

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

**DETERMINAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS DE USO E
COBERTURA DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA
VULNERABILIDADE AMBIENTAL: O CASO DO
MUNICÍPIO DE FORMOSA – GO**

JUAN PABLO CATAMUSCAY SALAZAR

ORIENTADOR: WAGNER SANTOS DE ALMEIDA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: PTARH. DM
BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2015

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

**DETERMINAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS DE USO E COBERTURA DO
SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA VULNERABILIDADE AMBIENTAL: O CASO
DO MUNICÍPIO DE FORMOSA – GO**

JUAN PABLO CATAMUSCAY SALAZAR

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

Prof. Wagner Santos de Almeida, Dsc (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Oscar de Moraes Cordeiro Netto, Dsc (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Waterloo Pereira Filho, Dsc (UFSM)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 21 DE OUTUBRO DE 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

SALAZAR, JUAN PABLO CATAMUSCAY.

Determinação de cenários futuros de uso e cobertura do solo e sua influência na vulnerabilidade ambiental: o caso do Município de Formosa – GO. [Distrito Federal] 2015.

xviii, 112p. 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2015).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Uso e cobertura do solo

2. Vulnerabilidade ambiental

3. Cenários futuros

4. Formosa

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SALAZAR, J. P. C (2015). Determinação de cenários futuros de uso e cobertura do solo e sua influência na vulnerabilidade ambiental: o caso do Município de Formosa – GO. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM – 175/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Juan Pablo Catamusca Salazar.

TÍTULO: Determinação de cenários futuros de uso e cobertura do solo e sua influência na vulnerabilidade ambiental: o caso do Município de Formosa – GO

GRAU: Mestre

ANO: 2015

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

Juan Pablo Catamusca Salazar
juankta@gmail.com

Dedico a meus pais Freddy e Mariela pela compreensão, apoio e incentivo ao longo das diferentes etapas da minha vida, a meus irmãos Vicky, Rafael e Jaime pelo companheirismo e amizade, a minha noiva Ingrith pelo incentivo, paciência e carinho durante o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Wagner Santos de Almeida pela orientação, paciência e conselhos nos momentos que precisei.

A Daiana e Mariana, pelas contribuições, auxílios e aprendizados, e por sempre estar dispostas a ajudar.

Aos professores do PTARH pelos ensinamentos.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de estudo.

Ao CDT pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de pesquisa.

Finalmente, os meus maiores e mais profundos agradecimentos a meus pais, a meus irmãos e meus sobrinhos pelo apoio, amor, carinho e compressão.

RESUMO

DETERMINAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS DE USO E COBERTURA DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA VULNERABILIDADE AMBIENTAL: O CASO DO MUNICÍPIO DE FORMOSA – GO

Autor: Juan Pablo Catamusca Salazar

Orientador: Wagner Santos de Almeida

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, Outubro de 2015

Nesta pesquisa foi aplicada uma metodologia para analisar a dinâmica ambiental no uso e cobertura do solo tomando como caso de estudo o Município de Formosa (GO). Inicialmente, foi realizada uma análise multitemporal do uso e cobertura do solo, por meio de processamento digital de imagens de sensores remotos embarcados nos satélites Landsat 5 e 8. A mesma produziu mapas temáticos para os anos de 1988, 1998, 2007 e 2010. A partir dessa análise multitemporal de uso e cobertura do solo, foi avaliado o efeito das transformações acontecidas na configuração da paisagem ao longo desse período de 22 anos e determinou-se um cenário futuro do uso do solo, com representação cartográfica, baseado na tendência histórica do período analisado. Em seguida, a partir dessas mudanças ocorridas no uso e na cobertura do solo, decorrentes do processo de ocupação antrópica, e por meio de algoritmos de geoprocessamento, a partir das informações fisiográficas da área de estudo, foi realizada uma avaliação multicritério baseada em análise hierárquica de processos (AHP) para se determinar a vulnerabilidade ambiental. Essa última mostrou que a área onde foi aplicada a metodologia de análise da dinâmica ambiental no uso e cobertura do solo vem apresentando uma pressão antrópica crescente, produzindo impactos ambientais diversos na ocupação do espaço urbano. Para essas áreas, foi realizada a modelagem ambiental com elaboração de cenários prospectivos de uso e cobertura do solo para os anos de 2015 e 2020 por meio do software DINAMICA EGO. Esses cenários prospectivos mostraram que as mudanças observadas no período de estudo tornam obsoleto o Plano Diretor municipal e indica uma acentuada transformação na conformação da paisagem da área de estudo devido ao contínuo desmatamento, ao incremento da agricultura mecanizada e às amplias áreas de crescimento urbano desordenado, polinucleado, em prejuízo de áreas de cerrado.

ABSTRACT

DETERMINATION OF FUTURE SCENARIOS OF USE AND LAND COVER AND ITS INFLUENCE ON ENVIRONMENTAL VULNERABILITY: THE FORMOSA MUNICIPALITY CASE

Author: Juan Pablo Catamusca Salazar

Supervisor: Wagner Santos de Almeida

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, October 2015

This research applied a methodology to analyze the environmental dynamics in the use and land cover taking the municipality of Formosa (GO) as a case study. Initially a multi-temporal analysis of use and land cover was performed through digital images processing of remote sensors embedded in the Landsat satellite 5 and 8. This analysis produced thematic maps for the years 1988, 1998, 2007 and 2010. From this multi-temporal analysis of use and land cover, the effects of the changes taken place in the landscape configuration over this period of 22 years were evaluated and a future scenario of land use mapping based on the historical trend of the analyzed period years was determined. Then, from these changes in land use and land cover resulting from human occupation process and through geo-processing algorithms from the physiographic information of the study area, a multi-criteria evaluation based on Analytic Hierarchy Process (AHP) was executed to determine the environmental vulnerability. The latter showed that the area where it was applied the methodology of analysis of demographic dynamics in the use and land cover has been showing an increasing human pressure, producing several environmental impacts in the occupation of urban space. For these areas was carried out environmental modeling with development of prospective scenarios of use and land cover for the years 2015 and 2020 through DINAMICA EGO software. These future scenarios showed that the changes observed during the study period make obsolete the Municipal Director Plan and indicates a marked change in the landscape of conformation of the study area due to the continuing deforestation, the increase of mechanized agriculture and areas of urban sprawl at the expense of savanna areas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	5
2.1	OBJETIVO GERAL.....	5
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3	ÁREA DE ESTUDO	6
3.1	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	6
3.2	ASPECTOS DEMOGRÁFICOS	8
3.3	ASPECTOS DO SANEAMENTO BÁSICO	12
3.4	REGIÕES INTEGRADAS DE DESENVOLVIMENTO DO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO – RIDE DF E ENTORNO	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
4.1	GEOPROCESSAMENTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	18
4.1.1	Elementos do SIG.....	19
4.1.2	Aplicações de SIG	21
4.2	USO E COBERTURA DO SOLO	22
4.2.1	Procedimentos prévios para a realização da classificação.....	23
4.2.2	Classificação temática de imagens para elaboração dos mapas de uso e cobertura do solo	25
4.3	VULNERABILIDADE AMBIENTAL.....	27
4.3.1	Determinação da vulnerabilidade ambiental.....	29
4.4	MODELAGEM AMBIENTAL	33
4.4.1	Modelagem Espacial Dinâmica.....	33
4.4.1.1	Método dos pesos de evidência.....	34
4.4.1.2	Modelagem através de autômatos celulares	34
4.4.1.3	O sistema DINAMICA EGO	35
4.4.2	Elaboração de cenários prospectivos.....	37
5	METODOLOGIA DE PESQUISA	39
5.1	PROCEDIMENTOS	40
5.1.1	Base de dados cartográficos.....	41

5.1.2	Classificação temática de imagens para elaboração dos mapas de uso e cobertura do solo	42
5.1.3	Vulnerabilidade ambiental.....	46
5.1.3.1	Ponderação dos valores de Vulnerabilidade Ambiental.....	50
5.1.3.2	Determinação da influenciados fatores	54
5.1.4	Modelagem da dinâmica de uso do solo.....	57
5.1.4.1	Preparação dados de entrada.....	57
5.1.4.2	Calibração do modelo.....	58
5.1.4.3	Construção do modelo de simulação e validação	59
5.1.4.4	Obtenção do cenário prospectivo de tendência histórica	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
6.1	CLASSIFICAÇÃO TEMÁTICA.....	63
6.2	VULNERABILIDADE AMBIENTAL.....	77
6.2.1	Ponderação dos valores de vulnerabilidade ambiental.....	77
6.2.1.1	Pedologia	78
6.2.1.2	Geologia.....	79
6.2.1.3	Vegetação	80
6.2.1.4	Uso e cobertura do solo	81
6.2.1.5	Declividade	83
6.2.2	Determinação da influência dos fatores.....	84
6.3	MODELAGEM DA DINÂMICA DE USO DO SOLO	89
6.3.1	Preparação dos dados de entrada.....	90
6.3.2	Calibração do modelo	91
6.3.2.1	Cálculo das matrizes de transição	92
6.3.2.2	Obtenção dos pesos de evidência.....	93
6.3.3	Construção do modelo de simulação e validação.....	96
6.3.3.1	Modelo de simulação.....	96
6.3.3.2	Validação do modelo de simulação.....	97
6.3.4	Obtenção do cenário prospectivo de tendência histórica.....	98
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização de Formosa.	6
Figura 3.2 – Porcentagem da população urbana e rural de Formosa.	12
Figura 3.3 – Lagoa anaeróbia (Obtida em trabalho de campo, 2014).....	14
Figura 3.4 – Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – RIDE DF e Entorno (Ministério do Meio Ambiente, 2007).....	15
Figura 4.1 – Arquitetura de Sistemas de Informações Geográficas (Câmara <i>et al.</i> , 1996).	20
Figura 4.2 – Determinação da vulnerabilidade ambiental (Grigio, 2003).	28
Figura 5.1 – Diagrama metodológico.	39
Figura 5.2 – Mapa geológico do Município de Formosa	47
Figura 5.3 – Mapa pedológico do Município de Formosa.	48
Figura 5.4 – Mapa de cobertura vegetal do Município de Formosa.	48
Figura 5.5 – Modelo Digital de Elevação do Terreno.....	49
Figura 5.6 – Exemplificação do processo realizado na aplicação do método de similaridade fuzzy (Soares-Filho <i>et al.</i> , 2009, modificado).....	61
Figura 6.1 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 1988.	64
Figura 6.2 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 1998.	65
Figura 6.3 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 2007.	66
Figura 6.4 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 2010.	67
Figura 6.5 – Evolução do uso e cobertura do solo no Município de Formosa.	69
Figura 6.6 – Mapa da área urbana do Município de Formosa para o ano 1988.	71
Figura 6.7 – Mapa da área urbanado Município de Formosa para o ano 1998.	72

Figura 6.8 – Uso e ocupação propostas para o Município de Formosa	74
Figura 6.9 – Mapa da área urbana do Município de Formosa para o ano 2007.	75
Figura 6.10 – Distribuição da área urbana por zonas de uso para o ano de 2007 segundo o Plano Diretor Municipal.	75
Figura 6.11 – Mapa da área urbana do Município de Formosa para o ano 2010.	76
Figura 6.12 – Distribuição da área urbana por zonas de uso para o ano de 2010 segundo o Plano Diretor Municipal.	77
Figura 6.13 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo a pedologia.	78
Figura 6.14 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo a geologia.	80
Figura 6.15 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo a vegetação.	81
Figura 6.16 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo o uso e cobertura do solo.	82
Figura 6.17 – Mapa da declividade e sua reclassificação.	83
Figura 6.18 – Mapa de vulnerabilidade ambiental do Município de Formosa.	87
Figura 6.19 – Mapas de entrada utilizados no desenvolvimento do modelo.	91
Figura 6.20 – Mapa de uso e cobertura do solo simulado pelo DINAMICA para o ano 2010.	97
Figura 6.21 – Cenários simulados para os anos de 2015 e 2020.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – População urbana e rural da Região Centro-Oeste – 1960/2010.....	9
Tabela 3.2 – População do Município de Formosa (GO) – 1920/2010.....	11
Tabela 3.3 – População RIDE DF e Entorno – 2010 (Ministério de Integração Nacional, 2010, modificado).....	16
Tabela 5.1 – Base de dados cartográficos.....	41
Tabela 5.2 – Caracterização das classes temáticas de uso e cobertura do solo nas imagens Landsat.....	45
Tabela 5.3 – Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas.....	49
Tabela 5.4 – Fatores e critérios de análise para determinação da vulnerabilidade ambiental.....	50
Tabela 5.5 – Valores e classes de vulnerabilidade ambiental.....	50
Tabela 5.6 – Valores de estabilidade/vulnerabilidade dos solos.....	51
Tabela 5.7 – Valores de vulnerabilidade/estabilidade para diferentes litologias.....	52
Tabela 5.8 – Classes de declividade com seus respectivos graus de vulnerabilidade.....	54
Tabela 5.9 – Escala fundamental de Saaty para comparação pareada.....	54
Tabela 5.10 – Índice de Consistência Randômicos (Saaty, 1980).....	56
Tabela 6.1 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 1988 – 1998.....	63
Tabela 6.2 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 1998 – 2007.....	68
Tabela 6.3 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 2007 – 2010.....	69
Tabela 6.4 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 1988 – 2010.....	70
Tabela 6.5 – Valores de vulnerabilidade para a pedologia.....	78
Tabela 6.6 – Valores de vulnerabilidade para a geologia.....	79

Tabela 6.7 – Valores de vulnerabilidade do tema vegetação.	80
Tabela 6.8 – Valores de vulnerabilidade ambiental para as classes de uso e cobertura do solo.	82
Tabela 6.9 – Matriz de comparação pareada da AHP.....	84
Tabela 6.10 – Matriz normalizada da AHP.....	84
Tabela 6.11 – Classes de vulnerabilidade ambiental em termos de área e porcentagem.....	86
Tabela 6.12 – Matriz de transição de passo único do uso e cobertura da terra para o período 2007 – 2010.	92
Tabela 6.13 – Matriz de transição de passos múltiplos do uso e cobertura da terra para o período 2007 – 2010.	92
Tabela 6.14 – Correlação de mapas verificada pelo índice de Cramer.....	95
Tabela 6.15 – Parâmetros utilizados na simulação para o período 2007 – 2010.....	96
Tabela 6.16 – Índices de similaridade para distintos tamanhos de janelas.	98
Tabela 6.17 – Valores das áreas das classes de uso e cobertura do solo.....	99

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANA	Agência Nacional de Águas
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CPRM	Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
DF	Distrito Federal
DPI/INPE	Divisão de Processamento de Imagens/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
GO	Goiás
GPS	Sistemas de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IC	Índice de Consistência
km	Quilômetro
Landsat	Land Remote Sensing Satellite
m	metros
MDET	Modelo Digital de Elevação do Terreno
MG	Minas Gerais
mm	milímetro
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PE	Pernambuco

PTARH	Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
RC	Razão de Consistência
RIDEDF e Entorno	Região de Desenvolvimento Integrado do Distrito Federal e Entorno
SAD 69	South American Datum 1969
SANEAGO	Companhia de Saneamento do Estado de Goiás
SIEG	Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
TIFF	Tagged Image File Format
TM	Thematic Mapper
UTM	Universal Transversa de Mercator
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
VA	Vulnerabilidade Ambiental

1 INTRODUÇÃO

O Brasil passou por um processo de transformação demográfica nos últimos 60 anos, fazendo que o País seja atualmente um dos mais populosos do mundo. O constante crescimento populacional aconteceu principalmente a partir da década de 1960 de maneira desigual pelo Território Nacional, sendo o Centro–Oeste uma das regiões que apresentou uma das mais elevadas taxas de crescimento (IBGE, 1988).

A principal razão que acarretou esse processo de crescimento populacional na região Centro–Oeste foi a construção da cidade de Brasília e a implantação de um novo sistema rodoviário que ligou a cidade com todas as partes do País, o que estimulou a vinda para a região de grandes contingentes migratórios. Segundo Cunha (2004), com a constituição do Distrito Federal e a transferência da Capital Federal para Brasília, desencadeou-se um novo processo de crescimento populacional e econômico na região, alterando sobremaneira seu aspecto territorial. Nas décadas de 1980 e 1990, a microrregião do entorno de Brasília passou a ser considerada um local de atração e redimensionamento populacional, com um crescimento demográfico bastante elevado, acentuando assim o seu processo de urbanização, a expansão de zonas rurais e tornando ao meio ambiente vulnerável à degradação.

O Município de Formosa, distante 79 km de Brasília, faz parte do entorno imediato do Distrito Federal e, ao longo dos últimos anos, vem sofrendo um intenso processo de crescimento demográfico, alterando sua estrutura social, econômica, espacial e ambiental. Essa elevada concentração populacional faz que a ocupação espacial venha acontecendo de forma desordenada, o que exerce, segundo Teixeira (2005), uma forte pressão sobre os equipamentos sociais e urbanos. Essa pressão acarreta problemas sociais que comprometem a qualidade de vida, já que o município não apresenta uma infraestrutura básica para absorver os impactos ambientais causados pelo aumento demográfico (Barros, 2011).

A nível regional e nacional, são geradas diversas ações referentes ao saneamento básico, a impactos ambientais, ao planejamento urbano, ao uso do solo, à qualidade da vida, entre outros, ações estas que são discutidas nas diferentes esferas de Governo, da sociedade civil e da comunidade acadêmica, sempre tendo em vista a obtenção de melhores e mais eficazes meios de gestão e planejamento urbano e ambiental. O Município de Formosa

(GO) faz parte da RIDEEDF e Entorno (Região de Desenvolvimento Integrado do Distrito Federal e Entorno), criada por lei federal e que tem, entre seus objetivos, avaliar soluções aos problemas de saneamento básico e promover ações de desenvolvimento sustentável do Distrito Federal e dos municípios do seu entorno.

Um dos temas com mais importância nas agendas políticas dos países em desenvolvimento, considerando-se saúde, bem-estar social, saneamento básico, meio ambiente e desenvolvimento, é o uso e cobertura do solo. O estudo do uso do solo é fundamental, já que o solo é a base de todas as atividades humanas, sendo ocupado e utilizado das mais diversas maneiras, as quais tem causado graves consequências ambientais e sociais quando é explorado de forma predatória. Alguns dos principais problemas socioambientais que se apresentam são a ocupação inadequada do solo (áreas de risco e margens das fontes hídricas, moradias estabelecidas em ambientes degradados sem serviços de saneamento básico), o desmatamento, o uso abusivo de agrotóxicos e a contaminação da água.

A ocupação inadequada do solo gera grandes impactos negativos, como a impermeabilização do solo, alterações na topografia, perda da vegetação original, erosão e aumento de assoreamento, modificações na quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Mas, o mais importante dos impactos se apresenta na qualidade de vida da população, a qual deve de enfrentar problemas como dificuldades na captação de água para abastecimento, maiores custos no tratamento e distribuição da água, maiores custos na coleta e tratamento dos esgotos, disposição inadequada dos resíduos sólidos e a proliferação de doenças.

O uso inadequado do solo pelo homem é um fator agravante da degradação ambiental e desequilíbrio ecológico. Por isso, é importante monitorar e avaliar os impactos causados pelas atividades antrópicas, ao fazer uso e ocupação do solo sobre os diferentes ambientes naturais. E, assim, fundamental o emprego de métodos de monitoramento e análise que permitam uma melhor compressão de suas mudanças que afetam a vulnerabilidade ambiental e interferem nas decisões de políticas públicas de saneamento básico.

É por essa razão que, no âmbito do objetivo geral do Projeto RIDES, “Diagnóstico do Saneamento Básico das Regiões Integradas de Desenvolvimento do Brasil – Ride DF e Entorno”, em desenvolvimento no programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH), existe a necessidade de se apresentar uma proposta para

elaboração do diagnóstico do saneamento básico dos municípios que a compõem, e aí se inclui o Município de Formosa. Na realização do diagnóstico, insere-se uma vertente analítica para avaliação da situação do saneamento básico, com base em dados secundários, em estudos disponíveis, em indicadores e, quando necessário, em dados primários. Surgem, então, alguns objetivos específicos, entre os quais está o levantamento de dados e avaliação das relações entre o desenvolvimento urbano e seus indicadores relacionados à expansão do uso e cobertura do solo.

Em um país como Brasil, que precisa de informações adequadas para o processo de tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, tem-se no geoprocessamento uma tecnologia de apoio eficiente. O uso de algoritmos de geoprocessamento como ferramentas computacionais inseridas em sistemas de informações geográficas (SIG) executa o processamento informatizado de dados e informações de diversas fontes (imagens de sensores remotos, mapas, cartas topográficas, plantas, entre outras), integrados em bancos de dados georreferenciados, que permite automatizar a produção de documentos cartográficos utilizados como suporte à tomada de decisões em recursos hídricos, planejamento urbano, saneamento básico e no uso e ocupação do solo em particular, por meio da realização de inventários e análises espaciais.

Os SIG proporcionam um ambiente computacional adequado para a captura, armazenamento e gerenciamento da informação, tanto a alfanumérica como aquelas necessárias para representar os objetos gerenciados pelos seus próprios aplicativos. Esses sistemas têm experimentado considerável desenvolvimento nos últimos anos, graças ao aperfeiçoamento no desempenho dos computadores convencionais e ao surgimento de várias ferramentas de desenvolvimento, que fornecem ao usuário um conjunto de utilitários para assistir no desenvolvimento de aplicações voltadas ao estudo de diagnósticos e prognósticos ambientais.

A construção de mapas em escala multitemporal por meio de imagens de satélite e de algoritmos de processamento de imagens de sensoriamento remoto existentes em SIG permite a avaliação das mudanças no uso e cobertura do solo em uma determinada área. Com o processamento e integração de dados temáticos para o cálculo da vulnerabilidade ambiental, pode-se conhecer a susceptibilidade de um determinado ambiente ao impacto potencial provocado pelas diferentes atividades humanas. Por sua vez, a construção de cenários gráficos baseados nas transformações do uso e cobertura do solo permite elaborar

prognósticos dos processos de mudanças futuras no uso do solo, o que permite subsidiar o planejamento ordenado de uma área, como é o abordado nesta dissertação, no que se refere ao Município de Formosa (GO).

O aumento significativo da população e o crescente uso e ocupação do solo no Município de Formosa representam um grande desafio para o Governo Municipal e para os prestadores dos serviços básicos, fazendo necessário que se tomem decisões com maior rapidez para ordenar e controlar o crescimento da mancha urbana em busca de uma distribuição adequada de sua infraestrutura básica para atender à população de forma satisfatória, e a implantação de políticas públicas que visem à gestão adequada dos recursos naturais e à proteção do meio ambiente. O uso de ferramentas de apoio à decisão e de SIG pode possibilitar o gerenciamento das informações necessárias no momento de selecionar a melhor opção em temas como o uso e cobertura do solo, e assim, evitar os impactos negativos de sua ocupação inadequada como os relacionados com os serviços de saneamento básico. Assim, o presente estudo pretende analisar a dinâmica no uso e ocupação do solo e seu efeito sobre a configuração da paisagem tendo como caso de estudo o Município de Formosa (GO), por meio da utilização de SIG e de modelagem ambiental.

Em relação à sua estrutura, o texto desta dissertação é apresentado em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução à pesquisa em pauta. O segundo capítulo apresenta os objetivos da pesquisa. O terceiro capítulo descreve a área de estudo, seus aspectos fisiográficos, demográficos e de saneamento básico. O quarto capítulo apresenta a fundamentação teórica com conceitos referentes ao geoprocessamento, SIG, incluídas algumas de suas aplicações, e ao uso e ocupação do solo. Nesse capítulo, também são apresentados os processos a ser desenvolvidos na pesquisa como a classificação temática de imagens, a análise multicritério da vulnerabilidade ambiental e a modelagem da dinâmica ambiental, e é apresentada uma revisão bibliográfica de estudos relacionados com a pesquisa em pauta. No capítulo cinco, descrevem-se os materiais utilizados e a metodologia adotada nas diferentes etapas do estudo. O capítulo seis apresenta os resultados obtidos na pesquisa e sua discussão. Finalmente, o capítulo sete apresenta as conclusões da pesquisa e são elaboradas recomendações para pesquisas futuras.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem como objetivo geral formular procedimentos para a determinação de cenário futuro de uso e cobertura do solo e sua influência na vulnerabilidade ambiental, com aplicação no Município de Formosa (GO), por meio de sistemas de informações geográficas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Executar uma avaliação multitemporal de 22 anos, em três períodos 1988-1998, 1998-2007 e 2007-2010, do processo de uso e cobertura do solo no Município de Formosa.
- Determinar a vulnerabilidade ambiental existente na área de estudo em função de suas características naturais e antrópicas, com base em ferramentas SIG e de análise multicritério.
- Desenvolver, por meio de técnicas de análise de dinâmica espacial, simulação da evolução de uso e cobertura do solo, de acordo com tendência histórica.

3 ÁREA DE ESTUDO

O estudo proposto abrange diretamente o Município de Formosa, no Estado de Goiás (GO), localizado entre as coordenadas geográficas de 15° 32' 13" de latitude sul e 47° 20' 09" de longitude oeste, situado a 79 quilômetros no eixo Norte–Leste de Brasília. O Município de Formosa limita-se ao norte com os Municípios de São João da Aliança (GO) e Flores de Goiás; ao sul, com o de Unaí (MG) e o Distrito Federal; ao leste, com Cabeceiras (GO), Buritis (MG); e ao oeste com Água Fria de Goiás (GO), Planaltina de Goiás e o Distrito Federal (DF). O Município tem altitude média de 911 metros e possui uma área de 5.811,78 km². A Figura 3.1 apresenta sua localização no Estado de Goiás.

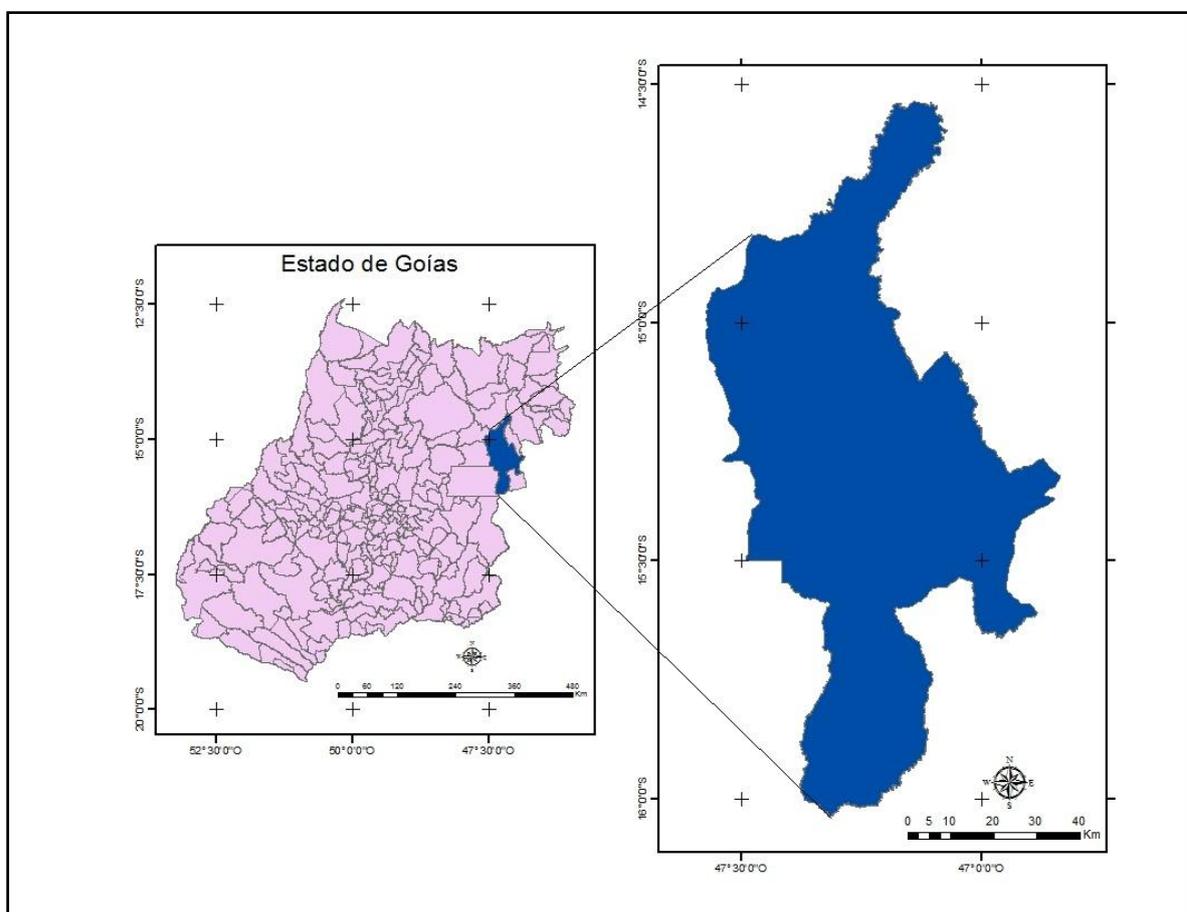


Figura 3.1 – Localização de Formosa.

3.1 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Por estar situado ao limite nordeste do DF, na região Centro–Oeste do País, o Município de Formosa apresenta um clima tropical chuvoso, com duas estações bem definidas: uma chuvosa com temperaturas elevadas e uma seca com temperaturas suaves. O período

chuvoso compreende os meses de setembro a maio e os meses considerados secos ocorrem entre os meses de junho a agosto.

A precipitação média anual varia entre os 1.400 e os 1700 mm. O período mais úmido, de acordo com a distribuição mensal da precipitação, apresenta-se nos meses de outubro a abril (100 mm/mês), e o período seco entre maio a setembro (50 mm/mês). A temperatura média situa-se em torno de 20,6 °C, e nos meses de setembro e outubro, obtêm-se valores de temperatura máxima, e em junho e julho, os de mínimas (INTERPLAN, 2003).

Em termos hidrológicos, o Município de Formosa é caracterizado por estar localizado em região de divisores naturais de águas. No Município, estão presentes cursos d'água pertencentes às bacias hidrográficas do São Francisco, Tocantins e Paraná. Ao norte, estão presentes o rio Parim e rio Paranaã, que contribuem com o rio Tocantins; ao sul, escoam o rio São Marcos, que deságua no rio Paranaíba, pertencente à Bacia do rio Paraná; e, para o leste, junto à zona urbana do Município, nasce o rio Preto, da bacia do rio São Francisco. No Município, há muitas lagoas, entre as quais: Feia, Formosa, Grande, dos Veados e da Espora.

De acordo com o Plano Diretor do Município (INTERPLAN, 2003), na região, domina o bioma cerrado com predomínio do cerrado no sentido restrito, e com presença de campo cerrado, mata seca e matas de galeria. Devido à rápida expansão na ocupação, áreas consideráveis são utilizadas para agricultura mecanizada, constatando-se a existência de pequenas áreas com cerrado degradado. Além do cerrado, existem campos e pequenos bosques espalhados em todo o Município.

Segundo o Plano Diretor do Município de Formosa (INTERPLAN, 2003), o Município insere-se no contexto geológico onde ocorrem rochas atribuídas ao grupo Paranoá e ao grupo Bambuí – subgrupo Paraopeba, do Proterozóico superior, coberturas Dentríticas Terciárias-Quaternárias e Aluviões Recentes. O grupo Paranoá apresenta uma variedade de tipos litológicos com domínio dos metarenitos sobre os demais litotipos. A base da unidade consiste em um paraconglomerado com matriz arcoseana carbonatada. Os seixos são compostos de ritmitos, calcários, argilitos e siltitos. Apresenta-se, nos horizontes superficiais, uma sequência constituída de intercalações de siltitos e arenitos impuros. O subgrupo Paraopeba é representado pelas formações: Jequitaí, Sete Lagoas, Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias.

As coberturas detríticas constituem a maior parte de elúvios (material proveniente do intemperismo das rochas subjacentes e não transportadas) e de colúvios (material pouco transportado). Os aluviões são representados por sedimentos atuais compostos principalmente de areias, cascalhos, siltes e argilas (INTERPLAN, 2003).

Segundo Teixeira (2005), predominam no Município de Formosa solos minerais, profundos a muito profundos, argilosos ou de textura média, bem drenados, pouco suscetíveis à erosão e com pequena reserva de nutrientes para as plantas. Esses solos encontram-se associados a outros solos medianamente profundos, bem drenados e com baixa fertilidade natural e também a solos medianamente profundos argilosos, ácidos e suscetíveis à erosão. Ocorrem, também, solos pouco desenvolvidos com restrições a uso agrícola devido à pouca profundidade.

3.2 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS

Para entender o processo de crescimento demográfico no Município de Formosa, faz-se necessário conhecer um pouco da transformação demográfica do Brasil e do Centro-Oeste, as respectivas implicações da edificação de Brasília e sua implementação como nova capital do País.

Em consequência do acelerado crescimento populacional ocorrido nas últimas décadas, Brasil é atualmente um dos países mais populosos do mundo. O constante crescimento populacional do Brasil aconteceu principalmente a partir da década de 1960, quando foram contabilizados pelo IBGE 70.992.343 habitantes, aumentando em sete vezes a população brasileira em apenas 90 anos desde o primeiro Censo Demográfico realizado em 1872. Esse processo se intensificou em três décadas, de 1960 a 1991, com um acréscimo da população de pouco menos de 76 milhões de pessoas, atingindo os 146.9 milhões de habitantes, ou seja, a população brasileira mais que dobrou em apenas trinta anos. As informações apresentadas na sinopse do censo demográfico do ano de 2010 mostram que, nos últimos vinte anos, a população no País cresceu 29,9% chegando a 190.755.799 pessoas, indicando que o Brasil foi um dos países que apresentou um crescimento populacional acentuado nos últimos cento e quarenta anos.

O crescimento da população brasileira ocorreu de maneira desigual pelo Território Nacional, sendo o Centro-Oeste uma das regiões que apresentou uma das mais elevadas taxas de crescimento. A região é composta pelos Estados de Goiás, Mato Grosso, Mato

Grosso do Sul e pelo Distrito Federal. No ano de 1960, a região figurava entre os espaços pouco ocupados do País, contrastando o pouco contingente demográfico e a grande extensão territorial, para esse ano, a região do Centro-Oeste contava com 2.678.380 habitantes em um território que ocupa aproximadamente o 18,8% do Brasil (IBGE, 2010).

Nos últimos cinquenta anos, houve uma explosão demográfica na Região Centro-Oeste, com um aumento de aproximadamente de 11 milhões de pessoas. Entre os anos de 1960 a 1991, a população na região teve um crescimento de 6.733.862 milhões de pessoas, ou seja, em 30 anos a quantidade de habitantes aumentou em três vezes. A Tabela 3.1 mostra o crescimento da população na Região Centro-Oeste de acordo com os censos demográficos realizados pelo IBGE desde 1960.

Tabela 3.1 – População urbana e rural da Região Centro-Oeste – 1960/2010 (IBGE, 2010, modificado).

População	Censo demográfico					
	1960	1970	1980	1991	2000	2010
Urbana	995.171	2.358.218	4.950.203	7.648.757	10.075.212	12.482.963
Rural	1.683.209	2.271.422	2.053.312	1.763.485	1.541.533	1.575.131
Total	2.678.380	4.629.640	7.003.515	9.412.242	11.616.745	14.058.094

No que tange à sua população urbana, a partir da década de 1960, o Centro-Oeste brasileiro apresentou um rápido crescimento passando de 995.171 habitantes para 2.358.218 habitantes, em dez anos, indicando um incremento de 137%. Desde 1970, como é apresentado na Tabela 3.1, a população urbana sofre um incremento gradativo até atingir mais de 12 milhões de habitantes. Por outro lado, a população rural nesses 50 anos apresenta dois leves incrementos, nas décadas de 1970 e 2010 quando aumentou em 588.213 e 33.598 habitantes respectivamente. Mas, em termos gerais, sofreu uma diminuição nesse tempo, o que pode caracterizar um êxodo rural para áreas urbanas.

O incremento populacional no Centro-Oeste iniciou-se, principalmente, com a edificação de Brasília e a construção de um novo sistema rodoviário que ligou a cidade com todas as partes do País, deslocando grandes contingentes migratórios para a região, o que desencadeou um novo processo de crescimento populacional e econômico, alterando sobremaneira seu aspecto territorial (Cunha, 2004). Nesse período, a região sofreu um elevado grau de urbanização modificando a natureza do incremento demográfico passando

a apoiar-se na concentração populacional nos principais centros urbanos e no surgimento de novos núcleos em áreas até então subocupadas (IBGE, 1988).

Na década de 1970, Brasília foi consolidada como centro urbano e deu início à fixação de um grande contingente migratório nos municípios vizinhos do DF, constituindo-se uma aglomeração urbana com a conurbação entre alguns municípios e algumas cidades satélites. É importante mencionar que, com a definição do Plano Diretor de Água, Esgoto e Controle da Poluição (Planidro) e a implementação do anel sanitário do Distrito Federal, a população com menor poder aquisitivo foi compelida a migrar para as áreas do entorno do Distrito Federal, estabelecendo a direção da atuação estatal na estruturação urbana, já que a ocupação do solo foi condicionada pela preservação dos recursos hídricos, limitando a quantidade de habitantes no DF (Caiado, 2005).

A expansão metropolitana de Brasília, que ocorreu sob a lógica de acumulação do capital imobiliário, ou seja, com a perpetuação dos assentamentos da periferia para setores médios e empobrecidos do capital comercial, fez que o avanço populacional para as áreas do Entorno fora grande, o que quer dizer ainda, que os municípios da periferia da cidade crescessem em maior ritmo recebendo acentuados contingentes de população, excluídos em sua maioria das áreas centrais por sua alta valorização.

Nos vinte anos seguintes, o Entorno de Brasília apresentou um elevado crescimento da sua população o que acentuou um acelerado e desordenado processo de urbanização que acarretou profundos problemas sociais sobre os centros urbanos tais como pobreza, desemprego, violência, má distribuição da renda, segregação espacial, entre outros (Teixeira, 2005).

Uma das áreas do Entorno de Brasília que vem sofrendo grandes mudanças nos aspectos sociais, econômicos e ambientais devido ao crescimento populacional e à ocupação desordenada do território, é o Município de Formosa situado no Estado de Goiás, ocasionando problemas na educação, saneamento, segurança pública e habitação, comprometendo os recursos técnicos e econômicos municipais.

De acordo com o IBGE, o Município possuía 15.860 habitantes em 1920, e registrava pouco crescimento com apenas um aumento de 1.026 moradores em 20 anos (Chauvet, 2005). Na década de 1950, é quando apresenta um crescimento acentuado, o que fez a sua população aumentara em mais de seis mil habitantes. Na década seguinte, devido à

emancipação dos Municípios de São João da Aliança e Cabeceiras, a população diminuiu para 21.708 habitantes. Na Tabela 3.2, pode-se observar a população do Município de Formosa e sua evolução, adaptada de Chauvet (2005) e IBGE (2010).

Tabela 3.2 – População do Município de Formosa (GO) – 1920/2010.

População	1920	1940	1950	1960	1970	1980	1991	2000	2010
Urbana	---	---	---	---	12.965	29.645	49.659	69.285	92.036
Rural	---	---	---	---	15.909	13.651	13.323	9.366	8.049
Total	15.860	16.886	23.273	21.708	28.874	43.296	62.982	78.651	100.085

De acordo com a Tabela 3.2, o Município de Formosa se caracteriza por registrar, desde 1980 um elevado crescimento da população para as décadas seguintes. Em 2010 o Município possuía 92% da sua população em área urbana. O período entre os anos 1970 e 1980 foi aquele com evolução urbana mais exacerbada, que é o mesmo período em que o estado de Goiás se urbanizou, e que corresponde aos fluxos migratórios campo-cidade, apresentando uma taxa de crescimento anual de 8,62% e atingindo o 68,47% da população total do Município. Nos anos seguintes, a população urbana continuou aumentando, mas com taxas de crescimento anuais menores, com valores de 4,80%, 3,77% e 2,88% nas décadas de 1980, de 1990 e de 2000, respectivamente.

No entanto, a população rural de Formosa apresentou um decréscimo geral nos últimos 40 anos. Em 1970, correspondia ao 55,10% da população total do Município, depois de 10 anos ao percentual de 31,53%, de 20 anos ao de 21,15% e de 30 anos ao de 11,91%, o que faz com que sua participação na população municipal seja cada vez menor, de tal forma que, no ano de 2010, corresponde-se a 8% da população municipal. Entre 1980 e 1990, o Município mantém o número de sua população rural estável, caindo acentuadamente a partir da década de 1990 até atingir 8.049 habitantes no ano de 2010, indicando uma diminuição de cerca de 50% em 40 anos. Com base nos dados da Tabela 3.2, a Figura 3.2 apresenta graficamente o desenvolvimento da população urbana e rural de Formosa nos últimos anos.

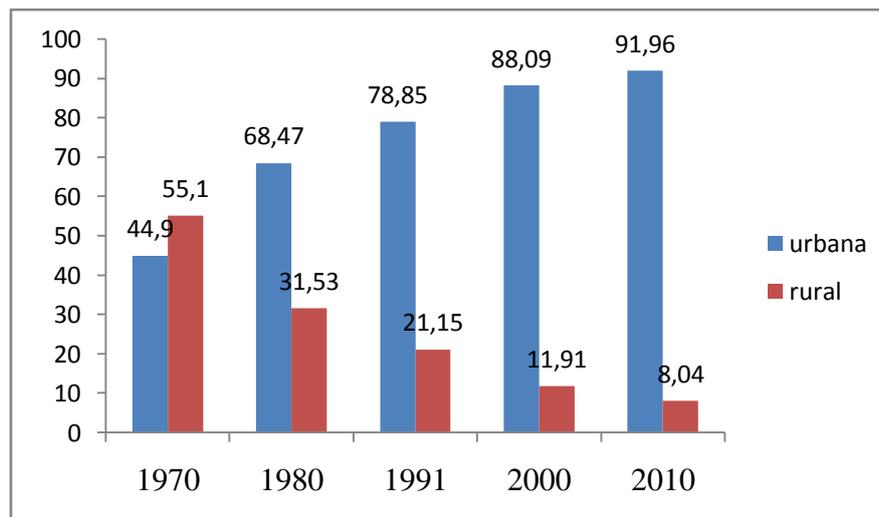


Figura 3.2 – Porcentagem da população urbana e rural de Formosa.

3.3 ASPECTOS DO SANEAMENTO BÁSICO

No que se refere ao saneamento básico, os serviços de abastecimento e tratamento de água e esgotamento sanitário do Município de Formosa estão a cargo da concessionária estadual SANEAGO – Saneamento de Goiás S.A. O sistema de abastecimento público de água no Município utiliza dois mananciais, um superficial e outro subterrâneo. O abastecimento superficial é realizado por meio de um sistema isolado composto por uma captação com tomada direta em uma barragem de elevação de nível no córrego Bandeirinha e pela Estação de Tratamento de Água (ETA) Formosa, que é de tipo convencional, a qual tem uma participação no abastecimento do Município de cerca de um 95%, com uma vazão de 161,25 l/s. Os restantes 5% são assegurados por três poços tubulares profundos que recebem a adição de cloro quando do recalque aos reservatórios elevados e que operam com uma vazão de 26,3 l/s (ANA, 2014).

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) oferece informações anuais referentes ao abastecimento de água, ao tratamento de esgotos e de resíduos sólidos do Brasil. Com base nos dados do SNIS para o ano 2011, o Município de Formosa é ocupado por uma população de 101.731 habitantes, dos quais 93.536 habitantes são residentes urbanos e 8.195 são residentes rurais (SNIS, 2014).

No Município, existem 91.828 habitantes atendidos pelo serviço de abastecimento de água, o que corresponde a 90,26% da população total, com uma extensão da rede de 339,73 km e com 31.451 ligações totais. Segundo o Atlas de Abastecimento Urbano de Água, do ano de

2010, elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2014), o sistema de produção de água do Município precisa de uma importante adequação para atender às demandas futuras e a solução proposta pela ANA é a construção de uma barragem do córrego Bandeirinha para o aumento da garantia hídrica do manancial do Município.

Para o mesmo ano, a concessionária estadual SANEAGO, adotou a alternativa para ampliação do sistema Bandeirinha em uma barragem de acumulação para regularização de vazão. Em visita de campo, realizada em abril de 2014 ao Município de Formosa, foi visitado o local de barramento e avaliado o estado das obras. A barragem seria implantada em área rural a 6 km da cidade e propiciaria a formação de um reservatório que deveria ter a capacidade de garantir as demandas atuais e futuras de água potável para abastecimento do Município. Depois de mais de um ano da visita de campo, os avanços do empreendimento são poucos e, durante o primeiro semestre de 2015, as obras foram interrompidas.

Com relação aos esgotos sanitários, segundo Cordeiro (2010), o Município não possuía sistema de tratamento até o ano de 2005, adotando as soluções individualizadas através de fossas e despejos diretos nos cursos de rios. Os dados do SNIS mostram um incremento na cobertura do serviço passando de 26.694 habitantes no ano de 2008 a 39.509 habitantes atendidos no ano 2011, com um volume coletado e tratado de 1.724.140 m³/ano, correspondendo a pouco mais da terceira parte da população total do Município. A Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) é composta por três lagoas anaeróbias que funcionam em paralelo seguidas por duas lagoas facultativas em série. O corpo receptor do efluente da ETE é o rio Preto. Na Figura 3.3, consta uma fotografia obtida durante trabalhos de campo em que se pode observar lagoa anaeróbia da ETE Formosa.

Quanto à coleta e destinação final de resíduos sólidos, o SNIS mostra que no Município de Formosa, no ano 2011, foram atendidos 93.536 habitantes com uma taxa de cobertura do serviço de 91,90%. Os serviços regulares prestados incluíam varrição de vias públicas, manutenção de praças e jardins e coleta de lixo doméstico com serviços diários nos bairros centrais (60% da população) e em dias alternados nas áreas periféricas, gerando aproximadamente 47 toneladas de resíduos por dia, as quais são destinadas ao “lixão”, sem nenhum tipo de separação ou triagem, o que se tornou em um local de proliferação de insetos, ratos e urubus e com riscos de propagação de doenças para a população (Barros, 2011).



Figura 3.3 – Lagoa anaeróbia (Obtida em trabalho de campo, 2014).

A área urbana do Município de Formosa é drenada, basicamente, pelo córrego do Brejo formador da lagoa Feia. Em sua micro drenagem, na área central, existem trechos com bocas de lobo simples e galerias de águas pluviais que despejam diretamente no córrego. O Município contava, em 2003 (INTERPLAN, 2003), com uma pequena rede pluvial em condições sofríveis e com dispositivos insuficientes e obstruídos, que, no período chuvoso, recebiam um grande aporte de material orgânico, causando entupimento e alagamento das ruas. Permanecem, hoje, as condições apontadas em 2003.

3.4 REGIÕES INTEGRADAS DE DESENVOLVIMENTO DO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO – RIDE DF E ENTORNO

O processo de crescimento populacional no Distrito Federal e seu Entorno se caracterizou por ser muito intenso na segunda metade do século anterior, pela grande concentração dos habitantes nos aglomerados urbanos, e também, pela grande diferença da infraestrutura social e econômica entre o Plano Piloto de Brasília e seu Entorno. Por esse motivo, o Governo Federal tem promovido muitas ações com o objetivo de reduzir as desigualdades socioeconômicas nesses municípios que apresentam um baixo desenvolvimento econômico e social.

Nesse contexto, foi estabelecida a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – RIDE DF e Entorno, criada pela Lei Complementar N.º 94, de 19 de fevereiro de 1998, e regulamentada pelo Decreto N.º 7.469 de 04 de maio de 2011, com o

objetivo de articular e harmonizar as ações administrativa da União, dos Estados de Goiás, Minas Gerais e do Distrito Federal, para a promoção de projetos que visem à dinamização econômica de territórios de baixo desenvolvimento. No ano de 2002, foram instituídas duas novas RIDE: a Região Administrativa de Desenvolvimento do Polo Petrolina e Juazeiro e a Região Integrada de Desenvolvimento de Grande Teresina. A Figura 3.4 mostra a região abrangida pela RIDE DF e Entorno.

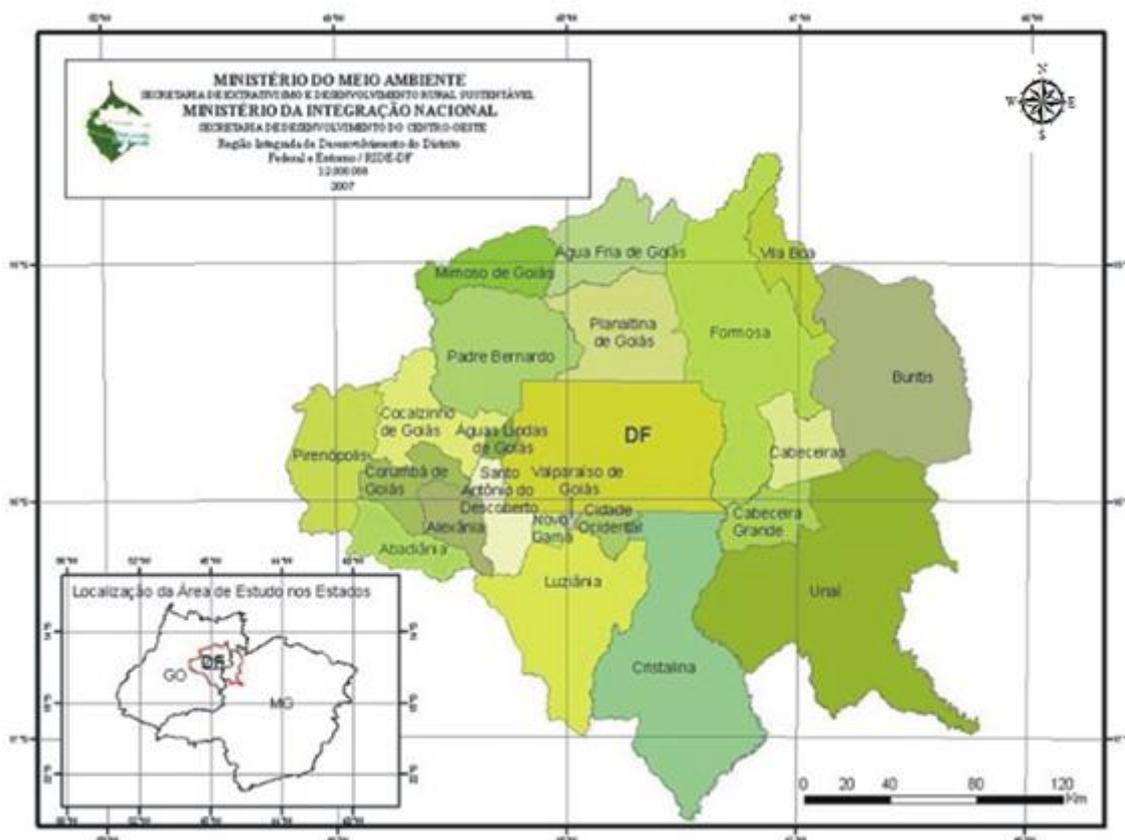


Figura 3.4 – Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – RIDE DF e Entorno (Ministério do Meio Ambiente, 2007).

A RIDE DF e Entorno é constituída pelo Distrito Federal, dezenove municípios do Estado de Goiás e três municípios do Estado de Minas Gerais. Tem uma extensão de 56.411 km², sendo que cerca de 10% correspondem ao Distrito Federal e conta, segundo o censo demográfico de 2010, com uma população aproximada de 3,7 milhões de habitantes localizando-se 70% no DF. Na Tabela 3.3, são apresentados os municípios pertencentes a RIDE DF e Entorno, sua área e população.

Tabela 3.3 – População RIDE DF e Entorno – 2010 (Ministério de Integração Nacional, 2010, modificado).

Unidade Federativa	Município	Área (km ²)	População Censo 2010
DF	Distrito Federal	5.799,99	2.570.160
GO	Luziânia	3.961,59	174.546
GO	Águas Lindas de Goiás	191,19	159.505
GO	Valparaíso de Goiás	60,15	132.947
GO	Formosa	5.807,17	100.084
GO	Novo Gama	191,66	95.013
GO	Planaltina	2.538,66	81.612
MG	Unai	8.463,18	77.590
GO	Santo Antônio do Descoberto	938,36	63.166
GO	Cidade Ocidental	388,47	55.883
GO	Cristalina	6.167,88	46.568
GO	Padre Bernardo	3.137,83	27.689
MG	Buritis	5.219,71	22.729
GO	Pirenópolis	2.181,84	23.065
GO	Alexânia	847,88	23.828
GO	Cocalzinho de Goiás	1.787,99	17.391
GO	Abadiânia	1.044,15	15.752
GO	Corumbá de Goiás	1.062,47	10.344
GO	Cabeceiras	1.113,48	7.346
MG	Cabeceira Grande	1.031,62	6.453
GO	Água Fria de Goiás	2.029,42	5.095
GO	Vila Boa	1.060,19	4.742
GO	Mimoso de Goiás	1.386,92	2.685
RIDE DF e Entorno		56.411,80	3.724.193

Entre as áreas de interesse da RIDE DF e Entorno, estão os serviços públicos comuns ao Distrito Federal e aos municípios relacionados no que tange à infraestrutura, à geração de empregos, ao uso e ocupação do solo, ao transporte, ao saneamento básico, à proteção ao meio ambiente e ao controle da poluição ambiental, entre outros.

Em procura de um desenvolvimento econômico e social sustentável e tentando atenuar as discrepâncias entre o Plano Piloto de Brasília e seu Entorno, o Ministério das Cidades propôs o desenvolvimento de um diagnóstico do saneamento básico nos municípios que as compõem. O diagnóstico está sendo feito com base em dados secundários, estudos disponíveis e indicadores, e quando possível com dados primários.

A elaboração do projeto “Diagnóstico do Saneamento Básico das Regiões Integradas de Desenvolvimento do Brasil – RIDE DF e Entorno” está contemplada na Lei de Saneamento Básico – Lei 11.445 e está sendo desenvolvido de forma agregada para as RIDES e de forma individualizada para cada município que as compõe.

Entre os objetivos específicos do projeto estão o levantamento de dados e a avaliação das relações entre o desenvolvimento urbano e seus indicadores relacionados à expansão do uso e cobertura do solo, o qual é objeto de reflexão neste trabalho.

A escolha de Formosa (GO) como área de estudo da pesquisa em pauta deveu-se às razões a seguir:

- a) O Município de Formosa tem uma relação econômica, social e espacial com Brasília e recebe sua influência direta. Apresenta-se como um polo regional em formação, sub-centro regional dinâmico em transição, entre o Entorno de Brasília e o Nordeste Goiano o que demanda um possível crescimento em muitos aspectos, incluídos o populacional e o econômico.
- b) O Município apresenta uma das maiores participações no total da população da RIDE DF e Entorno, o que indica que o processo de urbanização foi muito intenso e acelerado, e provoca um aumento na demanda por obras de saneamento básico em suas quatro áreas: abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem urbana. Implica, também, em se buscar a correta utilização do espaço urbano levando-se em conta a vulnerabilidade ambiental do Município.
- c) Por apresentar uma estrutura municipal e institucional organizada, Formosa facilita a aquisição dos dados necessários no desenvolvimento da pesquisa, principalmente devido à sua proximidade física com a Universidade de Brasília, onde se desenvolve esta pesquisa, o que permitiu a realização de entrevista e de trabalhos de campo, com gastos pouco significativos.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada a base teórica do estudo realizado, em que, inicialmente, foram abordados temas como geoprocessamento, sistemas de informações geográficas e uso e cobertura do solo, e também foi abordada a classificação temática de imagens para elaboração de mapas de uso e cobertura do solo. Em seguida, foi abordado o conceito de vulnerabilidade ambiental e sua determinação fazendo uso do método AHP e, por último, é apresentada a modelagem ambiental executada pelo sistema DINAMICA EGO, como ferramenta empregada na investigação de trajetória de paisagens e da dinâmica de fenômenos espaciais.

4.1 GEOPROCESSAMENTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica, com o objetivo principal de fornecer ferramentas computacionais para que os analistas determinem as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico e as inter-relações entre diferentes fenômenos (Câmara e Medeiros, 1998). Para Pina e Santos (2000), o geoprocessamento é um termo que engloba diversas tecnologias de tratamento e manipulação de dados geográficos, por meio de programas computacionais. Destacam-se dentre essas tecnologias: o sensoriamento remoto, a digitalização de dados, a automação de tarefas cartográficas, a utilização de Sistemas de Posicionamento Global (GPS) e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

O termo SIG é aplicado a sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos em que são armazenados a geometria e os atributos dos dados georreferenciados, ou seja, localizados na superfície terrestre e representados em uma projeção cartográfica (Câmara e Medeiros, 1998). O SIG também está definido como um conjunto de ferramentas computacionais para coletar, armazenar, recuperar, transformar e exibir dados espaciais do mundo real atendendo um conjunto particular de propósitos (Burrough, 1986; Burrough e McDonnell, 2010). O SIG tem as seguintes características:

- Capacidade para coletar e processar dados espaciais obtidos a partir de fontes diversas (levantamentos de campo, mapas existentes, fotogrametria, sensoriamento remoto e outros).

- Capacidade para armazenar, recuperar, atualizar e corrigir os dados processados de forma eficiente e dinâmica.
- Capacidade para permitir manipulações à realização de procedimentos de análise dos dados armazenados, com possibilidade de executar diversas tarefas, tais como: alterar a forma dos dados, produzir estimativas de parâmetros e restrições para modelos de simulação e gerar informações rápidas a partir de questionamentos sobre os dados e suas inter-relações.
- Capacidade para controlar a exibição e saída de dados em formatos gráfico e tabular.

Devido a essas capacidades inerentes, o SIG possibilita o gerenciamento das informações e com melhorias nos processos de entendimento da ocorrência de eventos, predição e simulação de situações e planejamento de estratégias no processo de tomada de decisões. Com o uso da tecnologia SIG se busca melhorar a eficiência operacional e permitir uma boa administração das informações estratégicas, minimizando os custos de operação e agilizando o processo de decisão.

4.1.1 Elementos do SIG

De acordo com Matias (2001), um SIG está composto essencialmente por cinco elementos que operam em um contexto computacional:

Hardware: conjunto de equipamentos necessários para suportar as tarefas de entrada, processamento e armazenamento dos dados e saída de informações. Pode ser qualquer tipo de plataforma computacional, tais como periféricos de entrada: mesas digitalizadoras, scanners, drives, câmaras digitais, instrumentos topográficos eletrônicos, rastreadores GPS, entre outros. Quanto aos periféricos de saída estão os monitores, os plotters e as impressoras.

Software: conjunto de algoritmos desenvolvido em vários níveis, constituído por módulos que executam funções de análise espacial, digitalização e georreferenciamento de dados, entre outras.

Dados: elemento fundamental para os SIG, tanto de natureza gráfica (espacial) como de natureza numérica ou alfanumérica (não espacial), conhecidos como atributos, dados tabulares ou descritivos.

Técnicas e procedimentos de uso e aplicação: a implementação da tecnologia SIG exige a definição de um conjunto coerente de técnicas e procedimentos visando realizar a entrada, processamento e saída de dados, incluindo a manutenção e gerenciamento da base de dados, para o cumprimento adequado das tarefas que visam alcançar um determinado objetivo.

As pessoas envolvidas: que desempenham um papel fundamental na existência do SIG. Sobre ele recai a tarefa de condução do sistema e também a iniciativa de criá-lo, ou seja, tomar a decisão sobre sua necessidade e a adequabilidade dessa tecnologia como possível solução para uma determinada problemática.

Câmara *et al.* (1996), em uma visão mais abrangente considera que o SIG está composto por: interface com usuário, entrada e integração de dados, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, armazenamento e recuperação de dados. Os diversos componentes em um SIG se relacionam de forma hierárquica. No nível mais próximo ao usuário, a interface homem-máquina define como o sistema é operado e controlado. No nível intermediário, um SIG possui mecanismos de processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída). No nível mais interno do sistema, um sistema de gerência de bancos de dados geográficos oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos. Na Figura 4.1 podem-se observar os componentes do SIG e seus relacionamentos.

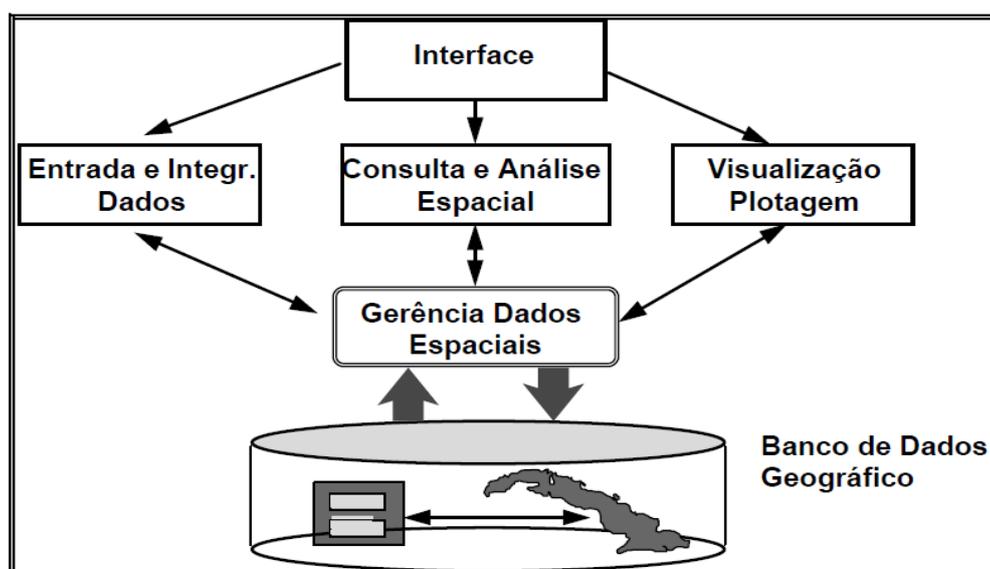


Figura 4.1 – Arquitetura de Sistemas de Informações Geográficas (Câmara *et al.*, 1996).

4.1.2 Aplicações de SIG

Um fenômeno geográfico pode ser analisado de forma e precisão diferente, e um mesmo conjunto de dados armazenados poderá ter tratamentos distintos dependendo do objetivo da aplicação. Cada aplicação requer a manipulação de fenômenos geográficos distintos, associados a diferentes características e propriedades que variam no espaço e no tempo. Além disso, os usuários de um SIG têm também uma grande variedade de perfis profissionais, especialistas diversos das áreas de exatas e humanas, abrangendo todas as engenharias, biologia, geografia, planejamento urbano, entre outras.

O campo de aplicações em SIG está se ampliando cada vez mais, acompanhando a evolução dos dispositivos de coleta e as facilidades computacionais em geral. O número de problemas onde são empregados os SIG aumenta cada dia, empresas públicas e privadas, institutos de pesquisa e órgãos governamentais em diversas áreas de atuação estão entre os principais usuários. Podem ser listadas, a seguir, algumas das áreas de aplicação dos SIG:

- Ocupação Humana: redes de infraestrutura; planejamento e supervisão de limpeza urbana; cadastramento territorial urbano; mapeamento eleitoral; rede hospitalar; rede de ensino; controle epidemiológico; roteamento de veículos; sistema de informações turísticas; controle de tráfego aéreo; sistemas de cartografia náutica; serviços de atendimentos emergenciais, entre outros.
- Uso da Terra: planejamento agropecuário; estocagem e escoamento da produção agrícola; classificação de solos; gerenciamento de bacias hidrográficas; planejamento de barragens; cadastramento de propriedades rurais; levantamento topográfico e planimétrico; mapeamento do uso da terra, entre outros.
- Uso de Recursos Naturais: controle do extrativismo vegetal e mineral; classificação de poços petrolíferos; planejamento de gasodutos e oleodutos; distribuição de energia elétrica; identificação de mananciais; gerenciamento costeiro e marítimo, entre outros.
- Meio Ambiente: controle de queimadas; estudos de modificações climáticas; acompanhamento de emissão e ação de poluentes; gerenciamento florestal de desmatamento e reflorestamento, entre outros.
- Atividades Econômicas: planejamento de marketing; pesquisas socioeconômicas; distribuição de produtos e serviços; transporte de matéria-prima, entre outros.

Para Câmara *et al.* (1996), devido à ampla gama de aplicações em temas como otimização de tráfego, controle cadastral, gerenciamento de serviços de utilidade pública, demografia, cartografia, administração de recursos naturais, monitoramento costeiro, controle de epidemias, planejamento urbano, os SIG podem ser utilizados pelo menos de três grandes maneiras:

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

4.2 USO E COBERTURA DO SOLO

A expressão uso e cobertura do solo pode ser entendida como sendo a forma pela qual o espaço está sendo ocupado pelo homem. Para Palacios (2006) o termo uso do solo refere-se à maneira e o propósito pelos quais o homem explora a cobertura da terra, e o termo cobertura da terra aos atributos da superfície e a subsuperfície da terra incluindo biota, solo, topografia, água superficial e subterrânea e estruturas humanas. Para Turner *et al.* (1995) o termo mudança na cobertura do solo consiste na substituição parcial ou completa de um tipo de cobertura e o termo mudança no uso do solo, além das modificações nos tipos de cobertura, inclui a intensificação em seu uso sem mudar totalmente sua classificação.

As mudanças na cobertura e no uso do solo são produto de processos naturais e antrópicos, mas as atividades antrópicas são as principais responsáveis da maioria de transformações acontecidas na conformação da paisagem. Na atualidade os processos de mudança na paisagem podem ser analisados com auxílio de mapas, fotografias aéreas, imagens de satélite e que com dados de campo. Essas fontes de dados após analisadas em uma base de dados georreferenciada adequada permite por meio de algoritmos de geoprocessamento avaliar as mudanças no uso e cobertura do solo em uma escala multitemporal, com a identificação de taxas e padrões.

A elaboração de mapas em escala multitemporal de uso e cobertura do solo permite identificar tendências da dinâmica da paisagem na área de estudo, as taxas de variação por período analisado e a evolução dessas taxas através do tempo. Por tanto estudos que pretendem determinar a vulnerabilidade ambiental e simular essas mudanças espaço-

temporais têm na produção de mapas de uso e cobertura do solo uma das suas principais fontes.

4.2.1 Procedimentos prévios para a realização da classificação

Para obter uma adequada classificação é necessário realizar alguns procedimentos prévios como:

- Composições coloridas

A composição colorida é um dos artifícios de maior utilidade na interpretação das informações em sensoriamento remoto. A identificação dos objetos depende da forma como é apresentada uma imagem, sendo mais comum e eficiente por meio de cores já que o olho humano é capaz de discriminar mais facilmente matiz de cores do que tons de cinza.

Para produzir a composição colorida são atribuídas às cores primárias (vermelha, verde e azul) as três bandas espectrais quaisquer, sendo conhecido este artifício como composição RGB pelas iniciais das cores em inglês (Red, Green, Blue). Com a combinação RGB se tem a liberdade de explorar todas as combinações possíveis de três cores com três bandas para obter a imagem colorida de melhor contraste (Meneses *et al.*, 2012).

- Realce de contraste

É a técnica mais simples de realce de imagens, sendo muito útil e eficaz. Tem por objetivo melhorar a qualidade visual das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano. Esta técnica amplia, por meio de uma transformação matemática, o intervalo original para toda a escala de níveis de cinza ou números digitais disponíveis, com base na consideração que geralmente os níveis de cinza originais de uma cena não ocupam todo o intervalo possível. A expansão do histograma é realizada em cada banda original.

As classes de algoritmos de expansão de histograma mais empregados são os lineares (por saturação ou por partes) e os não lineares (gaussiano, equalização, raiz quadrada, logaritmo e exponencial).

- Geração de Índice de Vegetação

As operações aritméticas (soma, subtração, multiplicação e divisão) são simples formulações algorítmicas de processamento de imagens, e apresentam resultados expressivos. Trata-se de um processo rápido para obtenção de realces da área da imagem

ou de alvos específicos de interesse do usuário. As operações realizam um processamento de transformação dos dados a partir da combinação de imagens, gerando uma nova imagem completamente distinta e uma matriz de dados. A transformação é executada pixel a pixel por meio de uma regra matemática pré-definida envolvendo normalmente duas bandas espectrais.

O Índice de Vegetação (NDVI) é o mais conhecido exemplo que ilustra os princípios da divisão de bandas que visa o realce das variações de densidade da cobertura vegetal, ele pode ser calculado conforme a Equação (4.1).

$$NDVI = \left(\mathbf{Ganho} \times \left(\frac{A - B}{A + B} \right) \right) - \mathbf{Offset} \quad (4.1)$$

Onde: NDVI é o índice de vegetação, Ganho é o ganho de realce da imagem entre as duas bandas, A e B são as bandas do infravermelho próximo e do vermelho respectivamente e Offset é a variância entre as duas bandas utilizadas (A e B).

- Componentes principais

A análise de componentes principais é um método estatístico que tem por finalidade básica a análise dos dados visando sua redução, eliminação de sobreposições e a escolha das formas mais representativas de dados a partir de combinações lineares das variáveis originais. Esse procedimento matemático é utilizado para converter um conjunto de variáveis correlacionadas em um conjunto de valores de variáveis descorrelacionadas por meio de uma transformação ortogonal. Nessa transformação os três primeiros componentes somam aproximadamente o 99,12% da informação os quais podem ser combinados em uma composição colorida RGB.

- Segmentação

A segmentação é um dos pré-processamentos que antecedem uma classificação estatística de imagens. Neste processo, divide-se a imagem em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação. As regiões são um conjunto de “pixels” contíguos, que se espalham bidireccionalmente e que apresentam uniformidade. A divisão em porções consiste basicamente em um processo de crescimento por regiões no qual as regiões adjacentes, espacialmente, podem ser agrupadas. O processo de segmentação inicialmente rotula cada “pixel” como uma região distinta e calcula a similaridade para cada par de regiões adjacentes espacialmente. O critério de similaridade está baseado em um teste de

hipótese estatístico que testa a média entre as regiões. Logo, divide a imagem em um conjunto de sub-imagens e realiza a sua união entre segundo um limiar de agregação definido (Almeida *et al.*, 2008).

4.2.2 Classificação temática de imagens para elaboração dos mapas de uso e cobertura do solo

A classificação temática é um processo de extração de informação em imagens digitais de sensores remotos para reconhecer padrões e objetos homogêneos e são utilizados em Sensoriamento Remoto para mapear áreas da superfície terrestre que correspondem aos temas de interesse (INPE, 2015). Ou seja, associar padrões de comportamento espectral de uma imagem com uma classe ou um grupo de classes temáticas, as quais representam as feições ou alvos terrestres como água, agricultura, área urbana, pastagem, entre outros.

A classificação temática, que automatiza a extração de informação das imagens, surgiu com o fim de eliminar a subjetividade da interpretação humana e reduzir o esforço de trabalho do analista. O resultado final da classificação é um mapa temático que mostra por meio de polígonos a distribuição das classes dos alvos presentes com os mesmos padrões de comportamento espectral na imagem.

De acordo com Meneses *et al.* (2012) a classificação pode ser dividida em classificação paramétrica e não-paramétrica, classificação espectral e espacial, classificação por pixel o por regiões; e, em a forma mais comum e difundida, a que divide os classificadores em supervisionados e não-supervisionados.

- Classificação por pixel

A classificação por pixel utiliza apenas a informação espectral isoladamente de cada pixel para encontrar regiões homogêneas, a partir de medidas de distância ou de probabilidades de um pixel pertencer a uma classe específica.

- Classificação por regiões

Os classificadores por regiões utilizam, além de informação espectral de cada "pixel", a informação espacial que envolve a relação com seus vizinhos. A informação de borda é utilizada inicialmente para separar regiões e as propriedades espaciais e espectrais irão unir áreas com mesma textura. Alguns dos classificadores por regiões mais empregados são Isoseg, ClaTex e Bhattacharya.

O classificador Bhattacharya é um algoritmo de agrupamento de dados supervisionado aplicado a uma imagem segmentada. O classificador requer interação do usuário, através do treinamento. Neste caso, as amostras serão as regiões formadas pelo algoritmo de segmentação de imagens. A medida da distância de Bhattacharya (distância calculada a partir da análise das médias e das covariâncias das amostras) é usada para medir a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais. Ela mede a distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais.

- Classificação não-supervisionada

A classificação não-supervisionada é útil quando não se tem suficientes informações sobre o número e natureza das classes de alvos da área imageada, e quando se deseja fazer uma classificação exploratória da imagem para saber as possíveis classes de alvos que pode ter. Este tipo de classificação agrupa os pixels segundo as suas características espectrais, organizando-os em agrupamentos denominados clusters que são definidos por parâmetros como a média variância e a covariância sendo a proximidade espectral dos pixels no espaço multidimensional definida. As técnicas de classificação não-supervisionada mais empregadas são ISODATA e K-médias, ambas baseadas no agrupamento de pixels por suas similaridades usando técnicas de distância mínima.

- Classificação supervisionada

A classificação supervisionada é utilizada quando se tem algum conhecimento das classes de alvos, o número de classes e pontos representativos de estas (conjunto de pixels das classes de interesse). A seleção de pontos representativos para obter as características das classes é conhecida como treinamento. Todos os pixels das amostras de treinamento de uma dada classe constituem o conjunto de treinamento para aquela classe, a qual define um padrão de comportamento espectral geralmente expresso pelos parâmetros estatísticos. Portanto, com as classes definidas a priori, a classificação visa enquadrar cada pixel a uma classe. Não há nenhuma restrição no número de classes a serem classificadas, apenas que seja feita uma seleção de classes bem distintas para evitar ao final da classificação confusão entre as classes.

Segundo Mather (2004) o processo de classificação consiste em duas etapas. A primeira é o reconhecimento das categorias dos objetos do mundo real, as quais poderiam incluir, por exemplo, floresta, água, pastagem e outros tipos de cobertura do solo, dependendo da

escala geográfica e natureza do estudo. A segunda etapa é a rotulagem das entidades (normalmente pixels) a ser classificadas. Na classificação de imagens digitais esses rótulos são numéricos, de modo que um pixel que é reconhecido como pertencendo à classe de água pode ser dada o rótulo 1, a floresta pode ser identificada como 2, e assim por diante.

O produto a ser obtido com a classificação das imagens de sensores remotos é o mapa de uso e cobertura do solo, base dos estudos que envolvem a vulnerabilidade ambiental da área de estudo.

Em trabalho realizado por Nascimento (2004) foi executada uma avaliação multitemporal de uso e cobertura do solo em um período de onze anos do Município de Grossos (RN), o que gerou dois mapas de uso e cobertura dos anos 1986 e 1996 a partir de sensores orbitais (imagens SPOT-HRVIR, Landsat 5 – TM e IKONOS-II) e pelo uso de algoritmos de álgebra de mapas no ArcGIS. Desta forma, o autor obteve as mudanças ocorridas na superfície do município para cada classe mapeada nesse intervalo de tempo.

Por sua vez, Barraclough (2004) examinou os padrões de crescimento urbano na região metropolitana de Lexington-Fayette, Kentucky entre 1974 e 2000, utilizando imagens de satélite, sensoriamento remoto e análise SIG. As imagens foram classificadas em urbano/construído, pouco desenvolvido e classes de água. Com as imagens classificadas foi realizada uma comparação para determinar a conversão do solo da classe pouco desenvolvida para urbano/construído no período de estudo. O estudo indicou que na região existe um crescimento interno nas áreas urbanas existentes e que a maior parte do novo desenvolvimento no Condado Fayette acontece dentro da área do serviço urbano sendo mantido o caráter rural fora do limite. Ambos os autores empregaram a metodologia de classificação temática de imagens de sensores remotos.

4.3 VULNERABILIDADE AMBIENTAL

Para o termo vulnerabilidade ambiental existem diversas definições, algumas são de caráter geral aplicando-se em diferentes contextos e outras são aplicadas em áreas mais específicas. A vulnerabilidade ambiental de maneira geral inclui o grau ao qual o homem ou um ecossistema está em contato com um risco (exposição), o grau ao qual uma unidade é afetada pela exposição (sensibilidade) e a capacidade de resistir ou recuperar-se dos danos (resiliência).

O estudo da vulnerabilidade ambiental vem ganhando destaque devido ao aumento dos impactos decorrentes da atuação desordenada das atividades antrópicas no meio ambiente. Problemas como o desmatamento, elevados níveis de erosão, poluição da água, deterioração na qualidade do ar, uso inadequado do solo, podem ser analisados por meio do estudo da sua vulnerabilidade ambiental.

De acordo com Tagliani (2003), a vulnerabilidade ambiental define-se como o grau de susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer. Para Grigio (2003), há dois tipos de vulnerabilidade, natural e ambiental, a primeira pretende mostrar a intensidade da suscetibilidade do ambiente levando em consideração fatores geomorfológicos, geológicos, pedológicos e de vegetação, e a segunda refere-se à suscetibilidade do ambiente às pressões antrópicas. Para este autor ao se relacionar os fatores físicos (geologia, geomorfologia, solos e vegetação) consegue-se uma avaliação natural do ambiente, e somente ao se integrar a pressão antrópica por meio do fator uso e cobertura do solo, consegue-se uma análise ambiental do território.

A vulnerabilidade ambiental, como mostrado na Figura 4.2, pode ser determinada pelo estudo integrado das informações dos processos naturais e antrópicos.

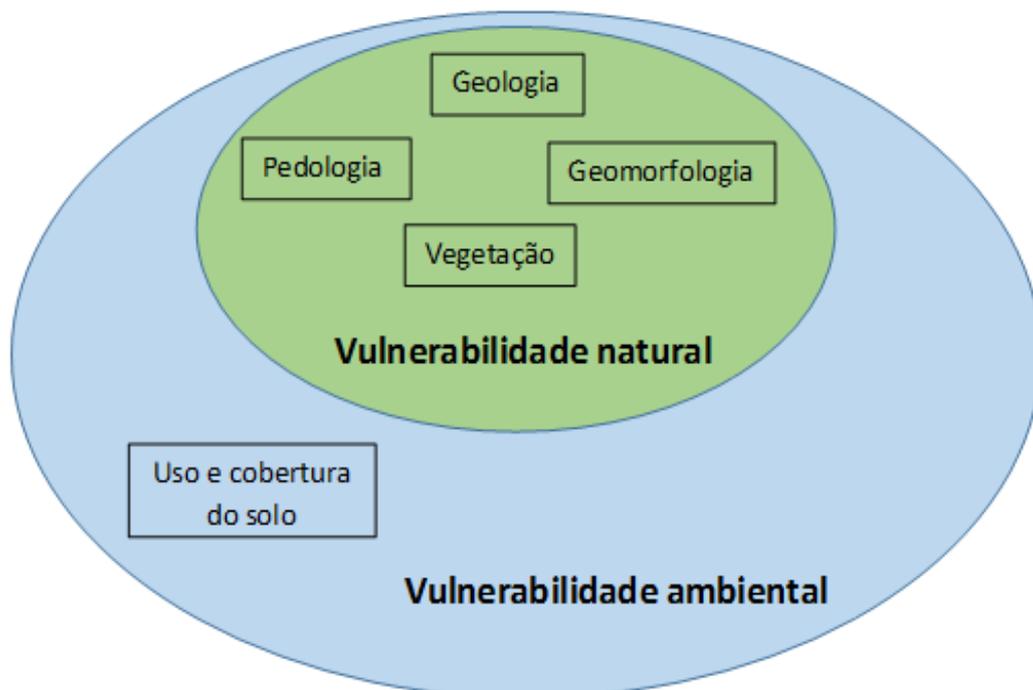


Figura 4.2 – Determinação da vulnerabilidade ambiental (Grigio, 2003).

4.3.1 Determinação da vulnerabilidade ambiental

Alguns autores como Crepani *et al.* (1996) e Crepani *et al.* (2001) apresentaram uma metodologia para elaborar mapas de vulnerabilidade ambiental natural à erosão que foi desenvolvida com base no conceito de Ecodinâmica (Tricart, 1977) e na utilização de imagens TM – Landsat, o que permite uma visão sinótica e holística da paisagem e potencializando o uso do Sensoriamento Remoto e dos Sistemas de Informações Geográficas.

A metodologia propõe dividir as unidades territoriais básicas em duas categorias: as unidades de paisagem natural e os polígonos de intervenção antrópica. Para Crepani *et al.* (2001) uma unidade territorial básica é uma entidade geográfica que contém atributos ambientais diferenciando-a das vizinhas, e que possui vínculos dinâmicos que a articulam a uma complexa rede de outras unidades territoriais.

As unidades de paisagem natural são analisadas ao conhecer sua gênese, constituição física, forma e estágio de evolução, e o tipo de cobertura vegetal por meio das informações fornecidas pelos fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos e fitogeográficos que integradas tentam obter um retrato fiel do comportamento de cada unidade frente à sua ocupação.

Os polígonos de intervenção antrópica são os representantes da área física onde se desenvolvem as atividades humanas que modifica as condições naturais e podem localizar-se sobre uma ou várias unidades de paisagem natural. Essas atividades introduzem novas forças que alteram, em escala variável, as condições de equilíbrio da unidade de paisagem natural. Estas unidades são analisadas com a informação fornecida pelo fator uso e cobertura do solo.

As unidades territoriais básicas podem ser analisadas morfodinamicamente a partir dos princípios de Ecodinâmica, no qual, quando prevalecem os processos erosivos modificadores do relevo predomina a morfogênese e quando prevalecem os processos formadores do solo predomina a pedogênese. Cada um dos fatores (naturais e antrópicos) é classificado de acordo com graus de vulnerabilidade baseado nos processos de morfogênese e pedogênese por meio da ponderação de valores de caráter analítico e individual. Finalmente a vulnerabilidade ambiental é determinada pela integração das

informações dos fatores por meio da atribuição de determinados pesos de importância para cada um de eles.

Todavia, na determinação dos pesos existem diversos critérios de comparação entre as alternativas, fatores ou opções das que se dispõe, dificultando o processo de decisão. De acordo com Souza *et al.* (2001) na existência de vários atributos de comparação entre alternativas, a determinação da superioridade entre estas pode não estar clara, não havendo uma dominância na totalidade de atributos de uma alternativa sobre os atributos de outra; também não pode estar clara a transitividade entre as alternativas comparadas, ocorrendo a dominância em um critério sem que possa verificar-se em outro, o que faz necessário o uso de ferramentas capazes de resolver estas questões. Como resposta ao problema de tomada de decisão utilizando diferentes alternativas qualificando e avaliando diversos critérios foram desenvolvidos métodos multiobjetivo e multicritério, que são técnicas de apoio à decisão que permitem comparar as alternativas disponíveis considerando simultaneamente diversos aspectos de um problema. Na análise multicritério a decisão pode ser tomada ou classificada com base em um grupo de critérios a serem otimizados e não na seleção ou hierarquização de alternativas que buscam a otimização de apenas um objetivo (Cordeiro Netto *et al.*, 2000).

Existem diversos métodos multicritério disponíveis na literatura, mas o seu uso, segundo Brites (2008), depende de uma série de fatores, tais como: a disponibilidade de informação, a natureza do problema, o cenário decisório, condições institucionais, entre outros.

O cálculo dos pesos de compensação, que indica a importância de um fator em relação aos demais, pode ser realizado através do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desenvolvido pelo matemático Thomas Saaty em 1980 (Saaty, 1980). O AHP é um método multicritério e multiobjetivo que tem como base a construção de hierarquias no estabelecimento de prioridades das alternativas e na consistência lógica.

O AHP desenvolve um modelo aditivo linear, que utiliza procedimentos para derivar os pesos e as pontuações obtidas pelas alternativas as quais são baseados, respectivamente, em comparações de pares entre os critérios e entre as opções. Assim, por exemplo, na avaliação de pesos, o decisor faz uma série de perguntas, cada uma das quais questiona quão importante é um determinado critério em relação a outro para a decisão que se está abordado (Dodgson *et al.*, 2001).

De acordo com Reyes (2009) o método AHP consiste em três operações principais. Primeiro o decisor precisa dividir os problemas multicriteriais em seus componentes, ordenando os possíveis atributos em diversos níveis hierárquicos. Depois deve fazer uma comparação par a par dos atributos em um mesmo nível hierárquico. E finalmente deve garantir que o processo de avaliação tenha robustez por meio de uma verificação de consistência, já que as comparações feitas levam elementos de juízo subjetivo. Se o método apresenta inconsistência devem ser feitas de novo as comparações par a par.

No cálculo da vulnerabilidade ambiental do Município de Guamaré (RN), Grigio (2003) realizou análise espacial de mapas de unidades geomorfológicas, de geologia, de pedologia e de vegetação para obter o mapa de vulnerabilidade natural, e este com o mapa de uso e cobertura do solo para obter o mapa de vulnerabilidade ambiental, no ambiente do SIG ArcGIS, com base na estabilidade de cada unidade considerando o conceito de análise Ecodinâmica de Tricart.

Em estudo desenvolvido por Tagliani (2003) em uma porção da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, foram ponderados os fatores vegetação e uso do solo, geologia, áreas protegidas por lei, declividade e capacidade de uso do solo através do método de combinação linear ponderada para o mapeamento da vulnerabilidade ambiental. O cálculo dos pesos de compensação que indica a importância de um fator em relação aos outros foi realizado através da técnica de comparação pareada obtendo os seguintes valores: recursos hídricos (0,1370), declividade (0,3262), solos (0,3262), vegetação (0,1370) e idade (0,0736). A determinação da vulnerabilidade ambiental realizada pelo módulo de avaliação multicritério do SIG Idrisi indicaram que as áreas mais vulneráveis ocupam 32,1% da área total, o percentual 47,4% das áreas com vulnerabilidade média e o percentual 20,5% para as áreas de baixa vulnerabilidade.

Com o fim de analisar a vulnerabilidade ambiental do curso superior do Rio Minjiang localizado na margem oriental da planície Qinghai-Tibet na China, Li *et al.* (2005) apoiados nas tecnologias de sensoriamento remoto e SIG, desenvolveram um modelo numérico ambiental. Para a ponderação da contribuição dos fatores elevação, declividade, temperatura acumulada, índice de seca, uso do solo, vegetação, solo, erosão hídrica do solo e densidade populacional, os autores utilizaram o método de análise espacial de componentes principais. Utilizando o modelo foram calculados os índices integrados de vulnerabilidade ambiental (EVI) para os anos de 1972, 1986 e 2000, sendo classificados

em potencial, fraca, leve, média e forte. Os resultados obtidos mostram na área de estudo uma tendência de aumento no nível forte no período de estudo relacionado principalmente ao impacto dos fatores socioeconômicos.

Na determinação da vulnerabilidade ambiental, por meio da integração de múltiplos fatores que estão inter-relacionadas entre si, alguns trabalhos utilizaram o método multicritério Análise Hierárquica de Processos (AHP) para estabelecer a importância relativa de cada fator na obtenção do mapa final. Melo *et al.* (2010), com o intuito de avaliar os níveis de vulnerabilidade ambiental no estuário do Rio Formoso (PE), propuseram uma metodologia baseada em AHP. Os autores estimaram a vulnerabilidade natural pela combinação dos aspectos geológicos, geomorfológicos, solo e vegetação, e a vulnerabilidade ambiental que foi estimada a partir do cruzamento dos dados da vulnerabilidade natural com o tema uso e ocupação da terra.

Em estudo conduzido por Silva e Nunes (2009) foi mapeada a vulnerabilidade ambiental do Município de Pacoti (CE) através do cruzamento dos fatores declividade, área legal e vegetação/uso e ocupação. Na determinação dos pesos das variáveis para elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental foi utilizado o método AHP para vegetação/uso e cobertura do solo e declividade do terreno.

Por sua vez, Pinese e Rodrigues (2012) utilizaram o Método de Análise Hierárquica (AHP) como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). Por meio do método AHP os autores determinaram os pesos de influência entre os critérios geologia, declividade, uso e ocupação da terra e pedologia, necessários na estimação da vulnerabilidade. O mapa de vulnerabilidade obtido com auxílio do método AHP, mostra resultados imparciais, devido à ponderação e normalização dos dados minimizando os erros do julgamento.

Por meio da análise multicritério AHP foram identificadas as áreas com diferentes graus de vulnerabilidade ambiental do Município de Formosa, em que uma das áreas com maior grau foi escolhida como a mais representativa, para a realização da modelagem da dinâmica ambiental.

4.4 MODELAGEM AMBIENTAL

De acordo com Soares-Filho (1998) a modelagem é o processo de pesquisa que leva a geração do modelo (representação) de um sistema, o qual se desenvolve definindo um conjunto de hipóteses ou previsões que podem ser comparadas com medidas do mundo real. O modelo pode ser aceito, rejeitado ou modificado para novamente ser testado dependendo da concordância entre o resultado deste e o observado. A modelagem dos processos ambientais e das mudanças na estrutura e composição na paisagem teve um importante crescimento a partir de 1960 devido ao rápido desenvolvimento de técnicas de mapeamento assistido por computador, SIG e à geração de bancos de dados espaciais. Este tipo de modelagem representa um desafio com elevado grau de complexidade devido à dificuldade de descrever algo que está em constante transformação e onde interagem diversas variáveis e fatores. Tal complexidade demanda a importância no desenvolvimento de métodos de análise e de previsão de mudanças por meio do espaço geográfico que permitam uma melhor compreensão da dinâmica da paisagem e auxiliem na projeção de seus estados futuros por meio de cenários.

4.4.1 Modelagem Espacial Dinâmica

Com o intuito de representar de maneira adequada fenômenos espaciais dinâmicos como o escoamento de água, a expansão urbana e mudanças no uso do solo, estão sendo desenvolvidas no campo das ciências da informação espacial algumas técnicas e ferramentas capazes de prever representações realistas de este tipo de processos espaço-temporais. Uma das técnicas desenvolvidas que tem como objetivo principal realizar simulações numéricas de processos dependentes do tempo foi o modelo espacial dinâmico. Burrough (1998) definiu um modelo espacial dinâmico como uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionadoras.

De acordo com Benedetti (2010), a modelagem dinâmica tem como propósito simular mudanças espaço-temporais nos atributos do meio ambiente atreladas a um território geográfico, e permite avaliar como um sistema evolui diante um conjunto de circunstâncias definidas pelo modelador entendendo os mecanismos que influem na determinação da função de mudança.

4.4.1.1 Método dos pesos de evidência

O método dos pesos de evidência é utilizado para o cálculo das probabilidades de transição entre as classes analisadas, e se baseia no teorema de probabilidade condicional de Bayes que determina a probabilidade de ocorrência de um evento A, sabendo da ocorrência de outro evento B; a ocorrência de A está condicionada ao fato de B já ter ocorrido.

No método o efeito de uma variável espacial em uma transição é calculado independentemente de uma solução combinada. De acordo com Trentin e Freitas (2010), os pesos de evidência representam a influência das faixas de distância de uma determinada variável nas probabilidades espaciais de uma transição.

Os pesos de evidência são calculados da seguinte forma:

$$O\{G/B\} = \pi O\{G\} \frac{P\{B/G\}}{P\{B/\bar{G}\}} \quad (4.2)$$

$$\log\{G/B\} = \log\{G\} + W^+ \quad (4.3)$$

Onde:

$O\{G\}$ e $O\{G/B\}$ são as chances de ocorrer a priori o evento G e ocorrer G dado um padrão espacial B, respectivamente, W^+ é o peso de evidência da ocorrência do evento G, dado um padrão espacial B.

4.4.1.2 Modelagem através de autômatos celulares

A primeira descrição formal dos autômatos celulares foi realizada por John Von Neumann com o objetivo de criar um modelo que por meio de regras simples pudesse imitar os complexos processos naturais e artificiais que nos rodeiam, como processos de crescimento e reprodução.

Os autômatos celulares são sistemas dinâmicos discretos com duas características importantes; seus objetos, criados de uma mesma forma, podem ser vistos como dados passivos ou não; e são capazes de simular sistemas complexos que evoluem ao longo do tempo, partindo de regras simples e que descrevem os mais variados fenômenos do espaço.

Os autômatos celulares estão compostos por um conjunto de células com determinados valores que interagem entre si em função de umas condições predefinidas. Os estados das células são alterados por um conjunto de regras de transição, que dependem das células em torno da célula a ser utilizada, assim, um autômato celular esta composto de quatro elementos: as células que podem assumir diferentes formas e dimensões, o estado que corresponde aos atributos da célula, a vizinhança que condiciona a mudança das células de sua influência e a regra de transição local que é aplicada a todas as células, estados e vizinhanças.

O modelo de autômatos celulares é utilizado no sistema DINAMICA EGO para reproduzir os padrões espaciais de mudança por meio de dois processos de transição complementares o Expander e o Patcher. O primeiro se dedica à expansão ou contração das manchas previas de uma determinada classe, e o segundo é dedicado à formação de novas manchas. Os dois processos usam um mecanismo nucleador de manchas que opera sobre o mapa de probabilidades de transição.

4.4.1.3 O sistema DINAMICA EGO

Um dos sistemas computacionais que realizam a modelagem dinâmica ambiental é o DINAMICA EGO desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (Soares-Filho *et al.*, 2009). O sistema teve seus algoritmos escritos em linguagem C++ orientada a objetos e está baseado em modelos de autômatos celulares, onde o espaço é representado por um mosaico de células de tamanhos e formas iguais. O estado de cada célula depende de seu estado prévio e da aplicação de regras de transição, qualitativas ou quantitativas, que determinam quando e por que o estado de uma célula se altera de acordo com o estado das células vizinhas (Palacios, 2006).

O DINAMICA EGO é empregado como um instrumento de investigação de trajetória de paisagens e da dinâmica de fenômenos espaciais e utiliza como parâmetros de entrada um conjunto de mapas em formato raster, do tipo: mapas temáticos de paisagem (uso do solo) representados por uma matriz, um conjunto de variáveis espaciais divididas em estáticas (variáveis supostas de controle da configuração da mudança) e dinâmicas (calculadas em cada iteração do modelo). Também são consideradas taxas anuais de transição, tempo mínimo de permanência em cada estado, entre outros. Como saída, o modelo produz mapas

temáticos de paisagem e mapas de probabilidade de transição para cada passo de tempo simulado (Soares-Filho *et al.*, 2001).

O ambiente do software contém uma série de algoritmos chamados *functores*. Cada *functor* pode ser entendido como um processo que atua sobre um conjunto de dados de entrada sobre o qual é aplicado um número finito de operações e produzindo como saída um novo conjunto de dados. Além dos *functores* existem uns operadores de grupo chamados *containers*, os quais agrupam e determinam um comportamento para um conjunto de operadores contido nele. Para a criação de modelos, os *functores* e os *containers* são sequenciados em um fluxo de dados através da interface gráfica, simplesmente arrastando e conectando os *functores* através de portos com tipos equivalentes. Os modelos são desenhados na forma de um diagrama e executados seguindo a cadeia de fluxo de dados (Rodrigues *et al.*, 2007).

Com o objetivo de modelar as mudanças no uso e cobertura do solo, Mas e Flamenco (2011), desenvolveram um estudo em uma região do trópico mexicano utilizando o sistema DINAMICA EGO. O modelo foi baseado em dois cenários diferentes para o ano de 2008, o primeiro seguiu a hipótese de que as altas taxas de desmatamentos na área de estudo continuariam, e um cenário alternativo onde se tem uma queda nas taxas de desmatamento e uma realocação das áreas de reflorestamento. Os resultados mostraram que o cenário tendencial foi o modelo que apresenta mais erros superestimando a quantidade de mudanças sem conseguir prever sua localização, e que o cenário alternativo ficou mais próximo da realidade.

Dias (2011) desenvolveu um estudo na bacia hidrográfica do Lago Paranoá (DF) com o objetivo de modelar a dinâmica espacial do uso e ocupação do solo usando o sistema DINAMICA EGO; e, para este fim, a autora identificou os processos de mudança no uso e ocupação do solo por meio de análise multitemporal e criou cenários futuros para os anos de 2014 e 2020. Os cenários foram elaborados seguindo a tendência histórica no uso e ocupação do solo considerando as transições em taxas fixas e projetando-as para o futuro. Os resultados das simulações futuras indicam uma saturação no espaço territorial das unidades hidrográficas caso mantenha-se a tendência de mudança no uso do solo dos períodos anteriores.

Em estudo adiantado por Godoy (2004), tomando como área de estudo o bairro de Savassi na cidade de Belo Horizonte (MG), foi desenvolvido um modelo dinâmico espaço-

temporal com o intuito de analisar as mudanças no uso e ocupação do solo no período de 1985 – 2003 utilizando conceitos e metodologias de autômatos celulares. O sistema DINAMICA EGO foi a ferramenta empregada na elaboração do modelo dinâmico com simulações em um período de tempo entre os anos de 2003 a 2017 seguindo as tendências de mudanças apresentadas no período de 1996 a 2003/2004.

4.4.2 Elaboração de cenários prospectivos

Novos métodos de planejamento têm sido desenvolvidos como suporte na tomada de decisões devido à alta velocidade com que ocorrem as transformações nas organizações e a grande quantidade de incertezas que se tem com relação ao futuro. Métodos que trabalham com cenários prospectivos cada dia tomam mais valor posicionando-se como uma importante ferramenta no planejamento, já que conduz as organizações a desenvolver atitudes pré e proativas em relação ao futuro, buscando a formulação do futuro desejado.

Os cenários prospectivos são definidos como um conjunto formado pela descrição, de forma coerente, de uma situação futura e do encaminhamento dos acontecimentos que permitam passar da situação de origem à situação futura. Os cenários prospectivos não têm como objetivo prever o futuro, e sim, estudar as diversas possibilidades de futuros plausíveis existentes e preparar as organizações para enfrentar qualquer uma delas.

De acordo com Marcial e Grumbach (2008), as técnicas de cenários prospectivos começaram a ser usadas durante a Segunda Guerra Mundial no planejamento de estratégias bélicas do Exército Norte-Americano. Seu uso cresceu com o passar dos anos, destacando-se a utilização da empresa Shell nos anos 1970 para seu planejamento organizacional. No Brasil, os cenários prospectivos começaram a ser utilizados pela Eletrobrás em 1987 e pela Petrobrás em 1989. Nos últimos anos os cenários também são empregados em distintas organizações, empresas estatais e/ou privadas e pela administração pública destacando-se experiências como o Plano Estratégico de Desenvolvimento Industrial do Maranhão e o Plano Nacional de Saneamento Básico com cenários vislumbrados até o ano 2020 e 2030, respectivamente.

Uma área de interesse para a comunidade científica nos últimos anos, de acordo com Furlan (2012), é a predição de cenários prospectivos a partir de modelagem de dados espaciais, como os extraídos de imagens de satélite. Uma das principais aplicações é a elaboração de cenários prospectivos a partir de modelos de mudança de uso e cobertura do

solo, que fornece respaldo ao planejamento e à gestão de políticas para seu uso a curto e médio prazo.

Por meio de cenários prospectivos baseados em modelos de simulação de uso do solo podem ser avaliadas várias hipóteses com o intuito de prever as consequências da dinâmica de esse uso e minimizar os possíveis impactos ambientais e socioeconômicos. A dissertação em pauta, também, contempla a realização de cenários prospectivos a partir do conhecimento da evolução do uso e cobertura do solo da área de estudo, entre os anos de 1988 e 2010.

5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Esta dissertação foi desenvolvida com base em uma metodologia que analisa as dinâmicas no uso e cobertura do solo do Município de Formosa por meio de uma análise multitemporal durante um período de 22 anos, da avaliação dos efeitos dessa dinâmica nas mudanças da configuração da paisagem por meio da sua vulnerabilidade ambiental, e pela determinação de cenários prospectivos do uso e cobertura do solo, avaliando-se se essa dinâmica segue uma tendência histórica. As diferentes análises, avaliações e respectivos procedimentos metodológicos de pesquisa adotados nesta dissertação estão apresentados na Figura 5.1.

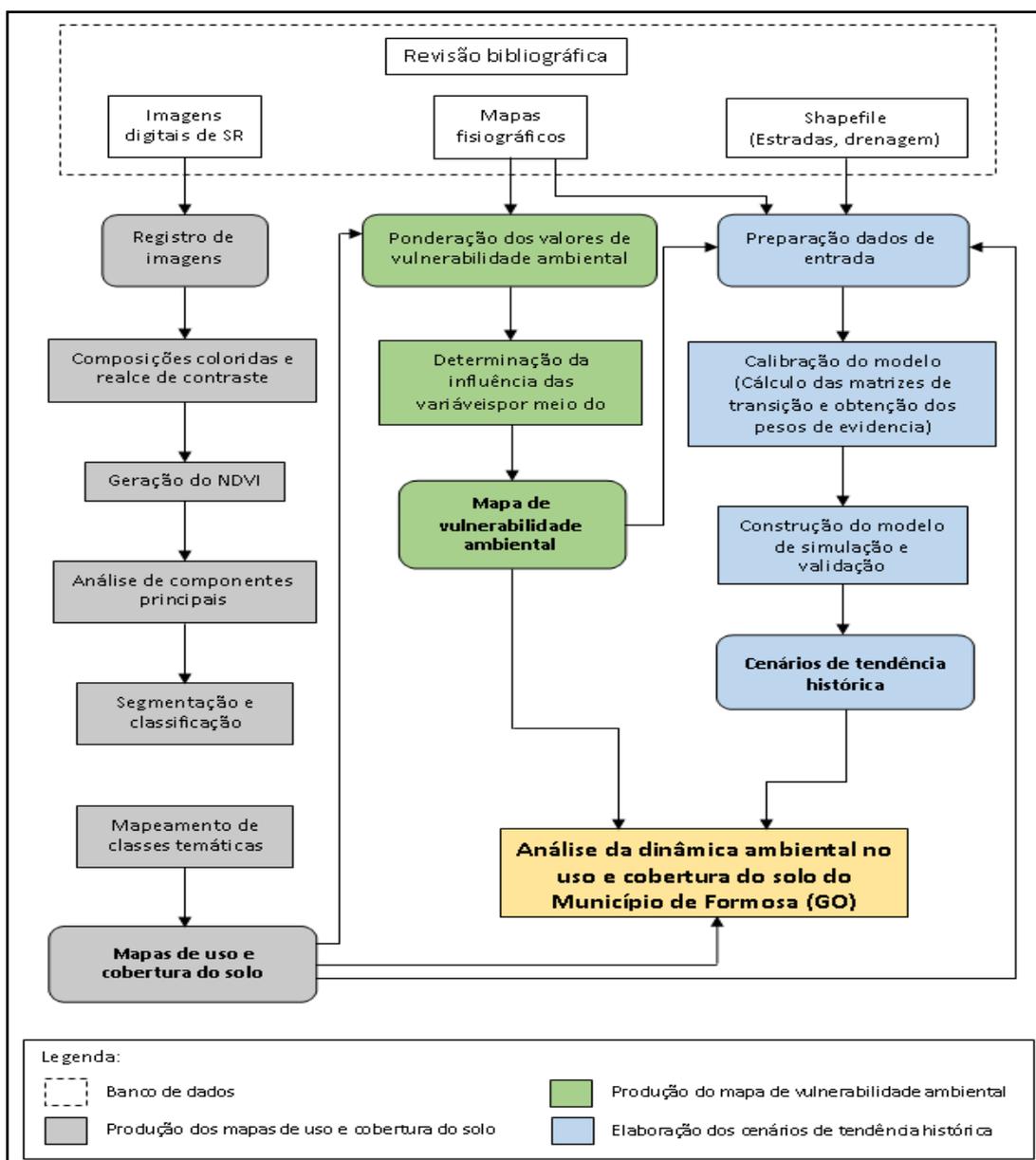


Figura 5.1 – Diagrama metodológico.

5.1 PROCEDIMENTOS

Em continuação são apresentados os procedimentos metodológicos seguidos no estudo, divididos em quatro etapas.

Na primeira etapa, foi realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de caracterizar a área de estudo para os diferentes temas envolvidos na pesquisa como: uso e cobertura do solo, vulnerabilidade ambiental, métodos multicritério e modelagem dinâmica espacial. Ao mesmo tempo, foram obtidos dados e informações dos materiais listados na Tabela 5.1 utilizados nas fases da pesquisa, elaborando-se uma base de dados georreferenciados.

Na seguinte etapa, foi realizada uma classificação do uso e cobertura do solo em uma escala multitemporal para conhecer sua evolução durante 22 anos, subsídio principal para obtenção da vulnerabilidade ambiental e o modelamento da dinâmica ambiental. A evolução de uso do solo foi estudada em três períodos 1988–1998, 1998–2007 e 2007–2010, para-se avaliar o estágio da pressão do crescimento urbano e das atividades antrópicas na área de estudo, com base nas mudanças ocorridas nas oito classes temáticas: área urbana, açudes e reservatórios, agricultura, mata de galeria, cerrado, pastagem, solo exposto e campo. Para tratar digitalmente as imagens, montar e manipular o banco de dados e classificar as imagens, foi empregado o SIG SPRING, versão 5.2.4, desenvolvido pelo INPE.

Posteriormente, foi determinada a vulnerabilidade ambiental para identificar as áreas de maior susceptibilidade da área de estudo como resultado das modificações acontecidas do processo de ocupação antrópica. A vulnerabilidade ambiental foi determinada para o final do período de estudo, ou seja, para o ano 2010. A classificação dos graus de vulnerabilidade está baseada nos processos de morfogênese e pedogênese e expressa pela atribuição de valores de 10 a 30 para os mapas temáticos geologia, pedologia, vegetação, uso e cobertura do solo e declividade, e a ponderação da importância dos mapas temáticos na determinação da vulnerabilidade ambiental foi realizada por meio de uma análise AHP. O processamento e a integração dos dados temáticos para determinação da vulnerabilidade ambiental e sua posterior representação cartográfica foram realizados com o emprego do SIG ArcGIS, versão de demonstração 10.2.

Na última etapa da metodologia, teve-se como objetivo, apresentar, por meio de cenários gráficos prospectivos, os processos envolvidos com a dinâmica do uso e cobertura do solo,

por simulação de possíveis trajetórias futuras. Como plataforma para a simulação da dinâmica ambiental, foi empregada o sistema DINAMICA EGO, desenvolvido pela UFMG.

5.1.1 Base de dados cartográficos

Para o desenvolvimento do presente estudo, foram utilizados os materiais especificados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Base de dados cartográficos.

Dado base	Escala	Fonte	Fonte primária
Imagens multiespectrais TM do satélite Landsat 5 cenas 220/71, 221/70 e 221/71	Resolução espacial de 30 m	DPI/INPE, 2014	
Imagens multiespectrais OLI do satélite Landsat 8 cenas 220/71, 221/70 e 221/71	Resolução espacial de 30 m	USGS, 2014	
Limite do Município de Formosa	1:250.000	SIEG	IBGE
Município de Formosa	1:250.000	SIEG	IMB – SEGPLAN
Perímetro urbano	1:250.000	SIEG	SIG-Goiás - Superintendência de Geologia e Mineração – SIC
Perímetro urbano	1:15.000	INTERPLAN, 2003	
Hidrografia	1:1.000.000	SIEG	SIG-Goiás - Superintendência de Geologia e Mineração – SIC
Principais rodovias	1:100.000	SIEG	AGETOP - Agência Goiana de Transportes e Obras Públicas
Mapa pedológico do Município de Formosa	1:1.000.000	SIEG	Projeto RADAMBRASIL
Mapa geológico do Município de Formosa	1:500.000	SIEG	CPRM/SIC-FUNMINERAL, 2008
Mapa da vegetação do Município de Formosa	1:250.000	SIEG	EMBRAPA - IBGE, 2006
Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDET)	Resolução espacial de 30 m	NASA, 2014	
Zoneamento urbano do Município de Formosa	1:15.000	INTERPLAN, 2003	

5.1.2 Classificação temática de imagens para elaboração dos mapas de uso e cobertura do solo

A classificação temática foi realizada utilizando imagens multiespectrais TM - Bandas espectrais 1, 2, 3,4, 5 e 7 do Município de Formosa dos meses de agosto e setembro para os anos 1988, 1998, 2007 e 2010 do satélite Landsat 5, com uma resolução espacial de 30 m.

Para se obter uma cobertura completa da área de estudo foram necessárias três cenas de satélite para cada ano estudado, referentes às órbitas-pontos 220/71, 221/70 e 221/71 de acordo com o sistema de posicionamento das órbitas do satélite Landsat. Todas as imagens foram adquiridas no catálogo de imagens que se encontram disponíveis no *site* da Divisão de Geração de Imagens do INPE. A fim de minimizar variações sazonais de iluminação e refletância, foram escolhidas imagens com cobertura sazonal e datas de obtenção das imagens com diferença menor do que 15 dias.

Na classificação temática, foi utilizado o sistema SPRING para a consulta a bancos de dados espaciais, para o processamento digital e a análise espacial dessas imagens. Assim, na elaboração do mapa de uso e cobertura do solo, por meio das imagens Landsat, foram seguidos os seguintes passos metodológicos, cujos princípios de processamento encontram-se em Almeida *et al.* (2012), citados a seguir:

- Criação do projeto: É o primeiro passo do SPRING, em que se definem o nome do projeto e a área em que se trabalhará ao longo de todo o projeto. A escolha das coordenadas geográficas do projeto e do sistema de projeção é feita nesse passo, bem como a definição da área das imagens que serão analisadas. O projeto foi definido na projeção cartográfica UTM, com datum horizontal SAD – 69 e no meridiano central 45 graus Oeste.
- Registro de imagens: O registro é uma transformação geométrica que relaciona as coordenadas da imagem (linhas e colunas) com as coordenadas geográficas (latitude e longitude). Os pontos para o registro foram adquiridos através de um plano de informação já georreferenciado, com imagens multiespectrais OLI do satélite Landsat 8 das cenas 220/71, 221/70 e 221/71 (USGS, 2014), em que quantos mais pontos coletados e distribuídos, melhor o registro. Foi realizado um registro com um total de quinze pontos de controle distribuídos na imagem e o valor do erro médio quadrático dos pontos de controle obtido foi de 0,2 pixel que, por ser menor que 0,5 “pixel”, enquadra-se no valor de erro aceitável para uma área urbana para uma resolução de 30 metros.

- Inserção das informações cartográficas: As informações das bases cartográficas devem ser inseridas no programa, em diferentes Planos de Informação (PI), definidos pelo usuário. Durante a realização da análise espacial do Município de Formosa, foram inseridas no SPRING as imagens multiespectrais, e tenho em vista que a área de estudo era compreendida por três cenas, foi necessária a aplicação de um mosaico de imagens. Também, foram inseridos os *shapefiles* referentes às vias asfaltadas e não asfaltadas, e drenagens, assim como a delimitação da área estudada, adquiridos no banco de dados do Sistema Estadual de Geoinformação (SIEG).

- Composição colorida: Para visualização das imagens, foram definidas as posições das bandas espectrais em cada cor do espectro do visível. Como havia 6 bandas espectrais e o espectro do visível conta com apenas 3 diferentes cores (vermelho (R), verde (G) e azul (B)), a combinação do tipo falsa cor RGB453 foi executada. Essa combinação, uma banda no visível e duas no infravermelho, permite uma diferenciação da vegetação em tons marrons, verdes e amarelos. As áreas urbanas e os solos expostos são mostrados em tonalidades de azul claro e as áreas alagadas e corpos d'água aparecem em tons azuis escuros. Um aspecto importante tido em conta na atribuição das cores atribuídas às bandas, de acordo com Meneses *et al.* (2012), é que o olho humano é mais sensível às cores vermelha e verde do que a cor azul, razão pela qual se aconselha a combinação falsa cor com as bandas espectrais 3, 4 e 5, associada às cores vermelha, e verde à banda espectral de maior variância ou maior contraste, que é representada pela banda 5 para que a composição tenha maior impacto visual.

- Realce de contraste: Para melhorar a visualização das imagens ao olho humano de maneira a distinguir diferentes objetos da imagem, foi utilizada a ampliação histográfica do contraste da imagem. O realce foi feito na combinação RGB453 e o algoritmo de expansão do histograma utilizado foi o de classe linear.

- Geração do Índice de Vegetação: Para a determinação do Índice de Vegetação, foram utilizadas as bandas espectrais 3 e 4 das imagens Landsat, já que na vegetação, a principal banda de absorção está centrada na região visível da luz vermelha, que, nas imagens do satélite Landsat, equivale à banda 3, e a região de maior reflectância é no infravermelho próximo, que equivale à banda 4. Ao se realizar a operação aritmética de bandas no SPRING, a divisão da banda 4 pela banda 3, as áreas com vegetação aparecerão nas imagens em tons muito claros e os outros alvos aparecem com tons escuros, destacando as

áreas de vegetação das áreas sem cobertura vegetal. Foram realizados inúmeros testes modificando os valores de ganho e *offset* visando à melhor diferenciação da vegetação, a qual foi obtida com ganho de 220 e *offset* de 80.

- Componentes principais: A análise de componentes principais foi aplicada às imagens previamente georreferenciadas para os diferentes anos de estudo. A geração de novas bandas não correlacionadas, que tem reduzido o volume de dados a ser analisado, foi realizada através das bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7. O procedimento foi feito por meio da ferramenta *Imagem* e o comando *Componentes Principais* do SIG SPRING para a obtenção de seis imagens com valores de pixel entre 0 e 255.

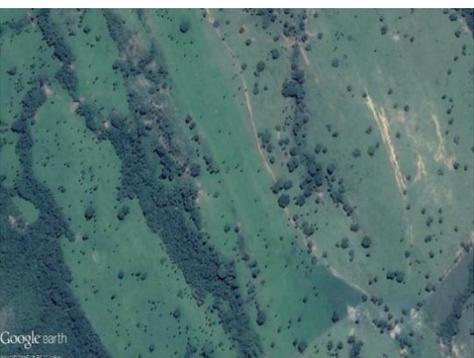
- Segmentação: Nessa fase, após várias tentativas, foram escolhidos um limiar de similaridade de 10 pixels e um tamanho mínimo dos polígonos de 100 pixels porque, com esses valores, os polígonos representavam adequadamente as principais regiões da imagem. A segmentação foi feita com as três primeiras imagens das componentes principais e com a imagem obtida no índice de vegetação.

- Classificação das imagens: Foi realizada uma classificação por regiões (considera o agrupamento dos pixels), utilizando o classificador Bhattacharya (algoritmo supervisionado). Para a classificação, foram utilizadas a imagem segmentada, as três primeiras imagens de componentes principais e a imagem do índice de vegetação. Também, foi realizada uma coleta de amostras de diferentes tipos de usos do solo na área estudada com base em oito classes (área urbana, açudes e reservatórios, agricultura, mata de galeria, cerrado, pastagem, solo exposto e campo), conseguindo assim um mapa digital para as datas das imagens Landsat, onde se pode identificar os tipos de uso e cobertura do solo e suas mudanças, nesse período de tempo. Na Tabela 5.2, são mostradas as diferentes classes de uso e cobertura do solo, com uma imagem ilustrativa e uma pequena descrição.

Tabela 5.2 – Caracterização das classes temáticas de uso e cobertura do solo nas imagens Landsat.

Classe		Descrição
Área urbana		<p>Compreende áreas ocupadas por edificações e sistema viário. Devido à limitada detecção de estas áreas pela resolução espacial das imagens (30m) pequenas vilas não foram incluídas na classificação.</p>
Açudes e reservatórios		<p>Áreas que contêm permanentemente uma quantidade variável de água. Faz referência a lagoas, lagunas e reservatórios.</p>
Agricultura		<p>Porções de terra cultiváveis.</p>
Mata de galeria		<p>Vegetação florestal que acompanha rios de pequeno porte e córregos, localizadas geralmente nos fundos dos vales ou nas cabeceiras de drenagem.</p>

Tabela 5.2 (Continuação) – Caracterização das classes temáticas de uso e cobertura do solo nas imagens Landsat.

Classe		Descrição
Cerrado		<p>Áreas caracterizadas por estratos arbóreo e herbáceo bem definidos, encontra-se grande número de arvores e arbustos, além de subarbustos e ervas.</p>
Pastagem		<p>Áreas com vegetação composta principalmente por espécies herbáceas e arvores esparsas.</p>
Solo exposto		<p>Corresponde a áreas desprovidas totalmente de cobertura vegetal.</p>
Campo		<p>Áreas com ocorrência de plantas arbustivas e subarbustivas espaçadas entre si, além de estrato herbáceo contínuo (campo sujo) e áreas onde ocorre somente o estrato herbáceo com poucos indivíduos arbustivos ou subarbustivos espalhados (campo limpo).</p>

5.1.3 Vulnerabilidade ambiental

Na determinação da vulnerabilidade ambiental, foi utilizado o seguinte material cartográfico:

- Mapa geológico do Município de Formosa. Escala 1:500.000 elaborado por CPRM/SIC-FUNMINERAL, em 2008.
- Mapa pedológico do Município de Formosa. Escala 1:1.000.000 elaborado pelo projeto RADAMBRASIL.
- Mapa de cobertura vegetal do Município de Formosa. Escala 1:250.000 elaborado pela EMBRAPA - IBGE, em 2006.
- Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDET) com resolução espacial de 30m extraído do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) disponibilizado de forma gratuita pelo site da NASA.
- Mapa de uso e cobertura do solo do ano 2010, obtido na primeira parte do estudo.

As Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 apresentam os mapas temáticos de geologia, pedologia e vegetação em formato *shapefile* disponibilizados gratuitamente no *web site* do SIEG (2014), assim como o MDET.

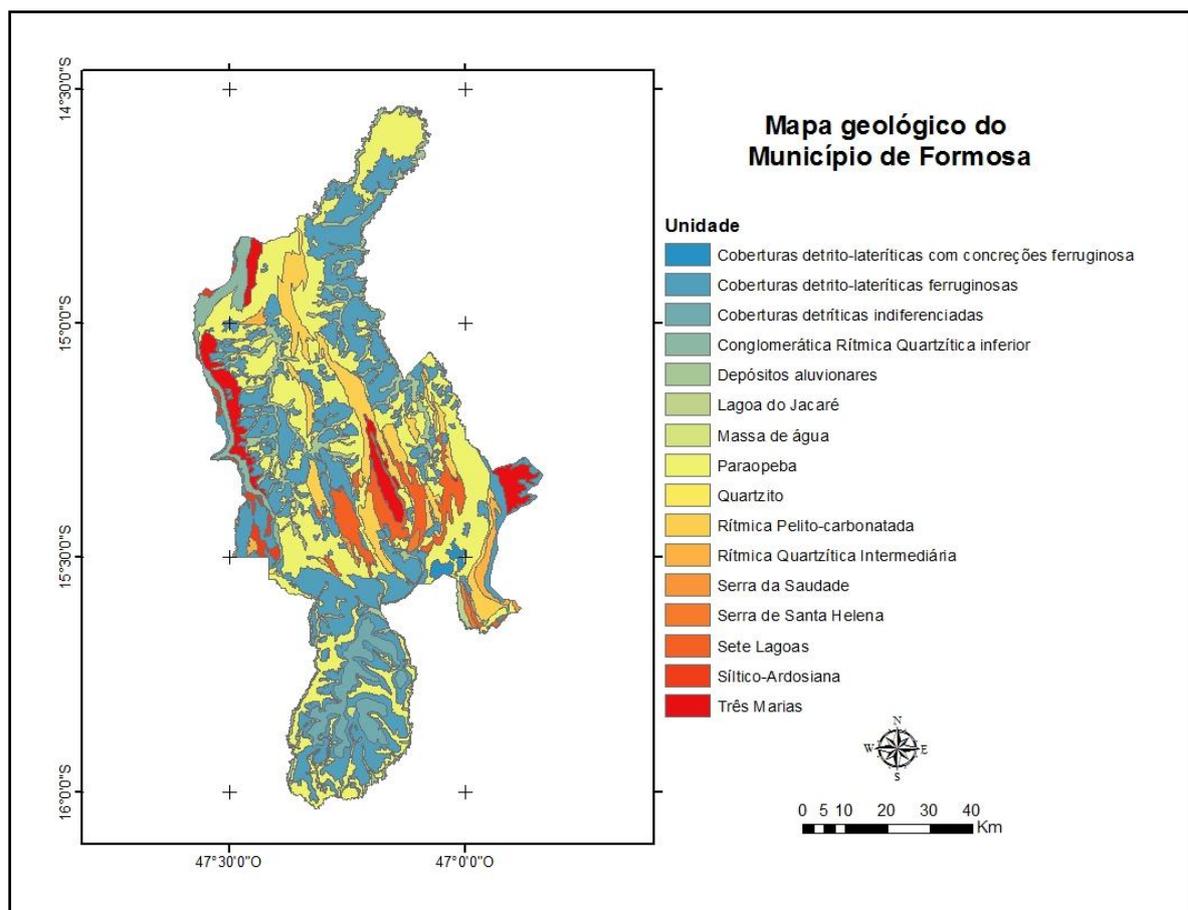


Figura 5.2 – Mapa geológico do Município de Formosa

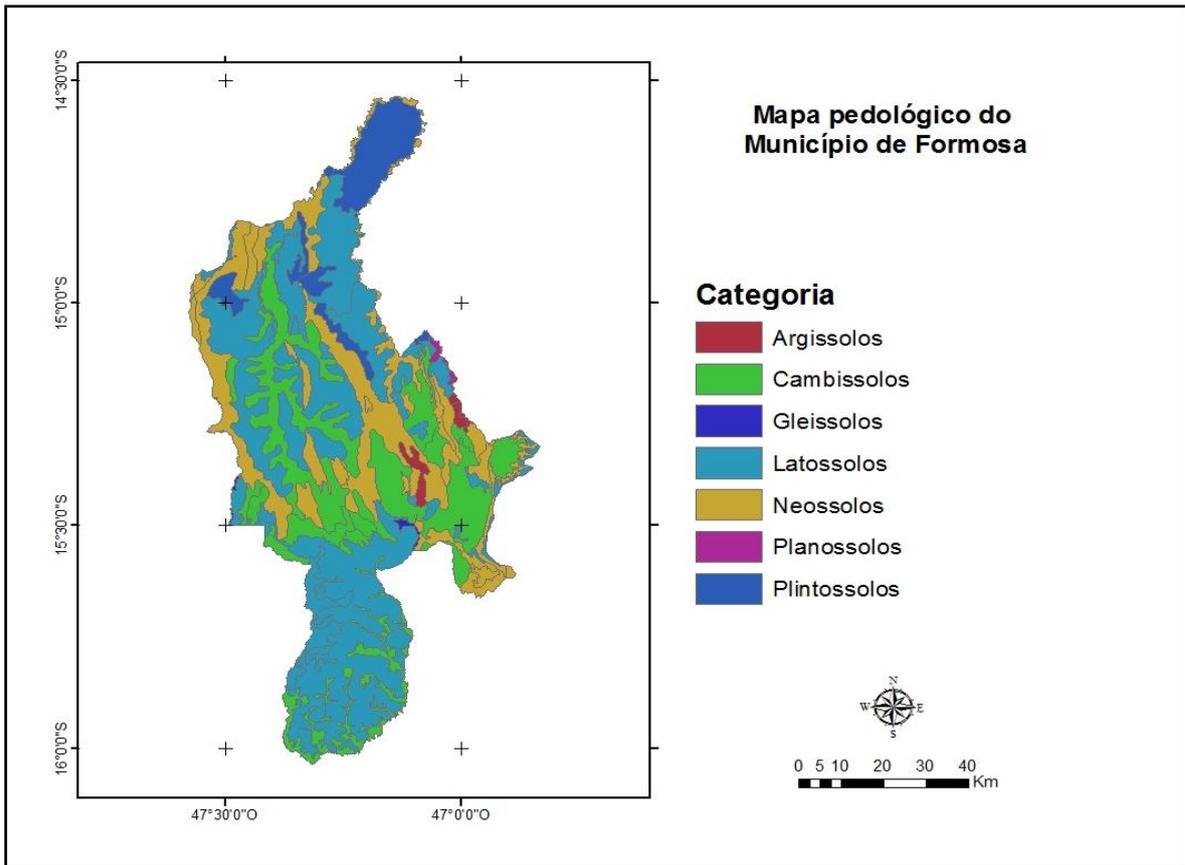


Figura 5.3 – Mapa pedológico do Município de Formosa.

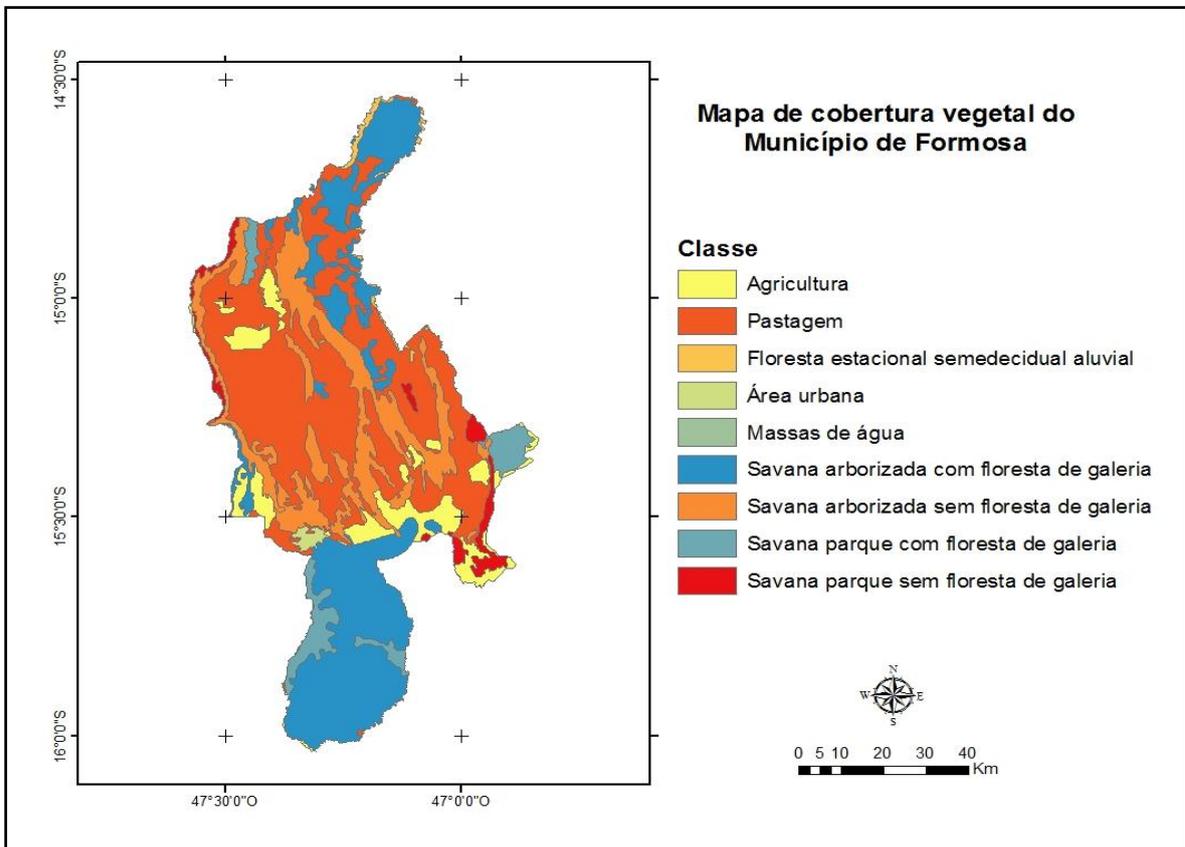


Figura 5.4 – Mapa de cobertura vegetal do Município de Formosa.

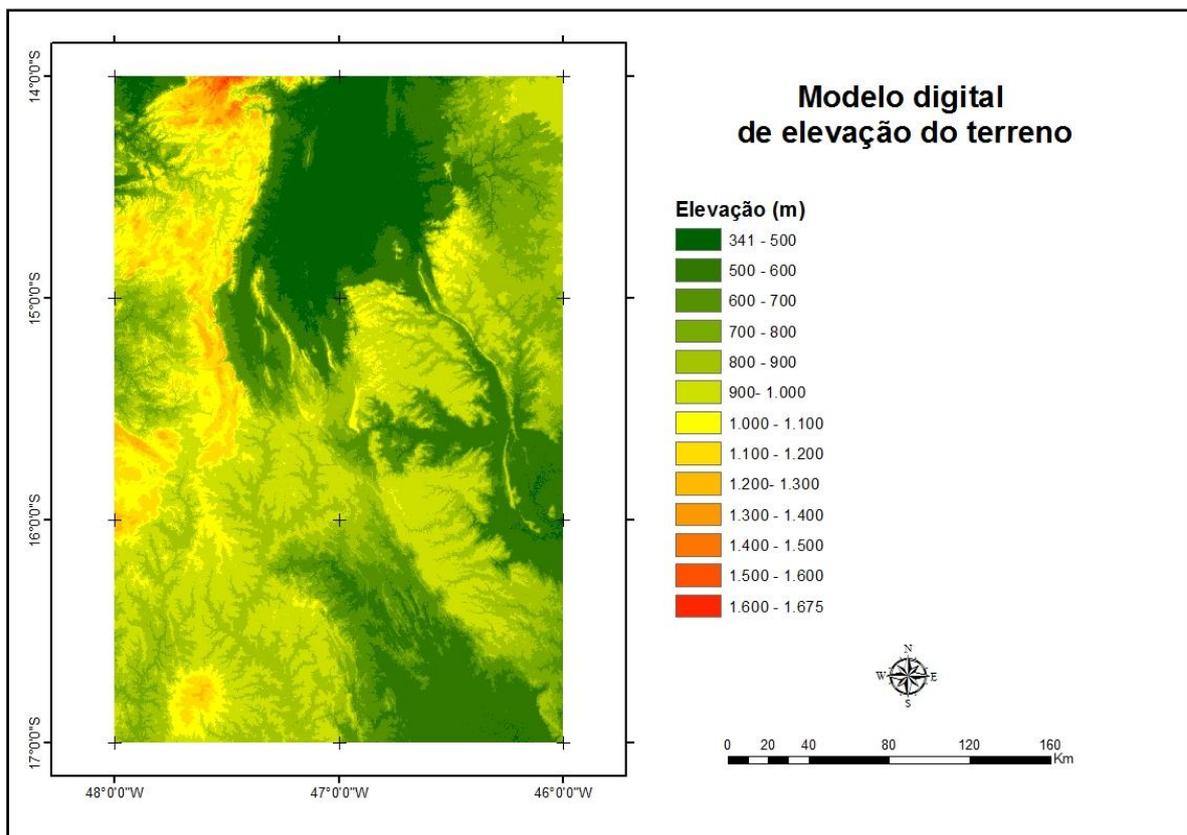


Figura 5.5 – Modelo Digital de Elevação do Terreno.

No desenvolvimento do trabalho, foi considerada a estabilidade de unidade de paisagem desenvolvida no conceito de Ecodinâmica (Tricart, 1977), em que são estabelecidas diferentes categorias morfodinâmicas, resultantes dos processos de morfogênese ou pedogênese. Também, é feita uma análise integrada dos dados que são resultado de combinações dinâmicas de unidades de paisagem natural e polígonos de intervenção antrópica, consideradas as unidades territoriais básicas para o desenvolvimento do estudo.

Com base no conceito de Ecodinâmica, foi possível a criação de um modelo para avaliação do estágio de evolução morfodinâmica das unidades territoriais básicas, atribuindo valores de estabilidade às categorias morfodinâmicas (Crepani *et al.*, 2001), como pode ser visto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas (Crepani *et al.*, 2001, modificado).

Categoria morfodinâmica	Processo	Valor
Estável	Predomina a pedogênese	10
Intermediária	Situação em equilíbrio	20
Instável	Predomina a morfogênese	30

A determinação da vulnerabilidade ambiental seguiu os métodos propostos por Ross (1994), Crepani *et al.* (1996), Crepani *et al.* (2001), Tagliani (2003) e Grigio (2003). A hierarquização da vulnerabilidade de cada tema ou classe mapeada considerou a distribuição dos seus valores ou graus com variação entre 10 (meios estáveis) a 30 (meios fortemente instáveis), por meio de ponderações de valores ou pesos de caráter analítico e individual a cada tema, com base em critérios de análise apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Fatores e critérios de análise para determinação da vulnerabilidade ambiental.

Fatores	Crítérios
Geologia	Análise litológico
Declividade	Graus de declividade
Pedologia	Maturidade pedogenética
Vegetação	Biodiversidade da biota
Uso do solo	Proteção da paisagem

5.1.3.1 Ponderação dos valores de vulnerabilidade ambiental

A ponderação dos valores de vulnerabilidade ambiental dos mapas temáticos da geologia, da pedologia, da vegetação, do uso do solo e da declividade, foi adaptada dos critérios propostos por Crepani *et al.* (1996), Crepani *et al.* (2001). Com os valores obtidos nessa etapa os mapas temáticos foram reclassificados e logo transformados em imagens temáticas, cujo valor do pixel corresponde ao peso atribuído na ponderação, divididas em 5 classes de vulnerabilidade ambiental, segundo a Tabela 5.5. Em continuação, são apresentados os critérios para cada tema.

Tabela 5.5 – Valores e classes de vulnerabilidade ambiental (Crepani *et al.*, 2001, modificado).

Valor de vulnerabilidade	Classes
10 – 13	Muito baixa
13 – 17	Baixa
17 – 22	Moderada
22 – 26	Alta
26 – 30	Muito alta

- Pedologia

A principal característica para estabelecer as classes de vulnerabilidade para esse tema, de acordo com Crepani *et al.* (2001), é o grau de desenvolvimento ou maturidade do solo. Se o ambiente favorece a formação o desenvolvimento do solo a unidade de paisagem é

considerada estável, apresentando solos bem desenvolvidos, intemperizados e envelhecidos. Se no ambiente prevalecem os processos modificadores de relevo, então a unidade é considerada vulnerável, com predomínio dos processos erosivos. A Tabela 5.6 mostra os valores de vulnerabilidade para o tema pedologia.

Tabela 5.6 – Valores de estabilidade/vulnerabilidade dos solos
(Crepani *et al.*, 2001, modificado).

Classificação de solos (Camargo et al., 1987)	Classificação de solos (EMBRAPA, 1999b)	Vulnerabilidade
Latossolos Amarelos Latossolos Vermelho-Amarelos Latossolos Vermelho-Escuros Latossolos Roxos Latossolos Brunos Latossolos Húmicos Latossolos Húmicos Brunos	Latossolos Amarelos Latossolos Vermelho-Amarelos Latossolos Vermelhos Latossolos Vermelhos Latossolos Brunos Latossolos (...) Húmicos Latossolos Bruno (...) Húmicos	10
Podzólicos Amarelos Podzólicos Vermelho-Amarelos Podzólicos Vermelho-Escuros Terras Roxas Estruturadas Brunos Não-Cálcicos Brunizéns Brunizéns Avermelhados Rendzinas Planossolos Solos Hidromórficos (abrupticos) Podzóis	Argissolos Argissolos Luvisolos Alissolos Nitossolos Argissolos Luvisolos Alissolos Nitossolos Argissolos Nitossolos Luvisolos Chernossolos Chernossolos Chernossolos Planossolos Planossolos Espodossolos	20
Cambissolos	Cambissolos	25
Solos Litólicos Solos Aluviais Regossolos Areias Quartzosas Vertissolos Solos Orgânicos Solos Hidromórficos (não abrupticos) Glei Húmico Glei Pouco Húmico Plintossolo Laterita Hidromórfica Solos Concrecionários Lateríticos Afloramento Rochoso	Neossolos Litólicos Neossolos Flúvicos Neossolos Regolíticos Neossolos Quartzarênicos Vertissolos Organossolos Gleissolos Gleissolos Plintossolos Gleissolos Plintossolos Plintossolos Plintossolos Plintossolos Plintossolos Afloramento Rochoso	30

- Geologia

Segundo Crepani *et al.* (1996), os elementos considerados na atribuição dos valores de vulnerabilidade são aqueles relacionados à história da evolução do ambiente geológico e os elementos relativos ao grau de coesão das rochas. Os valores da vulnerabilidade das unidades geológicas foram atribuídos a partir de uma análise litológica com base na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Valores de vulnerabilidade/estabilidade para diferentes litologias (Crepani *et al.*, 1996, modificado).

Litologia	Vulnerabilidade
Quartzitos ou metaquartzitos	10
Riólito, Granito, Dacito	11
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	12
Migmatitos, Gnaisses	13
Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito	14
Andesito, Diorito, Basalto	15
Anortosito, Gabro, Peridotito	16
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	17
Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito	18
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	19
Estaurolita xisto, Xistos granatíferos	20
Filito, Metassilito	21
Ardósia, Metargilito	22
Mármore	23
Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	24
Conglomerados, Subgrauvacas	24
Grauvacas, Arcózios	26
Siltitos, Argilitos	27
Folhelhos	28
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	29
Sedimentos Inconsolidados, Aluviões, Colúvios etc	30

- Vegetação

Para esse tema, o parâmetro que determina as classes de vulnerabilidade é a densidade de cobertura vegetal, já que é o fator de proteção contra os processos morfogenéticos. A cobertura vegetal desempenha um papel importante como defesa natural de uma unidade de paisagem contra a erosão. Ela reduz a energia das gotas da chuva protegendo o solo do impacto direto. Também, as raízes das plantas conduzem a água das chuvas pelo solo promovendo a movimentação de nutrientes e minerais e favorecendo o seu processo de

formação. Portanto para as altas densidades de cobertura vegetal são atribuídos valores próximos à estabilidade (10) e, para as baixas coberturas vegetais, valores próximos da vulnerabilidade (30).

De acordo com Crepani *et al.* (2001), as unidades de savana arborizada conferem mediana proteção as unidades de paisagem natural atribuindo-se valores ao redor de 20 na escala de vulnerabilidade. As unidades de savana parque por apresentar baixa cobertura vegetal são consideradas moderadamente vulneráveis com valores perto de 25. E as unidades de agricultura, área urbana e pastagem apresentam valores próximos da vulnerabilidade, por sua baixa proteção do solo.

- Uso e cobertura do solo

O uso do solo faz referência às atividades humanas desenvolvidas nas unidades de paisagem natural, alterando suas condições de equilíbrio. Se essas atividades ignoram o equilíbrio dinâmico dos diferentes elementos físico e bióticos, que conformam as unidades de paisagem, pode-se gerar danos tanto ecológicos como econômicos. A importância desse fator na ponderação dos graus de vulnerabilidade, de acordo com Oliveira (2011), está em ser um agente favorecedor da morfogênese, indicando maior instabilidade da unidade e, portanto, maior vulnerabilidade ambiental. Para Crepani *et al.* (2001), a primeira intervenção da ação humana é a alteração da cobertura vegetal, desencadeando processos que podem não ser absorvidos pela unidade de paisagem e com efeitos danosos para ela.

As diferentes unidades de uso e cobertura do solo foram classificadas, com base na interferência antrópica da área de estudo, ou seja, o grau de impacto de determinado uso ao ambiente, obtidas com o mapa de uso e cobertura do solo resultante da classificação temática das imagens Landsat (item 6.1). Nesse caso, foram atribuídos valores próximos de dez às áreas mais preservadas e valores próximos de trinta às áreas mais antropizadas.

- Declividade

Para a elaboração do mapa de declividade foi necessário o Modelo Digital de Elevação do Terreno. As ferramentas utilizadas para a geração da declividade foram a *3D Analyst* e os comandos *Surface Analysis* e *Slope* do SIG ArcGIS. Após esse procedimento, o modelo gerado foi reclassificado através da ferramenta *Spatial Analyst* e o comando *Reclassify*, em 5 classes de declividades considerando a classificação feita por Crepani *et al.* (2001), constante da Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Classes de declividade com seus respectivos graus de vulnerabilidade (Crepani *et al.*, 2001, modificado).

Declividade em °	Declividade em %	Grau de vulnerabilidade
< 0,7	< 2	10
0,7 – 3,4	2 – 6	15
3,4 – 11,31	6 – 20	20
11,31 – 26,57	20 – 50	25
> 26,57	> 50	30

5.1.3.2 Determinação da influência dos fatores

Posteriormente, foi determinada a influência mútua entre os fatores compostos pelas imagens temáticas: solos, geologia, cobertura vegetal, uso e cobertura do solo e declividade por meio do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (Saaty, 1980).

Inicia-se pela construção de uma matriz de comparação pareada denominada matriz de decisão, fazendo uso da escala fundamental de Saaty, apresentada na Tabela 5.9, que vai de um a nove, sendo um a indiferença de importância de um critério em relação ao outro e nove a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermédios entre estes valores.

Tabela 5.9 – Escala fundamental de Saaty para comparação pareada (Saaty, 1980).

VALORES	IMPORTÂNCIA MÚTUA
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

A comparação dos fatores deve responder qual dos dois fatores é mais importante com respeito a um critério de nível superior, e com que intensidade (escala 1 a 9). Comparações

entre fatores iguais são desconsideradas tomando o valor de 1 na escala. Cada elemento da matriz indica quanto o fator da coluna é importante em relação a cada fator correspondente na linha. Com base no levantamento bibliográfico e nas escalas cartográficas dos mapas temáticos, foram escolhidos os valores que definiram o grau de importância relativa entre os fatores.

Segundo Grigio (2003), na obtenção do mapa de vulnerabilidade ambiental do Município de Guamaré, por meio de cruzamentos dos fatores, o mapa de uso e ocupação do solo obteve um peso de 0,5, o mapa de unidades geomorfológicas um peso de 0,2 e os temas geologia, associação de solos e vegetação um peso de 0,1. Por sua vez, Costa *et al.* (2006) aplicaram o método de ponderação de fatores, na tentativa de obter um mapa de vulnerabilidade ambiental que melhor representasse as peculiaridades da Bacia Potiguar na Região de Macau (RN). Os pesos obtidos, que indicaram a importância relativa de cada fator foram de 0,5 para o tema de uso e ocupação do solo, 0,2 para a geomorfologia e 0,1 para os temas geologia, solos e vegetação.

Oliveira (2011) determinou a vulnerabilidade ambiental no Litoral Sul do Rio Grande do Norte por meio da parametrização sequencial e paralela de 4 etapas de álgebra de mapas. A última etapa consistiu no cruzamento do mapa de vulnerabilidade geodinâmica, resultado de cruzamentos prévios entre os mapas de geologia, pedologia, geomorfologia, declividade e intensidade pluviométrica, com o mapa de cobertura e uso da terra/vegetação com pesos de 0,5 para cada um. E, finalmente, em estudo desenvolvido por Corvalán (2009), na produção do mapa de vulnerabilidade ambiental da APA Corumbataí, foi feito um modelo em que o fator uso e cobertura do solo é considerado o mais importante para a avaliação, seguido do fator declividade com valores de 0,3 e 0,14 respectivamente.

A seguir, é calculada a matriz normalizada, em que o cálculo compreende a somatória dos elementos de cada coluna e a divisão de cada elemento da coluna pela respectiva somatória. Logo, são calculados os pesos relativos para cada fator e que correspondem às médias das linhas da matriz normalizada.

Em seguida, é necessário avaliar a consistência e confiança do método AHP, já que ele está baseado na realização de julgamentos de valor e é possível, em alguns casos, esperar avaliações inconsistentes. Saaty para verificar o grau de consistência da matriz pareada propõe o cálculo do Índice de Consistência (IC), pela Equação (5.1):

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (5.1)$$

Onde:

n é o número de fatores testados, correspondendo ao número de colunas ou linhas e λ_{max} corresponde ao autovetor, calculado por meio da Equação (5.2):

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]_i}{w_i} \quad (5.2)$$

Onde

Aw é a matriz resultante do produto da matriz recíproca pela matriz dos pesos calculados (w_i)

Também propõe o cálculo da Razão de Consistência (RC) como um procedimento para avaliar a consistência dos julgamentos, através da Equação (5.3):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (5.3)$$

Onde:

IC é o Índice de Consistência e IR é o Índice Randômico

O IR pode ser extraído da Tabela 5.10

Tabela 5.10 – Índice de Consistência Randômicos (Saaty, 1980).

Ordem da matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valores de IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

O mapa final da vulnerabilidade foi obtido, então, por meio de algoritmo de álgebra de mapas, com o uso da Equação (5.4), a qual contém os pesos calculados pelo método AHP. No cálculo, foi usada a ferramenta *Spatial Analyst* e o comando *Raster Calculator* do software ArcGIS. O resultado do cruzamento dos mapas temáticos foi distribuído em cinco (5) classes de vulnerabilidade ambiental como mostrado acima na Tabela 5.5.

$$VA = \text{Peso 1} * (\text{uso do solo}) + \text{Peso 2} * (\text{geologia}) + \text{Peso 3} * (\text{declividade}) + \text{Peso 4} * (\text{solos}) + \text{Peso 5} * (\text{vegetação}) \quad (5.4)$$

5.1.4 Modelagem da dinâmica de uso do solo

A modelagem da dinâmica de uso e cobertura do solo foi implementada com base na metodologia e conceitos do sistema DINAMICA EGO, e foi elaborada de acordo com Dias (2011) em quatro fases principais: preparação dos dados de entrada, calibração do modelo, construção do modelo de simulação e validação, e obtenção do cenário prospectivo de tendência histórica. A modelagem foi elaborada em uma das áreas com maior vulnerabilidade ambiental apontada pela análise multicritério, para os anos de 2015 e 2020.

5.1.4.1 Preparação dados de entrada

Na modelagem, foram utilizados como dados de entrada os mapas de uso e cobertura do solo do Município de Formosa, a partir das imagens Landsat dos anos 2007 e 2010, por ser o período que apresentou as variações mais significativas entre as diferentes classes temáticas estudadas. Para facilitar a modelagem, os mapas foram adaptados, reduzindo-se de oito para cinco as classes temáticas. As classes consideradas nessa etapa foram: área urbana, corpos d'água (açudes, lagoas e reservatórios), agricultura, mata de galeria e mata secundária/solo exposto, esta resultante das classes temáticas cerrado, pastagem, solo exposto e campo.

Também, foram usados como dados de entrada mapas com informação fisiográfica da área de estudo que podem condicionar ou direcionar a dinâmica de uso e cobertura do solo. Esses mapas são chamados de estáticos, já que não mudaram durante a execução do modelo. Os mapas estáticos empregados foram: mapa pedológico, mapa de declividade, mapa de distância até a drenagem e mapa de distância até as estradas. A rede de drenagem e as estradas principais foram obtidas no *web site* do SIEG (2014), a partir dos quais foram elaborados os mapas de distâncias. Para a rede de drenagem, foram calculados *buffers* (áreas de influência ao redor da feição a uma distância específica) com faixas de 100 metros e para as estradas *buffers* com faixas de 500 metros por meio da função *Buffer Wizard* do SIG ArcGIS. Os mapas estáticos foram compactados em um só arquivo chamado “cubo raster”, utilizando o functor *Create Cube Map*.

Além disso, é possível trabalhar com mapas dinâmicos, chamados assim por que podem ser atualizados durante a iteração do modelo. Na execução, foram incluídas as variáveis distância até a classe 1, 2, 3, 4 e 5, por meio do functor *Calc to Distance Map*, o qual recebe como entrada o mapa de uso e cobertura do solo do ano 2007 e gera um mapa de

distância de fronteira (distância mais próxima) entre as células de cada classe do mapa de entrada.

Todos os mapas foram convertidos para o formato TIFF por meio da função de conversão de formato do sistema ArcGIS com o mesmo número de colunas e linhas, e ancorados em um mesmo ponto de registro com as mesmas coordenadas no espaço geográfico. Os mapas ficaram na referência espacial GCS SAD 1969 – 96, com datum horizontal D_South_American_Datum_1969.

5.1.4.2 Calibração do modelo

O que se pretendeu nessa etapa foi analisar a dinâmica no uso do solo em um determinado período, para avaliar os padrões das mudanças e fornecer as informações necessárias ao modelo, com o intuito de determinar a quantidade de mudanças, os tipos de transição e a localização mais provável onde ocorreram essas mudanças (Mas e Flamenco, 2011). A fase foi dividida nos seguintes passos:

- Cálculo das matrizes de transição

Esse passo consistiu na elaboração das matrizes de transição para analisar as mudanças ocorridas em um período de tempo no uso do solo. A matriz de passo único correspondeu às mudanças acontecidas durante todo o período e a matriz de passos múltiplos correspondeu às mudanças acontecidas em uma unidade de tempo (anos, meses, dias).

As taxas de transição foram calculadas para o período compreendido entre os anos 2007 e 2010, através da tabulação cruzada entre as classes temáticas dos mapas de uso e ocupação do solo usando o modelo *Determine Transition Matrix* do sistema DINAMICA EGO.

- Obtenção dos pesos de evidência

Com esse passo, quis-se identificar as áreas mais favoráveis para uma mudança, sendo calculadas as probabilidades de transição de cada célula considerando diferentes variáveis naturais e antrópicas representadas por meio de mapas. O DINAMICA fornece uma ferramenta para produzir mapas de probabilidade de transição através do método bayesiano de pesos de evidência. Esse método está baseado na probabilidade condicional, a qual permite obter a probabilidade de um evento A ocorrer sabendo que outro evento B já ocorreu.

Primeiro foram calculadas faixas para classificar as variáveis em escalas contínuas de cinza para a derivação dos pesos de evidência utilizando o modelo *Determine Weights of Evidence Ranges*. Nessa etapa inicial, foram utilizados os mapas de uso e cobertura do solo e os mapas das variáveis estáticas e dinâmicas. Como resultado, foi obtido um arquivo esqueleto dos pesos de evidência. Em seguida foram calculados os pesos de evidência com o mesmo conjunto de dados no passo anterior e com o arquivo esqueleto por meio do modelo *Determine Weights of Evidence Coefficients*.

E, por último foi verificado se os mapas de entrada eram espacialmente independentes por meio de um grupo de medidas para estimar esta suposição. Dos métodos empregados pelo DINAMICA, foi adotado, na pesquisa, o índice de *Cramer*, já que opera com valores de áreas de sobreposição entre diferentes variáveis de dois mapas, visando avaliar a presença de associação ou dependência espacial entre ambos (Benedetti, 2010). O índice varia de 0 (zero), refletindo completa independência, a 1 (um), mostrando completa dependência das variáveis.

Segue a transcrição da correspondência citada na nota de rodapé, mantida com o professor Hermann Rodrigues, do Centro de Sensoriamento Remoto – UFMG, Belo Horizonte (MG), um dos desenvolvedores do Sistema DINAMICA EGO: O limiar de corte considerado no estudo foi de 0,5; sendo descartadas ou vinculadas de outras formas as variáveis que ultrapassem esse valor. Em geral o limiar para que variável seja removida é bastante polêmico. Algumas fontes citam até mesmo 20%. Na prática, uma correção alta implica que uma variável é muito semelhante a outra variável que, por isso, seu uso não traz benefícios a simulação. Ao contrário, ela cria uma falsa valorização de uma variável, pois o efeito dessa variável será contado mais de uma vez.”¹

O cálculo da correlação entre as variáveis foi realizado utilizando o modelo *Weights of Evidence Correlation* próprio do DINAMICA.

5.1.4.3 Construção do modelo de simulação e validação

- Modelo de simulação

Com o intuito de calibrar o modelo, foi realizada uma simulação de três anos, que corresponde ao período 2007 – 2010, utilizando o mapa de uso do solo de 2007, os mapas

¹ Correspondência do professor Hermann Rodrigues, do Centro de Sensoriamento Remoto – UFMG, Belo Horizonte (MG), enviada por email em 27.10.15.

estáticos compactados no “cubo raster”, os mapas dinâmicos, os pesos de evidência e a matriz de passos múltiplos.

Para reproduzir os padrões espaciais de mudança, o DINAMICA utiliza duas funções baseadas na técnica de autômatos celulares *Expander* e *Patcher*. O *Expander* é um processo dedicado à expansão ou à contração de manchas já existentes de certa classe e o *Patcher* é um processo que gera ou forma novas manchas, através de um mecanismo de semeadura. Por meio da variação de três parâmetros das funções *Expander* e *Patcher*, é possível a formação de uma variedade de tamanhos e formas de manchas de mudança. Esses parâmetros são denominados no DINAMICA de: *Mean Patch Size*, *Patch Size Variance* e *Patch Isometry*. Nesse passo, também é estabelecida a quantidade de células a serem alteradas para cada função de transição, ou seja, que quantidades serão consideradas para a expansão de categorias existentes e que quantidades serão consideradas na criação de novas manchas.

- Validação do modelo de simulação

Na validação do modelo, é comparado o mapa de referência (mapa de uso e cobertura do solo de 2010) com o mapa simulado, para quantificar o grau de semelhança entre os dois mapas, e a comparação é feita por meio de métodos baseados em proximidade. Têm sido desenvolvidos muitos métodos de comparação, mas o sistema DINAMICA utiliza uma modificação do método Hagen que está baseado na similaridade nebulosa *fuzzy*, denominado de *Calc Reciprocal Similarity*, no qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor proporção, pelas células vizinhas. A validação no sistema DINAMICA é feita utilizando a função de decaimento constante e a função de decaimento exponencial com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central.

O ajuste espacial entre os mapas pode ser medido por meio da análise de similaridade por múltiplas janelas empregando as funções de decaimento constante e exponencial dentro de um tamanho variável de janela. Para a função de decaimento constante se o mesmo número de células de mudança é encontrado dentro da janela, o ajuste terá o valor de 1, não importando suas localizações; já para a função de decaimento exponencial o valor do ajuste variara de acordo com a localização da célula na janela. Na Figura 5.6 pode ser observado um exemplo da aplicação do método de similaridade *fuzzy* para a função de decaimento exponencial.

O método empregado pelo sistema DINAMICA calcula a similaridade em duas direções, do mapa de diferenças 1 para o mapa de diferenças 2 e do mapa de diferenças 2 para o mapa de diferenças 1, devendo-se sempre escolher o menor valor de similaridade já que os mapas randômicos tendem a produzir um elevado ajuste artificial quando comparados univocamente, porque eles dispersam as mudanças sobre todo o mapa (Soares-Filho *et al.*, 2009).

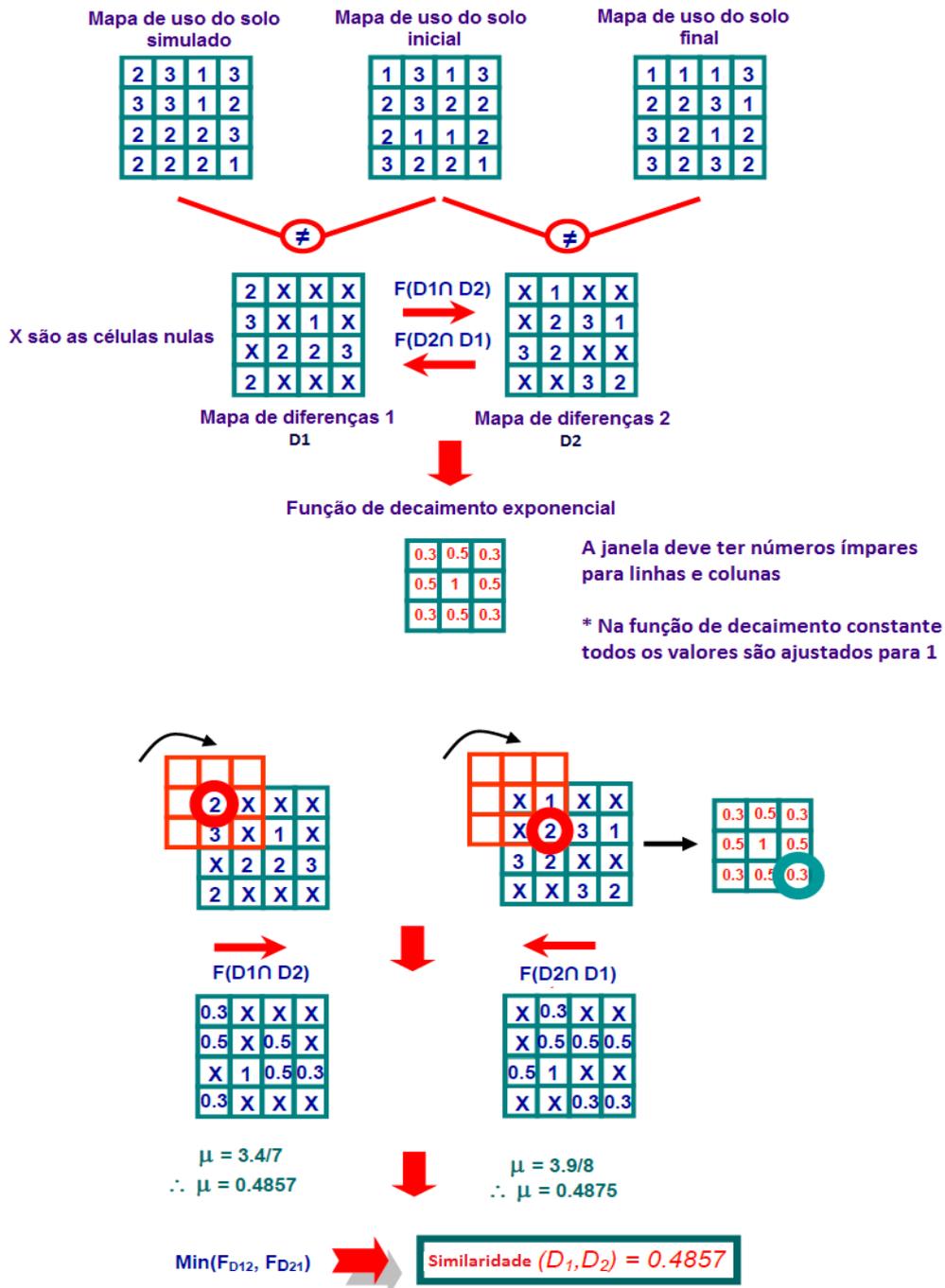


Figura 5.6 – Exemplificação do processo realizado na aplicação do método de similaridade fuzzy (Soares-Filho *et al.*, 2009, modificado)

De acordo com Soares Filho (2015) não existe um valor ideal de corte para determinar si um modelo deve ser descartado ou não. Na pesquisa em pauta foram considerados índices de similaridade acima de 0,5 para validar o mapa simulado, o que significa que como mínimo a metade das células que mudaram no período de estudo foram simuladas acertadamente.

5.1.4.4 Obtenção do cenário prospectivo de tendência histórica

Ao se modelar um cenário prospectivo de tendência histórica, supõe-se que as taxas e distribuições das mudanças não variam entre o período de calibração (2007 – 2010) e os períodos simulados (2010 – 2015) e (2010 – 2020). Os prognósticos de uso e cobertura do solo serão elaborados para curto e médio prazo, definindo curto prazo como um período de até cinco anos, e médio prazo como um período de tempo compreendido entre cinco e dez anos, a partir do ano de simulação e calibração do modelo. Na modelagem de mudanças de uso e cobertura do solo urbano, não é recomendável trabalhar com prognósticos de longo prazo devido ao fato de mudanças de uso e cobertura do solo de longo prazo serem dificilmente previsíveis e sujeitas a erro por alterações inesperadas na esfera macroeconômica e, conseqüentemente, no comportamento do uso e da cobertura do solo, e porque, no planejamento urbano estratégico, apenas o curto e o médio prazos são relevantes na definição de prioridades e no processo de tomada de decisões (Almeida, 2003).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São descritos, a seguir, os resultados obtidos, seguindo a metodologia proposta.

6.1 CLASSIFICAÇÃO TEMÁTICA

Depois de seguir os passos metodológicos descritos no capítulo anterior, foi possível gerar os mapas de uso e cobertura do solo do Município de Formosa, para os anos de 1988, 1998, 2007 e 2010. Os resultados da classificação temática por regiões das imagens Landsat 5 são apresentados nas Figura 6.1, 6.2, 6.3, 6.4.

Os valores obtidos das áreas nas diferentes classes de uso e cobertura do solo foram relacionados por períodos, em que a diferença entre os anos evidenciou a modificação ocorrida em cada uma das classes temáticas nesse período, em seguida, foi calculada a variação das áreas de cada classe e expressada em porcentagem.

No período entre os anos de 1988–1998, se apresenta uma redução nas classes cerrado e mata de galeria de 173,12 km² e 200,17 km² respectivamente, devido ao aumento de atividades antrópicas como pastagem e agricultura mecanizada. As áreas para agricultura tiveram um acréscimo de 105,81%, passando de 103,70 km² a 213,43 km², possivelmente porque nos anos 90, com a chegada da população gaúcha iniciou-se a lavoura da soja (INTERPLAN, 2003), e a pastagem aumentou sua área no Município em 169,77 km² em dez anos. Observa-se também um incremento na área urbana do Município, isso devido ao crescimento da população urbana que passou de 49.659 habitantes em 1991 a 69.285 habitantes no ano 2000 (IBGE, 2010). A Tabela 6.1 apresenta os resultados das áreas ocupadas para este período, além de mostrar sua variação percentual.

Tabela 6.1 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 1988 – 1998.

Classes	Área 1988 (km ²)	%	Área 1998 (km ²)	%	Varição (%)
Área urbana	10,77	0,19	18,02	0,31	67,30
Açudes/Reservatórios	6,39	0,11	6,17	0,11	-3,45
Agricultura	103,70	1,79	213,43	3,68	105,81
Mata galeria	1295,88	22,32	1095,71	18,87	-15,45
Cerrado	3497,22	60,24	3324,10	57,26	-4,95
Solo exposto	2,02	0,03	2,65	0,05	31,18
Pastagem	773,88	13,33	943,65	16,25	21,94
Campo	115,72	1,99	201,85	3,48	74,42
Total	5.805,58	100	5.805,56	100	

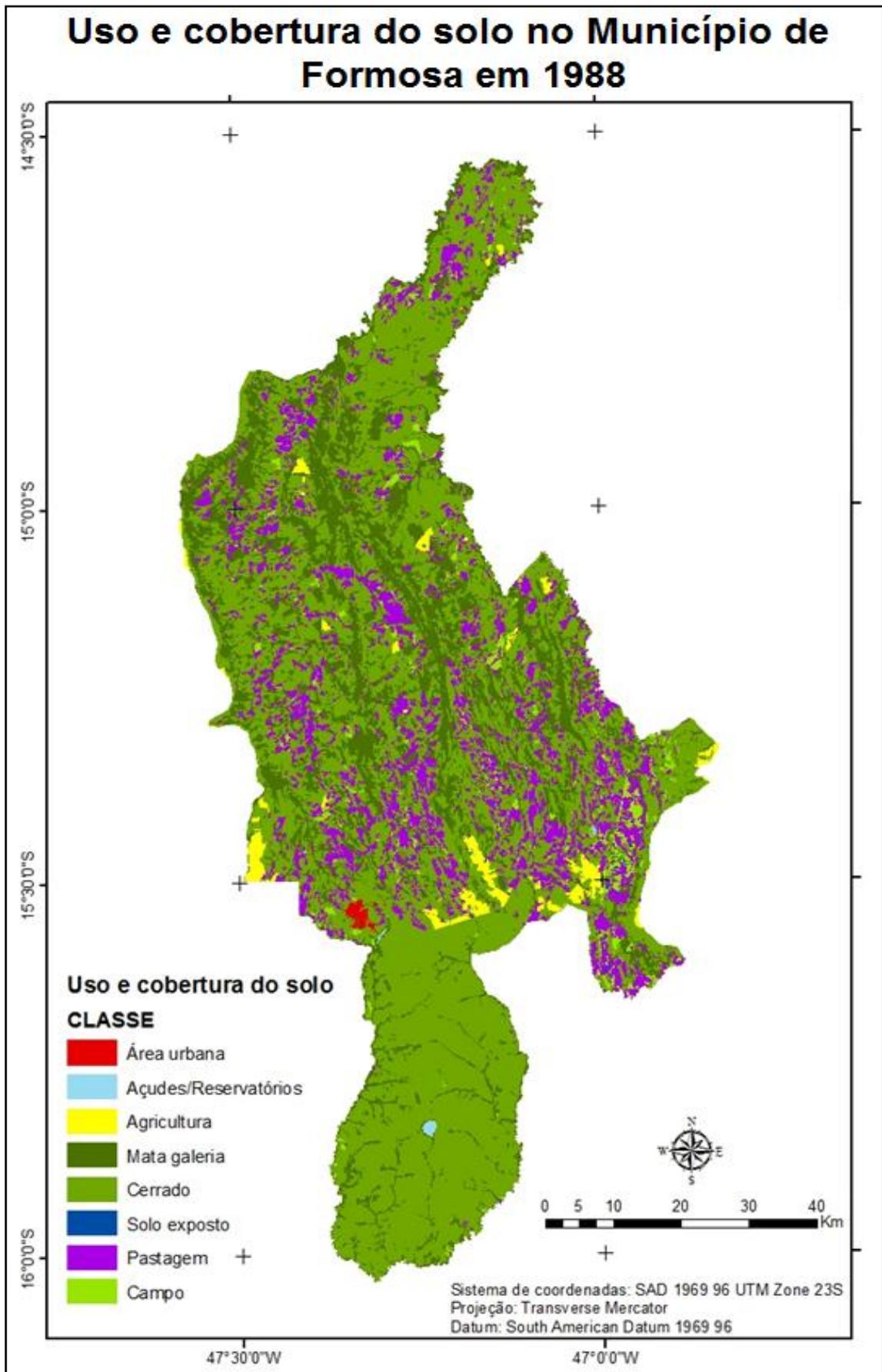


Figura 6.1 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 1988.

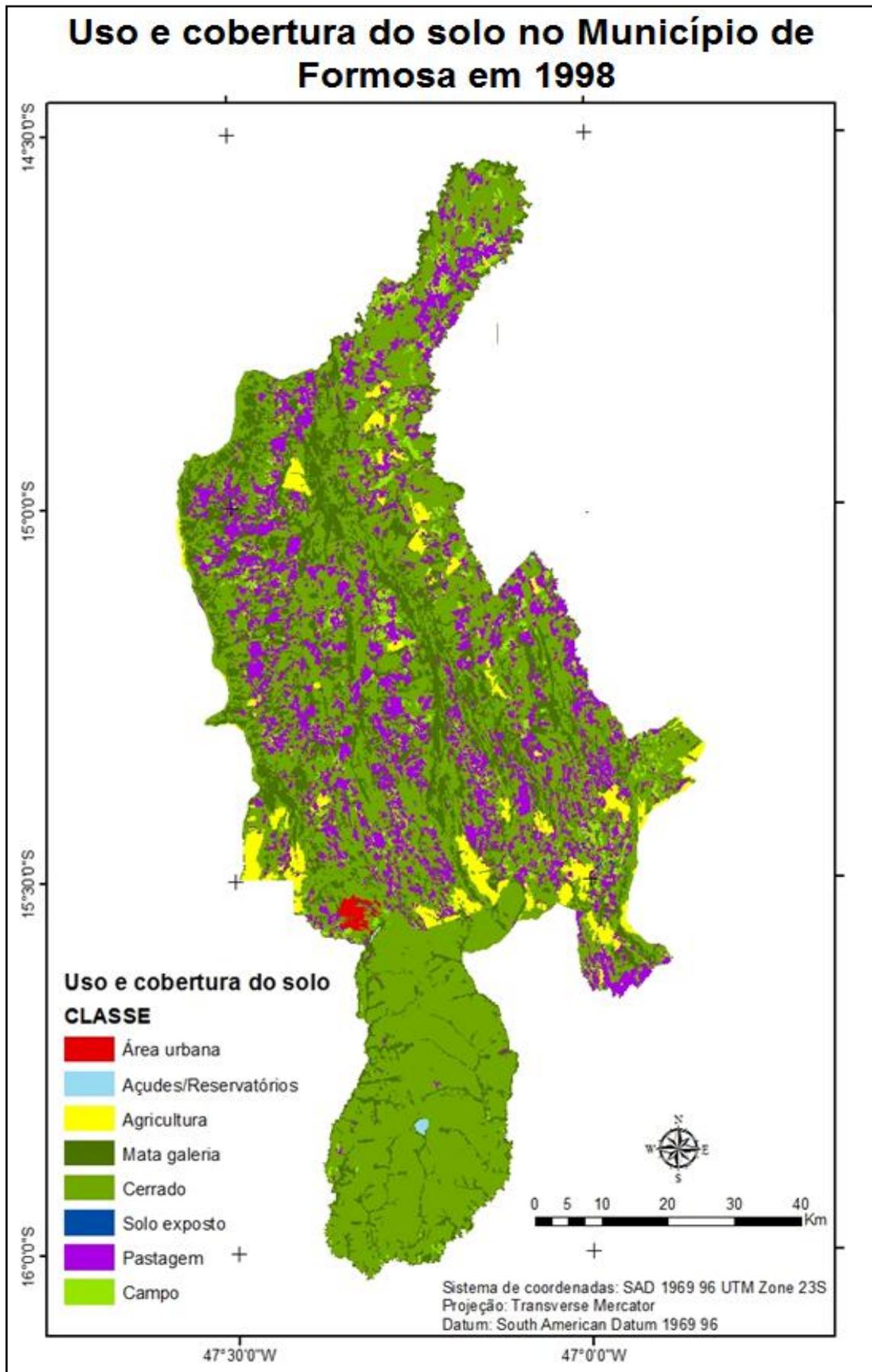


Figura 6.2 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 1998.

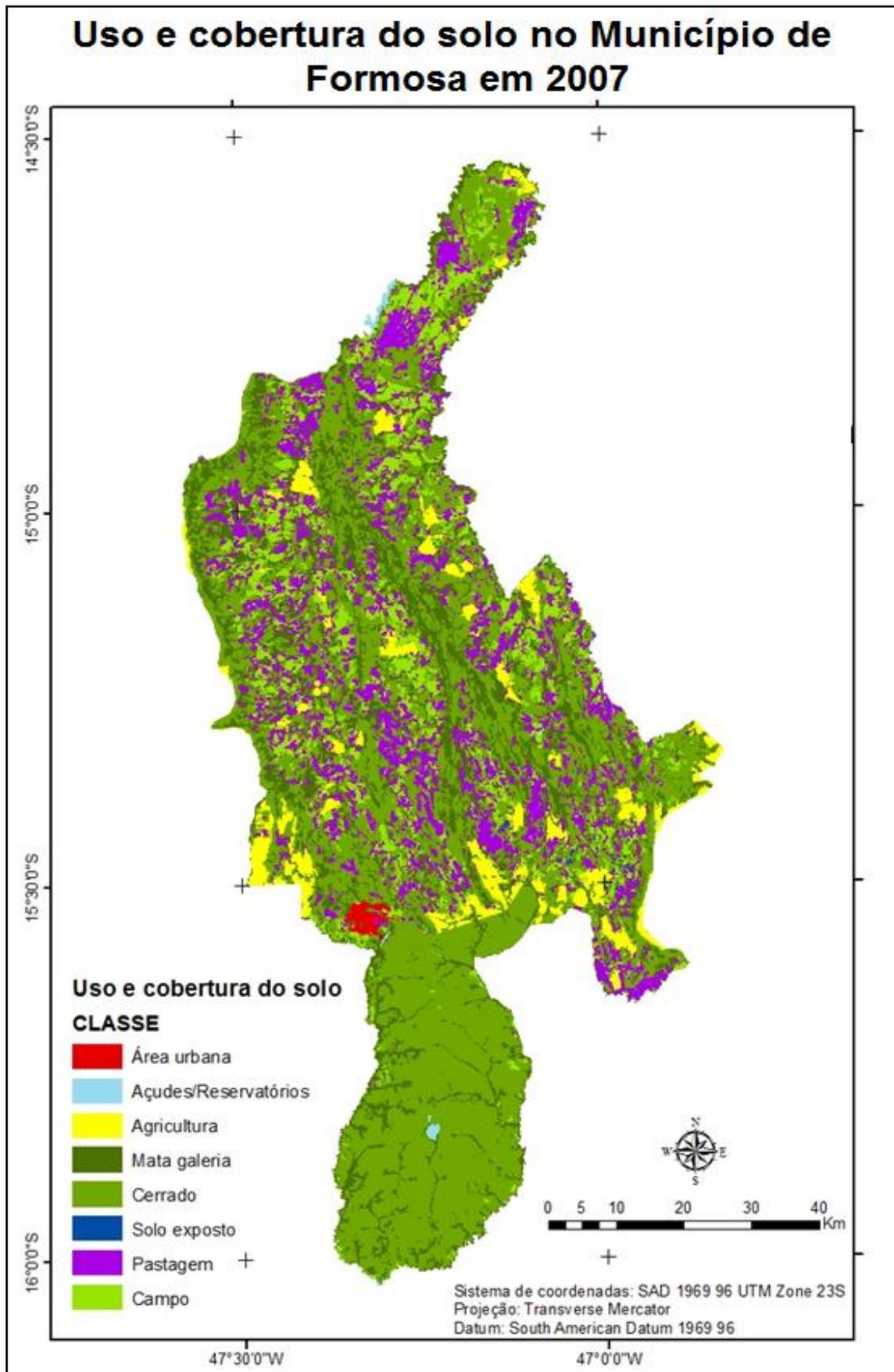


Figura 6.3 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 2007.

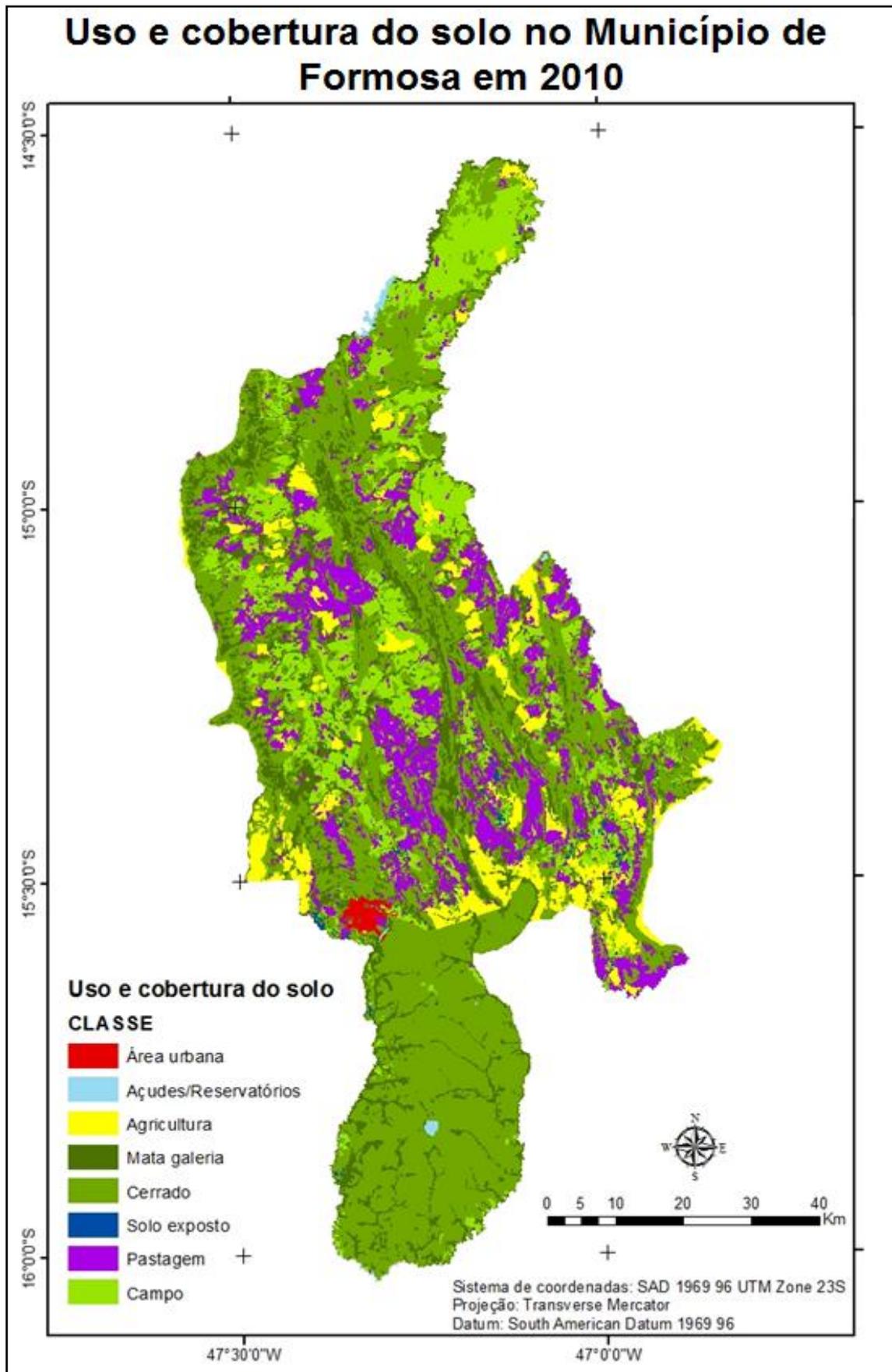


Figura 6.4 – Mapa de uso e cobertura do solo do Município de Formosa para o ano 2010.

Os resultados obtidos no período 1998–2007, mostram um aumento de 203,18% da área da classe campo e de 133,85% da área de solo exposto atingindo 611,96 km² e 6,20 km², respectivamente. O aumento do solo exposto pode-se atribuir ao desmatamento das áreas da vegetação nativa de cerrado causado pelo avanço de áreas agrícolas, que tiveram um crescimento de 86,52 km². Neste período de nove anos também apresentou um crescimento de 3,27 km² na área urbana ocupando 21,29 km². Os anteriores aumentos se produzem em detrimento das áreas de cerrado, que perdeu 418,75 km², e da mata galeria que perdeu 47,64 km². As áreas de pastagem, ao contrário do período anterior, diminuiram possivelmente por uma mudança no uso do solo sendo empregadas na agricultura mecanizada. Os detalhes da evolução do período são mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 1998 – 2007.

Classes	Área 1998 (km²)	%	Área 2007 (km²)	%	Varição (%)
Área urbana	18,02	0,31	21,29	0,37	18,17
Açudes/Reservatórios	6,17	0,11	15,24	0,26	147,12
Agricultura	213,43	3,68	299,95	5,17	40,54
Mata galeria	1095,71	18,87	1048,07	18,05	-4,35
Cerrado	3324,10	57,26	2905,35	50,04	-12,60
Solo exposto	2,65	0,05	6,20	0,11	133,85
Pastagem	943,65	16,25	897,50	15,46	-4,89
Campo	201,85	3,48	611,96	10,54	203,18
Total	5.805,56	100	5.805,56	100	

De acordo com a Tabela 6.3, no período 2007–2010 a classe temática que apresentou maior variação foi a de solo exposto com 292,10%, o que significou um incremento de 18,10 km², devido à remoção de espécies vegetais (herbáceo arbustivas) típicas da classe campo, ao manejo inadequado de áreas de pastagem como o pisoteio excessivo de animais e a presença de queimadas em zonas agrícolas. As classes que mais incrementaram sua área neste período foram o campo, atingindo os 953,60 km², e a agricultura que aumentou para 108,80 km². Observa-se também um relativo aumento da área urbana (16,39%), que ocorre devido ao incremento da população urbana que para o ano de 2010 aporta 91,96% da população total do Município (IBGE, 2010). Igualmente, que nos dois períodos anteriores, o cerrado e a mata de galeria são as classes que mais perderam área para as atividades antrópicas.

Tabela 6.3 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 2007 – 2010.

Classes	Área 2007 (km ²)	%	Área 2010 (km ²)	%	Variação (%)
Área urbana	21,29	0,37	24,78	0,43	16,39
Açudes/Reservatórios	15,24	0,26	17,51	0,30	14,89
Agricultura	299,95	5,17	408,75	7,04	36,27
Mata galeria	1048,07	18,05	903,68	15,57	-13,78
Cerrado	2905,35	50,04	2692,12	46,37	-7,34
Solo exposto	6,20	0,11	24,30	0,42	292,10
Pastagem	897,50	15,46	780,80	13,45	-13,00
Campo	611,96	10,54	953,60	16,43	55,83
Total	5.805,56	100	5.805,55	100	

Observando-se o período completo 1988–2010, verifica-se que a classe que mais aumentou foi a do solo exposto passando de 2,02 km² a 24,30 km², embora seu aporte à área total do Município seja muito pequeno (0,42%). Este elevado aumento também se apresenta na classe campo, já que em 1988 estava na quarta posição com 115,72 km² e em 2010 passou à segunda ocupando 953,60 km² o que representa 16,43% da área municipal. A evolução das classes e a ocupação do solo pode ser observada na Figura 6.5.

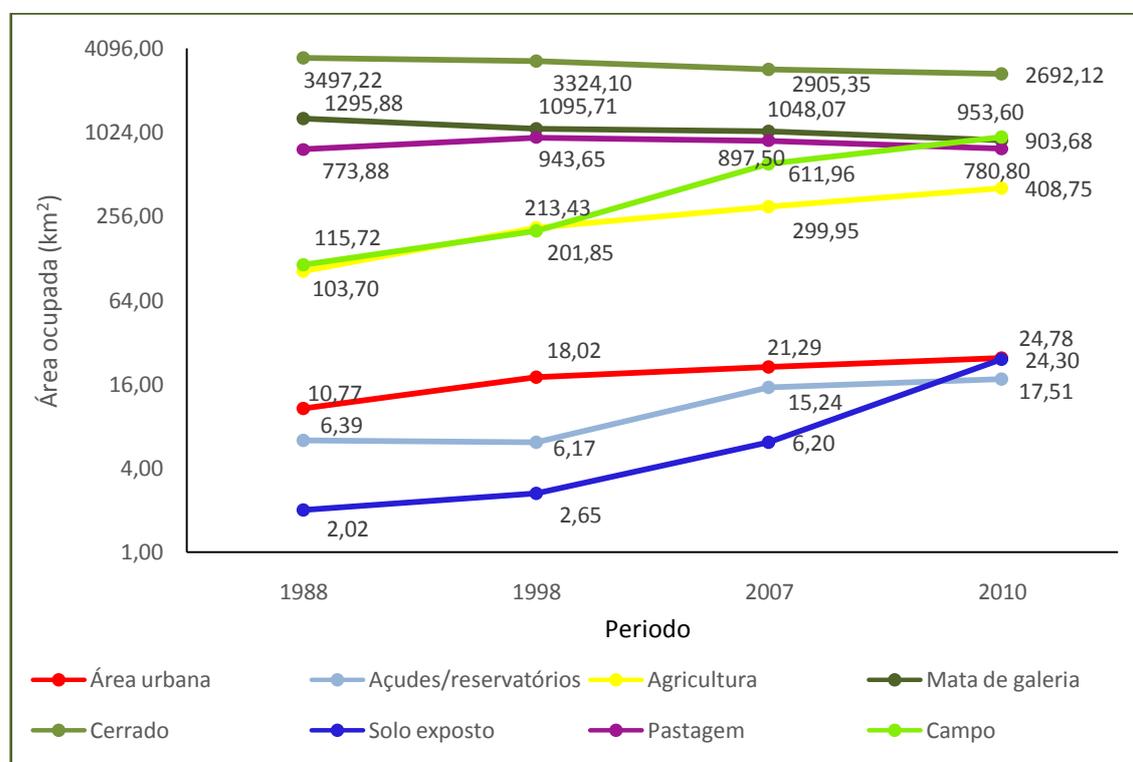


Figura 6.5 – Evolução do uso e cobertura do solo no Município de Formosa.

Para o ano de 1988, o cerrado e a mata de galeria eram as classes mais representativas do Município com 60,24% e 22,32% do território, ocupando a primeira e segunda posição, como pode ser observado na Tabela 6.4, onde é mostrada a variação do período, em que essas classes sofreram uma importante diminuição em suas áreas. O cerrado perdeu 805,10 km² e a mata de galeria 392,20 km², ocupando em 2010, os percentuais de 46,37% e 15,57% do território municipal. O cerrado, apesar de esta diminuição continua na primeira posição de cobertura do solo devido à área de quase metade do Município pertencer ao Exército Brasileiro e não ter sofrido desmatamentos significativos, mas a classe de mata galeria caiu para a terceira posição em área ocupada de cobertura do solo, depois do campo.

Tabela 6.4 – Evolução do uso e cobertura do solo por classes temáticas para o período 1988 – 2010.

Classes	Área 1988 (km ²)	%	Área 2010 (km ²)	%	Varição (%)
Área urbana	10,77	0,19	24,78	0,43	130,11
Açudes/Reservatórios	6,39	0,11	17,51	0,30	174,12
Agricultura	103,70	1,79	408,75	7,04	294,16
Mata galeria	1295,88	22,32	903,68	15,57	-30,27
Cerrado	3497,22	60,24	2692,12	46,37	-23,02
Solo exposto	2,02	0,03	24,30	0,42	1102,82
Pastagem	773,88	13,33	780,80	13,45	0,89
Campo	115,72	1,99	953,60	16,43	724,03
Total	5.805,58	100,00	5.805,55	100,00	

No que se refere às áreas de agricultura observa-se um incremento de 294,16% (305,05 km²), passando a ocupar 7,04% da área do Município. A pastagem apresentou um comportamento diferente das outras classes, primeiro sofreu um aumento de 21,94% em 10 anos atingindo 943,65 km², para logo diminuir em 2007 até os 897,50 km² e em 2010 até 780,80km².

De acordo com os dados do IBGE (2010) a população urbana do Município de Formosa está em contínuo crescimento, fato que implica o aumento da infraestrutura necessária no que tange ao saneamento básico. Constatou-se que em 22 anos a área urbana passou de 10,77 km² a 24,78 km², com 92.036 habitantes no ano de 2010, em um crescimento de 130,11%.

Quando analisados os padrões de crescimento urbano em Formosa para o ano de 1988, se observa que ele aconteceu, como mostra a Figura 6.6, no interior do perímetro urbano, com três consideráveis áreas ao sul, perto da lagoa Feia, como exceção, sendo uma dessas áreas de controle do Exército Brasileiro. Também é observado que ao norte e ao oeste o crescimento urbano está perto dos limites e que os melhores locais para seu desenvolvimento ficam ao leste do Município.

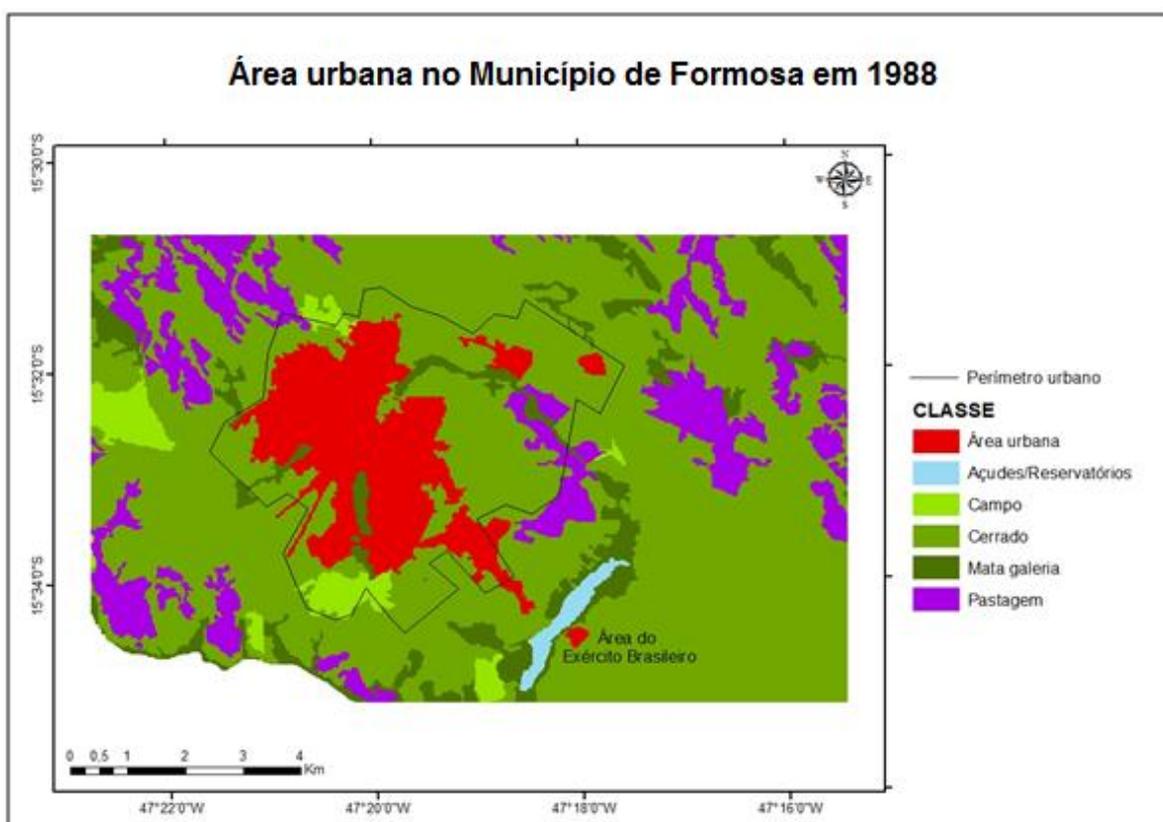


Figura 6.6 – Mapa da área urbana do Município de Formosa para o ano 1988.

Já para o ano de 1998, a área de 25,29 km² destinada para o desenvolvimento urbano estava praticamente ocupada e se apresentavam mais áreas urbanas por fora do perímetro estabelecido pela Lei do Perímetro Urbano, Lei n.º 72-S de 1979, e menores distâncias entre o perímetro e mancha urbana sendo necessária uma ampliação do perímetro para acomodar novos desenvolvimentos, fatos que podem ser observados na Figura 6.7. Observa-se que o crescimento tem acontecido nos arredores do núcleo central da cidade, onde é mais denso, estendendo-se principalmente para o sul com direção à lagoa Feia e para o leste do Município em uma ocupação rarefeita e polinucleada, resultando na formação de diversas áreas vazias.

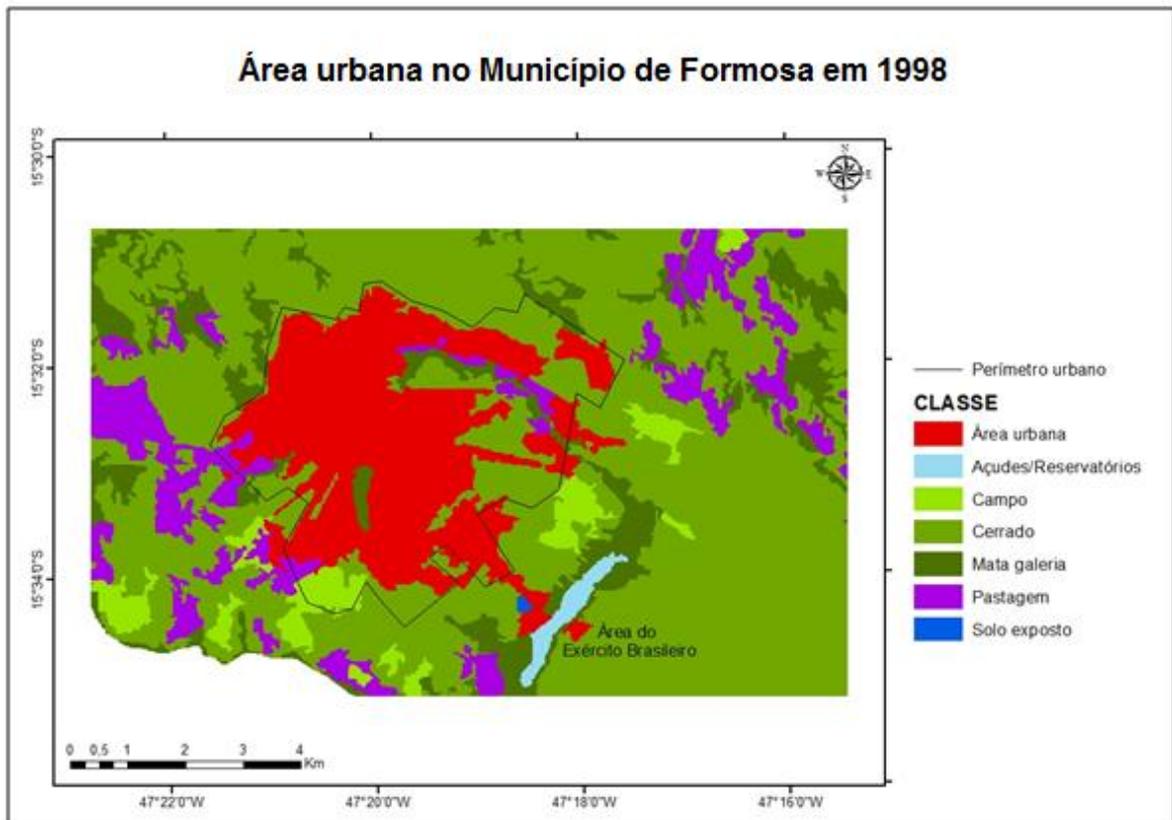


Figura 6.7 – Mapa da área urbana do Município de Formosa para o ano 1998.

No ano de 2003 de acordo com o Plano Diretor do Município (INTERPLAN, 2003), é estabelecido um novo perímetro urbano em função das tendências de crescimento e características do território. O novo perímetro urbano de 38.156,39m inclui uma área de 53,86 km². Além de estabelecer o novo perímetro urbano, o Plano Diretor também propõe um zoneamento da área urbana subdividindo-a por usos segundo as características da época e de sua potencialidade. A seguir é apresentada uma descrição das zonas de uso que foram definidas no artigo 5 da seção I do capítulo II da Lei n.º 250/04-SMG que dispõe sobre uso e ocupação do solo de Formosa e dá outras providências. A Figura 6.8 mostra a zona urbana e alguns dos usos em que foi dividida.

- ZPR1 – Zona predominantemente residencial de alta densidade populacional
Destinada aos usos residenciais unifamiliares (casas) e multifamiliares (edifícios de apartamentos), comércio e serviços locais, comércio varejista e serviço de âmbito geral.
- ZPR2 – Zona predominantemente residencial de média densidade populacional
Zona destinada aos mesmos usos da ZPR1.

- ZPR3– Zona predominantemente residencial de baixa densidade populacional
Zona destinada aos mesmos usos da ZPR1.
- ZCS – Zona de comércio e serviços
Destina a uso de comércio e serviços de caráter central.
- ZEIS1 – Zona especial de interesse social
Destinada a regularizar os problemas urbanos e fundiários constatados.
- ZEIS2 – Zona especial de interesse social
Zona destinada especificamente à reserva de áreas para que o poder público possa atender a demanda habitacional.
- ZPRU – Zona predominantemente residencial e universitária
Destinada a implantação de novos “campi” universitários
- ZI – Zona predominantemente industrial
Esta zona se destina a indústrias em geral, agroindústrias e oficinas não poluidoras.
- APA – Área de proteção ambiental
Destinada a preservação de áreas de interesse ambiental e turístico.
- ZEU – Zona de expansão urbana
Destinada a usos predominantemente residenciais de baixa densidade.
- PU – Parque urbano
Zona destinada à recreação, esporte, lazer e cultura da população, com preservação de locais de interesse ambiental e turístico.
- ZSE - Aeroporto

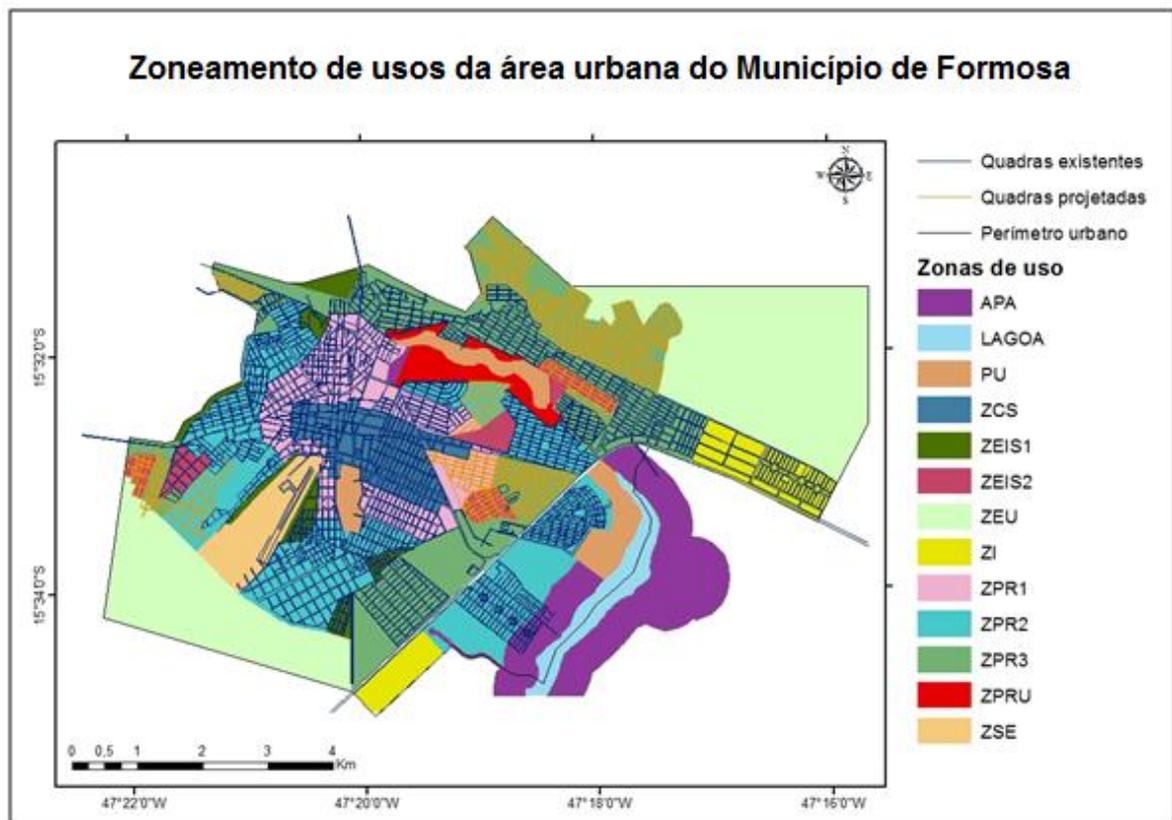


Figura 6.8 – Uso e ocupação propostas para o Município de Formosa (INTERPLAN, 2003).

O crescimento urbano do Município de Formosa para o ano de 2007 é mostrado na Figura 6.9. É possível observar que o crescimento ocorreu dentro do perímetro estabelecido no Plano Diretor Municipal no ano de 2003, nos arredores do núcleo central urbano, estendendo-se em direção à lagoa Feia, ao oeste nas zonas próximas ao aeroporto e ao leste. A Figura 6.9 também mostra uma considerável área para o crescimento urbano no interior da mancha urbana e na periferia. Os espaços livres encontrados na classificação temática apresentam semelhanças com as zonas destinadas pelo Plano Diretor em 2003, que teve como objetivo regularizar os problemas urbanos e fundiários constatados (ZEIS1) e com as zonas reservadas para atender a demanda habitacional (ZEIS2), sendo ocupadas para o ano de 2007 em um percentual de 60,78% e 32,53%, respectivamente.

De acordo com as zonas de usos propostas no Plano Diretor do Município para o ano de 2007, a mancha urbana está distribuída na seguinte forma: 20,98% em zonas predominantemente urbanas de alta densidade; 25,88% em zonas urbanas de média densidade; 27,97% em zonas urbanas de baixa densidade e, 11,48% na zona de comércio e serviços; as zonas especiais de interesse social 1 e 2 para este ano aportam 3,45% e 2,38% da área total. Uma pequena área urbana com percentual de 1,94% está situada na APA da

lagoa Feia a qual corresponderia a processos de loteamento que invadem a zona de proteção e a diversos quiosques e restaurantes que funcionam nas suas margens. Os demais usos em que está dividida a área urbana podem ser observados na Figura 6.10.

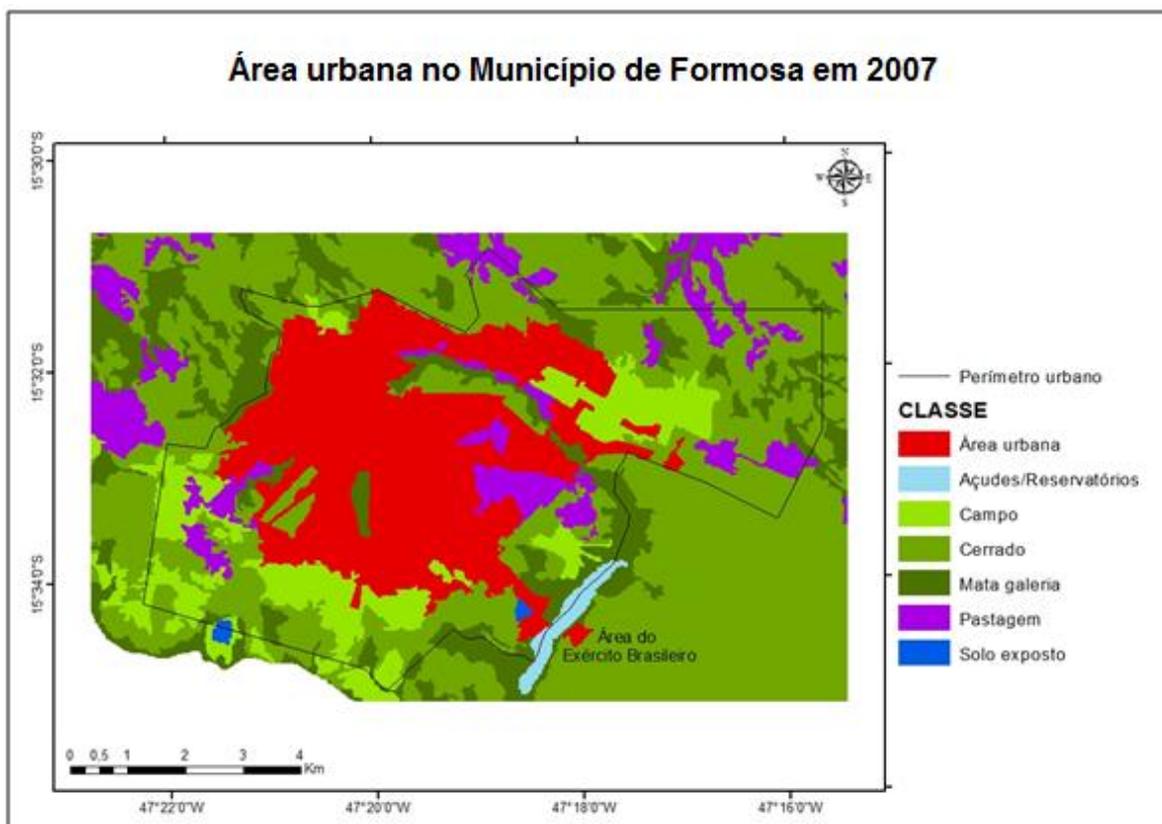


Figura 6.9 – Mapa da área urbana do Município de Formosa para o ano 2007.

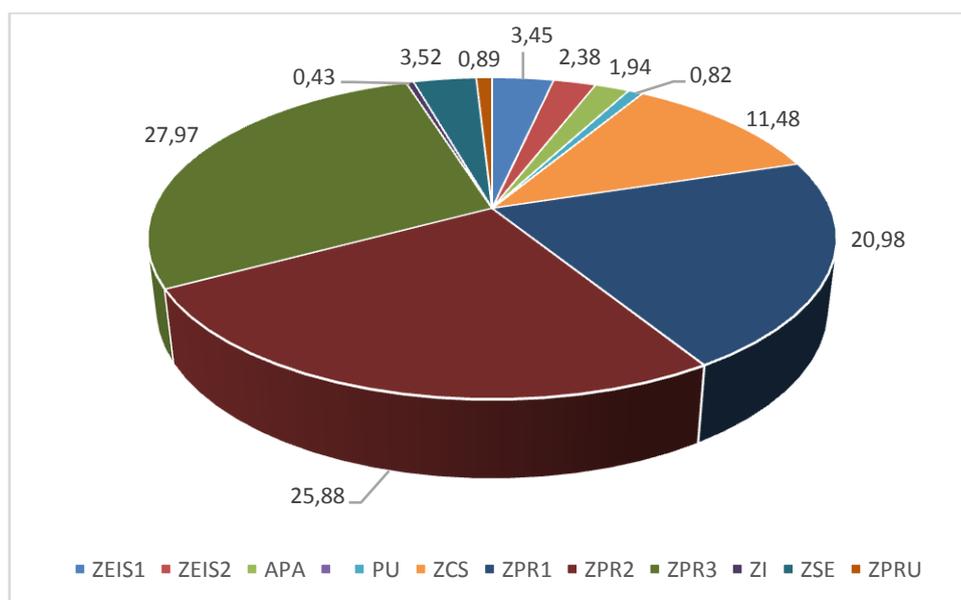


Figura 6.10 – Distribuição da área urbana por zonas de uso para o ano de 2007 segundo o Plano Diretor Municipal.

O mapa de crescimento urbano para o ano de 2010 na Figura 6.11, mostra duas áreas fora do limite estabelecido as quais correspondem à área do Exército Brasileiro e a um complexo industrial. O processo de urbanização segue a tendência encontrada nos anteriores anos dirigindo-se ao sul, ao leste e oeste, e ocupando os espaços livres encontrados nos anos anteriores. Alguns de estes espaços livres coincidem com as ZEIS1 que para este ano está ocupada em um percentual de 64,98% e com ZEIS2 ocupada em um percentual de 58,84%.

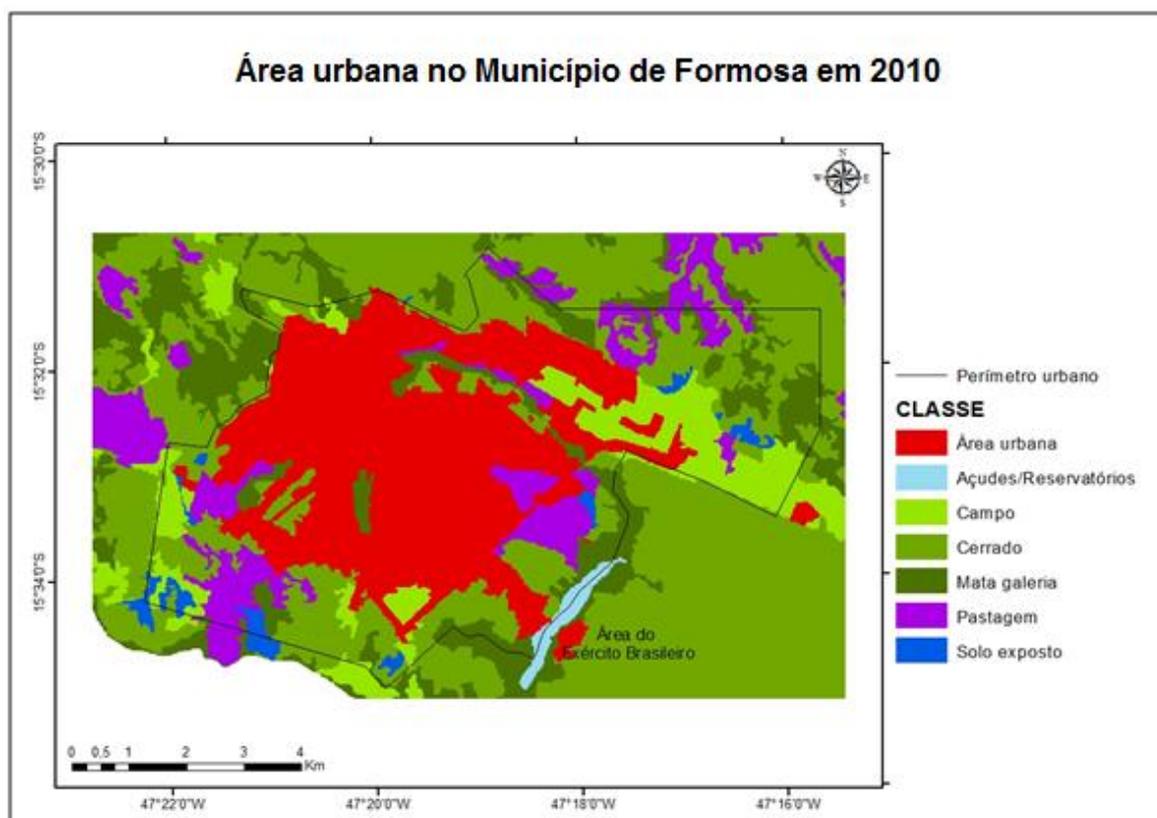


Figura 6.11 – Mapa da área urbana do Município de Formosa para o ano 2010.

Para o ano de 2010, o percentual de 24,78 km² de área urbana do Município está distribuído em sua maioria nas zonas residenciais de alta, média e baixa densidade com percentuais de 18,63%, 25,15% e 28,41%, respectivamente. Também na zona de comércio em um percentual de 9,89% e nas zonas de interesse social projetadas para regularizar os problemas urbanos e atender a demanda habitacional em um percentual de 6,87%. Na Figura 6.12 são apresentadas as zonas de uso em que está distribuída a área urbana para o ano de 2010.

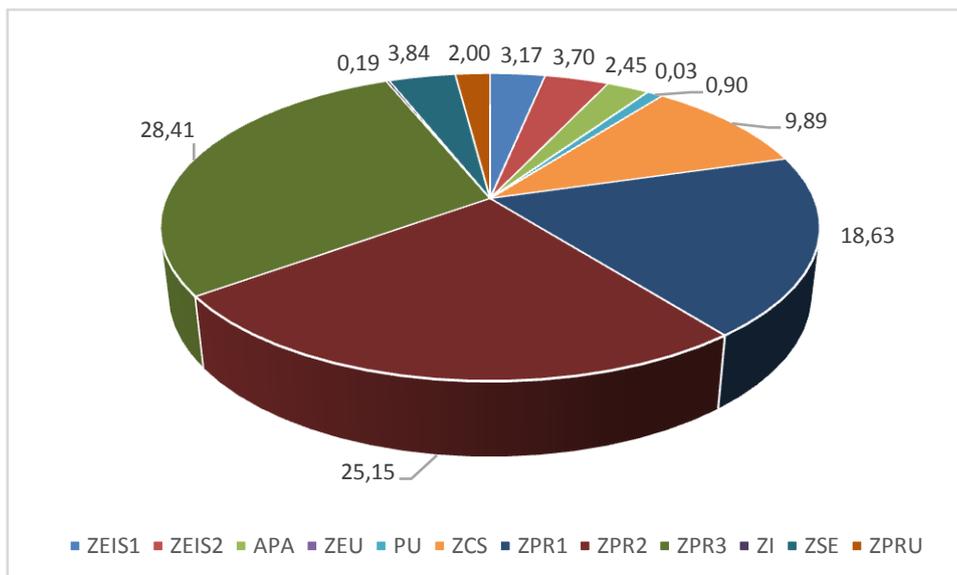


Figura 6.12 – Distribuição da área urbana por zonas de uso para o ano de 2010 segundo o Plano Diretor Municipal.

As mudanças observadas no período de estudo indicam uma importante transformação na conformação da paisagem e que pode influenciar as atividades econômicas do Município. O desmatamento contínuo, o incremento da agricultura mecanizada e das áreas de solo exposto, somado ao crescimento da população urbana, são os responsáveis pelas alterações ocorridas ao longo de 22 anos. Para poder avaliar o efeito das mudanças acontecidas no território, decorrentes do processo de ocupação, se decidiu calcular a vulnerabilidade ambiental, entendida como a maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado pelo uso antrópico (Souza, 2013).

6.2 VULNERABILIDADE AMBIENTAL

Como mencionado no capítulo anterior, a determinação da vulnerabilidade ambiental seguiu a metodologia proposta por Crepani *et al.* (1996), Crepani *et al.* (2001), Tagliani (2003) e Grigio (2003), fazendo uso dos fatores de geologia, pedologia, vegetação, uso e cobertura do solo e declividade do terreno, que com os valores da ponderação dos graus de vulnerabilidade para cada fator, foi realizada a sua reclassificação, o que permitiu a produção dos respectivos mapas temáticos de vulnerabilidade ambiental.

6.2.1 Ponderação dos valores de vulnerabilidade ambiental

A seguir, são apresentados por meio de tabelas e mapas, os fatores já ponderados.

6.2.1.1 Pedologia

O resultado da ponderação dos valores de vulnerabilidade para fator de pedologia pode ser visto na Tabela 6.5, onde o percentual de 42,84% (2.468,69 km²) da área de estudo corresponde à vulnerabilidade muito baixa, o percentual de 1,22% (70,24 km²) à vulnerabilidade moderada, o percentual de 25,74% (1.483,13 km²) à vulnerabilidade alta e, o percentual de 30,21% (1.740,79 km²) à vulnerabilidade muito alta. Sendo que a vulnerabilidade baixa não está presente nesta classificação. A Figura 6.13, mostra como estão distribuídas espacialmente os diferentes graus de vulnerabilidade segundo os tipos de solo da área de estudo.

Tabela 6.5 – Valores de vulnerabilidade para a pedologia.

Unidades pedológicas	Valor da vulnerabilidade
Argissolos	20
Cambissolos	25
Gleissolos	30
Latosolos	10
Neossolos	30
Planossolos	20
Plintossolos	30

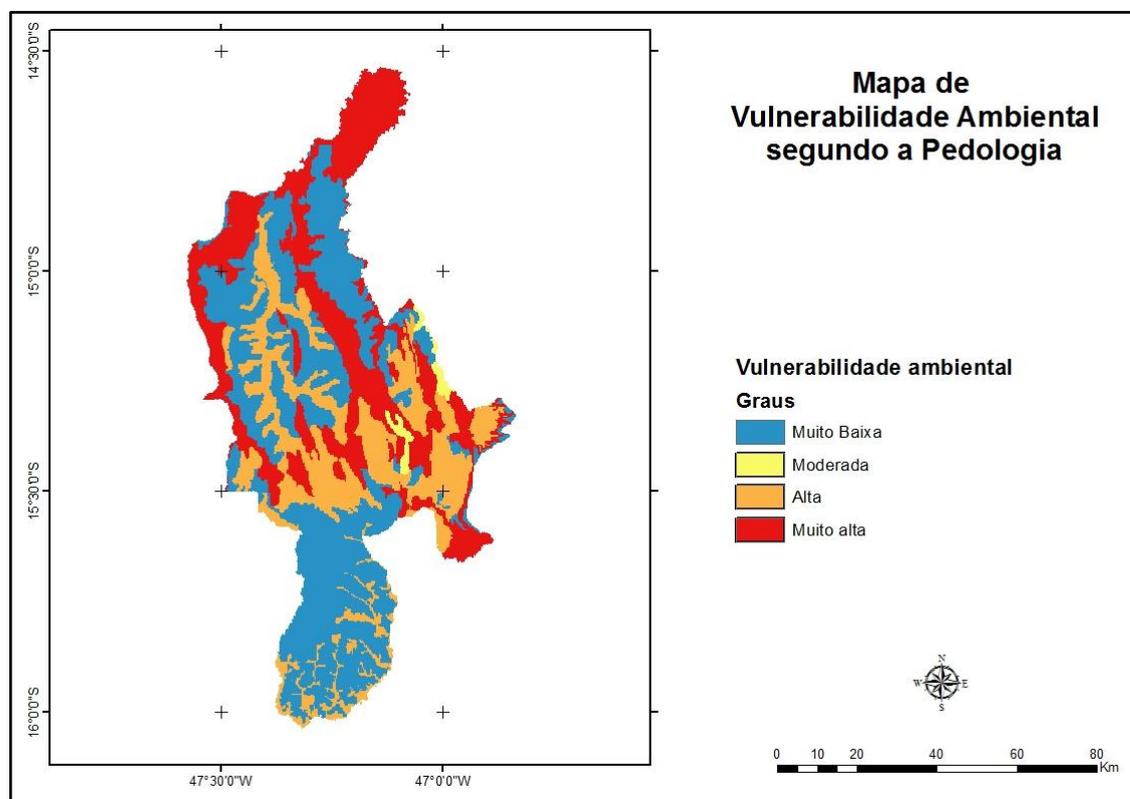


Figura 6.13 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo a pedologia.

6.2.1.2 Geologia

A geologia da área de estudo foi reclassificada de acordo com uma análise litológica das unidades geológicas. A Tabela 6.6, apresenta os pesos atribuídos à reclassificação para este tema. Como resultado da ponderação, 16,56 km² com vulnerabilidade baixa, 600,80 km² com vulnerabilidade moderada, 434,87 km² com vulnerabilidade alta e 4.723,59 km² com vulnerabilidade muito alta, sendo que a vulnerabilidade baixa não está presente nesta classificação. Geologicamente, o percentual de 89,31% da área total de estudo apresenta uma elevada vulnerabilidade ambiental. A distribuição espacial das classes de vulnerabilidade ambiental segundo a geologia é mostrada na Figura 6.14.

Tabela 6.6 – Valores de vulnerabilidade para a geologia.

Unidades geológicas	Valor da vulnerabilidade
Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	30
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	30
Coberturas detríticas indiferenciadas	30
Conglomerática Rítmica Quartzítica inferior	24
Depósitos aluvionares	30
Lagoa do Jacaré	26
Paraopeba	27
Quartzito	10
Rítmica Pelito-carbonatada	21
Rítmica Quartzítica Intermediária	22
Serra da Saudade	27
Serra de Santa Helena	27
Sete Lagoas	27
Síltico-Ardosiana	22
Três Marias	26
Massas de água	10

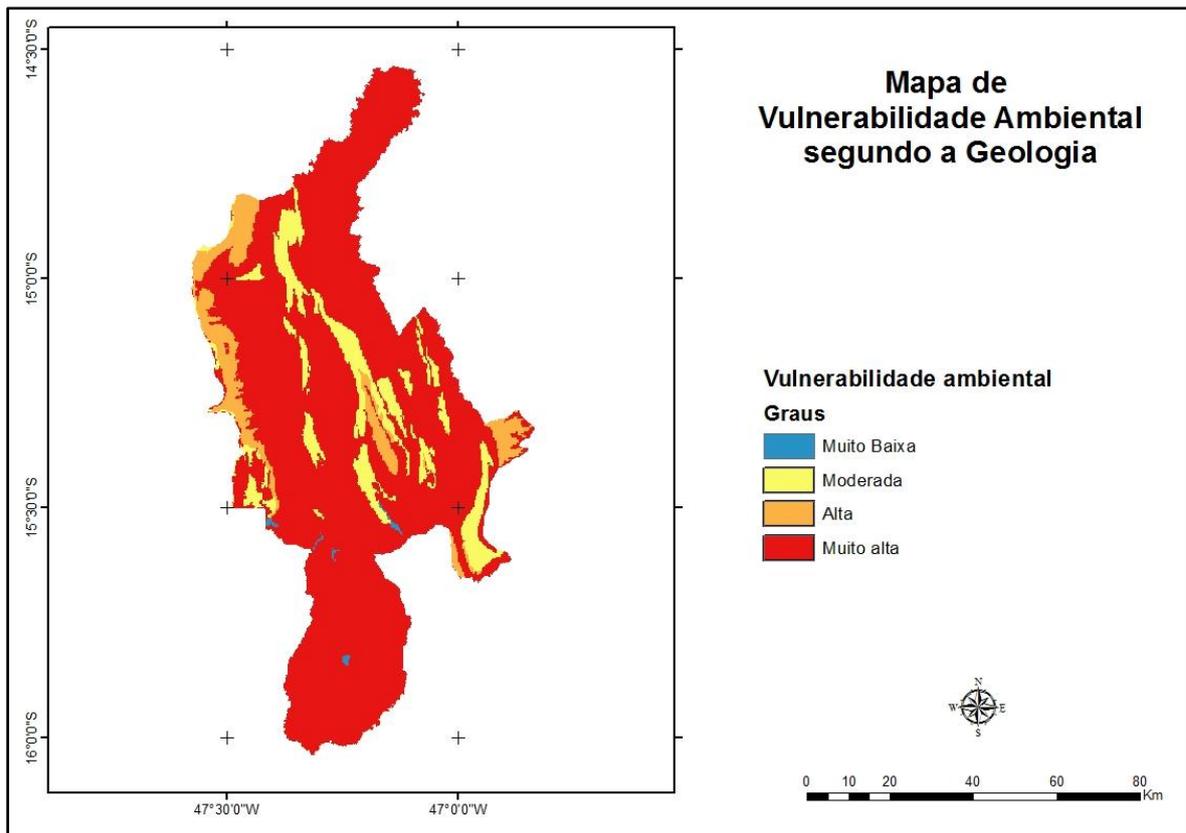


Figura 6.14 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo a geologia.

6.2.1.3 Vegetação

O parâmetro que determina as classes de vulnerabilidade para a vegetação é a densidade de cobertura vegetal, já que é o fator de proteção contra os processos morfogenéticos. Na Tabela 6.7 são mostrados os valores dos pesos atribuídos à cada classe de vegetação/cobertura vegetal em relação a sua vulnerabilidade ambiental.

Tabela 6.7 – Valores de vulnerabilidade do tema vegetação.

Unidades de cobertura vegetal	Valor da vulnerabilidade
Agricultura	25
Pastagem	22
Savana arborizada com floresta de galeria	21
Savana arborizada sem floresta de galeria	21
Savana parque com floresta de galeria	25
Savana parque sem floresta de galeria	25
Floresta estacional semidecidual aluvial	16
Área urbana	30
Massas de água	10

Segundo a ponderação realizada, os valores de vulnerabilidade estão distribuídos nas 5 classes da seguinte forma: 1,31 km² correspondem a uma vulnerabilidade muito baixa; 44,61 km² a vulnerabilidade baixa; 4.810,93 km² ao grau moderada; 885,10 km² a vulnerabilidade alta e 33,22 km² ao grau muito alta. De acordo com o anterior, os valores correspondentes à vulnerabilidade ambiental moderada e alta ocupam a maioria da área do Município com um percentual de 98,63% do total, os valores de vulnerabilidade ambiental muito baixa e muito alta correspondem às massas de água e a zona urbana respectivamente, como pode ser observado na Figura 6.15 que mostra a distribuição espacial da vulnerabilidade para este fator.

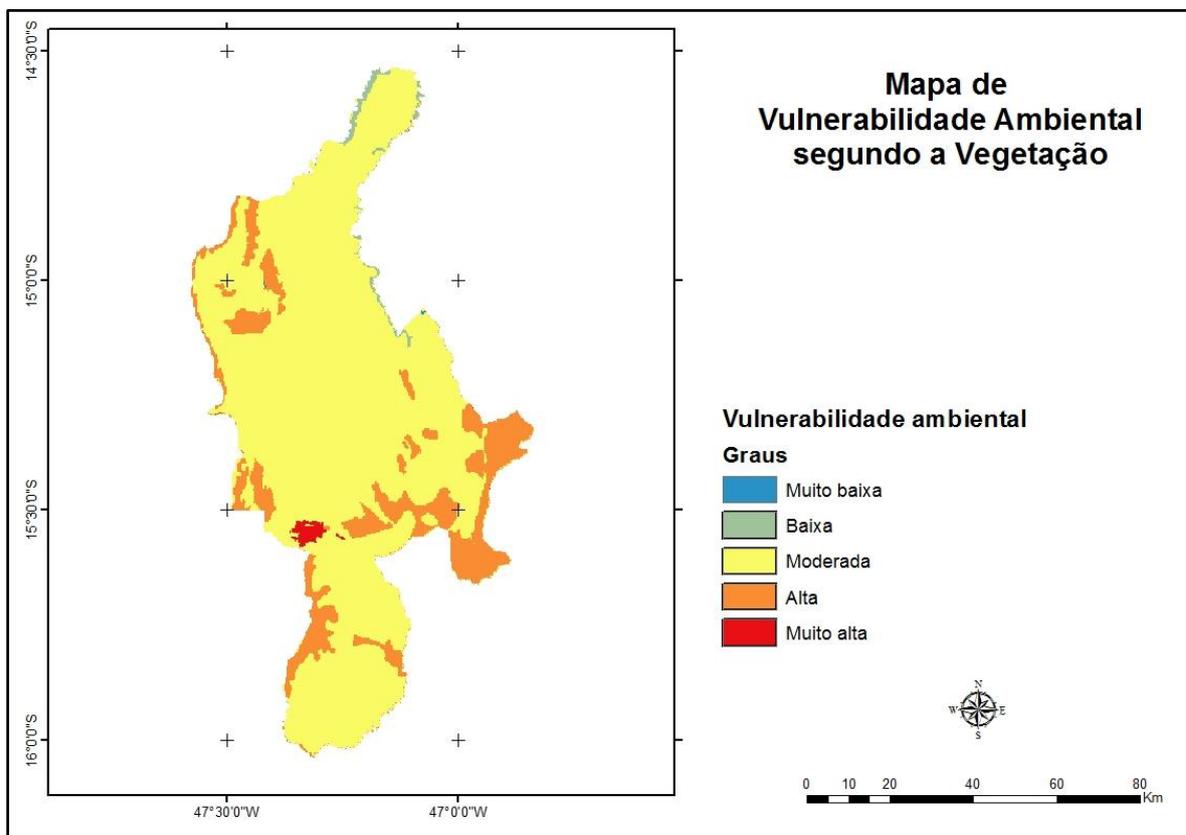


Figura 6.15 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo a vegetação.

6.2.1.4 Uso e cobertura do solo

Com base no critério da interferência antrópica da área de estudo, ou seja, o grau de impacto de determinado uso e cobertura do solo ao ambiente foram ponderados os valores de vulnerabilidade ambiental para o tema, os quais são descritos na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Valores de vulnerabilidade ambiental para as classes de uso e cobertura do solo.

Unidades de uso do solo	Valor da vulnerabilidade
Área urbana	30
Açudes/Reservatórios	10
Agricultura	25
Mata galeria	15
Cerrado	14
Pastagem	22
Solo exposto	30
Campo	19

De acordo com a reclassificação feita, o percentual de 92,05% da área de estudo, o que equivale a 2.711,5 km², apresentou vulnerabilidade ambiental muito baixa, 902 km² da área de estudo apresentou vulnerabilidade ambiental baixa; e, 1.730 km² da área de estudo apresentaram vulnerabilidade ambiental moderada, isto é, apresenta proteção do solo entre boa e mediana graças à cobertura vegetal. Somente o percentual de 7,95% da área de estudo apresentou vulnerabilidade ambiental alta e muito alta, ocupando uma área de 409,5 km² e 52,6 km² respectivamente. O mapa da distribuição da vulnerabilidade ambiental de acordo com o uso e cobertura do solo pode ser visto na Figura 6.16.

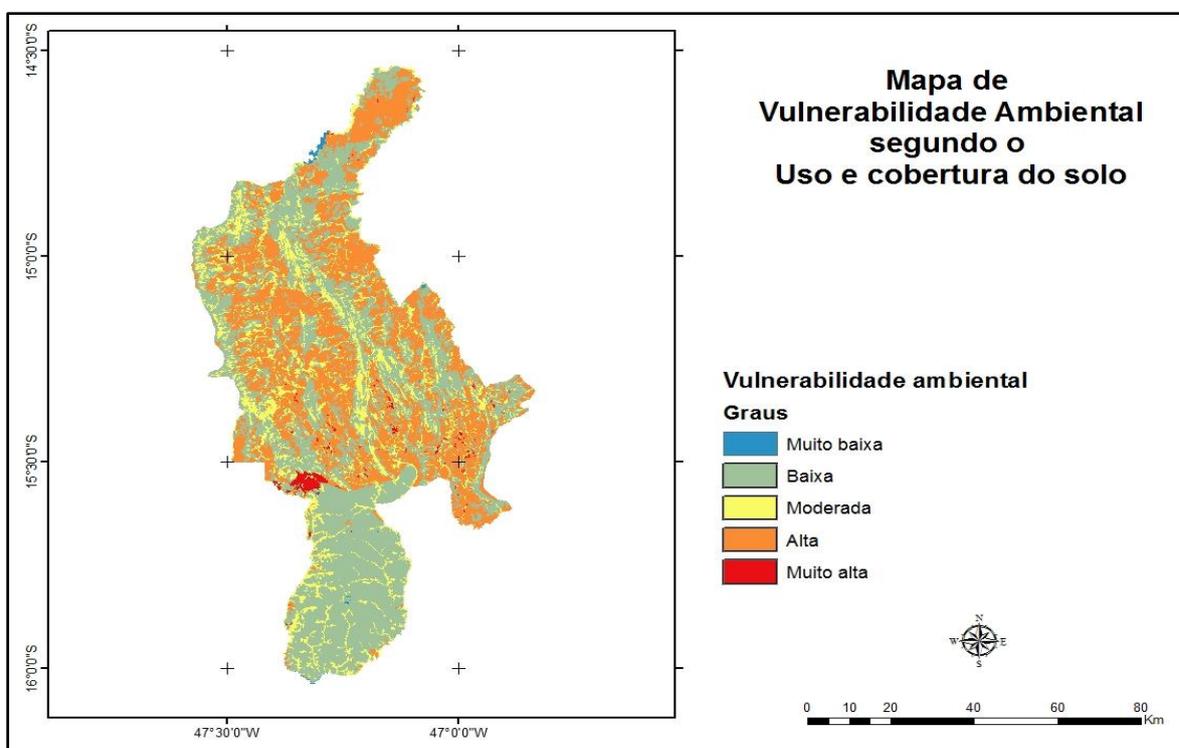


Figura 6.16 – Mapa de vulnerabilidade ambiental segundo o uso e cobertura do solo.

6.2.1.5 Declividade

A declividade da área de estudo foi obtida fazendo uso do MDET, com valores expressos em graus, sendo a mesma dividida em cinco classes, onde os menores valores correspondem às áreas mais planas (cor verde escuro), e os maiores valores as áreas mais íngremes (cor vermelha). Em seguida, o mapa de declividade foi reclassificado de acordo com a Tabela 5.8 em seus respectivos graus de vulnerabilidade ambiental.

A Figura 6.17 apresenta o mapa de declividade e o mapa de vulnerabilidade de acordo com este fator. Da área total do Município, o percentual de 53,66% corresponde à vulnerabilidade ambiental muito baixa; o percentual de 27,45% à vulnerabilidade ambiental baixa; o percentual de 17,79% corresponde à vulnerabilidade ambiental moderada; e, o percentual de 1,09% corresponde à vulnerabilidade ambiental alta. Praticamente, a vulnerabilidade ambiental muito alta não se apresenta nesse fator de declividade do terreno já que tem um percentual de apenas 0,004% na área de estudo.

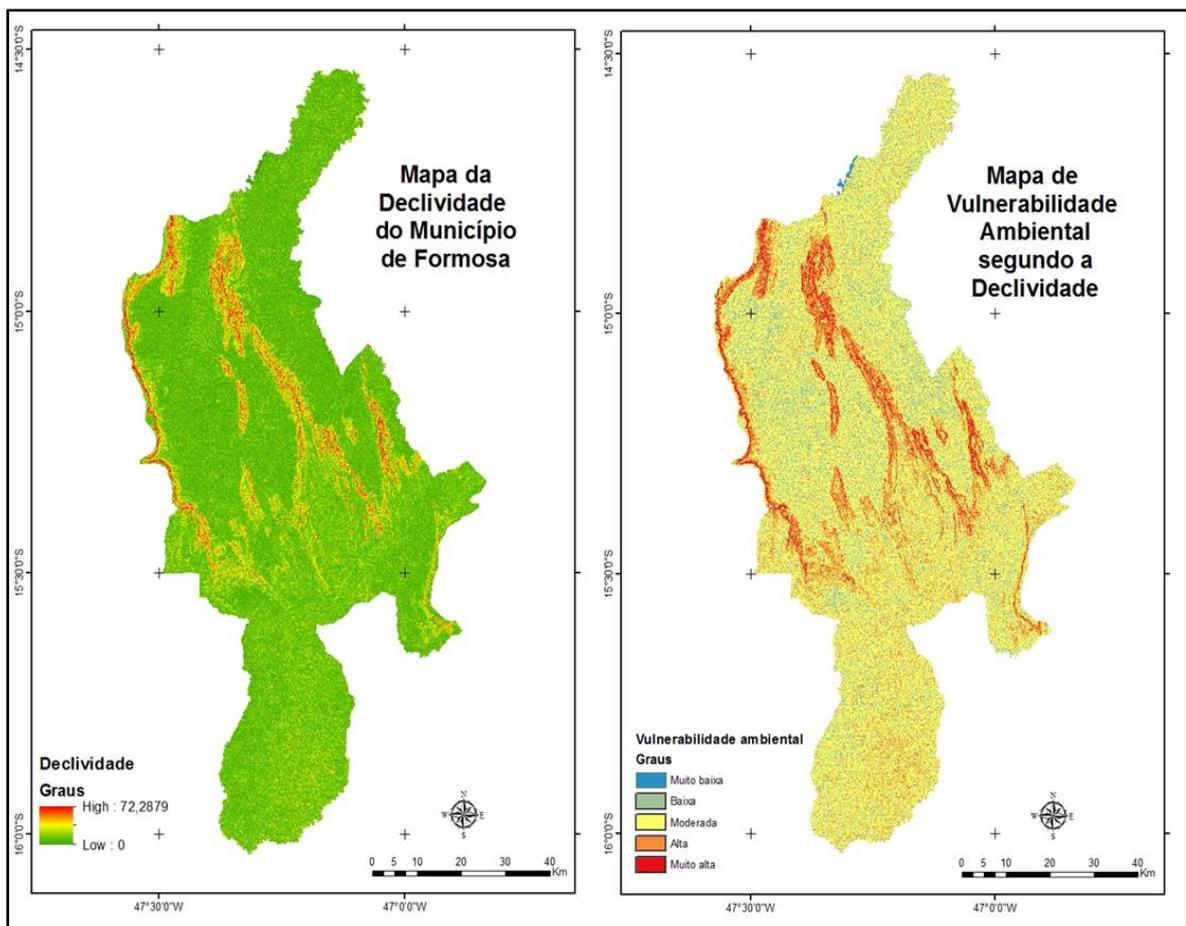


Figura 6.17 – Mapa da declividade e sua reclassificação.

6.2.2 Determinação da influência dos fatores

Na construção da matriz de comparação pareada, apresentada na Tabela 6.9, os valores para definir o grau de importância dos fatores foram escolhidos a partir de levantamento das referências bibliográficas. O fator uso e cobertura do solo possui maior importância por estar associado ao poder modificador das ações humanas, e é um reflexo da pressão dos impactos antrópicos sobre as unidades naturais de paisagem, o que refletiu nos resultados obtidos com a classificação temática das imagens de sensores remotos, os quais mostram uma importante transformação na paisagem do Município entre os anos de 1988 e 2010.

Tabela 6.9 – Matriz de comparação pareada da AHP.

Fatores	Uso do solo	Vegetação	Declividade	Pedologia	Geologia
Uso do solo	1	5	3	5	5
Vegetação	1/5	1	1/3	1	1
Declividade	1/3	3	1	3	3
Pedologia	1/5	1	1/3	1	1
Geologia	1/5	1	1/3	1	1
Σ	1,93	11,00	5,00	11,00	11,00

O fator declividade tem maior importância devido a sua influência no modelamento das formas de relevo do que os fatores geologia, pedologia e vegetação, que para efeitos do estudo estas possuem a mesma importância. Além do fato da declividade possuir influência direta no processo de perda de solo por erosão laminar, pois, quanto maior a declividade do terreno, maior a intensidade do escoamento e menor o tempo disponível para infiltrar no solo.

A partir dos valores de importância relativa dos fatores e através da matriz normalizada, foram determinados os pesos relativos para cada fator na metodologia da AHP. A matriz normalizada AHP e os pesos são apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Matriz normalizada da AHP.

Fatores	Uso do solo	Vegetação	Declividade	Pedologia	Geologia	Pesos
Uso do solo	0,517	0,455	0,600	0,455	0,455	0,496
Vegetação	0,103	0,091	0,067	0,091	0,091	0,089
Declividade	0,172	0,273	0,200	0,273	0,273	0,238
Pedologia	0,103	0,091	0,067	0,091	0,091	0,089
Geologia	0,103	0,091	0,067	0,091	0,091	0,089

Para obtenção dos pesos para cada fator é preciso verificar se os dados estão logicamente relacionados, para isso, primeiro foi calculado o autovetor (λ_{max}) por meio da Equação (5.2) e logo o Índice de Consistência (IC) pela Equação (5.1), como mostrado a continuação:

$$Aw = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 5 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 3 & 1 & 3 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,496 \\ 0,089 \\ 0,238 \\ 0,089 \\ 0,089 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,539 \\ 0,444 \\ 1,201 \\ 0,444 \\ 0,444 \end{bmatrix}$$

Utilizando a Equação (5.2):

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \frac{[Aw]_i}{w_i}$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{5} \left[\frac{2,539}{0,496} + \frac{0,444}{0,089} + \frac{1,201}{0,089} + \frac{0,444}{0,089} + \frac{0,444}{0,089} \right]$$

$$\lambda_{max} = 5,185$$

Fazendo uso da Equação (5.1):

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)}$$

$$IC = \frac{(5,185 - 5)}{(5 - 1)}$$

$$IC = 0,046$$

Além disso, é preciso verificar se existe consistência no desenvolvimento do método calculando a Razão de Consistência (RC) por meio da Equação (5.3):

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

O valor de IR, para 5 fatores, é obtido da Tabela 5.10 Índice de Consistência Randômico, correspondente ao valor de 1,12. Dessa forma:

$$RC = \frac{0,046}{1,12}$$

$$RC = 0,041$$

Para Saaty (1980), na aplicação da AHP espera-se obter uma razão de consistência menor que 0,10. A razão de consistência (RC) obtida foi de 0,041, assim os pesos utilizados para o modelo são aceitáveis.

A combinação final dos pesos dos diferentes fatores para gerar o mapa de vulnerabilidade ambiental (VA) foi dada pela Equação (5.4):

$$VA = 0,496 * (uso\ do\ solo) + 0,089 * (geologia) + 0,238 * (declividade) + 0,089 * (solo) + 0,089 * (vegetação)$$

O mapa de vulnerabilidade ambiental final obtido é apresentado na Figura 6.18, e a distribuição das classes de vulnerabilidade ambiental em termos de área e porcentagem na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Classes de vulnerabilidade ambiental em termos de área e porcentagem.

Valor	Grau de vulnerabilidade	Área (km²)	% da área total
10 – 13	Muito baixa	1,15	0,02
13 – 17	Baixa	1.438,68	25,06
17 – 22	Moderada	3.486,43	60,72
22 – 26	Alta	797,02	13,88
26 – 30	Muito alta	18,43	0,32
	Total	5.741,71	100,00

A vulnerabilidade ambiental no Município de Formosa está distribuída entre as seguintes classes: as áreas com grau de vulnerabilidade muito baixa correspondem em sua maioria a corpos de água em um percentual de 92,81%, lembrando que eles têm o valor de vulnerabilidade mais baixo (10), e o percentual restante de 7,19%, às unidades de cerrado e de mata de galeria, que tem associadas vegetações de savana arborizada (cerrado típico, cerrado denso) e floresta estacional semidecidual aluvial, com valores também perto da estabilidade. Estas áreas ocupam cinco unidades geológicas, Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, Depósitos aluvionares, Paraopeba, Quartzito e Rítmica Pelito-carbonatada. A classe possui a menor área do Município com 1,15 km² que, em termos de percentual corresponde ao 0,02% da extensão total.

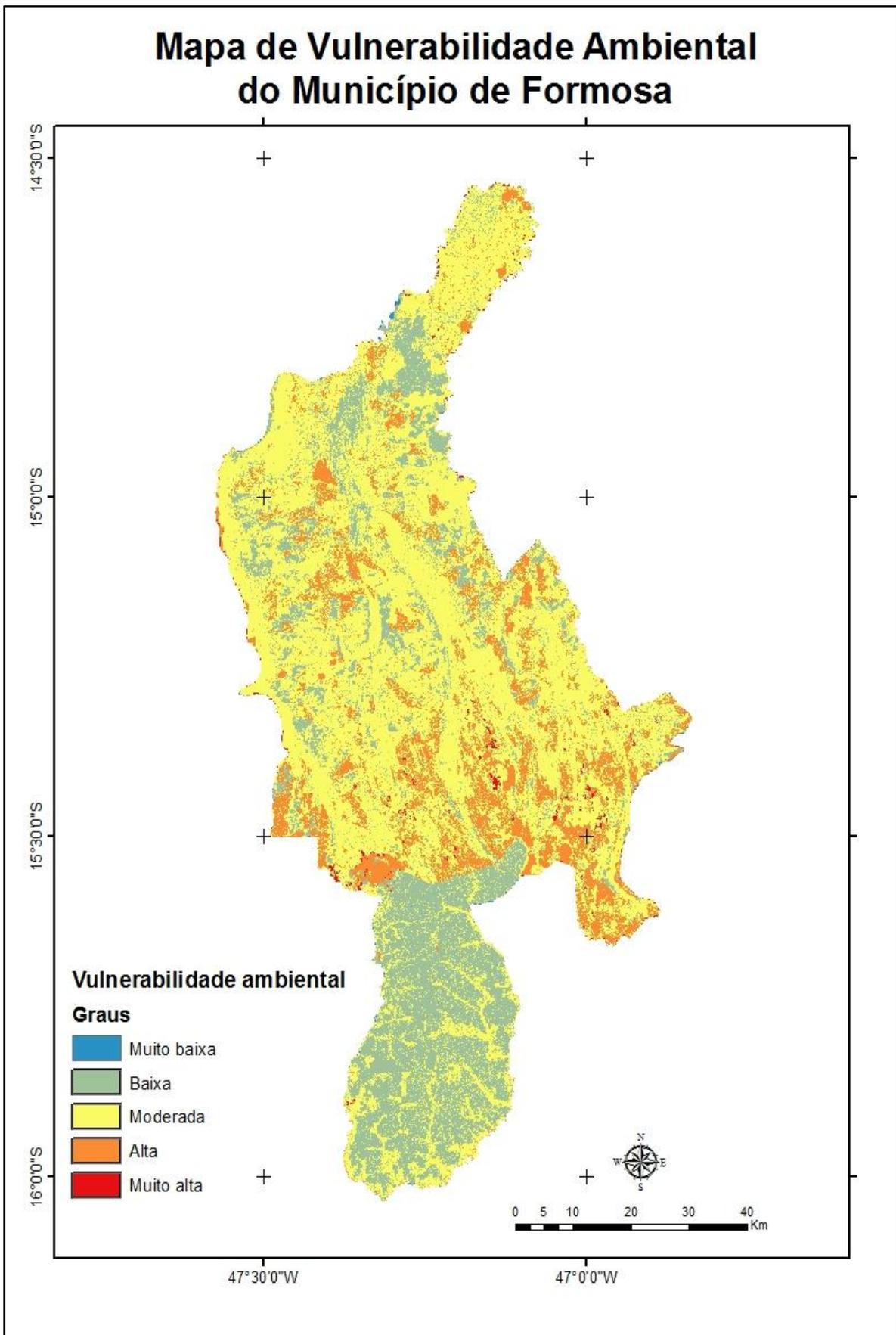


Figura 6.18 – Mapa de vulnerabilidade ambiental do Município de Formosa.

A classe vulnerabilidade ambiental baixa ocupa a quarta parte do território do Município com 1.438,68 km² e inclui grandes áreas de cerrado (93,30%) e pequenas áreas de mata de galeria, corpos de água, campestre e pastagem. Em quase toda sua extensão são observados latossolos (83,73%) que são solos minerais; profundos e com alta permeabilidade à água, situados em relevos planos e suave-ondulados, reduzindo o risco de erosão laminar, os cambissolos (8,41%) e neossolos (4,56%) presentes nos relevos ondulados e montanhosos. As áreas desta classe estão assentadas em sua maioria sobre depósitos de silte, areia e argila, assim como sobre calcarenitos, arcóseos, dolomitos, siltitos, folhelhos, argilitos e marga. É importante destacar que na região sul do Município de Formosa o Exército Brasileiro mantém uma área de aproximadamente 1.100 km²; de biota cerrado que abriga várias espécies da fauna e diversas nascentes e lagoas, dentro da qual, como observado na Figura 6.18, está localizada grande quantidade da classe vulnerabilidade ambiental baixa e por ser área protegida encontra-se pouco alterada, explicando assim o valor baixo da sua vulnerabilidade ambiental.

No Município de Formosa predomina a classe vulnerabilidade ambiental moderada ocupando uma área aproximada de 3.486,43 km², o que corresponderia ao percentual de 60,72% do território, estando distribuída geologicamente em sua maioria, nas unidades Paraopeba (36,07%), Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (25,42%), Rítmica pelito-carbonatada (10,59%) e Depósitos aluvionares (9,28%). Esta classe apresenta uma relativa influência antrópica, com quatro tipos de uso, áreas de cerrado que ocupam um percentual de 38,02%, as de campestre com percentual de 26,30%, a mata de galeria com percentual de 22,82% e a pastagem com percentual de 11,09%.

A vulnerabilidade ambiental alta compreende aproximadamente 797,02 km², cerca de 13,88% da área total. As áreas compreendidas neste grau de vulnerabilidade ambiental estão assentadas na maioria em litologias das unidades Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, Paraopeba, Sete Lagoas, Rítmica Pelito-carbonatada e Depósitos aluvionares, nas quais predomina a morfogênese. Essas áreas se caracterizam por ser bastante planas com declividades menores de 11,31 graus e por apresentar relevos planos e suavemente ondulados e relevos ondulados dissecados em colinas. Em quase toda sua extensão predominam os latossolos, cambissolos e neossolos, os dois últimos se caracterizam por ser solos jovens, pouco profundos e muitas vezes cascalhentos, e com alto teor de silte, que resulta em uma permeabilidade muito baixa e propenso de se formar mais facilmente sulcos pela água da chuva, e quando usados na agricultura e pastagem aumentam o risco à

erosão laminar. Esta classe está fortemente associada às atividades antrópicas, especialmente à pastagem (48,14%), à agricultura (43,14%) e à zona urbana (3,43%), concentrando em um percentual de 94,71% do total da área de estudo.

A classe vulnerabilidade muito alta ocupa o percentual de 0,32% da área do Município com 18,43km². A razão que explica este valor elevado para a vulnerabilidade ambiental é que compreende áreas de solo exposto com um percentual de 87,63%, de área urbana em um percentual de 8,68% e as áreas de agricultura em um percentual de 1,33%; que por sua vez são áreas caracterizadas por relevos planos e ondulados com solos jovens como os cambissolos e neossolos que ocupam a maior parte do território junto com os plintossolos, caracterizados por sua impermeabilidade e pouca profundidade, aumentando o risco de erosão laminar. Estas áreas de vulnerabilidade ambiental elevada estão associadas litologicamente às coberturas detrito-lateríticas ferruginosas e ao Grupo geológico de Bambuí com o subgrupo Paraopeba e as formações de Sete Lagoas e de Três Marias (MG), as quais apresentam valores altos de vulnerabilidade de acordo com a análise litológico feito na reclassificação e onde predomina a morfogênese.

De forma geral o Município de Formosa tem um percentual de 25,08% de sua área com uma vulnerabilidade ambiental baixa graças à considerável área localizada ao sul do Município que é preservada pelo Exército Brasileiro, ou seja, baixa pressão antrópica, onde o cerrado e a mata de galeria predominam; 60,72% da área com vulnerabilidade moderada ou com uma relativa pressão e 14,2% da área com vulnerabilidade ambiental elevada onde a atuação humana é significativa por meio da agricultura mecanizada, da pastagem e da área urbana.

De acordo com os resultados descritos anteriormente, uma das zonas que apresentou vulnerabilidade ambiental elevada foi a área urbana do Município e seus arredores, portanto a modelagem das mudanças na estrutura e composição da paisagem serão realizada nela.

6.3 MODELAGEM DA DINÂMICA DE USO DO SOLO

Conforme mencionado no capítulo anterior, a modelagem da dinâmica de uso do solo foi elaborada em quatro fases principais: preparação dos dados de entrada, calibração do modelo, construção do modelo de simulação e validação, e obtenção do cenário

prospectivo de tendência histórica, para a área urbana do Município de Formosa e seus arredores.

6.3.1 Preparação dos dados de entrada

Na Figura 6.19 podem ser observados os dados de entrada necessários para o desenvolvimento do modelo: os mapas inicial e final de uso e cobertura do solo, as variáveis estáticas de pedologia, declividade, distância até a drenagem e distância até as estradas, convertidos para o formato TIFF e com o mesmo número de colunas e linhas e resolução (tamanho do pixel) do mapa no formato raster.

Para os mapas distância até a drenagem e distância até as estradas apresentados na Figura 6.19, a cor azul indica as faixas de distâncias mais próximas às respectivas feições e a cor vermelha as faixas mais distantes.

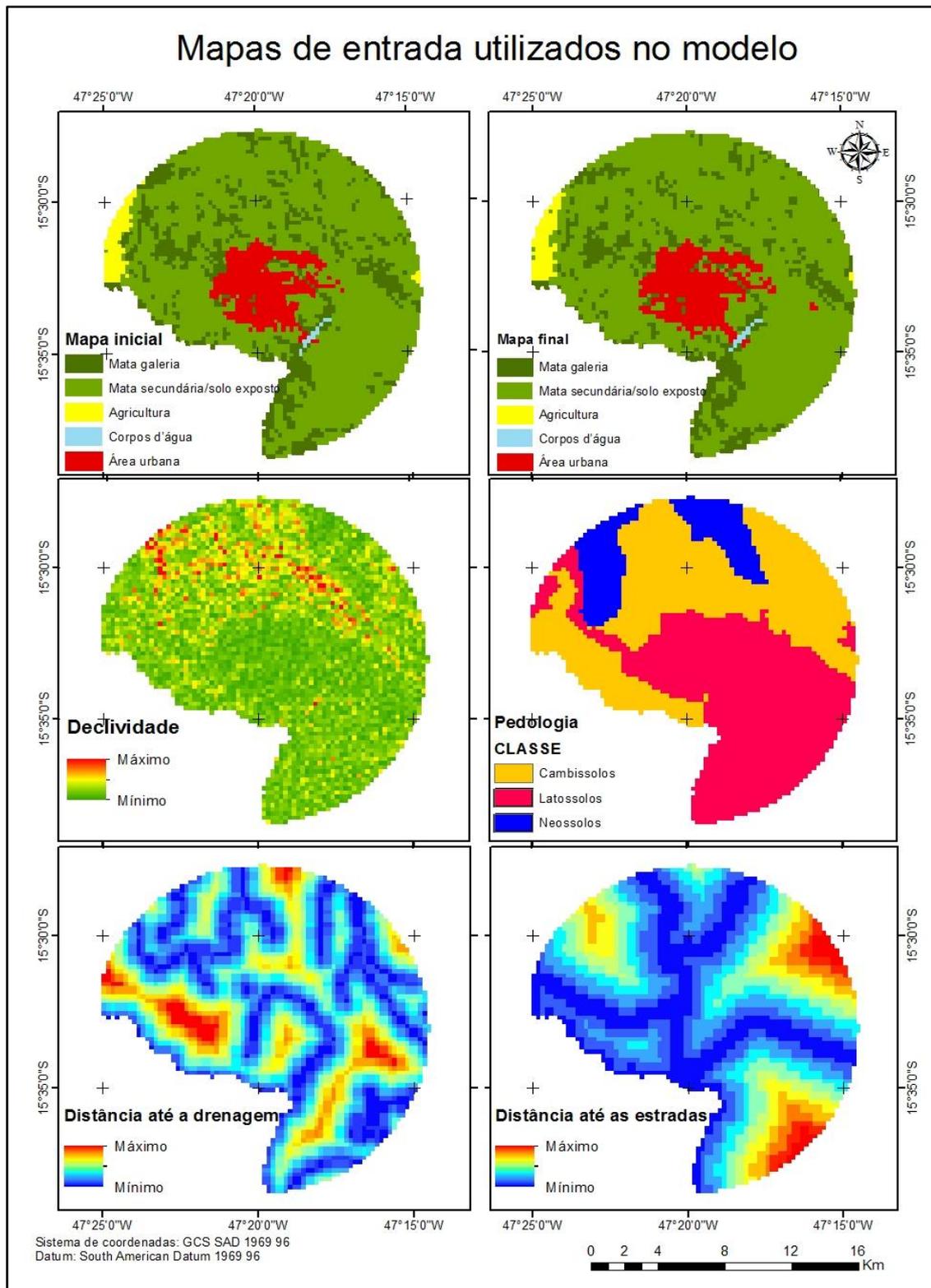


Figura 6.19 – Mapas de entrada utilizados no desenvolvimento do modelo.

6.3.2 Calibração do modelo

Esta fase está dividida nos seguintes passos:

6.3.2.1 Cálculo das matrizes de transição

As matrizes de transição resultantes da tabulação cruzada entre os mapas inicial e final de uso e cobertura do solo do período 2007–2010 são apresentadas nas Tabela 6.12 e 6.13. As matrizes de passo único e de passos múltiplos fornecem os percentuais de transição entre as diferentes classes temáticas de uso e cobertura do solo por unidade de passo de tempo, sendo para a primeira de três anos e para a segunda de um ano. De acordo com a Tabela 6.12 acontecem sete transições no período de estudo, mas as transições mais significativas são de classe mata galeria para classe mata secundária/solo exposto estimada em 32,60%, seguida da mudança da classe área agrícola para classe mata secundária/solo exposto estimada em 9,41% devido possivelmente a ações de reflorestamento nesta zona.

Tabela 6.12 – Matriz de transição de passo único do uso e cobertura da terra para o período 2007 – 2010.

Classes		2010				
		Mata galeria	Mata secundária/solo exposto	Agricultura	Corpos d'água	Área urbana
2007	Mata galeria		0,3260	---	---	0,0014
	Mata secundária/solo exposto	0,0461		0,0030	---	0,0179
	Agricultura	---	0,0941		---	---
	Corpos d'água	0,0769	---	---		---
	Área urbana	---	---	---	---	

Tabela 6.13 – Matriz de transição de passos múltiplos do uso e cobertura da terra para o período 2007 – 2010.

Classes		2010				
		Mata galeria	Mata secundária/solo exposto	Agricultura	Corpos d'água	Área urbana
2007	Mata galeria		0,1270	---	---	---
	Mata secundária/solo exposto	0,0179		0,0010	---	0,0061
	Agricultura	---	0,0333		---	---
	Corpos d'água	0,0300	---	---		---
	Área urbana	---	---	---	---	

6.3.2.2 Obtenção dos pesos de evidência

A etapa de calibração é também composta pelo cálculo das probabilidades de transição de cada célula considerando diferentes variáveis naturais e antrópicas por meio dos mapas de variáveis estáticas e dinâmicas utilizando o método bayesiano de pesos de evidência. Primeiro foi elaborado um arquivo esqueleto que contém as melhores faixas de distância das variáveis estáticas e dinâmicas para o cálculo dos pesos de evidência.

Logo foram utilizados o esqueleto dos pesos de evidência, o cubo raster e os mapas inicial e final para o cálculo dos coeficientes dos pesos de evidência. O sistema DINAMICA fornece como resultado para cada variável nas diferentes transições: as faixas de distância, o tamanho do buffer em células, o número de transições acontecidas no buffer, os coeficientes obtidos, a medida do contraste e o resultado do teste de significância estatística. Os valores dos coeficientes obtidos nas diferentes faixas de distância para cada variável indicam seu efeito na ocorrência de determinada transição, em que os valores positivos favorecem a transição, os valores próximos de zero não exercem efeito sobre a transição e os valores negativos repelem a transição. A seguir são descritas as faixas onde se apresentaram os valores positivos, ou seja, aquelas que têm efeito sobre a transição:

- Mata galeria para mata secundária/solo exposto: favorecem a transição as declividades entre os 13 e os 38 graus; as faixas de distância de 1.500 a 5.500m das estradas; e, faixas de distância de 1.300 a 2.300m da rede de drenagem. As áreas com solos neossolos e cambissolos também favorecem essa transição.
- Mata secundária/solo exposto para mata galeria: favorecem a transição as faixas de distância de 0 a 500m a partir da mata galeria; as faixas de distância de 500 a 2500m das estradas principais e faixas de distância de 0 a 400m da rede de drenagem. Favorecem a transição diferentes as faixas de declividade de 0 a 3 graus, de 9 a 14 graus e de 30 a 43 graus e os solos do tipo latossolos.
- Mata secundária/solo exposto para agricultura: os resultados mostram que a transição acontece nas faixas de distância até a rede de drenagem de 300 a 400m, de 1200 a 1300m e de 1400 a 2100m e, nas faixas de distância até as estradas de 0 a 500m e de 1000 a 1500m. Com relação à distância até a classe agricultura, a transição é favorecida na faixa de 0 a 500m. Também é favorecida por solos do tipo neossolos e por declividades de 2 a 3 graus, de 4 a 6 graus e de 16 a 19 graus.

- Mata secundária/solo exposto para área urbana: favorecem a transição as faixas de distância de 0 a 750m a partir da mata secundária e solo exposto, as faixas de distância de 0 a 1500m das estradas e as faixas de distância de 400 a 600m e de 1200 a 2100m a partir da rede de drenagem. Favorecem, também, a transição as áreas com valores de declividade de 0 a 7 graus e com solos de tipo cambissolos.
- Agricultura para mata secundária/solo exposto: a transição é favorecida nas faixas de 0 a 500m de distância de áreas com mata secundária/solo exposto, nas faixas de 0 a 600m de distância da rede de drenagem e faixas de 1500 a 2500m de distância às estradas. As principais faixas de declividade que favorecem a transição são aquelas com valores de 0 a 3 graus e de 10 a 15 graus.
- Corpos d'água para mata galeria: as áreas com declividades entre 0 e 17 graus favorecem a transição, ao igual que áreas com distâncias de 0 a 300m da drenagem e áreas com distâncias de 0 a 1500m das estradas.

O último passo desta etapa consistiu na verificação da independência espacial das variáveis de entrada por meio do cálculo do índice de *Cramer*, que opera com valores reais de áreas de sobreposição entre as diferentes variáveis de dois mapas avaliando a presença de associação ou dependência espacial entre ambos. A independência espacial foi verificada quando este índice apresenta valores inferiores de 0,5. O resultado do sistema DINAMICA é uma planilha a qual contém a descrição das variáveis comparadas e os valores dos diferentes testes.

A Tabela 6.14 apresenta os valores encontrados para o índice de *Cramer* no presente estudo. Como pode ser observado na Tabela 6.14, os valores do índice de *Cramer* de todos os pares de variáveis apresentaram valores próximos de zero indicando uma grande independência entre elas, e como os valores do índice foram inferiores ao limiar de corte, todas as variáveis foram finalmente consideradas no modelo de simulação para o ano de 2010.

Tabela 6.14 – Correlação de mapas verificada pelo índice de Cramer.

Mata galeria para mata secundária/solo exposto			
Comparação	Índice de Cramer	Comparação	Índice de Cramer
Declividade/drenagem	0,089	Drenagem/solo	0,128
Declividade/estradas	0,109	Drenagem/distance_to_2	0,062
Declividade/solo	0,287	Estradas/solo	0,196
Declividade/distance_to_2	0,089	Estradas/distance_to_2	0,092
Drenagem/estradas	0,149	Solo/distance_to_2	0,149
Mata secundária/solo exposto para mata galeria			
Comparação	Índice de Cramer	Comparação	Índice de Cramer
Declividade/drenagem	0,079	Drenagem/solo	0,146
Declividade/estradas	0,090	Drenagem/distance_to_2	0,209
Declividade/solo	0,285	Estradas/solo	0,155
Declividade/distance_to_2	0,167	Estradas/distance_to_2	0,124
Drenagem/estradas	0,153	Solo/distance_to_2	0,248
Mata secundária/solo exposto para agricultura			
Comparação	Índice de Cramer	Comparação	Índice de Cramer
Declividade/drenagem	0,071	Drenagem/solo	0,138
Declividade/estradas	0,082	Drenagem/distance_to_2	0,108
Declividade/solo	0,277	Estradas/solo	0,152
Declividade/distance_to_2	0,078	Estradas/distance_to_2	0,121
Drenagem/estradas	0,144	Solo/distance_to_2	0,249
Mata secundária/solo exposto para área urbana			
Comparação	Índice de Cramer	Comparação	Índice de Cramer
Declividade/drenagem	0,074	Drenagem/solo	0,135
Declividade/estradas	0,080	Drenagem/distance_to_2	0,098
Declividade/solo	0,276	Estradas/solo	0,152
Declividade/distance_to_2	0,094	Estradas/distance_to_2	0,158
Drenagem/estradas	0,143	Solo/distance_to_2	0,352
Agricultura para mata secundária/solo exposto			
Comparação	Índice de Cramer	Comparação	Índice de Cramer
Declividade/drenagem	0,063	Drenagem/solo	0,113
Declividade/estradas	0,051	Drenagem/distance_to_2	0,057
Declividade/solo	0,266	Estradas/solo	0,085
Declividade/distance_to_2	0,073	Estradas/distance_to_2	0,082
Drenagem/estradas	0,141	Solo/distance_to_2	0,149

Tabela 6.14 (Continuação) – Correlação de mapas verificada pelo índice de Cramer.

Corpos d'água para mata galeria			
Comparação	Índice de Cramer	Comparação	Índice de Cramer
Declividade/drenagem	0,036	Drenagem/solo	0,054
Declividade/estradas	0,029	Drenagem/distance_to_2	0,138
Declividade/solo	0,185	Estradas/solo	0,060
Declividade/distance_to_2	0,089	Estradas/distance_to_2	0,084
Drenagem/estradas	0,114	Solo/distance_to_2	0,195

6.3.3 Construção do modelo de simulação e validação

Esta etapa compreende gerar um mapa simulado, a partir do mapa inicial do uso e cobertura do solo, das variáveis estáticas e dinâmicas, e dos resultados dos passos anteriores; e posteriormente avaliar o mapa simulado quando comparado com o mapa real.

6.3.3.1 Modelo de simulação

Como mencionado no item 5.1.4.3 o sistema DINAMICA utiliza os *functores Expander e Patcher* como algoritmos de transição, responsáveis pela expansão e contração de manchas de células de cada classe e pelo surgimento de novas manchas respectivamente. Nesta etapa foram determinados os valores dos parâmetros *Mean Patch Size*, *Patch Size Variance* e *Patch Isometry* para os dois algoritmos por meio de múltiplas tentativas considerando uma análise visual do mapa simulado quando comparado com o mapa real e em procura da melhor similaridade possível. Também foram determinados os valores das taxas que devem ser consideradas para a expansão das manchas existentes e para a criação de novas manchas. A Tabela 6.15 mostra os valores calibrados dos três parâmetros e a porcentagem de transição para os algoritmos *Expander* e *Patcher* no período simulado.

Tabela 6.15 – Parâmetros utilizados na simulação para o período 2007 – 2010.

Porcentagem de transição expander	Expander			Patcher		
	Mean Patch Size	Patch SizeVariance	Patch Isometry	Mean Patch Size	Patch SizeVariance	Patch Isometry
0,3	10	5	1,5	10	5	1,5

O resultado da simulação feita pelo DINAMICA é apresentado por meio do mapa simulado para o ano 2010 na Figura 6.20.

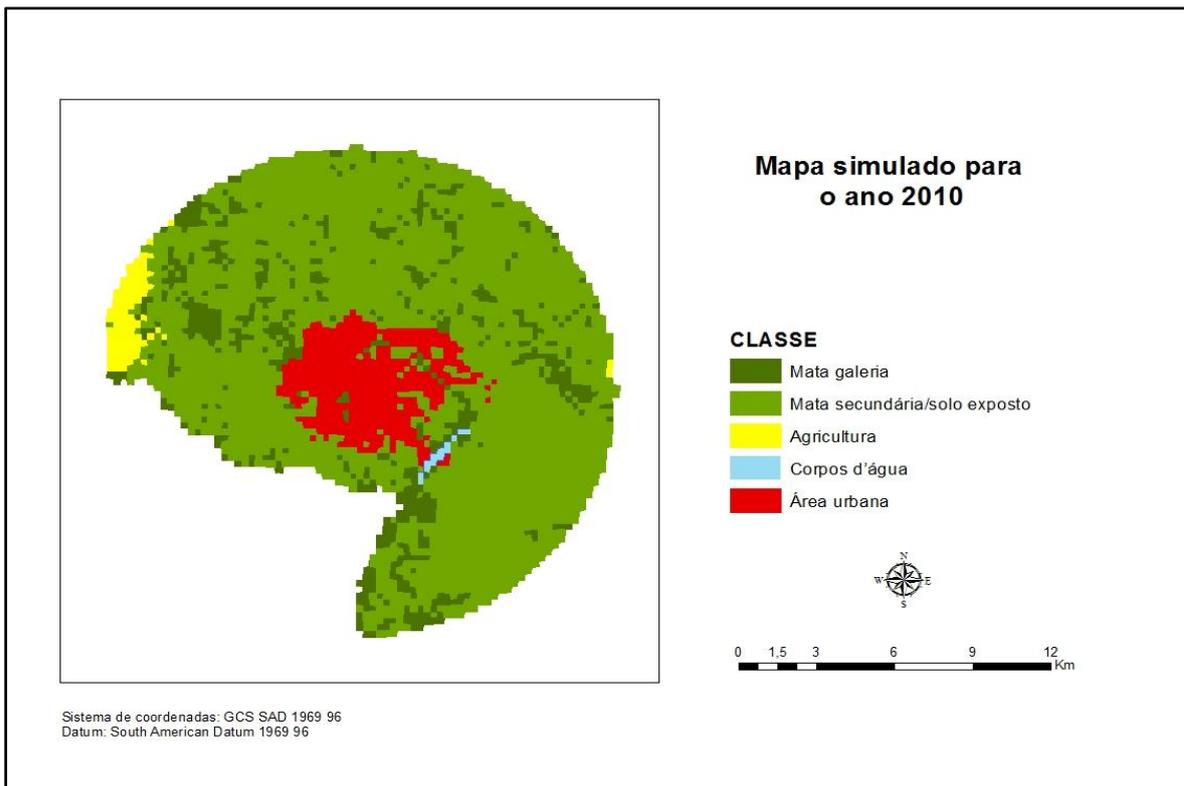


Figura 6.20 – Mapa de uso e cobertura do solo simulado pelo DINAMICA para o ano 2010.

6.3.3.2 Validação do modelo de simulação

Os resultados do passo anterior foram avaliados ao comparar o mapa de uso e cobertura do solo de 2010 com o mapa gerado na simulação. O sistema DINAMICA utiliza dois algoritmos para calcular o índice de similaridade baseado na diferença entre dois produtos: o mapa inicial e mapa final real, e o mapa inicial e o mapa simulado. A avaliação do processo de simulação foi realizada com base no método adaptado de similaridade *fuzzy* por meio dos algoritmos que compreendem a função de decaimento constante e a de decaimento exponencial.

Na Tabela 6.16 podem ser observados os valores dos índices de similaridade obtidos com as funções de decaimento constante e exponencial. O método aplicado tem como base o ajuste por múltiplas resoluções, no qual os valores das funções de decaimento tendem a ser superiores quando comparados com índices baseados no ajuste pixel a pixel. Os índices tendem a ser maiores quanto maior seja o tamanho da janela de amostragem, até ocorrer a saturação (janelas acima de 11 x 11 pixels), tornando ineficiente o método na validação (Ferrari, 2008).

Tabela 6.16 – Índices de similaridade para distintos tamanhos de janelas.

Índice de similaridade fuzzy			
Modelo	Tamanho das janelas (pixels)	Função de decaimento	
		Constante	Exponencial
2007 – 2010	3 x 3	0,607	0,535
	5 x 5	0,788	0,614
	7 x 7	0,878	0,638
	9 x 9	0,922	0,648
	11 x 11	0,951	0,652

Os resultados da Tabela 6.16 mostram que o ajuste do modelo de simulação vai de 61% na resolução 3 x 3 pixels até 95% na resolução de 11 x 11 pixels na função de decaimento constante; e que vai de 53% na resolução 3 x 3 pixels até 65% na resolução de 11 x 11 pixels na função de decaimento exponencial. De acordo com Palacios (2006), o mapa simulado precisa ter índices de similaridade acima de 0,5 para ser validado, e como os valores obtidos nas diferentes janelas nas duas funções de decaimento foram superiores ao limiar, os resultados são considerados satisfatórios para a área de estudo no período avaliado.

Pelo exame entre os mapas (obtido e simulado), pode-se notar que alguns fragmentos presentes no mapa final real não aparecem no mapa simulado para o ano 2010, em que esses fragmentos correspondem à classe mata galeria ao quais foram impossíveis de simular impedindo melhores resultados na calibração do modelo. Uma das dificuldades na simulação dos fragmentos deve-se a possíveis erros no algoritmo de classificação temática por regiões, pela dificuldade do mesmo em atribuir valores espectrais que não pertencem à classe temática de mata galeria.

6.3.4 Obtenção do cenário prospectivo de tendência histórica

Com base no modelo calibrado obtido no DINAMICA para o ano de 2010 foram elaborados os cenários prospectivos de tendência histórica, em que se consideraram fixas as taxas de transição. Na elaboração dos cenários prospectivos foram mantidos os valores utilizados na simulação e apresentados na Tabela 6.15. Na Figura 6.21 podem ser observados os cenários gráficos prospectivos elaborados na área selecionada para os anos 2015 e 2020, respectivamente.

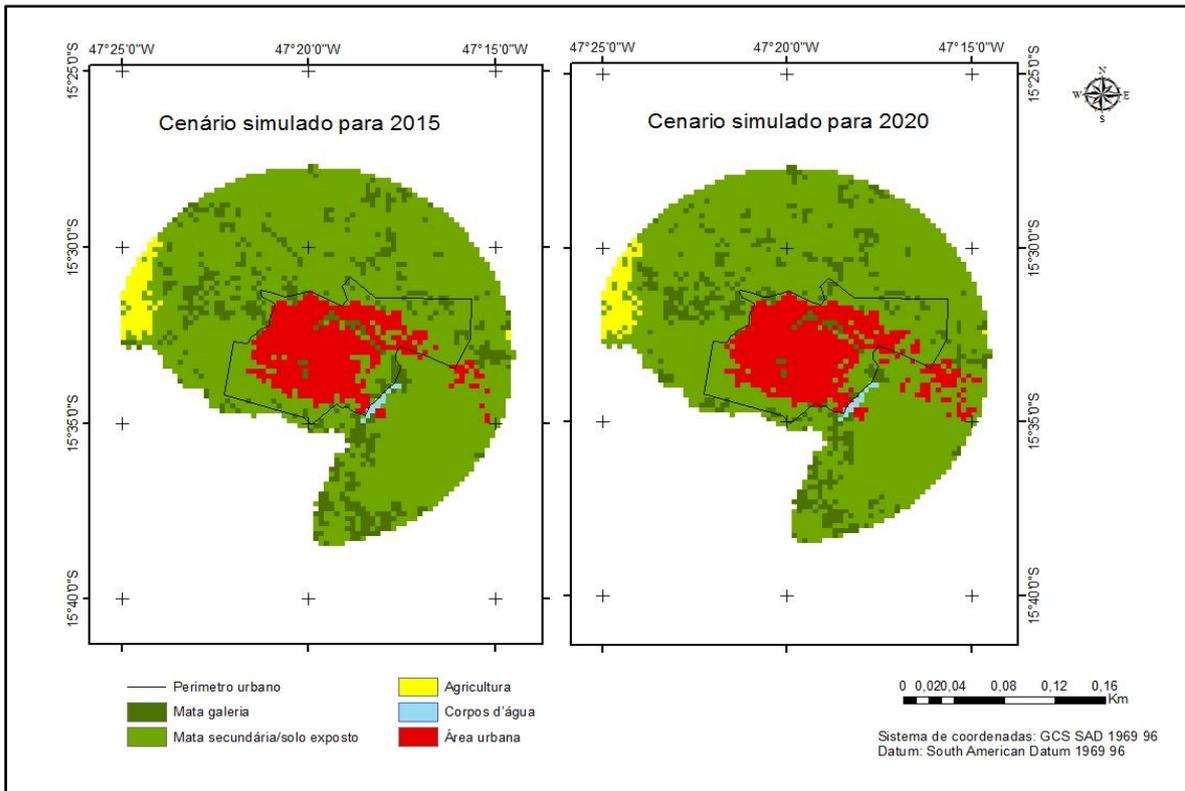


Figura 6.21 – Cenários simulados para os anos de 2015 e 2020.

Na Tabela 6.17 são apresentados os valores das áreas para as diferentes classes de uso e cobertura do solo nos anos 2010 (mapa real), 2015 e 2020 (mapas simulados), evidenciando as modificações ocorridas em cada uma de elas.

Tabela 6.17 – Valores das áreas das classes de uso e cobertura do solo.

Classes	Área 2010 (km ²)	Área 2015 (km ²)	Área 2020 (km ²)
Mata galeria	37,34	31,04	27,71
Mata secundária/solo exposto	171,28	172,80	171,19
Agricultura	5,41	5,44	5,45
Corpos d'água	0,76	0,76	0,76
Área urbana	24,78	29,53	34,47
Total	239,57	239,57	239,58

Os cenários prospectivos (simulados) para os anos de 2015 e 2020 apresentados na Figura 6.21 mostram um importante aumento na área urbana, de 4,75 km² em cinco anos e de 9,69 km² em dez anos, assim como uma significativa diminuição nas áreas de mata galeria de 6,30 km² e de 9,63 km². Também é possível observar que as classes agricultura, mata

secundária/solo exposto e corpos d'água mantêm um comportamento constante nos dois períodos simulados.

Os cenários prospectivos apresentam uma ocupação do espaço constante pelas áreas de agricultura mecanizada, que tem limitada sua expansão ao norte da área urbana devido à presença de declividades elevadas, e ao sul por que a área pertence a uma unidade de conservação mantida sob controle do Exército Brasileiro.

Os cenários prospectivos mostram que o processo de ocupação antrópica se dirige principalmente para o sul e, cada vez mais perto da lagoa Feia, e para o leste, ocupando os espaços livres encontrados em períodos anteriores. Os cenários prospectivos mostram também que a expansão antrópica nas áreas urbanas avança para leste, ultrapassando os limites estabelecidos no Plano Diretor do Município (INTERPLAN, 2003), ocupando a área de forma polinucleada e com formação de diversos espaços livres, a pesar de ter duas grandes áreas livres ao leste e oeste dentro do perímetro urbano.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia aplicada permitiu realizar um estudo abrangente da dinâmica de uso e cobertura do solo e da configuração da paisagem, por meio da construção de mapas em escala multitemporal usando imagens de satélite, da obtenção da vulnerabilidade ambiental com o processamento e integração de dados temáticos, e da elaboração de cenários prospectivos dos processos de mudanças futuras no uso do solo.

A classificação temática realizada permitiu identificar as principais mudanças acontecidas no uso e cobertura do solo em um determinado período de tempo. Para o período de 22 anos no Município de Formosa foi comprovada a expansão das áreas urbanas, das áreas agrícolas, áreas de pastagem e de solo exposto com elevados valores de variação, em detrimento das áreas de cerrado e de mata galeria, refletindo o modelo de ocupação dominante atualmente, o qual acontece de forma desordenada e sem considerar os ecossistemas existentes.

A divisão no estudo da evolução de uso e cobertura do solo em diferentes períodos de tempo permitiu um melhor conhecimento das mudanças acontecidas em cada uma das classes temáticas. Por meio da divisão em períodos foi possível observar as transições intermédias de cada classe temática e suas modificações, identificando os períodos com as taxas de variação mais elevadas.

Dos três períodos em que foi dividido o estudo da evolução de uso e cobertura do solo, o período 2007–2010 apresentou as variações mais significativas. Em três anos, a área urbana cresceu em 3,49 km², as de solo exposto em 18,10 km², as áreas de agricultura em 108,80 km² e as de campo com uso pastoril em 341, 63 km². Nesse mesmo tempo, foram reduzidas as áreas de cerrado e de mata galeria em 213,23 km² e 144,39 km² respectivamente. Os outros dois períodos de estudo (1988 – 1998 e 1998 - 2007) se caracterizaram por valores consideráveis de transição, mas em intervalos de tempo maiores.

A integração de fatores físicos (geologia, geomorfologia, solos e vegetação) e antrópicos (uso e cobertura do solo) permitiu uma classificação da vulnerabilidade ambiental segundo seu maior ou menor grau. A classificação da vulnerabilidade ambiental na área do Município de Formosa, indicou que o percentual de 85,80% da área está classificada como de baixa e moderada vulnerabilidade, mostrando que está estável com um predomínio do

cerrado e de mata galeria e com uma baixa ou relativa pressão das atividades humanas, principalmente pela considerável extensão da área protegida gerenciada pelo Exército Brasileiro ao sul do Município; as áreas com vulnerabilidade alta (13,88%) estão fortemente associadas às atividades antrópicas, especialmente à pastagem, à agricultura mecanizada e à zona urbana, e as áreas com vulnerabilidade muito alta (0,32%) correspondem a solo exposto.

Ao se conhecer a distribuição espacial da vulnerabilidade ambiental, foi possível definir as áreas mais vulneráveis para as quais devem ser estabelecidas limitações de uso e ocupação e definidas medidas de mitigação e recuperação, assim como as áreas menos vulneráveis, para as quais devem ser definidos planos de conservação e proteção.

A análise multicritério mostrou-se adequada na definição do grau de importância dos fatores naturais e antrópicos para o cálculo da vulnerabilidade ambiental. Com apoio do método AHP, foi possível determinar, de um modo mais objetivo, a importância de um fator em relação aos demais podendo facilitar o processo de tomada de decisão. A vulnerabilidade ambiental, resultado da análise AHP, mostra-se imparcial devido à ponderação dos dados que minimizam os erros de julgamento.

O modelo de simulação para o período 2007–2010, da área selecionada com elevada vulnerabilidade ambiental, apresentou resultados satisfatórios de acordo com os valores dos índices de similaridade obtidos com as funções de decaimento constante e exponencial usadas no método de similaridade *fuzzy*, mas também apresentou dificuldades em simular as manchas da classe mata galeria possivelmente pela associação espectral executada pelo algoritmo na fase de classificação temática.

Os cenários prospectivos simulados para curto e médio prazo se mostraram como uma ferramenta importante e apropriada na análise das tendências de crescimento e direcionamento que podem apresentar as diferentes classes de uso e cobertura do solo. Os cenários prospectivos indicaram um grande crescimento da mancha urbana, a qual aconteceria de forma rarefeita e polinucleada por fora do limite estabelecido, assim como uma significativa diminuição das áreas de mata galeria.

Além disso, a elaboração de cenários prospectivos pode subsidiar o Governo Municipal e gestores locais, no estabelecimento de políticas que contribuam ao desenvolvimento e ordenamento da expansão urbana de qualquer Município, ou seja, na elaboração do Plano

Diretor, entendendo este, como o instrumento básico do processo de planejamento municipal para a implantação da política de desenvolvimento urbano.

A modelagem desenvolvida na pesquisa para elaboração de cenários prospectivos mostrou a eficiência do sistema DINAMICA EGO como uma ferramenta competente na representação da realidade por meio de diferentes modelos, que pode auxiliar à administração municipal no ordenamento e controle da mancha urbana em procura de uma distribuição adequada de sua infraestrutura básica.

O mapeamento, resultado das diferentes etapas da pesquisa, constituiu-se como uma importante fonte de informação, capaz de auxiliar no planejamento e no desenvolvimento de projetos relacionados com o uso do solo na busca do menor impacto ambiental possível e como subsídio no direcionamento de ações preventivas e sustentáveis na mitigação de impactos ambientais causados pela ocupação antrópica e de formulação de políticas e ações municipais de conservação e planejamento de ações de saneamento básico, como a proposta pela RIDES DF e Entorno.

No desenvolvimento da pesquisa, foi possível verificar a importância da integração das informações de processos naturais e antrópicos em estudos ambientais, já que fornece uma visão sistêmica e permite uma melhor compreensão da paisagem e das variáveis socioambientais presentes na área.

O uso de ferramentas de apoio à decisão e de Sistemas de Informações Geográficas provaram ser úteis no desenvolvimento da pesquisa propiciando maior eficiência na detecção de mudanças, menor complexidade no tratamento dos dados e redução de custos de mapeamento, mostrando-se como um auxílio importante no monitoramento do meio ambiente.

Os resultados obtidos seguindo a metodologia proposta, além dos benefícios que podem ser inferidos ao subsidiar as futuras políticas públicas de ocupação do espaço e do ordenamento territorial do Município de Formosa. Além disso, a metodologia utilizada nesta pesquisa pode ser replicada para os demais Municípios abrangidos pelo RIDE-DF e Entorno, contribuindo no processo de planejamento municipal especialmente às políticas e ações referente ao saneamento básico, e também ao aperfeiçoamento da mesma. A metodologia também pode servir de ponto de partida para pesquisas semelhantes nas diferentes áreas do saneamento básico.

Com base na experiência adquirida no desenvolvimento deste estudo, as dificuldades e observações verificadas ao longo do mesmo, são propostas as seguintes recomendações para futuras pesquisas:

- Elaborar cartas de vulnerabilidade ambiental, utilizando os fatores de pedologia, da geologia, e da geomorfologia, cartograficamente disponíveis em escalas superiores a 1/250.000, com as informações de zonas homólogas do relevo que representam zonas homogêneas quanto às características dos componentes do meio físico, compartimentando a área de estudo em unidades geotécnicas, que fornecem melhor precisão no processo de análise hierárquica.
- Realizar estudos da área urbana com imagens de alta resolução espacial que permita a distinção entre os tipos de uso do solo intra-urbano e entre classes referentes à expansão urbana como pouco desenvolvida – urbano construída, possibilitando uma melhor avaliação do crescimento da mancha urbana.
- Estudar os possíveis impactos sobre a lagoa Feia decorrentes do crescimento desordenado da ocupação urbana, utilizando dados de modelos numéricos de terreno obtidos a partir de veículos aéreos não transportados (VANT), com resolução espacial da ordem de um metro no terreno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas (ANA). (2014). *Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água 2010*. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=12>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2014.
- Almeida, C. M. (2003). *Modelagem da Dinâmica Espacial como uma Ferramenta Auxiliar ao Planejamento: Simulação de Mudanças de Uso da Terra em Áreas Urbanas para as Cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil*. Tese de Doutorado, Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 321p.
- Almeida, W. S., Camapum de Carvalho, J. e Souza, N. M. (2008). *Diagnostico da Vulnerabilidade Ambiental a Processos Erosivos no Entorno do Reservatório da UHE Corumbá IV*. Trabalho de pesquisa de pós-doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185p.
- Almeida, W. S. Camapum de Carvalho, J. e Souza, N. M. (2012). “Produção de carta geotécnica preliminar de capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da UHE Corumbá IV (GO)” In: Camapum de Carvalho, J., Neves, G. F. e Carvalho, E. T. (org.) *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais*. Faculdade de Tecnologia, Brasil, 581-606.
- Barraclough, M. D. (2004). *A Remote Sensing and GIS Investigation of Urban Growth and Development Patterns in the Metropolitan Region of Lexington – Fayette, Kentucky*. Dissertação de mestrado. College of Arts and Sciences at West Virginia University. Morgantown, West Virginia, 48p.
- Barros, L. M. (2011). *A Proposta de Reciclagem e o Destino Final dos Resíduos Sólidos: Realidade de Formosa – GO*. Trabalho de conclusão de curso de Licenciatura em Biologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 43p.
- Benedetti, A. C. (2010). *Modelagem Dinâmica Para Simulação de Mudanças na Cobertura Florestal das Serras do Sudoeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 167p.

- Burrough, P. A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press, Oxford, U.K., 194p.
- Burrough, P. (1998). *Dynamic Modelling and Geocomputation. Geocomputation: A Primer*. P. Longley, M. Batty and R McDonnell. John Wiley & Sons, London, U.K., 290p.
- Burrough, P. A. e McDonnell, R. A. (2010). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, U.K., 333p.
- Brites, C. R. (2008). *Abordagem Multiobjetivo na Seleção de Sistemas de Reúso de Água em Irrigação Paisagística no Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 280p.
- Caiado, M. C. S. (2005). “Estruturação intra-urbana na região do Distrito Federal e entorno: a mobilidade e a segregação socioespacial da população.” *Revista Brasileira de Estudos de População*, 22 (1), 55 – 88.
- Câmara, G., Casanova, M. A., Hemerly, A. S., Magalhães, G. C. e Medeiros, C. M. (1996). *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. SBC, Campinas, Brasil, 205p.
- Câmara, G. e Medeiros, C. M. (1998). *Geoprocessamento para Projetos Ambientais*. INPE, São José dos Campos, Brasil, 195p
- Chauvet, G. (2005). *Brasília e Formosa: 4.500 anos de história*. Kelps, Goiânia, Brasil, 486p.
- Cordeiro, B. S. (2010). *A Gestão de Lodos de Fossas Sépticas: Uma Abordagem por Meio de Análise Multiobjetivo e Multicritério*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143 p.
- Cordeiro Netto, O. M., Souza, M. A., Carneiro, G. A., Leal, L. J. e Lopes, R. P. (2000). “Uma metodologia para análise tecnológica de sistemas com reatores biológicos anaeróbios para tratamento de águas residuárias municipais.” *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 14p.

- Corvalán, S. B. (2009). *Zoneamento Ambiental da APA Corumbataí (SP) de Acordo com Critérios de Vulnerabilidade Ambiental*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 170p.
- Costa, F. H., Petta, R. A., Lima, R. F. e Medeiros, C. N. (2006). “Determinação da vulnerabilidade ambiental na Bacia Potiguar, Região de Macau (RN), utilizando Sistemas de Informações Geográficas.” *Revista Brasileira de Cartografia*, **58**(2), 119-127.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., Azevedo, L. G., Hernandez, P., Florenzano, T. G. e Duarte, V. (1996). *Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico*. INPE, São Jose dos Campos, Brasil, 25p.
- Crepani, E., Medeiros, J. S., Hernandez, P., Florenzano, T. G., Duarte, V. e Barbosa, C. C. (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial*. INPE, São Jose dos Campos, Brasil, 103p.
- Cunha, J. B. (2004). “Planos diretores municipais da região entorno do Distrito Federal.” *Anais do IV Congresso Brasileiro de Direito Urbanístico*, Manaus, Brasil.
- Dias, L. T. (2011). *Modelagem Dinâmica Espacial do Uso e Ocupação do Solo na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá – DF: 1998–2020*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 144p.
- Dodgson, J., Spackman, M., Pearman, A., Phillips, L. (2001). *DTLR multi-criteria analysis manual*. DTLR – Department for Transport, Local Government and the Regions, Reino Unido, 145p.
- Ferrari, R. (2008). *Modelagem Dinâmica do Uso e Cobertura da Terra da Quarta Colônia, RS*. Dissertação de Mestrado em Geomática, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 131p.
- Furlan, M. C. (2012). *Modelagem Dinâmica de Uso e Cobertura da Terra da Bacia do Arroio Grande – RS*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 129p.

- Godoy, M. M. (2004). *Modelagem da Dinâmica de Ocupação do Solo no Bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 99p.
- Grigio, A. M. (2003). *Aplicação de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na Determinação da Vulnerabilidade Ambiental do Município de Guimarães (RN): Simulação de Risco às Atividades da Indústria Petrolífera*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 253p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (1988). *Geografia do Brasil*. IBGE, Rio de Janeiro, Brasil, 113p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2010). *Atlas de Censo Demográfico 2010*. IBGE, Rio de Janeiro, Brasil, 156p.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). (2015). *Divisão de Processamento de Imagens – DPI, Tutorial de Geoprocessamento*. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>. Acesso em: 20 de junho de 2015.
- INTERPLAN (2003). *Plano Diretor do Município de Formosa/GO: Relatório final consolidado, Revisão final*. Formosa, Brasil, 188p.
- Li, A., Wang, A., Liang, S e Zhou, W. (2005). “Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS – A case study in the upper reaches of Minjiang River, China.” *Ecological Modelling*, 192(2006), 175 – 187.
- Marcial, E. C. e Grumbach, R. J. (2008). *Cenários Prospectivos: Como Construir um Futuro Melhor*. 5 Ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2008. 255p.
- Mas, J. F. e Flamenco, A, S. (2011). “Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México.” *Geotrópico*, 5(1), 1 – 24.
- Mather, P. M. (2004). *Computer Processing of Remotely- Sensed Imagens*. Jonh Wiley& Sons, Chichester, England, 324p.

- Matias, L. F. (2001). *Sistemas de Informações Geográficas (SIG): Teoria e Método para representação do Espaço Geográfico*. Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 325p.
- Melo, R. M., Melo, I. D. e Albuquerque, E. C. (2010). “Proposição de metodologia baseada em análise multicriterial (AHP) para avaliação de níveis de vulnerabilidade ambiental no Estuário do Rio Formoso, PE.” *Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, 001-009, Recife, Brasil.
- Meneses, P. R., Almeida, T. Castro, A. N., Sano, E. E., Souza, E. B., Mello, G. M. e Brites, R. S. (2012). *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. CNPq – UnB, Brasília, 266p.
- Ministério de Integração nacional. (2010). *Regiões Integradas de Desenvolvimento–RIDE*. Disponível em: http://www.integracao.gov.br/web/guest/regioes_integradas_rides. Acesso em: 8 de março de 2014.
- Ministério do Meio Ambiente. (2007). *Região Integrada do Distrito Federal*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/component/k2/item/8205>. Acesso em: 18 de maio de 2014.
- Nascimento, S. R. (2004). *Geoprocessamento Aplicado a Gestão de Informações Territoriais do Município de Grossos – RN*. Estudo Multitemporal do Uso e Ocupação do Solo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 111 p.
- Oliveira, F. F. G. (2011). *Aplicação das Técnicas de Geoprocessamento na Análise dos Impactos Ambientais e na Determinação da Vulnerabilidade Ambiental no Litoral Sul do Rio Grande do Norte*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 250p.
- Palacios, S. N. (2006). *Modelagem da Dinâmica de Desmatamento a Diferentes Escalas Espaciais na Região Nordeste do Estado de Mato Grosso*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 153p.

- Pina, M. F. e Santo, S. M. (2000). *Conceitos básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia aplicados a saúde*. OPAS, Brasília, Brasil, 122p.
- Pinese, J. F. e Rodrigues, S. C. (2012). “O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade (MG).” *Revista do Departamento de Geografia*, **23**(1), 4 – 26.
- Prefeitura Municipal de Formosa (2004). Lei n.º 250 de 20 de dezembro de 2004: “Dispõe sobre o uso e ocupação do solo de Formosa e dá outras providências.” Formosa, GO, 2004.
- Reyes, D. A. (2009). *Metodologia Multiobjetivo e Multicritério de Auxílio à Outorga de Recursos Hídricos: Aplicação ao Caso da Bacia do Rio Preto*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 181p.
- Rodrigues, H. O., Soares Filho, B. S. e Souza, W. L. (2007). “Dinâmica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais.” *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, 3089-3096, Florianópolis, Brasil.
- Ross, J. L. S. (1993). “Análise empírica da fragilidade dos ambientes antropizados.” *Revista do Departamento de Geografia*, **8**(1), 63 – 74.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York. 287p.
- Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). (2014). *Mapas em formato shapefile*. Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/>. Acesso em: 08 de março de 2014.
- Silva, C. A. e Nunes, F. (2009). “Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no Município de Pacoti/CE.” *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 5435–5442, Natal, Brasil.
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). (2014). *Série histórica*. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 11 de março de 2014.

- Soares-Filho, B. S. (1998). *Análise de Paisagem: Fragmentação e Mudanças*. Departamento de cartografia, Centro de sensoriamento remoto, Instituto de geociências. UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 89p.
- Soares-Filho, B. S., Araújo, A. A. e Cerqueira, G. C. (2001). “DINAMICA um software para simulação de dinâmica de paisagens.” *Anais do II Workshop em Tratamento de Imagens – NPDI/DCC/UFMG*, Belo Horizonte, Brasil.
- Soares-Filho, B. S., Rodrigues, H. O. e Costa, W. L. (2009). *Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinamica EGO*. Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 116p.
- Soares-Filho, B. S. (2015). Validation. Disponível em: <http://csr.ufmg.br/dinamica/validation/>. Acesso em: 27 de outubro de 2015.
- Souza, M. A., Cordeiro, O. M., e Lopes, R. P. (2001). “Sistema de apoio à decisão (SAD) para seleção de alternativas de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.” In: Chernicharo. C. A (Org.). *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. Projeto PROSAB / FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, Brasil., 515-544.
- Souza, S. O. (2013). *Vulnerabilidade Ambiental da Planície Costeira de Caravelas (Bahia): Uma Proposta Geossistêmica*. Dissertação de Mestrado em Geografia, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade federal do Espírito Santo, Vitoria, BA, 137p.
- Tagliani, C. R. A. (2003). “Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um Sistema Geográfico de Informações.” *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, 1657-1664, Belo Horizonte, Brasil.
- Teixeira, R. A. (2005). *Formosa: Portal do Nordeste Goiano ou Pólo Regional no Entorno de Brasília?* Dissertação de Mestrado, Instituto de Estudos Sócio-ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 167p.
- Trentin, G. (2008). *A expansão urbano-industrial do Município de Americana – SP: geotecnologias aplicadas à análise temporal e simulação de cenários*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 237p.

- Tricart, Jean. (1977). *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro, IBGE – SUPREN, Recursos Naturais e Meio Ambiente, 97p.
- Turner, B. L., Skole, D., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco, L. e Leemans, R. (1995). *Land-use and land-cover Change, Science/research Plan*. International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Sweden and Geneva, Switzerland, 132p.
- United States Geological Survey (USGS). (2014). *Obtenção imagens de satélites e radares*. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 15 de julho de 2014.