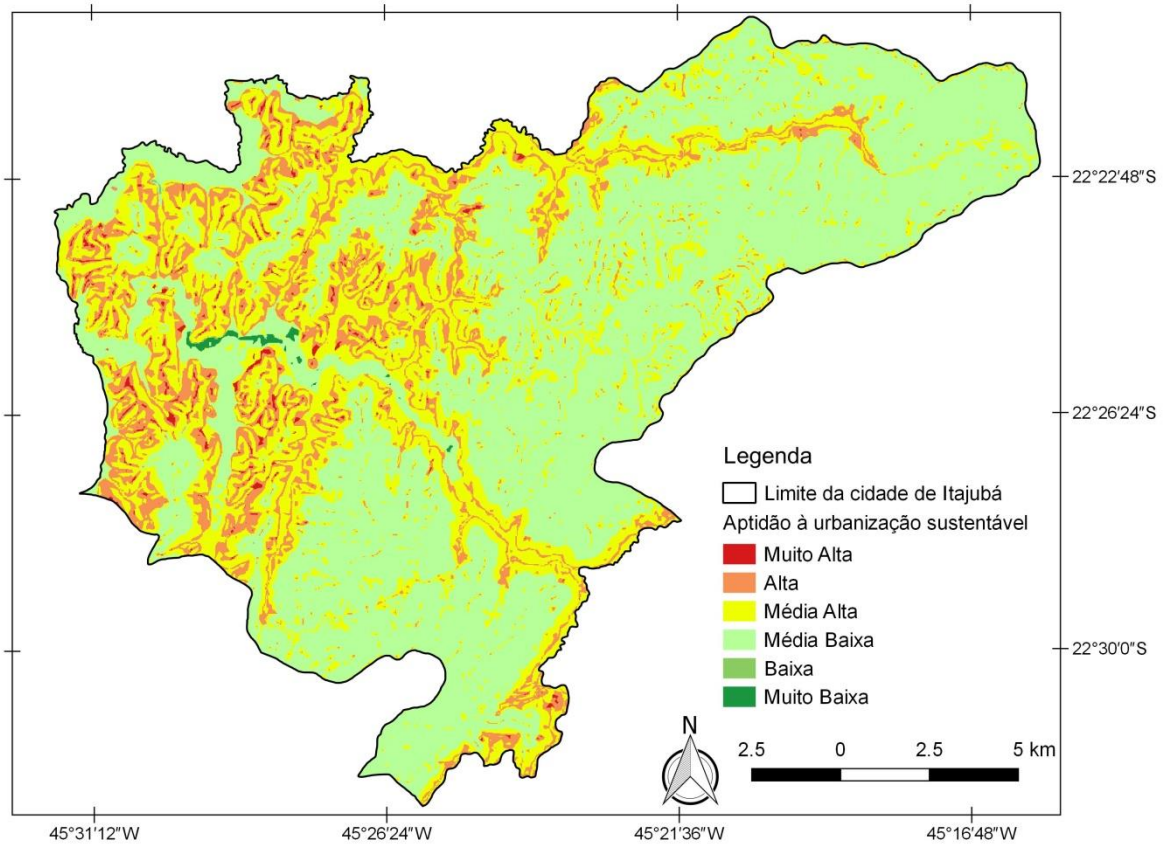


Figura 55: Mapa de aptidão à urbanização em função da estabilidade do solo.

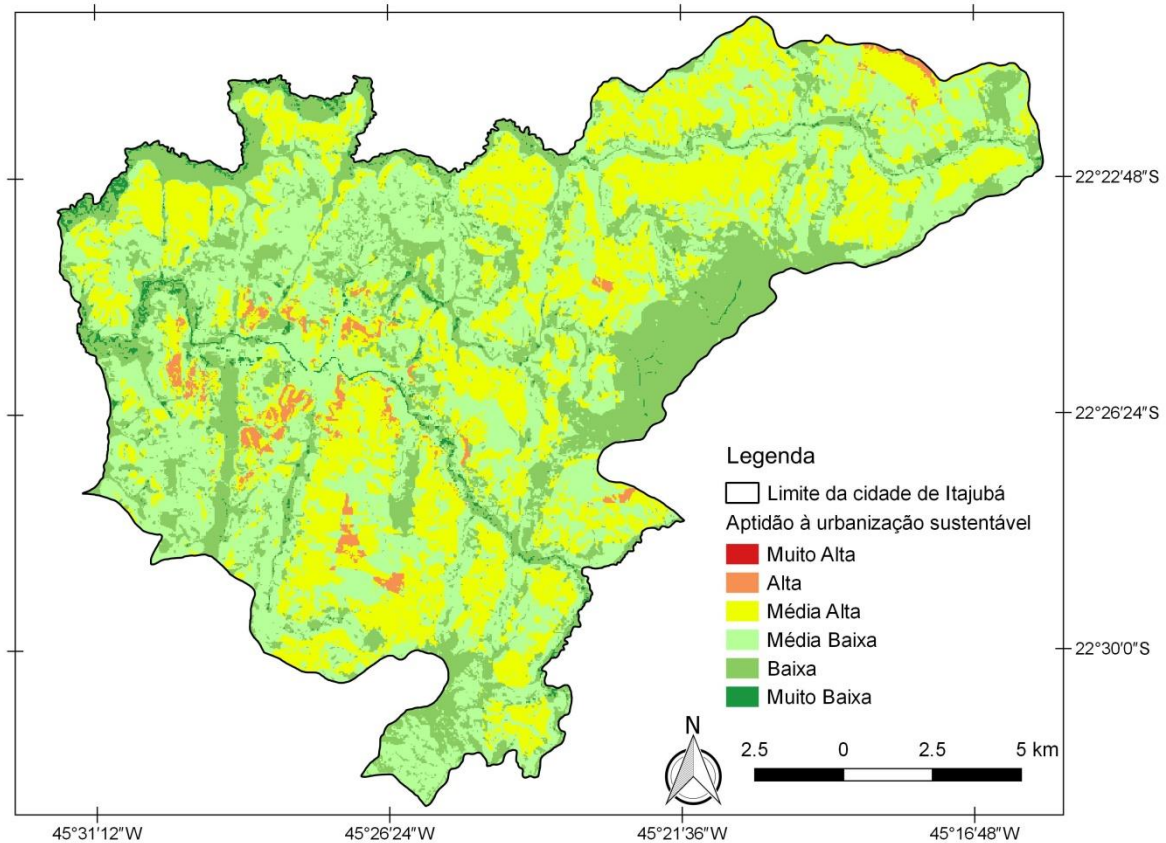


Figura 56: Mapa de aptidão à urbanização em função das vulnerabilidades dos recursos hídricos.

Com os subcritérios agregados, é possível realizar a combinação dos critérios para obter o mapa final de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável. Os critérios “Cidades Ambientalmente Sustentáveis”, mostrado na Figura 54, “Estabilidade do Solo”, mostrado na Figura 55, e “Vulnerabilidades Hídricas”, mostrado na Figura 56, foram combinados com metodologia WLC, através da ferramenta *Weighted Sum*, no SIG ArcGIS (ESRI, 2014). Essa combinação é realizada com os pesos atribuídos a cada critério no item 5.3.2 (Figura 28). A combinação gera o mapa final de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável para a região de estudo, disponível na Figura 57.

A carta da Figura 57 é obtida com valores normalizados, na mesma escala utilizada para todo o processo, de 0 a 1. Essa normalização é reclassificada de acordo com as aptidões “muito alta”, “alta”, “média alta”, “média baixa”, “baixa” e “muito baixa” para gerar a Tabela 11. Na tabela é possível visualizar a área que cada aptidão ocupa dentro do município e as porcentagens que representam em função da área do total de Itajubá.

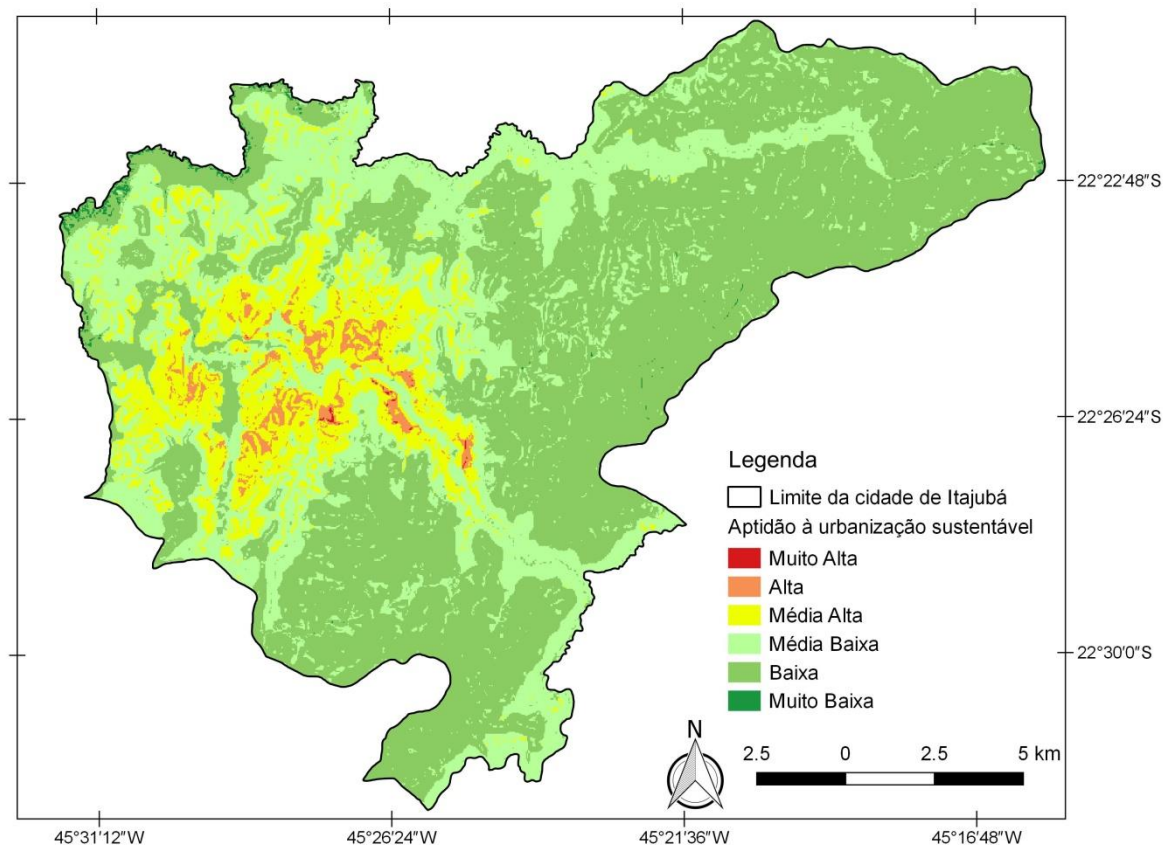


Figura 57: Mapeamento final das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável sobre o município do Itajubá.

Tabela 11: Área de cada classe de aptidão no mapeamento final.

| Aptidão à urbanização ambientalmente sustentável | Área (km²) | Porcentagem (%) |
|---|------------------------------|------------------------|
| Muito Alta | 0.14 | 0.05 |
| Alta | 5.03 | 1.71 |
| Média Alta | 35.04 | 11.89 |
| Média Baixa | 88.72 | 30.11 |
| Baixa | 164.46 | 55.82 |
| Muito Baixa | 1.23 | 0.42 |
| Área Total | 294.62 | |

No mapeamento final e com o auxílio da Tabela 11, é possível notar que Itajubá apresenta poucas áreas classificadas como aptas à urbanização. Somadas as classes de “muito alta”, “alta” e “média alta”, obtém-se que menos de 14% da área total da cidade é representada como área apta à ser urbanizada. Além disso, as parcelas de solo que apresentam aptidão “muito alta” e “alta”, como constatado na carta de classificação do ano de 2017, já são todas cobertas por áreas construídas.

É possível notar a grande predominância de áreas de baixa aptidão à urbanização. Somadas as classes de “média baixa”, “baixa” e “muito baixa” aptidão, obtém-se que mais de 86% das áreas do município são consideradas impróprias para serem urbanizadas de forma sustentável.

Essa baixa aptidão à urbanização apresentada na cidade é função da combinação final de todos os favorecimentos e desfavorecimentos medidos pelos diversos subcritérios avaliados. Por exemplo, nas áreas em que as declividades e altitudes são adequadas para serem urbanizadas, nota-se que fatores como o tipo de solo e a mancha de inundação acabam desqualificando essas áreas, ao passo que os fatores são combinados.

Constata-se, portanto, que as características da cidade como um todo tendem a desfavorecer sua aptidão à urbanização, já que a área apresenta muitos critérios de instabilidade ambiental que, se forçados, trarão problemas diversos como enchentes, deslizamento de solos, ilhas de calor, entre tantos outros impactos oriundos da ocupação urbana sem planejamento (MENDONÇA; CUNHA; LUÍS, 2016).

Nas Figuras 58 e 59, as áreas de aptidão “muita alta”, “alta” e “média alta” podem ser vistas sobre a imagem de melhor resolução, disponibilizada pelo Google Earth (ano).



Figura 58: Mapeamento das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável na parte norte de Itajubá.

Com as Figuras 58 e 59, é possível notar que dentro da área central de Itajubá, onde a cidade já é consolidada há anos, é possível encontrar áreas que não são aptas a receber

urbanização. Essas áreas estão suscetíveis a vulnerabilidades ambientais, estando localizadas exatamente dentro da mancha de inundação da cidade, como será mostrado no item 6.3.



Figura 59: Mapeamento das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável na parte sul de Itajubá.

5.4. Aplicação conjunta da Projeção e do Mapeamento de Aptidão

Embora existam leis que governem o uso e a ocupação do solo sobre o município de Itajubá, foi possível notar, através das duas análises elaboradas, que há a ocorrência de expansão urbana sobre áreas que levam a insustentabilidade da urbanização, sendo também notório o crescimento horizontal da cidade. Dessa forma, infere-se que as diretrizes atuais que regem a urbanização possam não estar sendo eficazes, deixando margem à ocorrência de uma urbanização que gera impactos diversos no ambiente e na sociedade.

Analisando o comportamento histórico e a projeção do crescimento urbano, desenvolvidos através do modelo LCM, com o mapeamento de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável, elaborado com a metodologia AHP da análise de decisão multicritério, foi elaborada a Figura 60.

Como já discutido no item 5.2.2, o crescimento é notório nas zonas periféricas da cidade. Destacam-se, através da Figura 60, as áreas 1 (região leste do bairro Açude), 2 (Distrito Industrial e Santos Dumont), 3 (Vila Rubens e parte norte do Boa Vista), 4 (Conexões entre os bairros Capituba, Piedade e Rebourgeon), 5 (Vila Poddis, Avenida e

Medicina), e 6 (Morro Grande, Nossa Senhora de Fátima, Santa Rosa e Jarrinha). As áreas são destacadas, pois, além de apresentarem alto crescimento nos períodos analisados (incluindo-se a projeção), estas se encontram localizadas em locais de “média baixa” ou “baixa” aptidão, sendo, portanto, áreas de destaque para a tomada de medidas públicas. As Figuras 61, 62, 63, 64, 65 e 66 apresentam um zoom sobre as regiões mais críticas que tendem a crescer sobre áreas inadequadas à ocupação urbana.

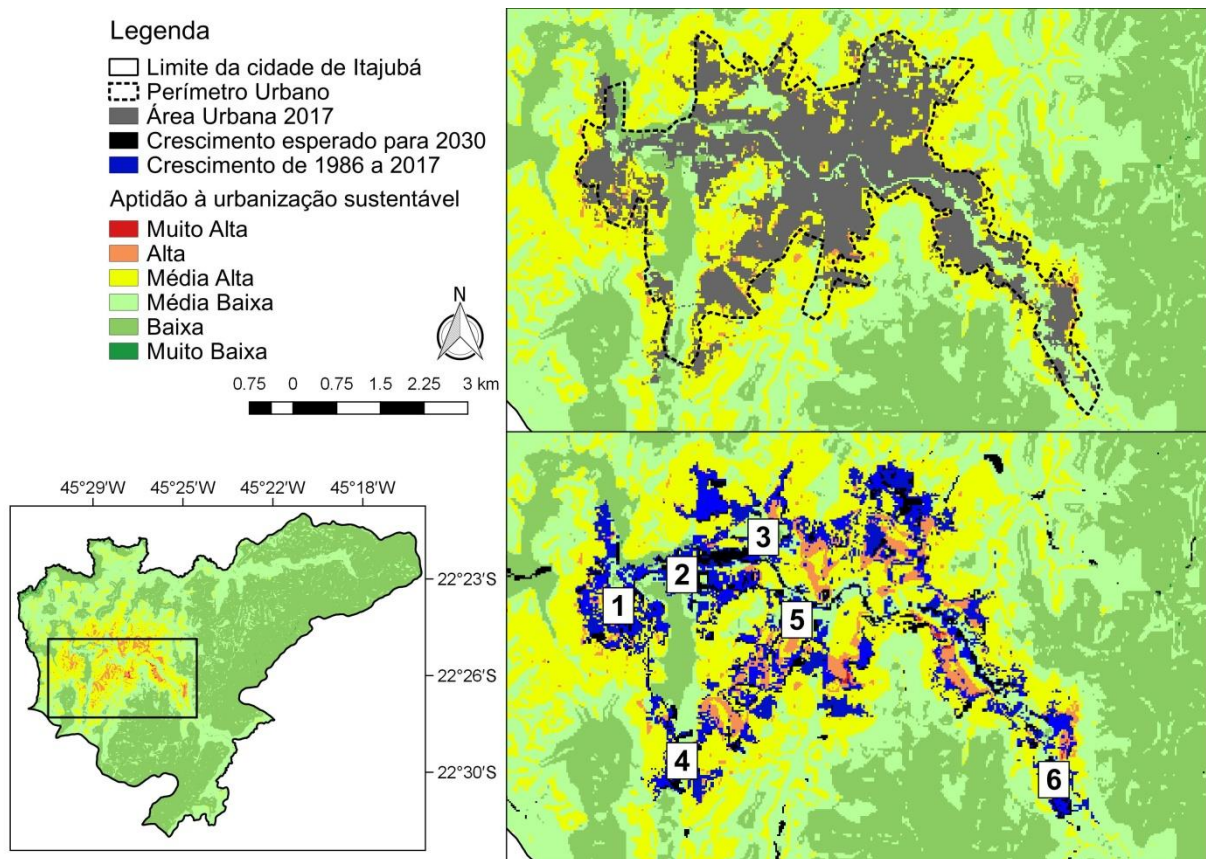


Figura 60: Mapeamento de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável junto à projeção de crescimento urbano.

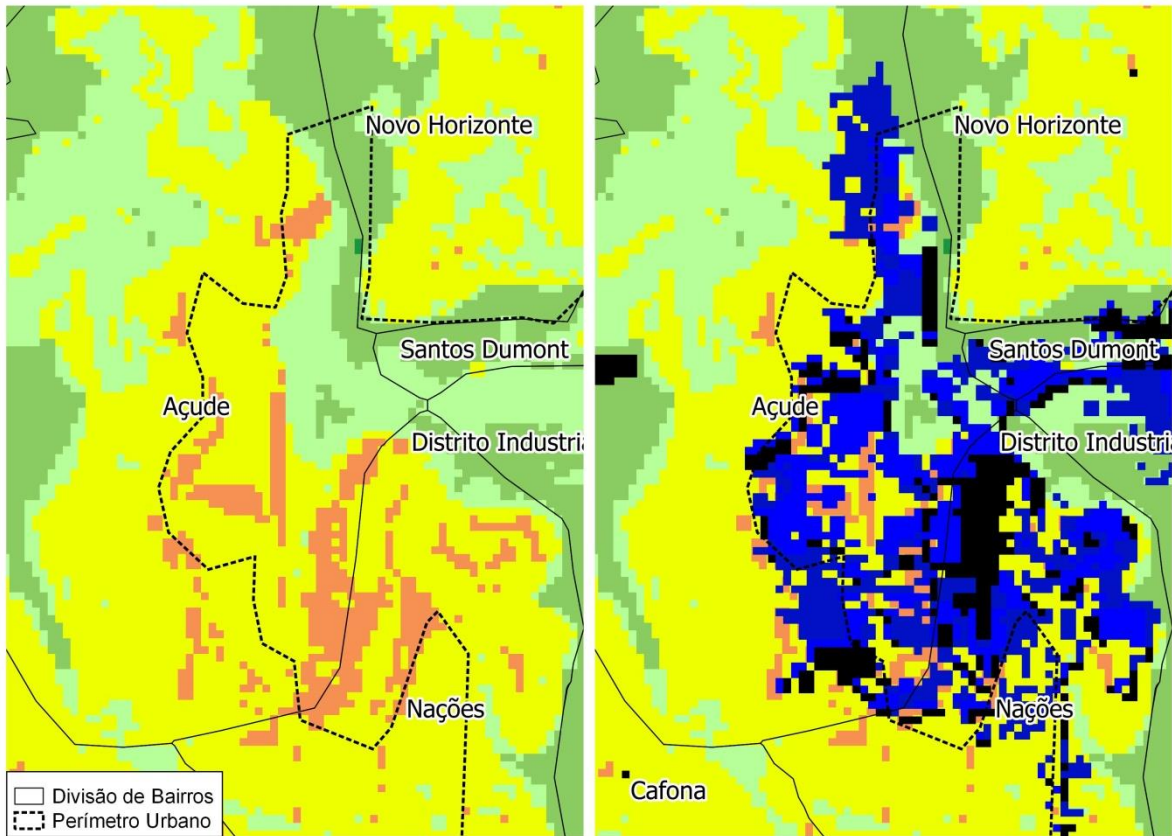


Figura 61: Zoom sobre a área número 1.

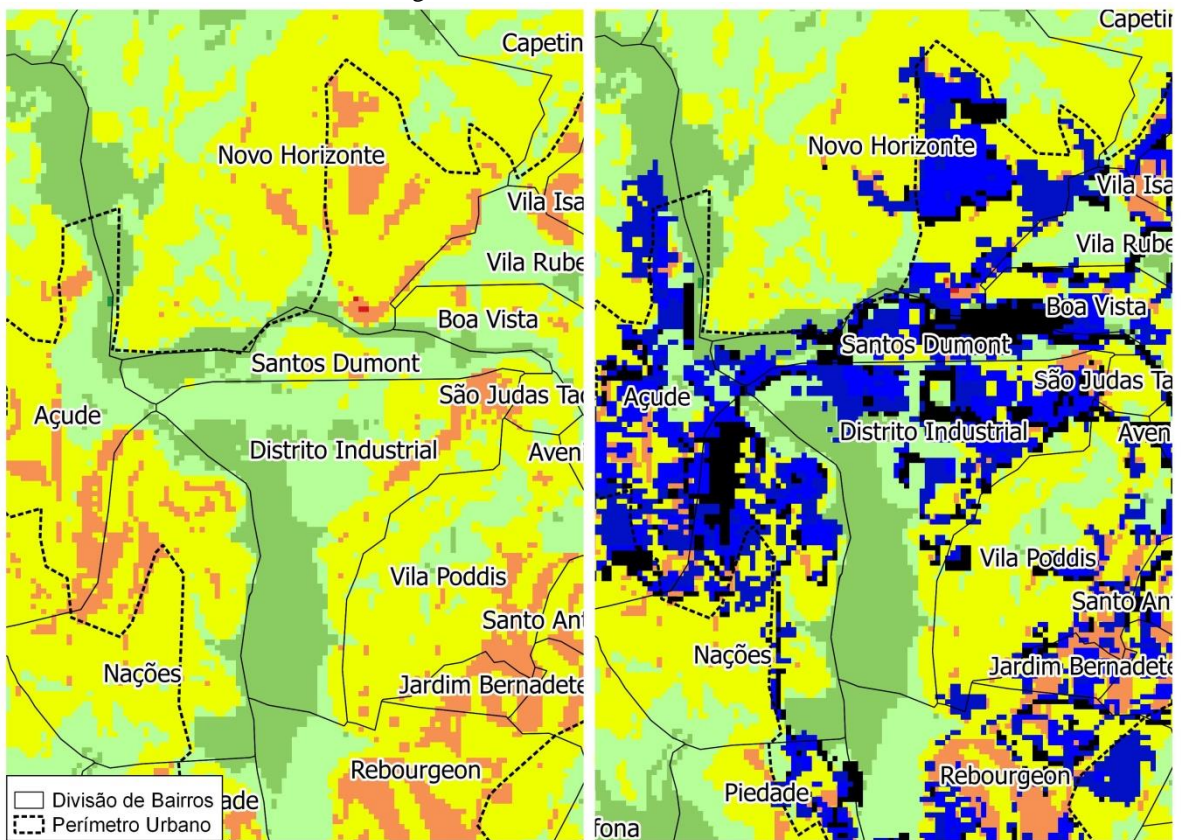


Figura 62: Zoom sobre a área número 2.

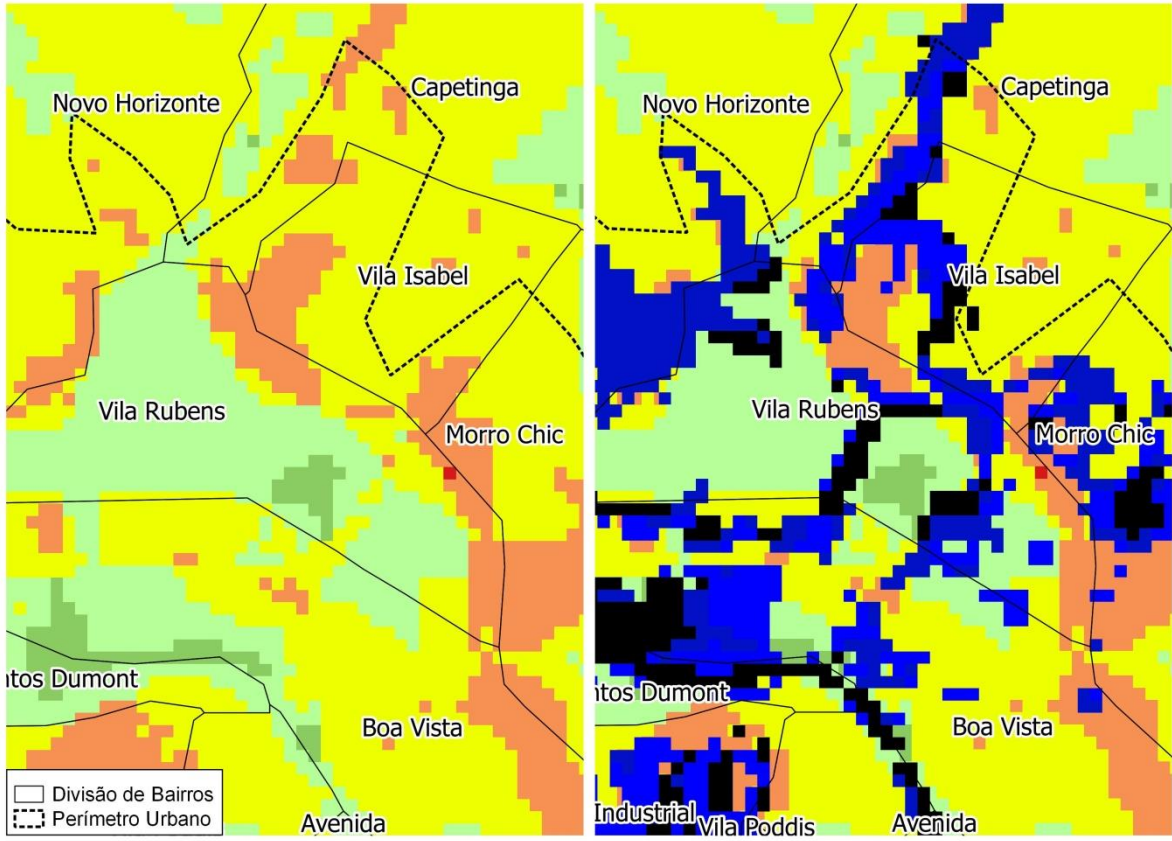


Figura 63: Zoom sobre a área número 3.

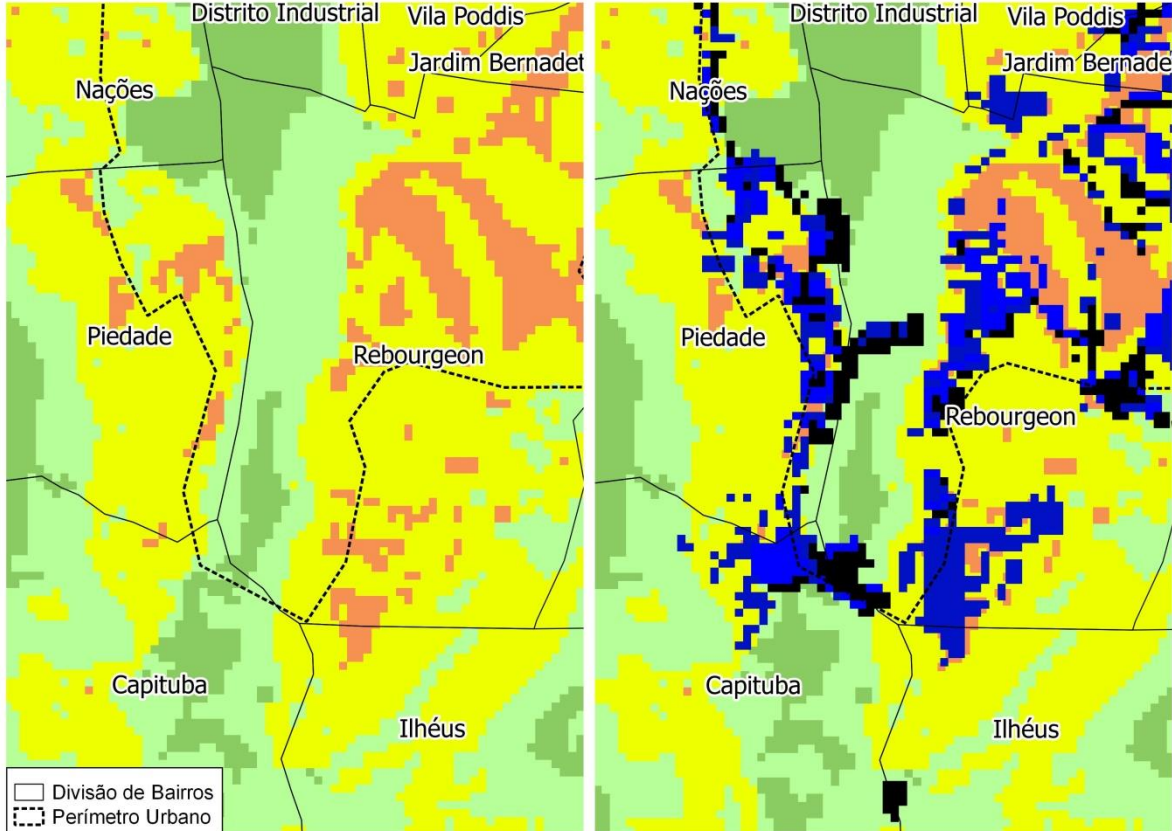


Figura 64: Zoom sobre a área número 4.

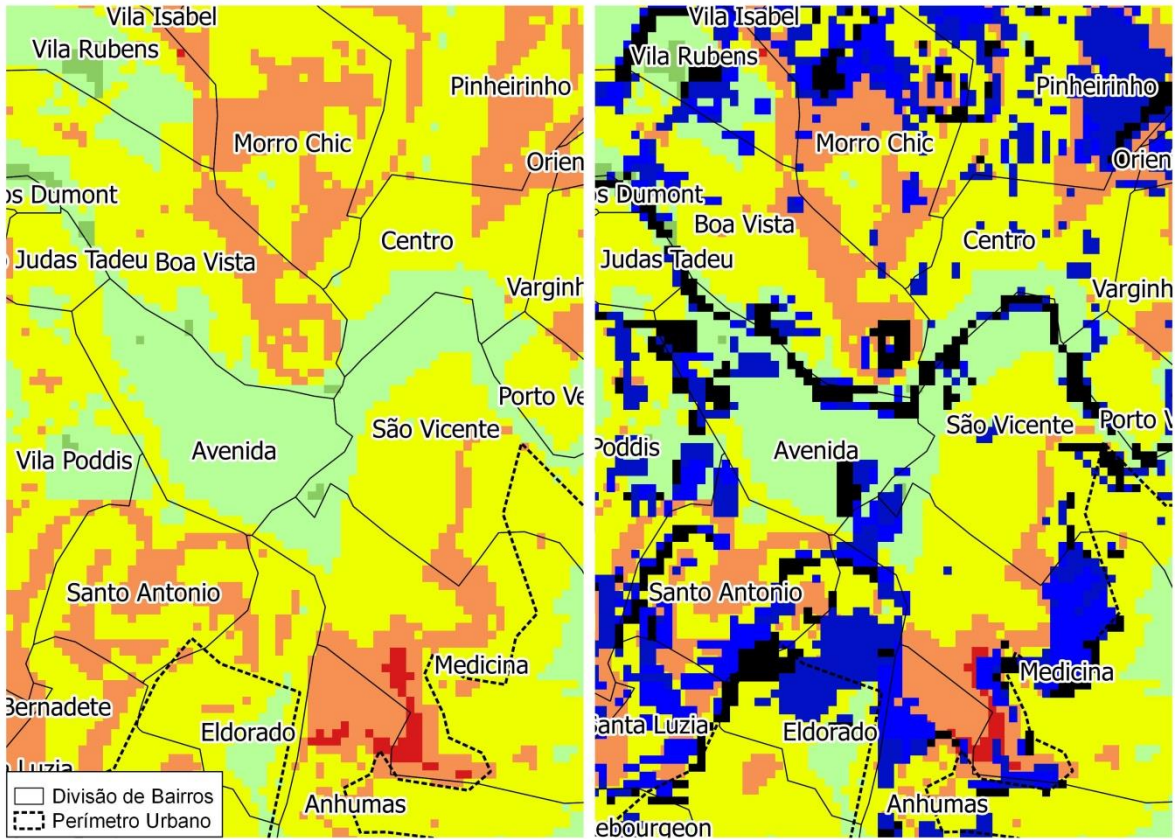


Figura 65: Zoom sobre a área número 5.

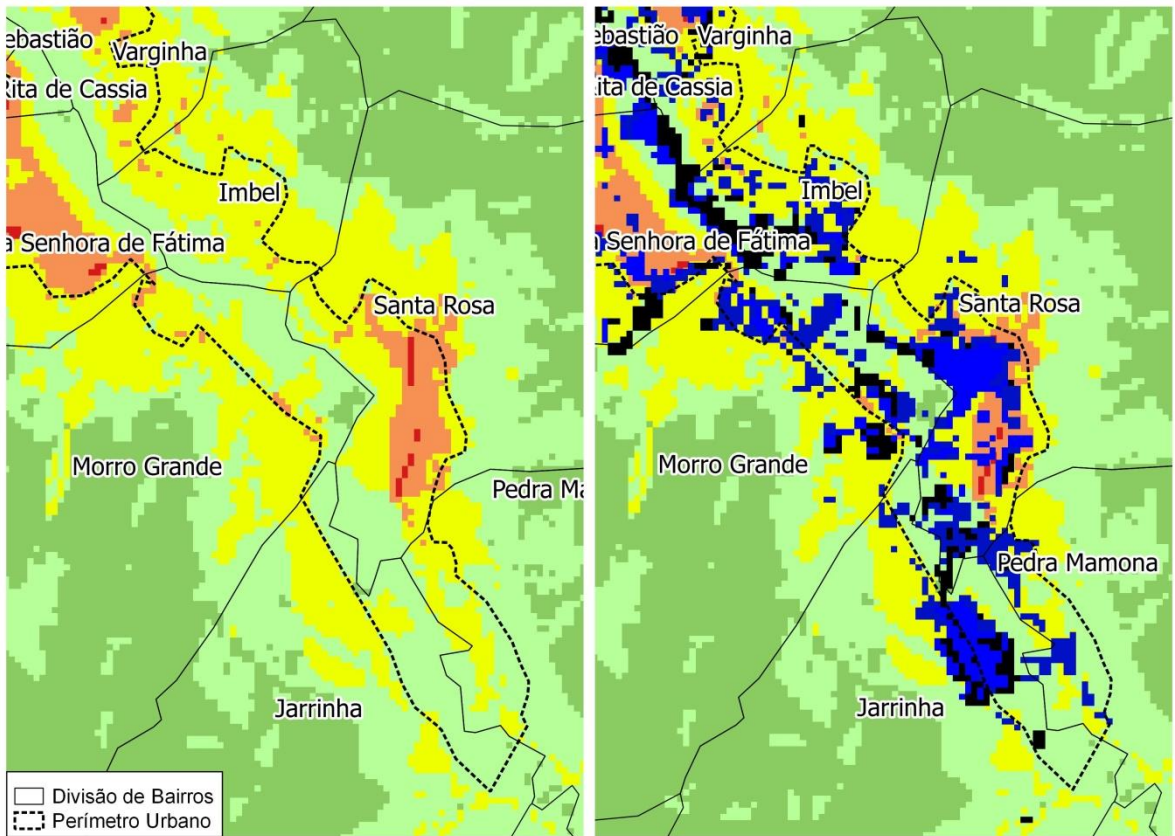


Figura 66: Zoom sobre a área número 6.

Dessa forma, esses bairros necessitam de alerta quanto às medidas públicas de gestão urbana para que os impactos ambientais sejam minimizados e para que as populações não sofram com as vulnerabilidades ambientais à que estão sujeitas, como já discutido no item 5.2.2.

Além disso, a ocupação sobre os locais de baixa aptidão trazem problemas diversos à cidade como o incentivo do transporte motorizado individual, já que as populações estão sujeitas a percorrer maiores distâncias para acessar áreas de serviço, normalmente localizadas no centro da cidade (PIVO, 1996; FELIX, 2017). Esse incentivo ao transporte motorizado aumenta as emissões de poluentes, contribuindo para o efeito estufa e para a maior incidência de problemas respiratórios (FELIX, 2017).

A análise realizada permite conhecer as regiões que mais crescem em direção à áreas aptas e não aptas à ocupação de solo urbano. A utilização dessas ferramentas, portanto, é vital para uma abordagem preventiva na tomada de decisão no planejamento urbano. A inserção dessas técnicas no Plano Diretor, por exemplo, permite que o desenvolvimento sustentável seja alcançado através de uma metodologia acessível e replicável. Além disso, destaca-se também a necessidade de seriedade e rigorosidade no seguimento das políticas desenvolvidas, para que o Plano Diretor seja de fato eficiente na manutenção da urbanização ambientalmente sustentável.

5.5. Adequação dos Zoneamentos de Áreas de Expansão e Adensamento

Após realizar o mapeamento de aptidão à urbanização ambientalmente sustentável para o município de Itajubá, constatou-se a necessidade de sugestões de melhorias para o Zoneamento de Uso e Ocupação do Solo do Plano Diretor no que concerne à delimitação das zonas destinadas à expansão urbana, denominadas como Zonas de Expansão Urbana (ZEU), e das zonas destinadas ao adensamento urbano, denominadas Zonas de Adensamento Urbano (ZAD).

5.5.1. Análise das zonas de expansão

Analisando o ZEU do Plano, disposta na Figura 67, notou-se que a delimitação dessas áreas se encontrava sobre solos de “média baixa” aptidão. Além disso, constatou-se superestimação da delimitação, que foi traçada de modo a incentivar ainda mais um

crescimento horizontal, que, como já discutido anteriormente, propaga os efeitos de desigualdades sociais e impactos ambientais.

Para sugerir um Zoneamento mais sustentável, foi elaborada a Figura 67, onde são propostas, com base na aptidão do solo à urbanização ambientalmente sustentável, novas áreas para serem destinadas à expansão (áreas destacadas em vermelho).

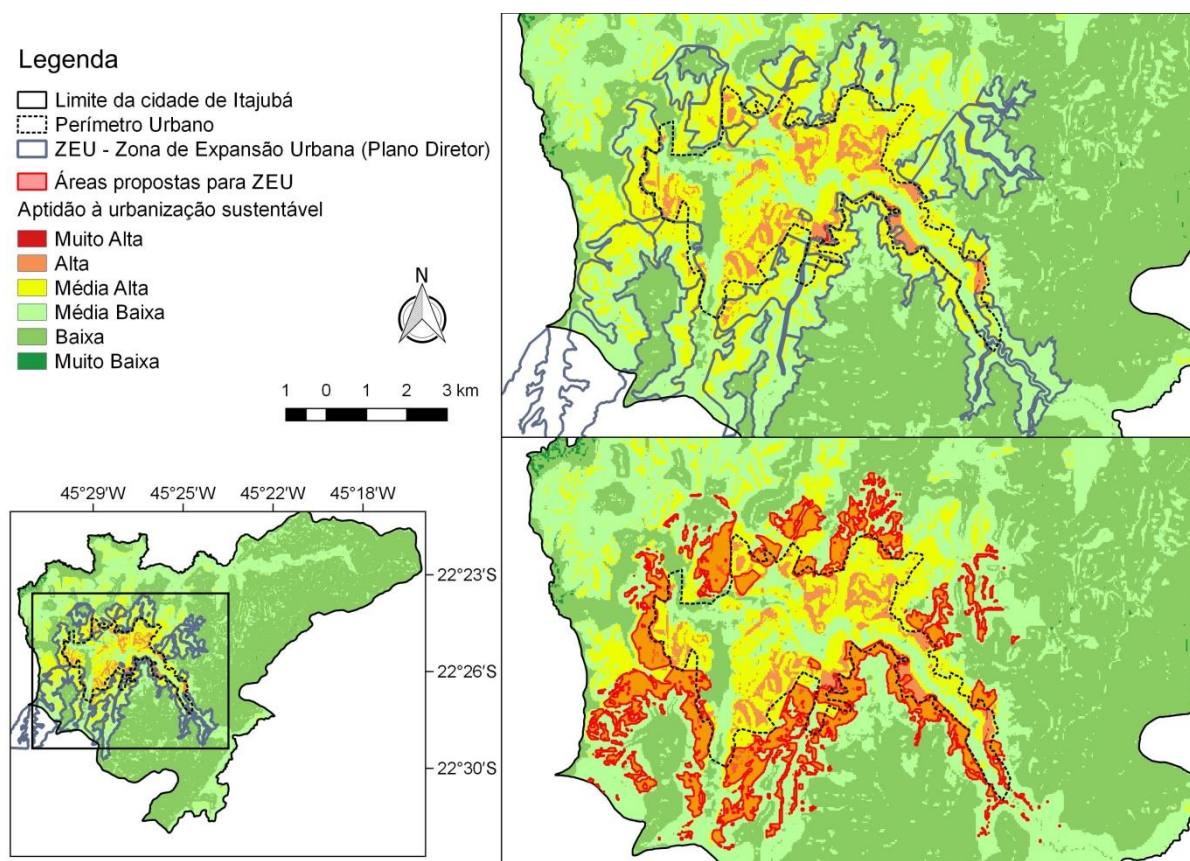


Figura 67: Proposta de redefinição das zonas de expansão urbana para o município de Itajubá.

É possível notar, através da Figura 67, que houve uma diminuição de áreas destinadas à expansão. Essa diminuição quantificada pode ser vista na Tabela 12, onde se constata que há uma diminuição em área de ZEU de aproximadamente 57%.

Tabela 12: Comparação entre a ZEU delimitada e a ZEU proposta para manutenção da sustentabilidade.

| | Área (km ²) |
|--|-------------------------|
| ZEU delimitada no Plano Diretor | 34.16 |
| ZEU proposta pelo Mapeamento de Aptidão | 14.7 |

Embora exista uma grande diminuição em área das zonas destinadas à urbanização entre o Plano e o mapeamento proposto, é necessário que os benefícios trazidos pela urbanização ambientalmente sustentável sejam priorizados na tomada de decisão municipal.

Nota-se que a ZEU definida no Plano Diretor incentiva fortemente a expansão horizontal, atingindo além das fronteiras municipais, como pode ser visto na Figura 67.

A ocupação sobre as áreas de baixa aptidão e o incentivo ao crescimento horizontal, como já discutido nos itens 5.2.2 e 5.4, representam uma ameaça tanto para a população quanto para o ambiente. Além do que já foi discutido, ressalta-se ainda que o crescimento horizontal potencializa a invasão sobre as áreas rurais e áreas protegidas (PIVO, 1996). O avanço sobre áreas rurais não é incentivado, pois, como explica Maricato (2003) é um tipo de urbanização que atrai e favorece ainda mais a expansão horizontal. A urbanização em direção as áreas protegidas e a ocupação no seu entorno, como explicam Wittemyer et al. (2008), é preocupante, pois impacta diretamente nos índices de desmatamento e perda de habitat de animais silvestres. Portanto, é de extrema importância que as áreas de ZEU sejam delimitadas com muita seriedade e precaução, para minimizar os impactos da expansão.

Ressalta-se ainda que o Plano deve ser seguido com muita rigorosidade, especialmente após a diminuição das delimitações de ZEU, para que novos loteamentos e ocupações sejam aprovados unicamente de acordo com a lei.

Como alternativa à expansão horizontal, discute-se no item 5.6, a seguir, as áreas passíveis de adensamento controlado.

5.5.2. Análise das zonas de adensamento

Como aponta Pivo (1996), o adensamento das cidades é vital para a realização de uma urbanização ambientalmente sustentável. O adensamento ocorre através da verticalização e adensamento populacional controlados de áreas que já possuem infraestruturas básicas, como rede de transporte, rede de esgoto e energia. O adensamento controlado das cidades permite que serviços diferentes sejam oferecidos dentro de uma mesma área, favorecendo o acesso a esses serviços e diminuindo, diretamente, a dependência dos meios de transporte motorizado. Dessa forma o adensamento permite, além de conter a horizontalização das cidades, que haja menos emissão de poluentes e, conseqüentemente, mais saúde pública (PIVO, 1996; FELIX, 2017).

A Zona de Adensamento (ZAD) mapeada de acordo com o Plano Diretor pode ser vista na Figura 68. Através dela é possível notar que, embora grande parte das áreas adensáveis se encontrem em posição favorecida pelo mapeamento de aptidão e pela sua proximidade ao centro comercial da cidade, algumas delas encontram-se exatamente sobre a mancha de

inundação delimitada pela CPRM (2014). De acordo com a Figura 68, é possível ver que as regiões 3, 5, 7 e 12 serão diretamente impactadas em casos de cheia.

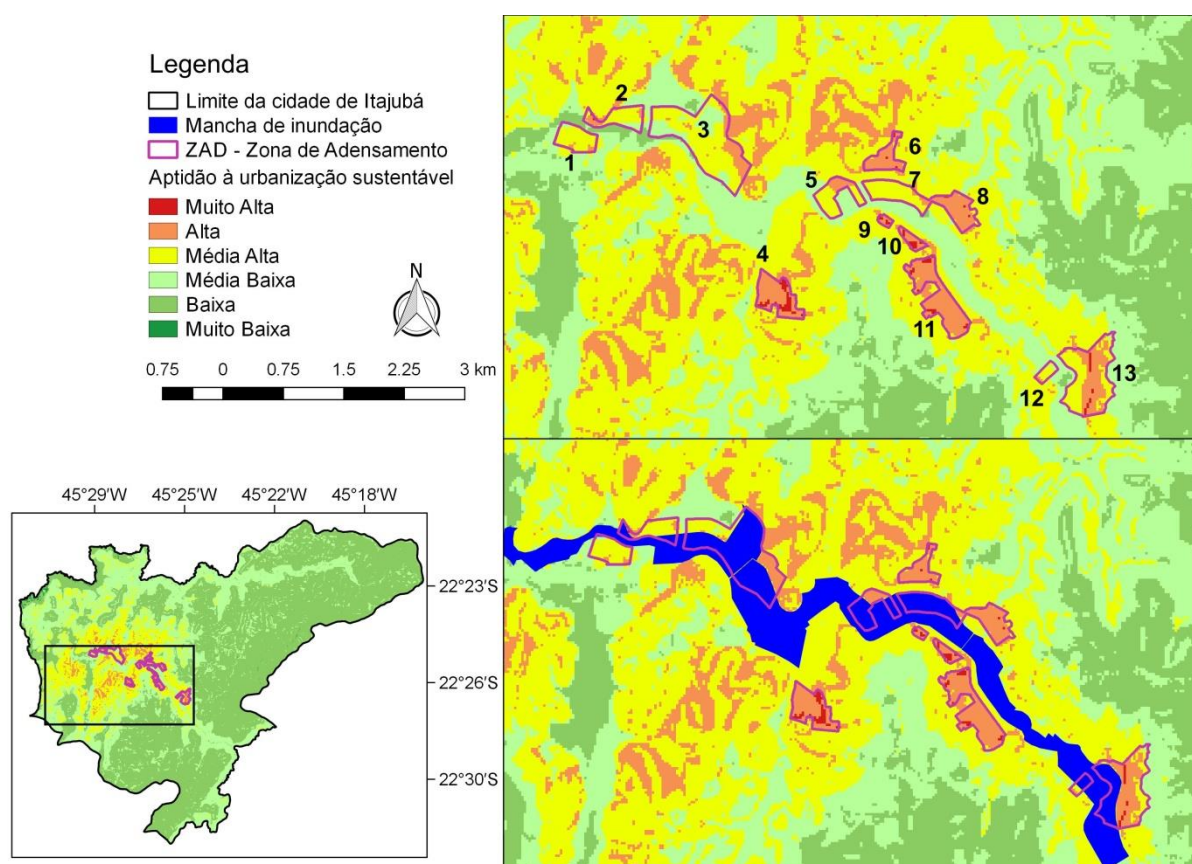


Figura 68: Zona de Adensamento (ZAD) e mapa de inundações da CPRM (2014).

Buscando minimizar esses impactos e propor novas áreas a serem adensadas, a partir do mapeamento de aptidão, foram sugeridos locais que podem se tornar novas zonas de adensamento. Esses locais são indicados para que estudos de viabilidade de adensamento sejam realizados, a fim de que mais zonas adensáveis sejam criadas no Plano Diretor sem que ocorra um adensamento em excesso, que também gera impactos negativos. As áreas propostas para estudo de ZAD podem ser vistas na Figura 69.

Recomenda-se, para o estudo de adensamento das áreas propostas na Figura 69, que sejam consideradas para o adensamento, principalmente as áreas consideradas como vazios urbanos. Dessa forma seria estimulado o melhor aproveitamento das infraestruturas urbanas já existentes, barateando os gastos públicos e contribuindo com a não horizontalização.

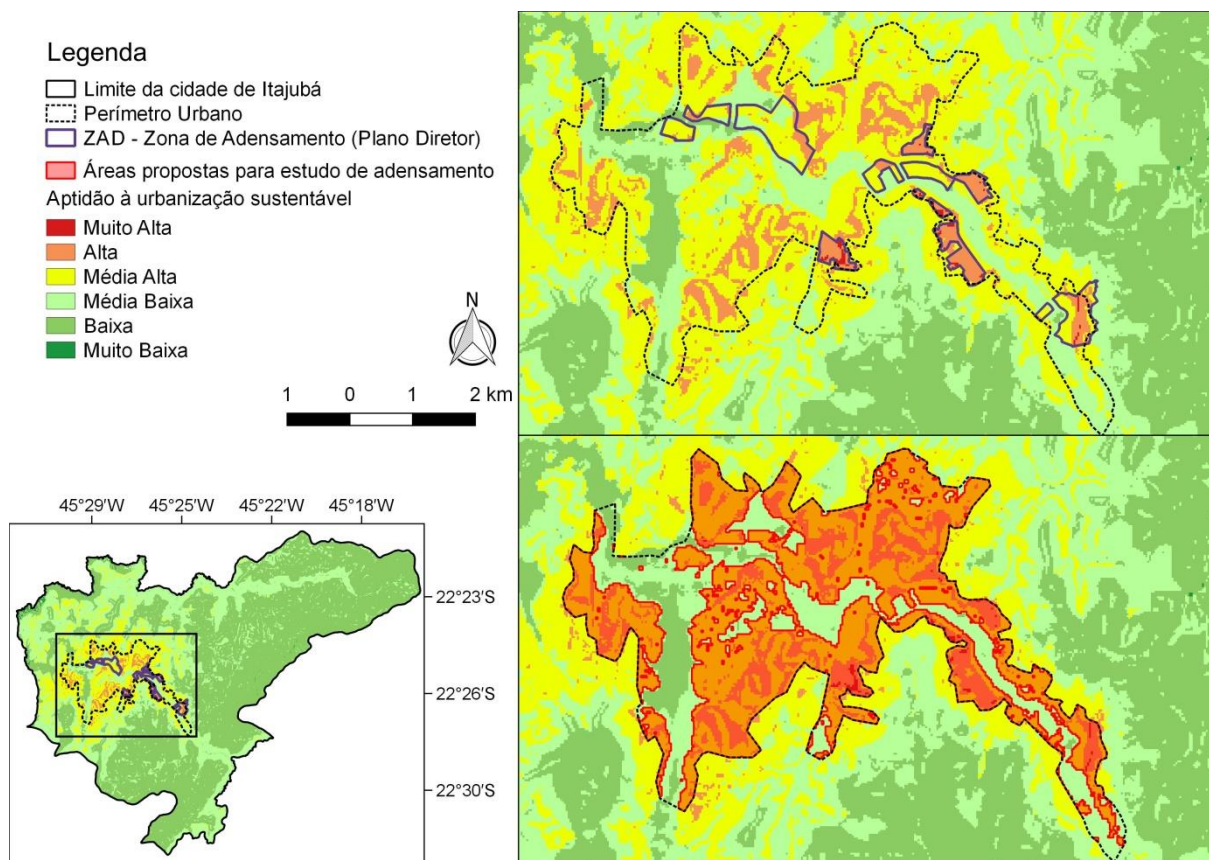


Figura 69: Sugestão de novas áreas passíveis de adensamento para o município de Itajubá.

Portanto, cabe à gestão pública municipal, através do Plano Diretor, estabelecer diretrizes e ações que estimulem o crescimento através do adensamento controlado, onde o adensamento ocorre sem sobrecarregar o ambiente. Dessa forma, o crescimento horizontal é desestimulado ao passo que, simultaneamente, são respeitados os limites ambientais das áreas a serem adensadas.

6. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, que mostram a intensa horizontalização do crescimento urbano e a ocupação recorrente sobre áreas consideradas inaptas à ocupação sustentável, foi possível notar a grande dificuldade que Itajubá enfrenta em exercer, de forma eficiente, as leis de uso e ocupação do solo no município.

A etapa de classificação das imagens, realizada através da ferramenta de segmentação com classificação supervisionada, forneceu classificações de ótima qualidade para o nível de estudos urbanos, permitindo o prosseguimento do estudo.

A ferramenta de modelagem da projeção da alteração do uso e da cobertura do solo utilizada foi o modelo LCM. O modelo operou se baseando nas imagens classificadas dos anos de 1986, 2001 e 2017, no mapa de declividade, e no mapa de distância euclidiana da rede de transporte. A projeção foi realizada para o ano de 2030. O LCM permitiu avaliar todo o crescimento urbano entre os períodos estudados e a projeção de crescimento para o tempo futuro de 2030. Ao avaliar o histórico e a projeção de crescimento da cidade, foi possível constatar que o crescimento ocorre predominantemente de forma horizontal tanto nos anos de embasamento (1986 – 2017) quanto no ano de projeção (2030). A grande maioria dos bairros que se expandem de forma horizontal é caracterizada como bairros de populações mais pobres, evidenciando toda a discussão literária realizada neste trabalho, e a exclusão social urbana a que estas pessoas estão submetidas.

A partir da análise do LCM, constatou-se que a não seriedade e rigorosidade no seguimento das leis de uso e ocupação do solo, como é o caso do Plano Diretor, acabam por estimular e propagar esses traços da desigualdade social, bem como por atenuar os impactos ambientais oriundos da horizontalização e da desigualdade.

Além disso, o modelo LCM permitiu avaliar o grande potencial de transição de solo não urbano para solo urbano que Itajubá apresenta em direção a cidade de Piranguinho, em direção a Piranguçu, em direção a Delfim Moreira e Wenceslau Braz, a Maria da Fé, sobre as regiões da Prefeitura e nos bairros próximos ao Aeroporto. Essa análise de potencial é importante para ressaltar as áreas que possuem maior tendência de se tornar urbanas, despertando a atenção dos gestores públicos para a criação de políticas urbanas sobre esses locais e evitando impactos ambientais sobre a região e sua população.

O mapeamento das áreas de aptidão foi realizado através da análise de decisão multicritério com a metodologia do Processo Analítico Hierárquico (AHP). Os critérios e subcritérios utilizados no desenvolvimento do modelo foram determinados com embasamento

na literatura e nas leis que regem o parcelamento do solo urbano sobre Itajubá. A ponderação dos critérios foi atribuída através da aplicação da matriz par a par. A matriz foi avaliada por especialistas nas áreas de direito, pedologia, engenharia civil e engenharia ambiental, através de alunos mestrandos, doutorandos e professores. A combinação dos critérios foi realizada através da Combinação Linear Ponderada, onde os critérios são agregados de forma ponderada com os pesos a eles atribuídos na matriz par a par.

O modelo elaborado foi aplicado de modo a obter o mapeamento das áreas aptas à urbanização ambientalmente sustentável sobre a cidade de Itajubá. O mapeamento permitiu inferir que Itajubá possui poucas áreas de aptidão à urbanização, sendo que mais de 86% da área total da cidade foi classificada como área não apta a ser urbanizada.

A baixa aptidão apresentada pela cidade ocorre em função da medição de aptidão ou não aptidão realizada em todos os critérios avaliados. Constata-se, de forma geral, que os fatores que regem a urbanização, analisados à realidade da cidade, tendem a desfavorecer os terrenos quanto à aptidão de urbanização. A maior parte desse desfavorecimento se dá em função das condições naturais de relevo, pedologia e altitude de Itajubá, que tornam a cidade altamente suscetível à ocorrência, principalmente, de inundações e processos de erosão.

Com a aplicação da metodologia conjunta foi possível constatar que a modelagem de alteração do solo e a análise de decisão multicritério podem contribuir para a realização de um planejamento urbano dinâmico, através de uma metodologia acessível e replicável. A análise através da utilização dessas ferramentas é recomendável aos gestores públicos, pois permite que o planejamento seja realizado de forma preventiva, garantindo a manutenção da sustentabilidade ambiental urbana.

A aplicação conjunta da projeção do uso do solo com o mapeamento, através da análise de decisão multicritério, permitiu que fossem destacadas as áreas urbanas que necessitam de maior atenção dos órgãos públicos de Itajubá. A análise realizada permitiu a identificação das áreas ao redor dos bairros: Açude, Distrito Industrial, Santos Dumont, Vila Rubens, Boa Vista, Capituba, Piedade, Rebourgeon, Vila Poddis, Avenida, Medicina, Morro Grande, Nossa Senhora de Fátima, Santa Rosa e Jarrinha. Esses bairros foram selecionados, pois, além de apresentarem crescimento horizontal durante todo o período histórico avaliado e na projeção para 2030, mostraram que estão crescendo em direção às áreas com baixa aptidão à urbanização ambientalmente sustentável.

Essa ocupação horizontal, além de pressionar as áreas rurais, acaba incentivando cada vez mais a ocupação das áreas periféricas, pois, a tendência de se urbanizar próximo a locais

já urbanizados faz com que essas novas áreas urbanas tornem-se atrativas à abertura de novos loteamentos. Esse processo avança, não só em direção às áreas rurais, mas também em direção às áreas protegidas, impactando diretamente nos índices de desmatamento e perda de habitat de animais silvestres. Além disso, o crescimento horizontal aumenta as distâncias entre os diferentes serviços ofertados na cidade, induzindo a maior utilização de transporte motorizado, que aumenta as emissões de poluentes, contribuindo para o efeito estufa e para a maior incidência de problemas respiratórios.

Essas áreas periféricas de crescimento, constatadas no trabalho, normalmente ocorrem em locais menos valorizados pelo mercado imobiliário, devido, principalmente, às vulnerabilidades ambientais que essas áreas possuem. Por esse motivo, essas áreas são comumente habitadas por pessoas de poder aquisitivo mais baixo. Esse processo se torna um círculo vicioso, pois a urbanização aumenta a vulnerabilidade ambiental que, por sua vez aumenta a desvalorização dessas áreas. Além disso, as populações mais carentes que ocupam essas áreas acabam ficando expostas aos impactos ambientais e problemas de falta de infraestrutura urbana.

Ressalta-se ainda, que a expansão sobre áreas de baixa aptidão, constatadas na análise conjunta dos métodos utilizados, favorece ainda mais os processos erosivos e os casos de enchentes, tão corriqueiros no município de Itajubá.

Conclui-se que a solução para os problemas encontrados na expansão horizontal podem ser resolvidos através de políticas de adensamento controlado sobre a cidade. Esse adensamento que ocorre através do adensamento populacional e da verticalização de residências, permite que não haja a expansão de infraestruturas urbanas, não incentivando, portanto, cada vez mais o espalhamento das cidades. Além disso, o adensamento permite que as pessoas dependam menos da utilização de carros, diminuindo a emissão de poluentes e os problemas ambientais e de saúde que eles geram.

Sabendo que o Plano Diretor encontra-se em fase de revisão, neste trabalho foram propostas novas áreas de expansão urbana, com base no Plano Diretor municipal vigente, e no mapeamento da aptidão à urbanização ambientalmente sustentável (realizado neste trabalho). As novas áreas de expansão propostas levam em consideração o adensamento da cidade, já que este fator é utilizado como critério na definição da aptidão da urbanização e a manutenção da sustentabilidade urbana.

Foi proposta também a seleção de áreas, dentro do perímetro urbano, que podem vir a ser enquadradas como áreas adensáveis. A delimitação destas áreas foi baseada no mapa de

aptidão à urbanização e sugere-se que sejam realizados estudos sobre o potencial dessas áreas para que estas sejam enquadradas como Zonas de Adensamento, no Plano Diretor que está sendo revisado.

A conclusão final é de que todos os objetivos puderam ser atingidos. As ferramentas se mostram excelentes para o auxílio ao planejamento urbano. Desta forma, recomenda-se que a metodologia utilizada seja cada vez mais inserida dentro do contexto municipal, de forma a dinamizar a ação decisória dentro do município, além de dar um enfoque preventivo ao gerenciamento urbano e ambiental.

REFERÊNCIAS

ASPINALL, R. Modelling land use change with generalized linear models – a multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley, Montana. **Journal of Environmental Management**, Belgium, v. 72, p. 91-103, Feb. 2004. DOI:10.1016/j.jenvman.2004.02.009.

BENZA, M.; WEEKS, J. R.; STOW, D. A.; LÓPEZ-CARR, D. L.; CLARKE, K. C. A pattern-based definition of urban context using remote sensing and GIS. **Remote Sensing of Environment**, Florida, USA, v. 183, p. 250-264, Sep. 2016. DOI:10.1016/j.rse.2016.06.011.

BRAGA, R. Política urbana e gestão ambiental: considerações sobre o Plano Diretor e o zoneamento urbano. In: CARVALHO, P. F.; BRAGA, R. (Org.). **Perspectivas de Gestão Ambientalem Cidades Médias**. Rio Claro: LPM-UNESP, 2001. p. 95-109.

BRASIL. **Código Florestal**. Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 05 maio 2017.

BRASIL. **Estatuto da Cidade**. Lei Federal nº 10.257 de 10 de julho de 2001. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm>. Acesso em: 10 jul. 2017.

BRASIL. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação**. Lei Federal nº 9.985 de 18 de julho de 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm>. Acesso em: 11 jun. 2017.

BRASIL. **Lei de Parcelamento do Solo Urbano**. Lei Federal nº 6.766 de 19 de dezembro de 1979. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.htm>. Acesso em: 25 jun. 2017.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CAMPBELL, J. B., WYNNE, R. H. **Introduction to remote control sensing**. 5.ed. New York: The Guilphord Press, 2011.

CAMPESAN, J. D.; BUENO, J. O. A.; LANDGRAF, M. L.; MORAIS, M. S.; TREVISAN, D. P.; MOSCHINI, L. E.; CASSIANO, A. M. Proposta de expansão urbana para o Município de Santa Lúcia-SP. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, Portugal, v. 6, n.2, p. 264-282, mai. 2017. DOI:10.21664/2238-8869.2017v6i2.p264-282.

CASTRO, J. S.; COSTA, L. S.; BARBOSA, G. R.; ASSEMANY, P. P.; CALIJURI, M. L. Utilização de SIG e análise multicritério para seleção de áreas com potencial para a construção de universidades e loteamentos universitários. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 21, n. 3, p.652 - 657, jul. 2015. DOI:10.1590/S1982-21702015000300037.

CBH Sapucaí. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, Itajubá, s. d.. Disponível em: <<http://www.cbhsapucaí.org.br/cbh/Pagina.do?idSecao=15>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summारेy of current radiometric calibration coefficients for Landsat MMS, TM, ETM+, e EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, Florida, USA, v. 113, n. 5, p. 893-903, May 2009. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007.

COULTER, L. L.; STOW, D. A.; TSAI, Y. H.; IBANEZ, N.; SHIH, H. C.; KERR, A.; BENZA, M.; WEEKS, J. R.; MENSAH, F. Classification and assessment of land cover and land use change in southern Ghana using dense stacks of Landsat 7 ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, Florida, USA, v. 184, p. 396–409, Oct. 2016. DOI:10.1016/j.rse.2016.07.016.

EASTMAN, J. R. **Guide to GIS and image processing**. Worcester, USA: Clark Labs, 2001.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Selva Tutorial**. Worcester, USA: Clark Labs, 2012.

EASTMAN, J. R.; TOLEDANO, J. A Short Presentation of the Land Change Modeler (LCM). In: CAMACHO OLMEDO, M. T.; PAEGELOW, M.; MAS, J. F.; ESCOBAR, F. (Ed.). **Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios**. Cham, Suíça: Springer International Publishing AG, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36.

EHRlich, P. R. **The Population Bomb**. Cutchogue, USA: Buccaneer Books Inc., 1968.

ESRI. **ArcGIS Desktop**: Release 10.2. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2014.

FAO. **The State of Food Insecurity in the World: Meeting the 2015 international hunger**. Rome: United Nations, 2015.

FARIAS, C. L. **O processo de ocupação da periferia urbana em Santa Maria-RS: O caso do bairro Nova Santa Marta**. 2013. 166 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional)-Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2013.

FELIX, R. R. O. M. **Avaliação de áreas urbanas baseada no desenvolvimento orientado ao transporte sustentável (DOTS)**. 2017. 127 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Tecnologia e Sociedade)–Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

FENGLER, F. H.; SILVA, A. M.; PECHE-FILHO, A.; STORINO, M.; RIBEIRO, A. I.; MEDEIROS, G. Análise temporal da cobertura do solo na zona de amortecimento de reserva biológica. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, v. 25, p. 37-47, set. 2012. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/134875>>. Acesso em: 25 maio 2017.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

FLAUZINO, B. K.; MELLONI, E. G. P.; PONS, N. A. D.; LIMA, O. Mapeamento da Capacidade de Uso da Terra como contribuição ao planejamento de uso do solo em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n.2, p. 277-287, 2016. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9025/8290>>. Acesso em: 10 out. 2017.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FULLER, D. O.; HARDIONO, M.; MEIJAARD, E. Deforestation projections for carbon-rich peat swamp forests of Central Kalimantan, Indonesia. **Journal of Environmental Management**, Belgium, v. 48, p. 436-447, Feb. 2011. DOI 10.1007/s00267-011-9643-2.

Google Street View. 2011. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Itajubá>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

Google Earth. Imagens CNES/ Airbus. 2017.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/censo2010/apps/painel/>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

IBGE. **Cidades@**. Itajubá, 2010. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/1BQ1>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

IBGE. **Mapeamento das linhas de drenagem**: Mapeamento Topográfico Disponível em: <<ftp://geofp.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

ICMBio Banco de dados de Geoprocessamento. **Mapa Temático e Dados Geoestatísticos das Unidades de Conservação Federais**: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2016. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/geoprocessamentos>>. Acesso em: 5 jun. 2017.

ITAJUBÁ. **Parcelamento do Solo Urbano** Lei Municipal nº 1.774 de 14 de fevereiro de 1991. Disponível em: <http://www.itajuba.mg.gov.br/semug/leis_e_decretos.php>. Acesso em: 10 jun. 2016.

ITAJUBÁ. **Plano Diretor** Lei Complementar Municipal nº 008 30 de dezembro de 2003. Disponível em: <http://www.itajuba.mg.gov.br/semup/plano_diretor.php>. Acesso em: 10 jun. 2016.

JELOKHANI-NIARAKI, M.; MALCZEWSKI, J. A group multicriteria spatial decision support system for parking site selection problem: A case study. **Land Use Policy**, Adelaide, Australia, v. 42, p. 492-508, Jan. 2015. DOI:10.1016/j.landusepol.2014.09.003.

KHOI, D. D.; MURAYAMA, Y. Modeling deforestation using a neural networks-Markov Model. In: MURAYAMA, Y.; THAPA, R. B. (Ed.). **Spatial Analysis and Modeling in Geographical Transformation Process**. Dordrecht: Springer, 2011. DOI:10.1007/978-94-007-0671-2_11.

LACERDA, N.; MARINHO, G.; BAHIA, C.; PECCHIO, R. Planos Diretores Municipais – Aspectos legais e conceituais. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, São Paulo, v. 7, n. 1, maio 2005. DOI:10.22296/2317-1529.2005v7n1p55.

LANDIS, J. R.; KOCH, G.G.. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v.33:, p. 159-174, Mar. 1977. DOI: 10.2307/2529310.

LILLESAND, T.; KIEFER, R.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and image interpretation**. 6. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

LIMA, O. **Distribuição de solos em catenas e mapeamento pedológico de sub-bacia hidrográfica piloto na região de Itajubá-MG**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

LIMA, J. P. **Modelo de decisão para a priorização de vias candidatas às atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos**. 2007. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Universidade Anhanguera UNIDERP, 2006. 908p.

LIU, Y.; HE, Q.; TAN, R.; LIU, Y.; YIN, C. Modeling different urban growth patterns based on the evolution of urban form: A case study from Huangpi, Central China. **Applied Geography**, Sevenoaks, England, v.66, p. 109-118, Jan. 2016. DOI:10.1016/j.apgeog.2015.11.012

LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAQUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic information systems and science**. 2.ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2005.

MALCZEWSKI, J.; LIU, X. Local ordered weighted averaging in GIS-based multicriteria analysis. **Annals of GIS**, Hong Kong, China, v. 20 n. 2, p. 117-129, Apr. 2014. DOI:10.1080/19475683.2014.904439

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria decision analysis in geographic information science**. New York, NY: Springer, 2015.

MARICATO, E. Urbanismo na periferia do mundo globalizado: Metrôpoles brasileiras. São Paulo em Perspectiva, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 21-33, dez., 2000. DOI:10.1590/S0102-88392000000400004.

MARICATO, E. Metrôpole, legislação e desigualdade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 17, n. 48, p. 151-167, maio/ago. 2003. DOI:10.1590/S0103-40142003000200013

MENDONÇA, F.; CUNHA, F. C. A.; LUÍS, G. Problemática Socioambiental Urbana. **Revista da ANPEGE**, Dourados, v. 12, n. 18, p. 331-352, 2016. DOI: 10.5418/RA2016.1218.0017.

MENG, Y.; MALCZEWSKI, J. A GIS-based multicriteria decision making approach for evaluating accessibility to public parks in Calgary, Alberta. **Journal of Studies and Research in Human Geography**, Romania, v. 9, n. 1, p. 29-41, May, 2015. DOI:10.5719/hgeo.2015.91.3.

MINISTÉRIO de Minas e Energia; Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral; Serviço Geológico do Brasil (CPRM); Departamento de Gestão Territorial (DEGET). **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa**. Itajubá: CPRM, 2014.

MOGHADAM, H. S.; HELBICH, M. Spatiotemporal urbanization process in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. **Applied Geography**, Sevenoaks, England, v. 40, p. 140-149, June 2013. DOI:10.1016/j.apgeog.2013.01.009.

MONTAÑO, M. **A aplicação conjunta de método de projeção das alterações no uso e ocupação do solo e de instrumentos de política ambiental: O caso de São Carlos (SP)**. 2005. 113f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanamento)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MYAGMARTSEREN, P.; BUYANDELGER, M.; BRANDT, S. A. Implications of a Spatial Multicriteria Decision Analysis for Urban Development in Ulaanbaatar, Mongolia. **Mathematical Problems in Engineering**, Egypt, v. 2017, p. 1-16, Feb. 2017. DOI:10.1155/2017/2819795.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4.ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, T. D. S.; SANTOS, J. W. M. C.; PEREHOUSKEI N. A. Geotecnologias aplicadas na avaliação do potencial das subbacias hidrográficas enquanto unidades espaciais de planejamento urbano integrado na cidade de Rondonópolis-MT. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 6., 2016, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2016. p. 738-749.

OLIVEIRA, T. J.; OLIVEIRA, G. M.; BARBOSA, A. A. Histórico de enchentes em Itajubá/MG. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, Rio Grande do Sul, v. 9, n. 4, p. 125-140, 2015. DOI:10.22292/mas.v9i4.437.

OLMEDO, M. T.; PONTIUS JR, R. G.; PAEGELOW, M.; MAS, J. F. Comparison of simulation models in terms of quantity and allocation of land change. **Environmental Modelling and Software**, Utah, USA, v. 69, p. 214-221, July 2015 DOI:10.1016/j.envsoft.2015.03.003.

ONU (Organização das Nações Unidas). **Population 2030: Demographic challenges and opportunities for sustainable development planning**. New York: United Nations, 2015a.

ONU (Organização das Nações Unidas). **World Population Prospects: The 2015 Revision**. New York: United Nations, 2015b.

OpenStreetMap Project Database. **Mapa da Rede de Transporte**: OpenStreetMap 2017.

PIVO, G. Toward sustainable urbanization on Mainstreet Cascadia. **Cities**, Tacoma, Washington, USA, v. 13, n. 5, p. 339-354, Oct. 1996. DOI: 10.1016/0264-2751(96)00021-2.

PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

REIS-FILHO, A. A. **Análise integrada por geoprocessamento da expansão urbana de Teresina com base no Estatuto da Cidade**: estudo de potencialidades, restrições e conflitos de interesses. 2012. 279 f. Tese (Doutorado em Geografia)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

RIBAS, R. P.; GONTIJO, B. M.; MOURA, A. C. M. Análise da dinâmica espacial de um potencial conector de paisagem utilizando cadeias de Markov e Autômatos Celulares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015. p. 1852-1859.

RIBEIRO, A. G. **Epidemiologia da Esquistossomose no Município de Itajubá – MG**. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos)–Univerdidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process – What it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.DOI:10.1016/0270-0255(87)90473-8.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, Holland, v. 48, n. 1, p. 9-26, Sep. 1990. DOI:10.1016/0377-2217(90)90057-I

SAKIEH, Y.; AMIRI, B. J.; DANEKAR, A.; FEGHHI, J.; DEZHKAM, S. Scenario-based evaluation of urban development sustainability: an integrative modeling approach to compromise between urbanization suitability index and landscape pattern. **Environment, Development and Sustainability**, London, UK, v. 17, n. 6, p. 1343-1365, Dec. 2015.DOI:10.1007/s10668-014-9609-7.

SALES, C. A. J.; SILVA, C. C. D.; ROMAGNANO, F. T. L.; BERTAGNA, R.; LOURENÇO, R. W. Avaliação do impacto ambiental causado pelas alterações espaço temporal do uso do solo e da cobertura vegetal utilizando o modelo das cadeias de Markov. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 115-124, abr. 2016. DOI:10.5902/2179-460X18641.

SÁNCHEZ, F. Reinvenção das cidades na virada de século: Agentes, estratégias e escalas de ação política. **Revista de Sociologia e Política**, Curitiba, v. 16, p. 31-49, 2001. DOI: 10.1590/S0104-44782001000100004

SANGERMANO, F.; TOLEDANO, J.; EASTMAN, J. R. Land cover change in the Bolivian Amazon and its implications for REDD+ and endemic biodiversity. **Landscape Ecology**, Tempe, USA, v. 27, n. 4, p. 571-584, Apr. 2012. DOI:10.1007/s10980-012-9710-y

SANTORO, P. F. Perímetro urbano flexível, urbanização sob demanda e incompleta: O papel do Estado frente ao desafio do planejamento da expansão urbana. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, Recife, v. 16, n. 1, p. 169-187, maio 2014. Disponível em: <<http://unuhoagedagem.com.br/revista/rbeur/index.php/rbeur/article/view/3837/%204627>>. Acesso em: 27 maio 2016.

SECUMA, A. J. J. **Modelando o Crescimento Urbano da Província de Luanda, Angola**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica)–Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

SHEN, L.; PENG, Y.; ZHANG, X.; WU, Y. An alternative model for evaluating sustainable urbanization. **Cities**, Tacoma, Washington, USA, v. 29, n. 1, p. 32-39, Feb. 2012. DOI:10.1016/j.cities.2011.06.008.

SILVEIRA, D. T.; CÓRDOVA, F. P. A pesquisa científica. In: GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Org.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

SONG, X. P.; SEXTON, J. O.; HUANG, C.; CHANNAN, S.; TOWNSHEND, J. R. Characterizing the magnitude, timing and duration of urban growth from time series of Landsat-based estimates of impervious cover. **Remote Sensing of Environment**, Florida, USA, v. 175, p. 1-13, 2016. DOI:10.1016/j.rse.2015.12.027.

SOUSA, J. V. **Sustentabilidade ambiental: análise da degradação e perturbação ambiental na mata ciliar do Rio Mandú, município de Pouso Alegre (MG)**. 2012. 168 f. Tese (Doutorado em Geografia)–Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.

SOUZA, M. V. M. Entre a lógica da necessidade e a de mercado: Cenários recentes da produção do espaço urbano no núcleo Cidade Nova, Marabá (PA). **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, v. 1, n. 36, p. 99-115, jan. 2014. Disponível em: <<http://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/viewFile/3290/2795>>. Acesso em: 27 maio 2016.

TEWOLDE, M. G.; CABRAL, P. Urban sprawl analysis and modeling in Asmara, Eritrea. **Remote Sensing**, Basel, Switzerland, v. 3, p. 2148-2165, set. 2011. DOI:10.3390/rs3102148.

TOPODATA. Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil. **Modelo Digital de Elevação**. São José dos Campos: INPE, 2008.

UDDIN, K.; CHAUDHARY, S.; CHETTRI, N.; KOTRU, R.; MURTHY, M.; CHAUDHARY, R. P.; NING, W.; SHRESTHA, S. M.; GAUTAM, S. K. The changing land cover and fragmenting forest on the Roof of the World: A case study in Nepal's Kailash Sacred Landscape. **Landscape and Urban Planning**, Ann Arbor, Michigan, USA, v. 141, p. 1-10, Sep. 2015. DOI:10.1016/j.landurbplan.2015.04.003.

UNFPA. **Population Matters for Sustainable Development**. New York: UNFPA, 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.

U.S. Geological Survey Database. **Landsat Imagery**. United States: USGS Earth Explorer, 2017.

YAGER R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Fairfax, USA, v. 18, n. 1, p. 183-190, Jan./Feb. 1988. DOI: 10.1109/21.87068.

WITTEMYER, G.; ELSEN, P.; BEAN, W. T.; BURTON, A. C. O.; BRASHARES, J. S. Accelerated human population growth at protected area edges. **Science**, UK, v. 321, n. 5885, p. 123-126, July, 2008. DOI:10.1126/science.1158900.

WOLFRAM, S. **A New Kind of Science**. Champaign, USA: Wolfram Media, 2002.

ZAMBON, K. L.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, A. N. R.; NEGRI, J. C. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoelétricas utilizando SIG. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.25, n.2, p.183-199, maio 2005. DOI: 10.1590/S0101-74382005000200002.