

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

**ANÁLISE DA DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO  
SOLO SOBRE A VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM  
ÁREA DO DISTRITO FEDERAL**

**ALANA DE ALMEIDA VALADARES**

**ORIENTADOR: WAGNER SANTOS DE ALMEIDA**

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

**PUBLICAÇÃO: PTARH.DM - 200/2017  
BRASÍLIA/DF: JULHO – 2017**

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

**ANÁLISE DA DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO  
SOBRE A VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM ÁREA DO  
DISTRITO FEDERAL**

**ALANA DE ALMEIDA VALADARES**

**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.**

**APROVADO POR:**

---

**Prof<sup>o</sup> Wagner Santos de Almeida, Dr (ENC-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof<sup>o</sup> Conceição de Maria Albuquerque Alves, Dra (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof<sup>o</sup> Waterloo Pereira Filho, Dr (UFMS)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 07 DE JULHO DE 2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

VALADARES, ALANA DE ALMEIDA

Análise da dinâmica do uso e cobertura do solo sobre a vulnerabilidade ambiental em área do Distrito Federal [Distrito Federal] 2017.

xix, 197p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2017).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Uso e cobertura do solo

2. Simulação de cenários

3. Temperatura da superfície terrestre

4. Dinamica EGO

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VALADARES, A. A. (2017). Análise da dinâmica do uso e cobertura do solo sobre a vulnerabilidade ambiental em área do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 200/2017, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 197p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Alana de Almeida Valadares.

TÍTULO: Análise da dinâmica do uso e cobertura do solo sobre a vulnerabilidade ambiental em área do Distrito Federal

GRAU: Mestre

ANO: 2017

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.

---

Alana de Almeida Valadares  
alanavaladares@hotmail.com

Dedico este trabalho aos meus pais, Erondino e Cida, aos meus irmãos, Luciano, Nathália e Flávia, que não mediram esforços para que eu chegasse onde estou; e ao meu esposo, Ronaldo Jr, pelo seu carinho, paciência e amor.

## AGRADECIMENTOS

Meus primeiros agradecimentos são para **Deus e Nossa Senhora**, pelas oportunidades que colocou em meu caminho, pela força que sempre me deram para seguir em frente, principalmente nos momentos de dúvida e medo; e, por hoje estar encerrando mais uma etapa da minha vida, sabendo que nada foi em vão.

Aos meus pais, **Eronidino e Cida**, pelo o amor incondicional e o apoio que sempre me deram, por dignamente me apresentaram à importância da família, aos ensinamentos cristãos e ao caminho da honestidade e persistência. Obrigada por tudo!

Aos meus irmãos **Luciano, Nathália e Flávia**, que me alegraram e fizeram meus dias mais felizes e que nos momentos de minha ausência, dedicados aos estudos, compreenderam que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Ao meu esposo, **Ronaldo Jr**, que sempre acreditou em mim, que de forma especial me deu força e coragem, me ouviu com paciência e me acalmou com palavras de conforto e ânimo, me fazendo sentir capaz de superar os desafios. Agradeço assim, por todo o amor e carinho que me dedica.

Ao professor **Wagner Santos de Almeida** pela orientação, ensinamentos, paciência e confiança ao longo da supervisão das minhas atividades.

À **Mariana Diniz** pelas contribuições, auxílios e aprendizados, e por sempre estar disposta a ajudar. Às minhas amigas, **Ariela Fonseca e Júnia Porto**, pela amizade, alegrias, tristezas e dores que compartilhamos durante o mestrado. Aos **colegas da turma de 2015**, pelos momentos partilhados.

Aos professores **Conceição de Maria Albuquerque Alves e Waterloo Pereira Filho**, que prontamente aceitaram o convite para comporem esta banca de defesa e contribuir com o nosso trabalho.

A todos os **professores, técnicos e demais funcionários** do PTARH/UnB pelo convívio e ensinamentos que foram fundamentais durante esses anos de mestrado.

Ao **CNPq** pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da execução deste trabalho e da minha formação, deixo aqui o meu muito obrigada.

## **RESUMO**

### **ANÁLISE DA DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO SOLO SOBRE A VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM ÁREA DO DISTRITO FEDERAL**

O Córrego Taquari é destinado para a captação de água para o abastecimento humano e, apesar de ter sua área protegida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, tem sofrido com o processo de urbanização, observado principalmente com a implantação do Paranoá Parque. O objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica ambiental, por meio da evolução histórica e de cenários prospectivos de uso e cobertura do solo, e a sua influência na vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do Córrego Taquari e entorno, no Distrito Federal.

Para tanto realizou-se uma avaliação multitemporal do uso e cobertura do solo, para os anos 1985-1995, 1995-2005 e 2005-2016, para a área de estudo A; 2009-2011 e 2011-2014, para a área de estudo B e a para bacia hidrográfica do Córrego Taquari. Em seguida foi realizada uma avaliação multicritério baseada em Análise Hierárquica de Processos (AHP) para se determinar a vulnerabilidade ambiental em função de suas características naturais e antrópicas, tais como uso e cobertura do solo, declividade, pedologia, geomorfologia e geologia. Analisou-se a mudança na temperatura aparente de superfície do solo. Foi realizada simulação da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, pelo sistema Dinamica EGO, para produzir cenários prospectivos para o ano de 2019. Foi realizada uma análise de sensibilidade da relação entre as mudanças do uso e cobertura do solo e a alteração no escoamento superficial direto, na bacia hidrográfica do Córrego Taquari.

Os resultados sugerem a evolução do uso e cobertura do solo com o decorrer dos anos, demonstrando continuidade do processo de ocupação antrópica, podendo afetar as componentes hidrológicas, como o escoamento superficial direto, podendo ocasionar impactos ambientais e sociais devido ao aumento do volume. A utilização da AHP mostrou-se satisfatória para reduzir erros e produzir mapas com certa imparcialidade. A integração dos fatores naturais e antrópicos incorporou informações relevantes ao estudo da vulnerabilidade ambiental. A vulnerabilidade ambiental muito alta não é muito representativa nas áreas estudadas. As temperaturas de superfície terrestre sugerem boa relação com o uso e cobertura do solo, com os dados meteorológicos e como indicador da capacidade de infiltração do solo.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF DYNAMICS OF SOIL USE AND COVER ON ENVIRONMENTAL VULNERABILITY IN DISTRITO FEDERAL AREA**

The Taquari stream is destined for the water abstraction for the human supply and despite its protected area by the Environmental Sanitation Company of the Federal District, has suffered with the urbanization process, mainly observed with implementation of Paranoá Parque. The objective of this study was to evaluate the environmental dynamics, through historical evolution and prospective scenarios of soil use and cover, and its influence on environmental vulnerability in the Taquari stream watershed and surrounding area, in the Distrito Federal.

A multitemporal evaluation of soil use and cover was carried out for the years 1985-1995, 1995-2005 and 2005-2016, for study area A; 2009-2011 and 2011-2014, for study area B and for the Taquari stream watershed. A multicriteria evaluation based on Analytical Hierarchy Process (AHP) was then carried out to determine the environmental vulnerability due to its natural and anthropogenic characteristics, such as soil use and cover, declivity, pedology, geomorphology and geology. The apparent soil surface temperature change was analyzed. Simulation of the environmental dynamics of soil use and cover by the Dinamica EGO system was carried out to produce prospective scenarios for the year 2019. A sensitivity analysis of the relationship between soil use and cover changes and the direct surface runoff change in Taquari stream watershed was performed.

The results suggest the evolution of soil use and cover the years, demonstrating the continuity of the anthropic occupation process, which may affect the hydrological components, such as direct surface runoff, and may cause environmental and social impacts due to the increase in volume. The use of AHP was satisfactory to reduce errors and produce maps with some impartiality. The integration of natural and anthropic factors incorporated relevant information to the study of environmental vulnerability. Very high environmental vulnerability is not very representative in the areas studied. Land surface temperatures suggest a good relation with the soil use and cover, with meteorological data and as an indicator of soil infiltration capacity.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	5
2.1. OBJETIVO GERAL.....	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
3. ÁREA DE ESTUDO .....	6
3.1. CLIMA DO DF .....	6
3.2. HIDROGRAFIA DO DF .....	7
3.3. ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO .....	8
3.4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO A.....	10
3.4.1. Hidrografia .....	10
3.4.2. Pedologia.....	11
3.4.3. Geomorfologia .....	17
3.4.4. Geologia .....	19
3.5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO B.....	22
3.5.1. Hidrografia .....	22
3.5.2. Pedologia.....	23
3.5.3. Geomorfologia .....	24
3.5.4. Geologia .....	25
3.6. PLANO DIRETOR DE ORDENAMENTO TERRITORIAL DO DISTRITO FEDERAL - PDOT.....	26
3.7. PARANOÁ PARQUE.....	29
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	32
4.1. SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO.....	32
4.2. USO E COBERTURA DO SOLO .....	34
4.3. VULNERABILIDADE AMBIENTAL .....	37
4.3.1. Análise Hierárquica de Processos (AHP) .....	40

<b>4.4. TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5. MODELAGEM DA DINÂMICA AMBIENTAL DO USO E COBERTURA DO SOLO .....</b>	<b>45</b>
4.5.1. Método dos pesos de evidência .....	48
4.5.2. Modelo de Autômatos Celulares (AC) .....	49
4.5.3. Plataforma de Simulação de Dinâmica Ambiental - Dinamica EGO .....	50
<b>4.6. MÉTODO DO <i>SOIL CONSERVATION SERVICE</i> .....</b>	<b>52</b>
4.6.1. Relação chuva-vazão.....	58
4.6.2. Grupos hidrológicos de solos (GHS) .....	60
4.6.3. Parâmetro CN .....	68
4.6.4. Chuva de projeto.....	71
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>74</b>
5.1. MATERIAL .....	74
5.2. MÉTODOS .....	75
5.2.1. Produção dos mapas de uso e cobertura do solo.....	77
5.2.2. Vulnerabilidade ambiental.....	82
5.2.2.1. Ponderação dos valores de vulnerabilidade natural.....	84
5.2.2.2. Análise Hierárquica de Processos.....	89
5.2.3. Mapas de temperatura da superfície terrestre.....	93
5.2.3.1. Temperaturas obtidas com as imagens do Landsat 5 .....	93
5.2.3.2. Temperaturas obtidas com as imagens do Landsat 8 .....	94
5.2.4. Modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo.....	96
5.2.4.1. Dados de entrada .....	96
5.2.4.2. Calibração do modelo .....	97
5.2.4.3. Construção do modelo de simulação e validação .....	98
5.2.4.4. Obtenção de cenários prospectivos do uso e cobertura do solo .....	100
5.2.5. Método do SCS.....	102

5.2.5.1.	Parâmetros da bacia hidrográfica .....	102
5.2.5.2.	Parâmetro CN .....	102
5.2.5.3.	Cálculo do escoamento superficial .....	103
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>105</b>
<b>6.1.</b>	<b>USO E COBERTURA DO SOLO .....</b>	<b>105</b>
<b>6.1.1.</b>	<b>Mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo A.....</b>	<b>105</b>
<b>6.1.2.</b>	<b>Mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo B.....</b>	<b>111</b>
<b>6.2.</b>	<b>VULNERABILIDADE AMBIENTAL .....</b>	<b>115</b>
<b>6.2.1.</b>	<b>Ponderação dos valores de vulnerabilidade natural.....</b>	<b>115</b>
<b>6.2.2.</b>	<b>Análise Hierárquica de Processos .....</b>	<b>126</b>
<b>6.3.</b>	<b>MAPAS DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE .....</b>	<b>132</b>
<b>6.3.1.</b>	<b>Área de estudo A .....</b>	<b>132</b>
<b>6.3.2.</b>	<b>Área de estudo B .....</b>	<b>137</b>
<b>6.4.</b>	<b>MODELAGEM DA DINÂMICA AMBIENTAL DO USO E COBERTURA DO SOLO .....</b>	<b>142</b>
<b>6.4.1.</b>	<b>Preparação dos mapas de entrada .....</b>	<b>142</b>
<b>6.4.2.</b>	<b>Calibração do modelo .....</b>	<b>143</b>
<b>6.4.3.</b>	<b>Construção do modelo de simulação e validação .....</b>	<b>150</b>
<b>6.4.4.</b>	<b>Obtenção do cenário prospectivo de tendência histórica .....</b>	<b>155</b>
<b>6.5.</b>	<b>BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO TAQUARI.....</b>	<b>159</b>
<b>6.5.1.</b>	<b>Delimitação e parâmetros da bacia hidrográfica.....</b>	<b>160</b>
<b>6.5.2.</b>	<b>Modelagem dinâmica ambiental na bacia hidrográfica do Córrego Taquari</b>	<b>161</b>
<b>6.5.3.</b>	<b>Uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Córrego Taquari .....</b>	<b>164</b>
<b>6.5.4.</b>	<b>Escoamento superficial direto.....</b>	<b>166</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>172</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>175</b>

APÊNDICES .....	187
-----------------	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Regiões, bacias e unidades hidrográficas do DF .....	8
Tabela 4.1 – Critérios para classificação hidrológica de solos.....	65
Tabela 4.2 – Grupos hidrológicos do SCS segundo condições de solos brasileiros .....	66
Tabela 4.3 – Classificação hidrológica para solos brasileiros .....	67
Tabela 4.4 – CN em função da descrição da área e do GHS com AMC II para área urbana .....	68
Tabela 4.5 – CN em função da descrição da área e do GHS com AMC II para área rural .	69
Tabela 5.1 – Imagens de sensores remotos orbitais.....	74
Tabela 5.2 – Imagens utilizadas na classificação temática.....	77
Tabela 5.3 – Valores de <i>ganho</i> e <i>offset</i> utilizados nas imagens NVDI .....	80
Tabela 5.4 – Valores de limiar de similaridade e área mínima dos polígonos utilizados nas imagens segmentadas .....	81
Tabela 5.5 – Fatores e critérios que serão analisados.....	84
Tabela 5.6 – Valor e classe de vulnerabilidade .....	84
Tabela 5.7 – Valor de vulnerabilidade natural para uso e cobertura do solo .....	85
Tabela 5.8 – Valor de vulnerabilidade natural para classes de declividade .....	86
Tabela 5.9 – Valor de vulnerabilidade natural dos solos.....	87
Tabela 5.10 – Valor de vulnerabilidade natural para geomorfologia .....	88
Tabela 5.11 – Valor de vulnerabilidade natural para litologia .....	89
Tabela 5.12 – Valores de AHP para comparação pareada .....	90
Tabela 5.13 – Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n .....	92
Tabela 6.1 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 1985 - 1995.....	107
Tabela 6.2 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 1995 - 2005.....	108
Tabela 6.3 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2005 - 2016.....	109
Tabela 6.4 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 1985 - 2016.....	111
Tabela 6.5 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2009 - 2011.....	113

Tabela 6.6 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2011 - 2014.....	114
Tabela 6.7 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2009 - 2014.....	114
Tabela 6.8 – Matriz de comparação pareada .....	127
Tabela 6.9 – Matriz normalizada.....	127
Tabela 6.10 – Vulnerabilidade ambiental em termos de área e porcentagem .....	129
Tabela 6.11 – Dados meteorológicos na data da aquisição das imagens .....	137
Tabela 6.12 – Testes de modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo .	143
Tabela 6.13 – Matriz de transição de passo único – T5 .....	146
Tabela 6.14 – Matriz de transição de passos múltiplos – T5.....	146
Tabela 6.15 – Matriz de transição de passo único – T6 .....	147
Tabela 6.16 – Matriz de transição de passos múltiplos – T6.....	147
Tabela 6.17 – Matriz de transição de passo único – T6_inf .....	148
Tabela 6.18 – Matriz de transição de passos múltiplos – T6_inf .....	148
Tabela 6.19 – Matriz de transição de passo único – T6_sup.....	149
Tabela 6.20 – Matriz de transição de passos múltiplos – T6_sup.....	149
Tabela 6.21 – Parâmetros de <i>Patcher</i> e <i>Expander</i> escolhidos para o teste T5 .....	151
Tabela 6.22 – Índices de similaridade mínima para o modelo 2011 – 2014 .....	153
Tabela 6.23 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T5.....	156
Tabela 6.24 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T6.....	158
Tabela 6.25 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T6_inf .....	158
Tabela 6.26 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T6_sup .....	158
Tabela 6.27 – Parâmetros morfológicos da bacia.....	160
Tabela 6.28 – Matriz de transição de passo único .....	161
Tabela 6.29 – Matriz de transição de passos múltiplos .....	162
Tabela 6.30 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2011 – 2019 .....	166
Tabela 6.31 – Distribuição do escoamento superficial na área da bacia .....	171
Tabela A.1 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T5.....	188
Tabela A.2 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T6.....	191
Tabela A.3 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T6_inf .....	192
Tabela A.4 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T6_sup .....	194

Tabela B.5 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer .....	196
------------------------------------------------------------------	-----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização das áreas de estudo segundo as unidades hidrográficas.....	9
Figura 3.2 – Mapa pedológico - área de estudo A.....	12
Figura 3.3 – Mapa geomorfológico - área de estudo A.....	18
Figura 3.4 – Mapa geológico - área de estudo A.....	20
Figura 3.5 – Bacias hidrográficas e unidades hidrográficas - área de estudo B.....	23
Figura 3.6 – Mapa pedológico - área de estudo B.....	24
Figura 3.7 – Mapa geomorfológico - área de estudo B.....	25
Figura 3.8 – Mapa geológico - área de estudo B.....	26
Figura 3.9 – Mapa de zoneamento territorial - área de estudo B.....	29
Figura 3.10 – Localização Paranoá Parque e vegetação área de estudo B.....	30
Figura 5.1 – Fluxograma metodológico geral.....	76
Figura 5.2 – Fluxograma metodológico para produção de mapas de uso e cobertura do solo.....	78
Figura 5.3 – Fluxograma para obtenção dos mapas de vulnerabilidade ambiental.....	82
Figura 5.4 – Modelo digital de terreno - área de estudo A.....	83
Figura 5.5 – Modelo digital de terreno - área de estudo B.....	83
Figura 5.6- Fluxograma da modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo.....	96
Figura 5.7 – Representação do método de comparação <i>Fuzzy</i> .....	101
Figura 5.8 – Fluxograma do cálculo do escoamento superficial direto.....	103
Figura 6.1 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 1985.....	105
Figura 6.2 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 1995.....	106
Figura 6.3 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 2005.....	108
Figura 6.4 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 2016.....	110
Figura 6.5 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo B para o ano 2009.....	112
Figura 6.6 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo B para o ano 2011.....	112
Figura 6.7 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo B para o ano 2014.....	113
Figura 6.8 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo o uso e cobertura do solo - área de estudo A.....	116
Figura 6.9 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo o uso e cobertura do solo - área de estudo B.....	117

Figura 6.10 – Mapa de declividade - área de estudo A .....	118
Figura 6.11 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a declividade - área de estudo A .....	118
Figura 6.12 – Mapa de declividade - área de estudo B.....	119
Figura 6.13 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a declividade - área de estudo B .....	120
Figura 6.14 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a pedologia - área de estudo A.	121
Figura 6.15 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a pedologia - área de estudo B.	122
Figura 6.16 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geomorfologia - área de estudo A .....	123
Figura 6.17 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geomorfologia - área de estudo B .....	124
Figura 6.18 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geologia - área de estudo A...	125
Figura 6.19 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geologia - área de estudo B...	126
Figura 6.20 – Mapa de vulnerabilidade ambiental - área de estudo A .....	130
Figura 6.21 – Mapa de vulnerabilidade ambiental - área de estudo B .....	131
Figura 6.22 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 18 de setembro de 1985 - área de estudo A .....	133
Figura 6.23 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 14 de setembro de 1995 - área de estudo A .....	134
Figura 6.24 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 09 de setembro de 2005 - área de estudo A .....	135
Figura 6.25 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 07 de setembro de 2016 - área de estudo A .....	136
Figura 6.26 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 18 de julho de 2009 área de estudo B.....	139
Figura 6.27 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 24 de julho de 2011 área de estudo B.....	140
Figura 6.28 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 16 de julho de 2014 área de estudo B.....	141
Figura 6.29 – Mapa das áreas utilizadas na modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo da área de estudo B .....	145
Figura 6.30 – Mapas de uso e cobertura do solo simulados para o ano de 2014.....	152

Figura 6.31 – Mapa de uso e cobertura do solo simulado para o ano de 2019 - teste T5..	156
Figura 6.32 – Mapas de uso e cobertura do solo simulados para o ano de 2019 com os testes T6, T6_inf e T6_sup .....	157
Figura 6.33 – Bacia do Córrego Taquari .....	160
Figura 6.34 – Mapas de uso e cobertura do solo simulados para os anos 2014 e 2019 ....	164
Figura 6.35 – Mapas de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Córrego Taquari .....	165
Figura 6.36 – Distribuição espacial dos Grupos Hidrológicos do Solo na bacia hidrográfica do Córrego Taquari.....	167
Figura 6.37 – Distribuição espacial dos valores de CN na bacia hidrográfica do Córrego Taquari.....	168
Figura 6.38 – Distribuição espacial do escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Córrego Taquari.....	170

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AC	Autômatos Celulares
AHP	Analytical Hierarchy Process (Análise Hierárquica de Processos)
AMC	Antecedent Moisture Conditions (Condições de Umidade Antecedente)
APA	Área de Proteção Ambiental
APM	Área de Proteção de Manancial
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
cm	Centímetro
CN	Curve Number (Número da Curva de Escoamento)
CSR	Centro de Sensoriamento Remoto
DF	Distrito Federal
DN	Digital Number (Número Digital)
EGO	Environment for Geoprocessing Objects
EUA	Estados Unidos da América
GDF	Governo do Distrito Federal
GHS	Grupos hidrológicos de solos
IDF	Intensidade Duração Frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
km	Quilômetro
LEGAL	Linguagem Espacial de Georreferência Algébrica
m	Metro
Maxver	Máxima Verossimilhança
mm	Milímetros
MDT	Modelo Digital de Terreno
NDVI	Normalize Difference Vegetation Index (Índice de vegetação normalizado)
Novacap	Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
NRCS	Natural Resources Conservation Service
PDOT	Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal
PI	Plano de Informação
RA	Região Administrativa

s	Segundo
SCS	Soil Conservation Service
SEDHAB	Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano
SIG	Sistema de Informação Geográfica
Spring	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SR	Sensoriamento Remoto
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
TOA	Top Of Atmosphere (Topo da atmosfera)
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United State Geological Survey
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
µm	Micrômetro

# 1. INTRODUÇÃO

As ações humanas sobre o meio ambiente provocam mudanças que alteram consideravelmente o equilíbrio e a dinâmica da natureza. Os processos de degradação causados pela ruptura deste equilíbrio têm conduzido os pesquisadores a uma busca por soluções que apontem para mecanismos de relacionamento entre causas e efeitos, levando a processos que acentuam os problemas ambientais.

Um dos principais problemas sociais, econômicos e ambientais enfrentados atualmente pela população mundial é a degradação dos recursos naturais. A acelerada alteração da paisagem natural e o crescimento das áreas urbanas nas últimas décadas, juntamente com o planejamento inadequado da gestão de recursos hídricos e a deficiência na execução das políticas públicas, têm proporcionado a deterioração da qualidade e quantidade da água e, conseqüentemente, da qualidade de vida da população.

Neste sentido, as técnicas e os produtos que fazem parte das geotecnologias, como o geoprocessamento, são aliados no desafio de planejar e ordenar o território e tem sido comum sua utilização para classificar uma área quanto ao uso e cobertura do solo, além de determinar a temperatura da superfície terrestre, relacionando-os para definir até que ponto essas modificações podem alterar as características naturais do ambiente. Os processos de urbanização de uma área, como a retirada da cobertura vegetal, estabelecimento de edificações e impermeabilização do solo, por meio de pavimentação, podem alterar a infiltração de água no solo, proveniente de precipitação, modificando o escoamento superficial e evaporação de água do solo, o que reduz a umidade relativa do ar e altera as temperaturas da superfície do solo.

As técnicas de geoprocessamento estão sendo cada vez mais aperfeiçoadas no campo da ciência, sendo responsáveis por representar, de maneira mais adequada possível, os fenômenos espaciais dinâmicos, como a expansão da área urbana, mudanças no uso e cobertura do solo e o escoamento da água em uma bacia hidrográfica. Dentre essas técnicas utilizadas na análise espacial estão os algoritmos empregados na modelagem ambiental e na análise multicritério, por meio da análise de vulnerabilidade ambiental.

Identificar ambientes naturais e antropizados, e determinar suas fragilidades são meios para definir, de forma mais coerente, as diretrizes e ações a serem implementadas no espaço

físico-territorial, buscando a eficiente execução do planejamento urbano. Assim, a utilização de Sistema de Informação Geográfica (SIG) que emprega algoritmos de geoprocessamento permite a realização de análises espaciais no que tange, dentre outros aspectos, à vulnerabilidade ambiental, além de auxiliar estudos que permitam o planejamento adequado para as áreas de risco ambiental mediante a ação humana ou as mudanças naturais (Costa *et al.*, 2006).

Sendo assim, destaca-se a importância de entender o gradiente de variação da vulnerabilidade ambiental em uma localidade que sofre com intervenções humanas, tornando-se essencial nos processos de gestão para a conservação dos recursos naturais e estabelecimento de resiliência nos sistemas envolvidos. Neste estudo, a vulnerabilidade ambiental refere-se à suscetibilidade do ambiente às pressões antrópicas, relacionando-se a vulnerabilidade natural a processos erosivos e sua potencialização devido à influência antrópica, por meio de informações de uso e cobertura do solo.

Diante desse cenário, ressalta-se também a importância de estudar a evolução do uso e cobertura do solo por técnicas de geoprocessamento em áreas que sofrem ocupação antrópica, para determinar a sua vulnerabilidade ambiental, modelar os cenários prospectivos do uso do seu solo, indicando a tendência espacial do crescimento urbano e demais mudanças futuras no uso do solo, e sua influência no escoamento superficial direto da área estudada, além de relacionar a temperatura da superfície terrestre com o uso e cobertura do solo e como indicador da capacidade de infiltração do solo.

Os modelos de dinâmica ambiental são utilizados para compreender os processos de mudanças na paisagem, que evoluem no tempo, e ocorrem de forma natural ou induzida pela ação antrópica, buscando replicar os possíveis caminhos da evolução da paisagem e, assim, possibilitar a avaliação de suas implicações futuras (Soares-Filho *et al.*, 2002). Esses modelos simulam a integração dos processos de dinâmica ambiental em bacias hidrográficas e são importantes para propor cenários futuros de desenvolvimento sustentável (Conway e Lathrop, 2005). Para avaliar essas mudanças, a modelagem dinâmica requer o uso de dados provenientes do sensoriamento remoto aéreo e/ou orbital, como as fotografias aéreas e as imagens de satélite, além dos cartográficos, como mapeamentos e levantamentos que caracterizem o uso e cobertura do solo no intervalo de tempo proposto (Soares-Filho *et al.*, 2007).

O elevado crescimento populacional que, por vezes, resulta no inadequado uso e cobertura do solo, juntamente com a mudança climática podem ocasionar diversos impactos em uma bacia hidrográfica, como a mudança no microclima da região e no regime de escoamento dos cursos de água, o desmatamento, os processos erosivos que causam aporte de sedimentos, a poluição dos corpos hídricos, o lançamento de resíduos sólidos, entre outros.

Os cenários prospectivos representados por mapas futuros de uso e cobertura do solo, obtidos com o sistema de modelagem da dinâmica ambiental, Dinamica EGO (desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais), fornecem subsídios para identificar as mudanças que poderão ocorrer na paisagem, como a expansão urbana futura. Essas mudanças estão diretamente ligadas às alterações que podem ocorrer nos componentes hidrológicos, modificando-os e alterando a disponibilidade de água e a biodiversidade local, e dentre esses componentes hidrológicos está o escoamento superficial direto, daí a importância em se analisar as mudanças que ocorrem em uma bacia hidrográfica pela ação humana, buscando identificar os fatores responsáveis por sua alteração.

Na quantificação do escoamento superficial direto em bacias hidrográficas que não possuem sistemas de monitoramento é necessária a utilização de um modelo que estime a parcela de chuva total que irá se transformar nesse escoamento, de forma a estimar a chuva excedente. Um dos modelos utilizados para esta finalidade é o Método do *Soil Conservation Service* (SCS), o *Runoff Curve Number Method* (USDA-NRCS, 2004). A partir de eventos de chuva, estima-se o volume de escoamento superficial direto, onde são considerados os principais fatores que afetam a geração do escoamento, como a cobertura do solo, características hidrológicas dos solos na forma de grupos hidrológicos de solos, e as condições de umidade antecedente da bacia (Sartori *et al.*, 2011).

A presente pesquisa está voltada para a bacia hidrográfica do Córrego Taquari e seu entorno, visto que neste córrego existe um ponto de captação de água da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) voltado para o abastecimento humano. Apesar de ter sua área quase totalmente protegida pela CAESB, observa-se que, com o passar dos anos, tem ocorrido a ocupação antrópica dessa bacia e do seu entorno, pela construção de edificações por particulares e pela implantação de um conjunto habitacional do Programa Morar Bem do Governo do Distrito Federal (GDF). Este processo de ocupação resulta em modificações das condições ambientais, como a supressão da vegetação nativa que altera a biodiversidade da fauna e da flora local, o aumento da área construída, com consequente

aumento de impermeabilização do solo que promove a redução da infiltração de água e, também, a alteração da quantidade, da intensidade e da duração do escoamento superficial direto, o que causa inundações e danos a infraestrutura urbana, com perdas materiais e humanas.

Como hipóteses dessa pesquisa apresentam-se: i) a existência de ocupação antrópica crescente da bacia hidrográfica do Córrego Taquari e entorno e que esta ocupação continuará ocorrendo no futuro, em um horizonte de curto e médio prazo; ii) a evolução da dinâmica ambiental, em termos de uso e cobertura do solo, irá influenciar na sua vulnerabilidade ambiental; iii) a crescente ocupação antrópica da área de estudo poderá aumentar o escoamento superficial direto em escala multitemporal.

Diante da problemática apresentada, ressalta-se a importância de se estudar a dinâmica de uso do solo e seus efeitos na temperatura da superfície terrestre, na vulnerabilidade ambiental e no escoamento superficial direto. Os resultados desta pesquisa podem ser utilizados como subsídios para a elaboração e implantação de políticas públicas para o planejamento da ocupação das áreas próximas ao Córrego Taquari.

A estrutura desta dissertação apresenta-se dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo, tem-se a introdução e contextualização do trabalho em pauta. O segundo capítulo apresenta os objetivos da pesquisa. O terceiro capítulo descreve a caracterização das áreas de estudo. O quarto capítulo contém a fundamentação teórica, onde estão apresentados conceitos julgados pertinentes ao entendimento e desenvolvimento da pesquisa e a revisão bibliográfica de estudos relacionados, buscando a aplicação destes conceitos. Este capítulo apresenta conceitos envolvidos na classificação temática de imagens, na análise multicritério da vulnerabilidade ambiental, na análise de temperatura da superfície terrestre, na modelagem da dinâmica ambiental e no escoamento superficial direto. No capítulo cinco está descrito o material utilizado e a metodologia adotada para alcançar os objetivos propostos. O capítulo seis apresenta os resultados obtidos na pesquisa e sua discussão. No sétimo, e último capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas por meio da realização desta pesquisa.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Em vista do exposto, o objetivo geral dessa pesquisa constitui-se em compreender a relação da dinâmica do uso e cobertura do solo com a vulnerabilidade ambiental a processos erosivos, a temperatura de superfície terrestre e o escoamento superficial direto, em área do Distrito Federal.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar avaliação multitemporal do processo de uso e cobertura do solo nas áreas de estudo;
- Determinar a vulnerabilidade ambiental da área de estudo em função de suas características naturais e antrópicas, por meio de algoritmos de geoprocessamento e análise hierárquica de processos;
- Analisar mudanças na temperatura de superfície terrestre e sua relação com a evolução do uso e cobertura do solo;
- Realizar simulação da dinâmica do uso e cobertura do solo, pelo sistema Dinamica EGO, considerando sua tendência histórica, para produzir cenários prospectivos;
- Executar uma análise de sensibilidade da relação entre as mudanças do uso e cobertura do solo ao longo dos anos e a sua alteração no escoamento superficial direto, na bacia hidrográfica do Córrego Taquari.

### **3. ÁREA DE ESTUDO**

#### **3.1. CLIMA DO DF**

O clima do Distrito Federal é caracterizado por duas estações bem definidas, uma chuvosa e quente, que compreende os meses de outubro a abril, e outra fria e seca, entre maio a setembro (Embrapa, 1978; Campos, 2004).

A temperatura anual varia entre 18 e 22°C, sendo julho o mês mais frio, com temperaturas médias de 16 a 18°C, e setembro e outubro os meses mais quentes, com temperaturas médias de 20 a 22°C (Embrapa, 1978). A temperatura de Brasília sofre influência da altitude e da latitude. As regiões de menor altitude são mais quentes do que as de maior altitude, já que o aquecimento da atmosfera se dá pela emissão da onda de calor pela superfície da Terra, e dessa forma, a medida que a onda emitida vai subindo a atmosfera ela vai dissipando seu calor. Com relação a latitude, quanto menor ela for maior será a temperatura, isso se deve a maior proximidade do local a linha do equador, onde o ângulo de incidência da radiação solar é praticamente perpendicular superfície, fazendo com que a dispersão do calor seja menor do que em zonas temperadas e/ou polares (Baptista, 1998).

De acordo com classificação de Köppen, o DF tem clima tropical, com concentração da precipitação pluviométrica no período de verão. Há significativas diferenças de precipitação dentro de sua área, porém as variações altimétricas são as responsáveis pelas variações na temperatura, o que permite observar os seguintes tipos climáticos (Embrapa, 1978; Baptista, 1998).

- Aw – Tropical: Clima de savana, com temperatura superior a 18°C no mês mais frio. Situa-se em áreas com cotas altimétricas abaixo de 1.000 metros, por exemplo as bacias hidrográficas dos rios São Bartolomeu, Preto, Descoberto e Maranhão.
- Cwa - Tropical de Altitude: Temperatura inferior a 18°C no mês mais frio e média superior a 22°C no mês mais quente. Esse tipo climático encontra-se na unidade geomorfológica Pediplano de Brasília, cuja cota está entre 1.000 e 1.200 metros.
- Cwb - Tropical de Altitude: apresenta temperatura inferior a 18°C no mês mais frio, e no mês mais quente a média é inferior a 22°C. Esse tipo climático encontra-se na unidade geomorfológica Pediplano Contagem/Rodeador, cuja cota altimétrica está acima 1.200 metros.

A porcentagem de umidade oscila diariamente de acordo com os períodos de maior ou menor temperatura, com essa oscilação chega-se ao valor de umidade relativa do ar, sendo esta entendida como a variação percentual do vapor d'água na composição do ar atmosférico (Baptista, 1998). Na estação meteorológica Brasília a umidade relativa do ar oscila, aproximadamente, entre 50 a 80%, porém é uma característica comum do cerrado, que no inverno, principalmente nos meses de julho a setembro, a umidade relativa do ar alcance níveis muito baixos, tendo sido registrados valores inferiores a 15% (Baptista, 1998; Campos, 2004).

A média anual de pluviometria varia entre 1.500 e 2.000 mm, o trimestre mais chuvoso é novembro, dezembro e janeiro, sendo o mês de dezembro o de maior total de precipitação, já o trimestre com menor índice pluviométrico é junho, julho e agosto, sendo agosto o que apresenta menor total de precipitação (Embrapa, 1978).

### **3.2. HIDROGRAFIA DO DF**

O Distrito Federal abrange três das doze regiões hidrográficas do Brasil: Paraná, São Francisco e Tocantins-Araguaia (Campana *et al.*, 1998; GDF 2012). A região hidrográfica do Paraná localiza-se na região centro-oeste do DF e abrange cerca de 62,5% de sua área; a região hidrográfica do São Francisco compreende a região leste, com 24,2% da área; e 13,3% restantes da área do DF faz parte região hidrográfica do Tocantins/Araguaia, compreendendo a região noroeste. Considerando os principais rios das três regiões hidrográficas, realizou-se a subdivisão das mesmas em sete bacias hidrográficas: São Bartolomeu, Lago Paranoá, Descoberto, Maranhão, Preto, Corumbá e São Marcos. Para efeito de planejamento e gerenciamento as bacias hidrográficas foram divididas em 36 unidades hidrográficas conforme apresentado na (Secretaria do Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia (SEMATEC), 1994 apud Campana *et al.*, 1998), conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Regiões, bacias e unidades hidrográficas do DF  
(SEMATEC, 1994 apud Campana *et al.*, 1998).

<b>Região Hidrográfica</b>	<b>Bacia Hidrográfica</b>	<b>Unidade Hidrográfica</b>	
Paraná	Rio São Bartolomeu	Pipiripau	
		Mestre d'armas	
		Sobradinho	
		Paranoá	
		Tabocas	
		Papuda	
		Cachoeirinha	
		Santana	
		Saia Velha / Maria Pereira	
		Lago Paranoá	Santa Maria / Torto
			Bananal
			Lago Paranoá
			Ribeirão do Gama
Rio Descoberto	Riacho Fundo		
	Lago Descoberto		
	Dois Irmãos		
	Melchior / Belchior		
Rio Corumbá	Buriti		
	Engenho das Lages		
	Alagado / Ponte Alta		
São Francisco	Rio São Marcos	Santa Maria	
		Samambaia	
	Rio Preto	Santa Rita	
		Jacaré	
		São José	
		Extrema	
		Buriti Vermelho	
		Alto Jardim	
		Médio Jardim	
		Baixo Jardim	
Capão do Lobo			
São Bernardo			
Tocantins / Araguaia	Rio Maranhão	Vereda Grande	
		Sonhem	
		Pedreira	
		Palma	

### 3.3. ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

Para o estudo bacia hidrográfica do Córrego Taquari e seu entorno, foram selecionadas duas áreas de estudo, localizadas no Distrito Federal, com intuito de estudar a sua vulnerabilidade e dinâmica ambiental. A primeira área de estudo, denominada de área de estudo A, localizada nas coordenadas geográficas 15°35'22,61" a 15°57'5,871" de latitude sul e 48°1'9,378" a 47°29'26,786" de longitude oeste, com área de 2.250,17 km<sup>2</sup> sendo, portanto, a de maior

dimensão e abrangendo as seguintes unidades hidrográficas: Lago Paranoá, Paranoá, Sobradinho, Tabocas, estas em sua totalidade, e parcialmente, Riacho Fundo, Cachoeirinha, Papuda, Baixo, Médio e Alto Jardim, Extrema, Pípiripau, Mestre D'Armas e Santa Maria/Torto, representada na Figura 3.1 pelo retângulo amarelo. A segunda área de estudo possui área de 47,49 km<sup>2</sup>, abrange a bacia hidrográfica do Córrego Taquari e o empreendimento de parcelamento do solo denominado Paranoá Parque, pertencente ao Programa Morar Bem do Governo do Distrito Federal (GDF), localizada nas coordenadas geográficas 15°43'13,619" a 15°46'39,344" de latitude sul e 47°49'32,508" a 47°45'19,993" de longitude oeste e abrange parcialmente três unidades hidrográficas, a do Lago Paranoá, a do Paranoá e do Sobradinho, representada na Figura 3.1 pelo quadrado vermelho.

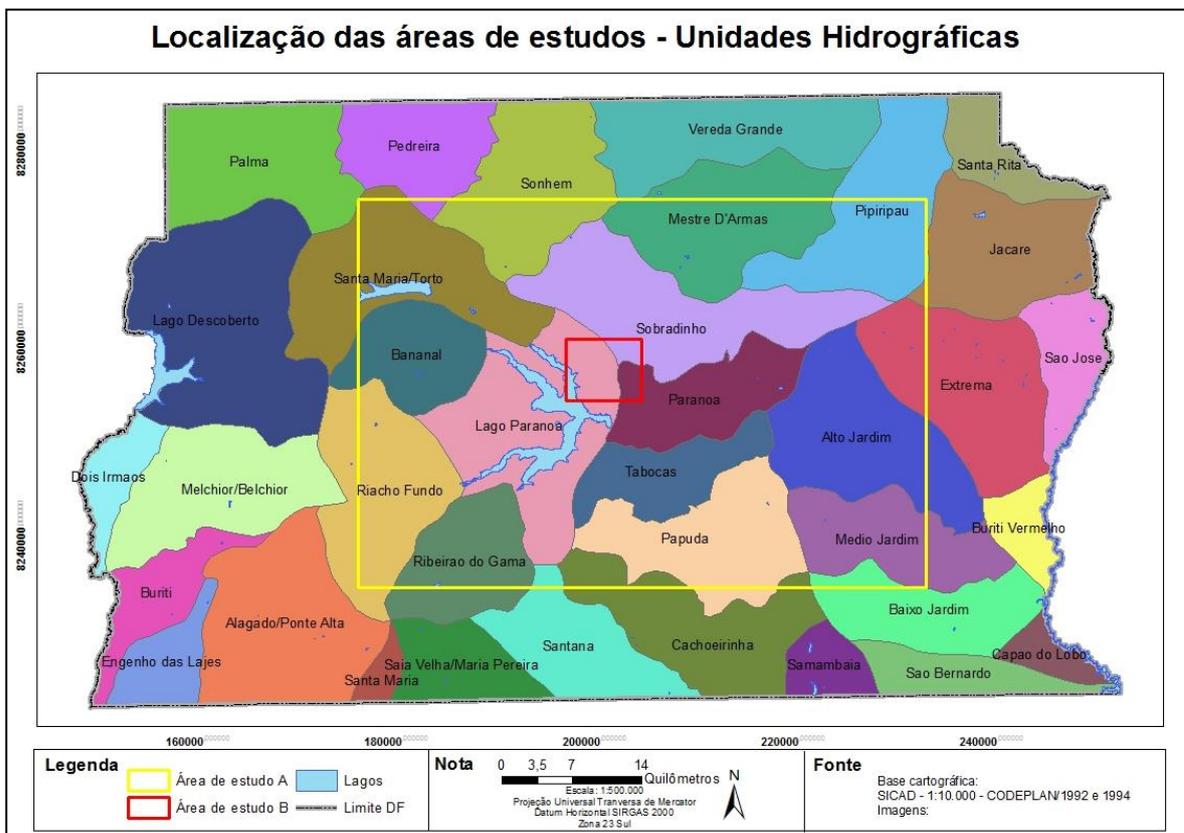


Figura 3.1 – Localização das áreas de estudo segundo as unidades hidrográficas

A escolha de duas áreas de estudo buscou compreender o processo de urbanização e suas consequências, primeiramente, de forma macro (área de estudo A), em seguida, em uma área micro (área de estudo B), de maneira a auxiliar a definição de cenários prospectivos por meio da tendência histórica de alteração do uso e cobertura do solo. Sendo assim, a área de estudo A foi escolhida por estar representada pelo Plano Piloto de Brasília e por outras regiões administrativas que apresentaram, durante décadas, crescente expansão urbana. Já a área de

estudo B foi definida pela proximidade do Plano Piloto e por apresentar um corpo hídrico de captação de água para abastecimento, ressaltando-se a importância de estudar o processo de urbanização de uma bacia hidrográfica e seus efeitos.

### 3.4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO A

#### 3.4.1. Hidrografia

Na área de estudo A são identificadas as mesmas três regiões hidrográficas presentes no DF. A região hidrográfica Paraná é representada pelas bacias hidrográficas do Rio São Bartolomeu e do Lago Paranoá, a do São Francisco pela bacia do Rio Preto e a do Tocantins-Araguaia pela bacia do Rio Maranhão, a descrição das bacias hidrográficas, segundo Campana *et al.* (1998), é apresentada a seguir:

- **Bacia do Rio São Bartolomeu** – é a maior bacia hidrográfica do DF e representa 44,5% da área de estudo A, nasce no norte do DF e se estende no sentido norte-sul, drenando todo o seu trecho central. Situa-se nesta bacia parte das regiões administrativas de Paranoá, Planaltina, Santa Maria, São Sebastião e Sobradinho, entretanto apenas os núcleos urbanos de Planaltina, São Sebastião e Sobradinho estão situados nos seus limites. A Bacia do Rio São Bartolomeu limita-se: ao norte com a Bacia do Rio Maranhão; a leste com a Bacia do Rio Preto; a sudeste com a Bacia do Rio São Marcos; a oeste com a Bacia do Lago Paranoá; e a sudoeste com a Bacia do Rio Corumbá. As unidades hidrográficas que pertencem a Bacia do Rio São Bartolomeu e fazem parte da área de estudo são: Pípiripau, Mestre d'armas, Sobradinho, Paranoá, Tabocas, Papuda, Cachoeirinha e Santana.
- **Bacia do Lago Paranoá** – está localizada na porção central do Distrito Federal e faz limite com a Bacia do Rio Maranhão, ao norte, com a Bacia do Rio São Bartolomeu, a leste e ao sul, com a Bacia do Rio Corumbá, a sudoeste e com a Bacia do Rio Descoberto, a oeste. É uma das bacias que apresenta maior contingente populacional, pois nela estão situadas as Regiões Administrativas (RA) de Brasília, Lago Norte, Lago Sul, Núcleo Bandeirante, Riacho Fundo, Candangolândia, Cruzeiro e Guará, além de parte da Região Administrativa (RA) de Taguatinga. Representa 34,95% do total da área de estudo A, e está distribuída entre as unidades hidrográficas: Santa Maria / Torto, Bananal, Lago Paranoá, Ribeirão do Gama e Riacho Fundo.

- **Bacia do Rio Preto** – está localizada na porção oriental do DF, faz limite a oeste com a Bacia do Rio São Bartolomeu e a sudeste com a Bacia do Rio São Marcos. Seu curso d'água principal, o rio Preto, divide o DF com os Estados de Goiás e Minas Gerais, e não apresenta nenhum núcleo urbano nos seus limites. Representa 16,62% da área de estudo A e as unidades hidrográficas que pertencem a Bacia do Rio Preto são: Jacaré, Extrema, Alto Jardim, Médio Jardim e Baixo Jardim.
- **Bacia do Rio Maranhão** – está localizada na porção norte do DF e faz limite a sul com as bacias do Rio Descoberto, São Bartolomeu e Lago do Paranoá. Apesar de não apresentar nenhum núcleo urbano em seus limites, na Bacia do Rio Maranhão estão situadas as RAs de Brazlândia, Planaltina e Sobradinho. Os principais cursos d'água são os rios Maranhão, Palmeiras, Sonhim, Palma e Sal. Na área de estudo A representa a menor porcentagem em área (3,98%), com as unidades hidrográficas de Vereda Grande, Sonhem e Pedreira.

### 3.4.2. Pedologia

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2013) classifica o solo como uma coleção de corpos naturais, formados por matérias minerais e orgânicos que pode apresentar partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais e dinâmicas, e ocupa a maior parte da superfície continental do planeta e contém matéria viva, podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e modificados por meio de interferências antrópicas.

Os solos do Distrito Federal, por sua vez, são produtos do intemperismo de rochas dos grupos Paranoá, Araxá, Canastra e Bambuí e foram levantados pela Embrapa em 1978, e descritos no Boletim Técnico 53 – “Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal” (Embrapa, 1978), e em 1999, a Embrapa fez a reclassificação dos solos conforme o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa, 1999). No DF existem três classes de solos mais significativas: o Latossolo Vermelho (antiga classe do Latossolo Vermelho-Escuro), o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Cambissolo, que juntos representam 85,49% da área total do DF (Martins, 1998). Na área de estudo A essas três classes de solo somam cerca de 83% da área total, os 17% restantes são classificados como argissolo vermelho, argissolo vermelho-amarelo, espodossolo, neossolo quartzarênico, nitossolo, plintossolo e solos hidromórficos indiscriminados, representados no mapa pedológico, escala 1:100.000 obtido

de Embrapa (1999) e apresentado na Figura 3.2, descritos a seguir conforme definições apresentadas por Reatto *et al.* (2004) e Embrapa (2013).

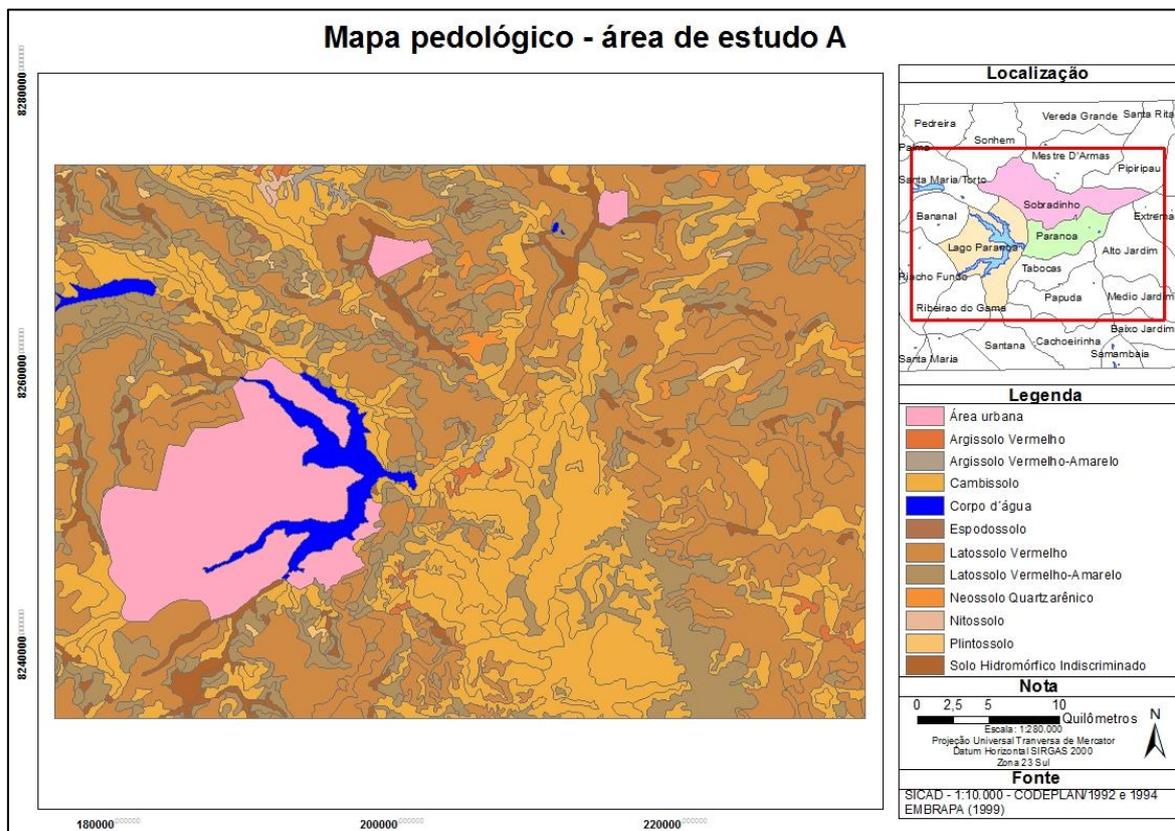


Figura 3.2 – Mapa pedológico - área de estudo A  
 Fonte: Embrapa (1999)

- **Argissolos**

Os argissolos compreendem os solos Argissolo Vermelho (antiga classe do Podzólico Vermelho-Escuro) e Argissolo Vermelho-Amarelo (antiga classe do Podzólico Vermelho-Amarelo). É uma classe de solos heterogênea que apresenta um incremento substancial no teor de argila com profundidade e/ou evidências de movimentação de argila do horizonte A para o horizonte B. Compreende solos constituídos por materiais minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural de cores avermelhadas, com tendência à tonalidade escura e teores de óxidos de ferro inferiores a 15%.

Na paisagem, os argissolos, ocupam a porção inferior das encostas, em geral naquelas côncavas onde o relevo apresenta-se ondulado (8% a 20% de declive) ou forte-ondulado (20% a 45% de declive).

Em relação à morfologia, o horizonte A é menos argiloso e estruturado do que o horizonte B. A permeabilidade é diferenciada dentro do perfil, devido ao gradiente de textura, podendo haver formação de erosões em sulcos no horizonte A, sendo comum encontrar argissolos com o horizonte A decapitado. Considerando a estrutura física, os argissolos apresentam profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, assim como a textura, que varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt.

Apesar de ocorrer em ambientes variados, no geral, os argissolos são comumente encontrados em área de cerrado e floresta, sendo sua fertilidade natural uma característica bastante variável.

- **Cambissolos**

Esses solos, geralmente, estão associados a relevos mais movimentados (ondulados e forte-ondulados), e variam desde rasos a profundos, atingindo entre 0,2 a 1 m. Seu horizonte subsuperficial é denominado “B incipiente” e, apesar de ser submetido a pouca alteração física e química é o suficiente para desenvolvimento de cor e estrutura. De forma geral, apresentam minerais primários facilmente intemperizáveis, teores mais elevados de silte, indicando baixo grau de intemperização.

Os cambissolos apresentam coloração bruno-amarelada no horizonte superficial e vermelho-amarelada no subsuperficial. Quimicamente, são solos distróficos em função do material de origem e do clima local. A sua estrutura é variável, predominando blocos subangulares, assim como a textura, que varia desde muito argilosa até franco-arenosa, com cascalho ou sem cascalho. Por serem encontrados em relevos mais íngremes ou mais rasos, os cambissolos deveriam ser destinados à preservação permanente. Em áreas com este tipo de solo é indicado o reflorestamento com espécies nativas, uma vez que o replantio dessas espécies possibilita a proteção da cobertura do solo.

- **Espodossolos**

Os espodossolos (antiga classe do Podzol) são solos constituídos por material mineral com horizonte B espódico subjacente a horizonte eluvial E, a horizonte A, podendo ser de qualquer tipo.

O horizonte A apresenta cor que varia de cinzenta até preta e o horizonte E desde cinzenta ou acinzentada-clara até praticamente branca, já no horizonte espódico a cor varia desde cinzenta, de tonalidade escura ou preta, até avermelhada ou amarelada. A textura é predominantemente arenosa, sendo menos comumente textura média e raramente argilosa no horizonte B. Em geral, são solos com baixa reserva de nutrientes e, por isto, são muito pobres em fertilidade, de moderado a fortemente ácidos, normalmente com saturação por bases baixas.

- **Latosolos**

Assim como acontece no DF, os latossolos, ocupam a maior parte da área de estudo A, e compreendem os Latossolos Vermelhos (antiga classe do Latossolo Vermelho-Escuro) e os Latossolos Vermelho-Amarelos (antiga classe do Latossolo Vermelho-Amarelo). Esses solos são predominantes em relevo do tipo chapada, sendo que na primeira superfície geomorfológica, onde a topografia é plana a suave-ondulada há predomínio de latossolos mais intemperizados com maior porcentagem de óxidos de Fe e principalmente óxidos de alumínio, com matiz mais amarelada. Já segunda superfície geomorfológica, ocorrem os latossolos de origem de depósitos de sedimentos, normalmente, menos intemperizados, mais caulíníticos e vermelhos.

Os latossolos são altamente intemperizados, evoluídos geologicamente como resultado de transformações enérgicas no material constitutivo. São solos minerais, não hidromórficos, profundos, normalmente superiores a 2 m, com horizonte B latossólico muito espesso, maior que 50 cm. Possuem sequência de horizontes A, B e C com pouca diferenciação e cores variando de vermelha a amarelada, geralmente escuras no A, vivas no B e mais claras no C.

Como estruturas predominantes destacam-se blocos subangulares (pouco desenvolvidos) e/ou em forma muito pequena granular podendo haver partes com aspecto maciço poroso. Apresentam teor de argila que varia entre 15 a 80% e silte entre 10 e 20%. De acordo com a natureza da textura, estrutura e situação topográfica podem ter a drenagem classificada com excessiva, forte e acentuada. São solos com alta permeabilidade de água, e a capacidade de água disponível até 2 m de profundidade varia, em média, de 500 a 760 mm para os solos de textura muito argilosa, de 300 a 500 mm para os de textura argilosa e de 260 a 330 mm para os de textura média.

- **Neossolos Quartzarênicos**

Nos solos do tipo Neossolos Quartzarênicos, (antiga classe das Areias Quartzosas) do DF a vegetação natural predominante é a de cerrado e/ou campo cerrado, normalmente, são solos profundos, superiores a 2 m, com textura arenosa ou franco-arenosa, constituídos essencialmente de quartzo, sendo no máximo 15% de argila e com sequência de horizontes do tipo A-C. Esse tipo de solo é muito suscetível à erosão, devendo ser destinados à preservação quando ocorrem nas cabeceiras de drenagem e adjacentes a mananciais.

Esses solos apresentam-se normalmente em relevo plano ou suave-ondulado, estando relacionados com sedimentos arenosos de cobertura e a alterações de rochas quartzíticas e areníticas. No aspecto químico, é caracterizado por apresentarem baixa disponibilidade de nutrientes para as plantas. A estrutura morfológica caracteriza-se por camadas de areia inconsolidadas cuja estrutura é fraca, pouco coerente e constitui basicamente grãos simples. São muito porosos, excessivamente drenados e com capacidade de água disponível até 2 m de profundidade variando em média de 70 a 200 mm.

- **Nitossolos**

Os Nitossolos que ocorrem no DF são derivados de rochas calcárias e ocupam as porções média e inferior de encostas onduladas até forte-onduladas que devido ao uso agrícola, ficam expostos à erosão. A vegetação original remanescente mais comum é mata seca semidecídua. De maneira geral, sua estrutura é bem desenvolvida no horizonte B nítico, sendo do tipo prismática ou em blocos subangulares. Cerosidade geralmente abundante. Apresentam semelhança com os argissolos no aspecto morfológico, sendo menos expressivo o gradiente textural. Caracterizados com cor vermelho-escuro tendendo à arroxeadada. Na sua maioria são eutróficos e bastante procurados para uso na pecuária e agricultura. A textura ao longo do perfil é argilosa ou muito argilosa, com reduzido gradiente textural entre o horizonte A e B. São bem porosos e apresentam boa drenagem.

- **Plintossolos**

Os plintossolos são típicos de regiões quentes e úmidas com estação seca definida, oscilando de 5 a 6 meses. Presentes em relevo plano e suave-ondulado, em áreas deprimidas e nos terços inferiores da encosta onde há importante movimentação lateral de água. O horizonte de subsuperfície apresenta manchas avermelhadas distribuídas no perfil de aspecto

variegado, resultado da concentração diferencial de ferro do solo, chamadas de plintita, denominando-se de horizonte plíntico. Seu aspecto multicolorido com cores contrastantes o torna bem visível, ficando realçadas as partes mais vermelhas formadas pela plintita. Esta é submetida a ciclos de umedecimento e secagem, o que a torna endurecida de maneira irreversível, transformando-se gradualmente em petroplintita, os solos com essa característica são conhecidos como Plintossolos Pétricos.

São solos que apresentam grande variabilidade em suas propriedades químicas, sendo, na região, distróficos e com alto ou baixo teor de carbono orgânico no horizonte superficial. A profundidade do horizonte plíntico relaciona-se com as principais limitações físicas, pois, quando a plintita ou a petroplintita são mais rasas, formam uma camada contínua e espessa, limitando à permeabilidade e restringindo o enraizamento das plantas.

- **Solos Hidromórficos Indiscriminados**

A denominação ‘solos hidromórficos indiscriminados’ é utilizada para referir-se aos espodossolos, que já foram definidos anteriormente, e aos gleissolos, que será descrito aqui, já que suas diferenças estão no horizonte A.

Os geissolos encontram-se permanentemente ou periodicamente saturados por água, com exceção de quando estão sendo drenados artificialmente, podendo em qualquer circunstância se elevar até a superfície por meio de ascensão capilar. A água permanece estagnada internamente ou a saturação ocorre por fluxo lateral no solo. Identifica-se a drenagem como mal drenado ou muito mal drenado, ocorrendo, com frequência, espessa camada escura de matéria orgânica mal decomposta sobre uma camada acinzentada (gleizada), resultante de ambiente de oxirredução.

No horizonte superficial observa-se cores desde cinzentas até pretas, com espessura variando entre 10 e 50 cm e teores de carbono orgânico de médio a altos. O processo de gleização implica na apresentação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas.

Ao longo do perfil a textura é bastante variável. Quando argilosos ou muito argilosos, apresentam consistência plástica e pegajosa. Podem ser ricos ou pobres em bases ou com teores de alumínio elevados por estarem posicionados em áreas sujeitas a contribuições de material transportado das posições mais elevadas, uma vez que são formados em terrenos de recepção ou trânsito de produtos transportados.

### 3.4.3. Geomorfologia

É vasto o acervo de estudos de geomorfologia da região do Distrito Federal, que, inicialmente foram desenvolvidos pela empresa *Donald J. Belcher and Associates*, resumidos no “Relatório técnico sobre a nova capital da república – Relatório Belcher” de 1954, seguidos por estudos de Penteadó (1976), IBGE (1977), Embrapa (1978), CODEPLAN (1984) e Novaes Pinto (1987, 1988, 1994).

O Distrito Federal situa-se em uma das porções mais elevadas do Planalto Central do Brasil, onde está localizada as cabeceiras de afluentes dos três maiores rios brasileiros – o rio Maranhão (afluente do rio Tocantins), o rio Preto (afluente do rio São Francisco) e os rios São Bartolomeu e Descoberto (tributários do rio Paraná). Destaca-se como responsáveis pela evolução morfodinâmica da região o tipo de vegetação, o clima, a estruturação neotectônica, a evolução dos perfis de alteração além de processos de incisão de vales nas amplas chapadas elevadas (Campos, 2004).

A paisagem natural do DF é integrada por 13 unidades geomorfológicas, que foram agrupadas, devido similaridades morfológicas e genéticas, em três tipos de paisagem (macrounidades) características da região de cerrados, que são as Regiões de Chapadas, Regiões de Dissecação Intermediária e Regiões Dissecadas de Vales (Novaes Pinto, 1994). Sua caracterização está descrita a seguir:

- **Região de Chapada** – é caracterizada por relevo plano a plano-ondulado, com cotas a cima de 1000 m, com destaque para a Chapada de Contagem, que praticamente contorna a cidade de Brasília. As unidades Chapada Divisora São Bartolomeu - Preto e a Divisora Descoberto - Alagado desenvolvem-se sobre ardósias, filitos e micaxistos, já as Chapadas da Contagem, Brasília e Pípiripau desenvolvem-se sobre quartzitos (Novaes Pinto, 1994). Sobre essa superfície foram edificadas as regiões administrativas de Ceilândia, Taguatinga, Gama, Recanto das Emas, Riacho I e II, Samambaia, Santa Maria, e os condomínios da região do Jardim Botânico (Campos e Freitas-Silva, 2001).
- **Área de Dissecação Intermediária** – essa paisagem compreende áreas fracamente dissecadas, drenadas por pequenos córregos, modeladas sobre ardósias, filitos e quartzitos (unidades Depressão do Paranoá e Vale do Rio Preto). Havendo, nos

interflúvios, presença de couraças, latossolos e fragmentos de quartzo (Novaes Pinto, 1994). A cidade de Brasília e as regiões administrativas Candangolândia, Cruzeiro, Guará I e II, Núcleo Bandeirante, Setor Sudoeste, Setor de Indústria e Abastecimento, e Setor de Mansões Park Way, foram edificadas sobre essa macrounidade (Campos e Freitas-Silva, 2001).

- **Região Dissecada de Vale** – corresponde às depressões de litologias de resistências variadas, ocupadas pelos principais rios da região. Ocorre no baixo curso do rio Paranoá, já fora dos limites da bacia. É condicionada por unidades muito impermeáveis, com pequena capacidade de infiltração (Novaes Pinto, 1994).

A proposta de compartimentação geomorfológica de Martins e Baptista (1998) integra conceitos propostos por CODEPLAN (1984) e por Novaes Pinto (1994) e descreve características do relevo em função da altimetria e declividade, com as seguintes classes: Chapadas Elevadas, Escarpas, Planos Intermediários, Planícies e Rebordos. A Figura 3.3 e a descrição a seguir representam a classificação do relevo considerando a proposta de Martins e Baptista (1998).

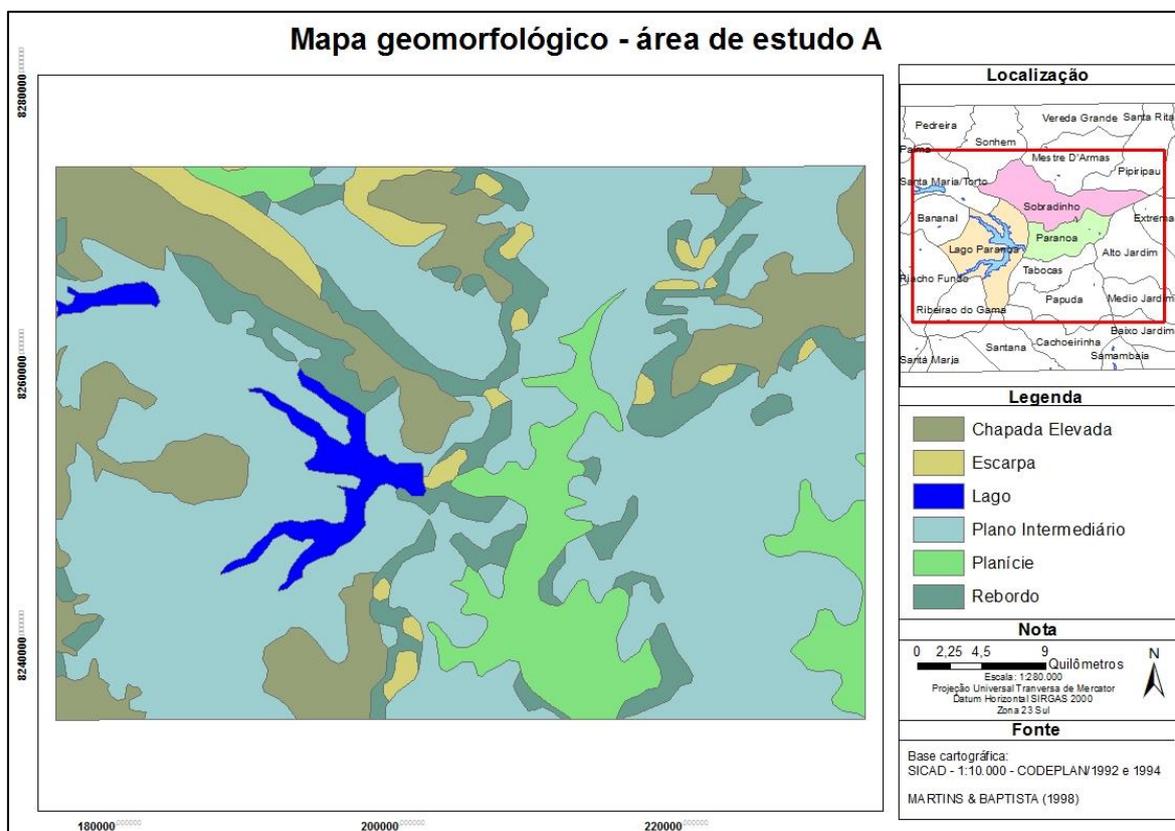


Figura 3.3 – Mapa geomorfológico - área de estudo A  
Fonte: Martins e Baptista (1998)

De acordo com a legenda do mapa geomorfológico da Figura 3.3, são apresentadas a seguir as compartimento geomorfológicas do DF. As Chapadas Elevadas, que representam 17% da área de estudo A, ampliam o conceito do Pediplano Rodeador-Contagem e da Região de Chapadas, envolvendo porções da Depressão do Paranoá, como a feição convexa observada no núcleo do semi-domo de Brasília.

A proposta de compartimentação geomorfológica de Martins e Baptista (1998) apresenta área contínuas com a presença de Escarpas, representando 4% da área de estudo A, como todas as porções de contato entre o semi-domo de Brasília e as dissecadas das bacias mais importantes, destacando a porção norte.

A feição de Planos Intermediários representa cerca de 57%, é definida como porções planas extensivamente distribuídas na região, limitada por Rebordos e Escarpas e intermediária as Chapadas Elevadas e Planícies, com grande semelhança ao Pediplano de Brasília.

As feições denominadas como Planícies representam superfície limitada pelos canais dos principais rios da região e os Planos Intermediários, representando 10% da área de estudo A.

Os Rebordos, por sua vez, representam 10% da área de estudo A, e são feições que não haviam sido contempladas pelas outras propostas, sua gênese pode estar associada ao controle lito-estrutural, pedológico e hidrodinâmico. Eles são responsáveis por delinear grande parte dos limites entre outros compartimentos, individualizando as porções de Chapadas Elevadas e Planos Intermediários, acima; e de Escarpas e Planícies, abaixo.

#### **3.4.4. Geologia**

A geologia representa a base para a caracterização do meio físico, pois em função do substrato geológico estão condicionadas características como formas de relevo, evolução geomorfológica, o tipo, características e composição química dos solos e manto de intemperismo, a distribuição das águas subterrâneas, controle das disponibilidades das águas superficiais, a natureza e intensidade dos processos erosivos dentre outros. No Distrito Federal são reconhecidos quatro conjuntos litológicos, os grupos, Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, contribuindo, respectivamente, com cerca de 65, 15, 5 e 15% de sua área total (Freitas-Silva e Campos, 1998). Na área de estudo A o grupo Paranoá representa 66,75% de sua área total, enquanto o Canastra e Bambuí representam 25,28% e 7,97%, respectivamente,

não existindo na área o grupo Araxá. A Figura 3.4 representa o mapa geológico da área de estudo A seguido de sua descrição.

O grupo Paranoá ocupa a maior área no Distrito Federal e concentra o maior número de centros urbanos (o Plano Piloto e todas as Cidades Satélites com exceção de São Sebastião e Vale do Amanhecer), sendo a sua unidade geológica mais importante (Freitas-Silva e Campos, 1998).

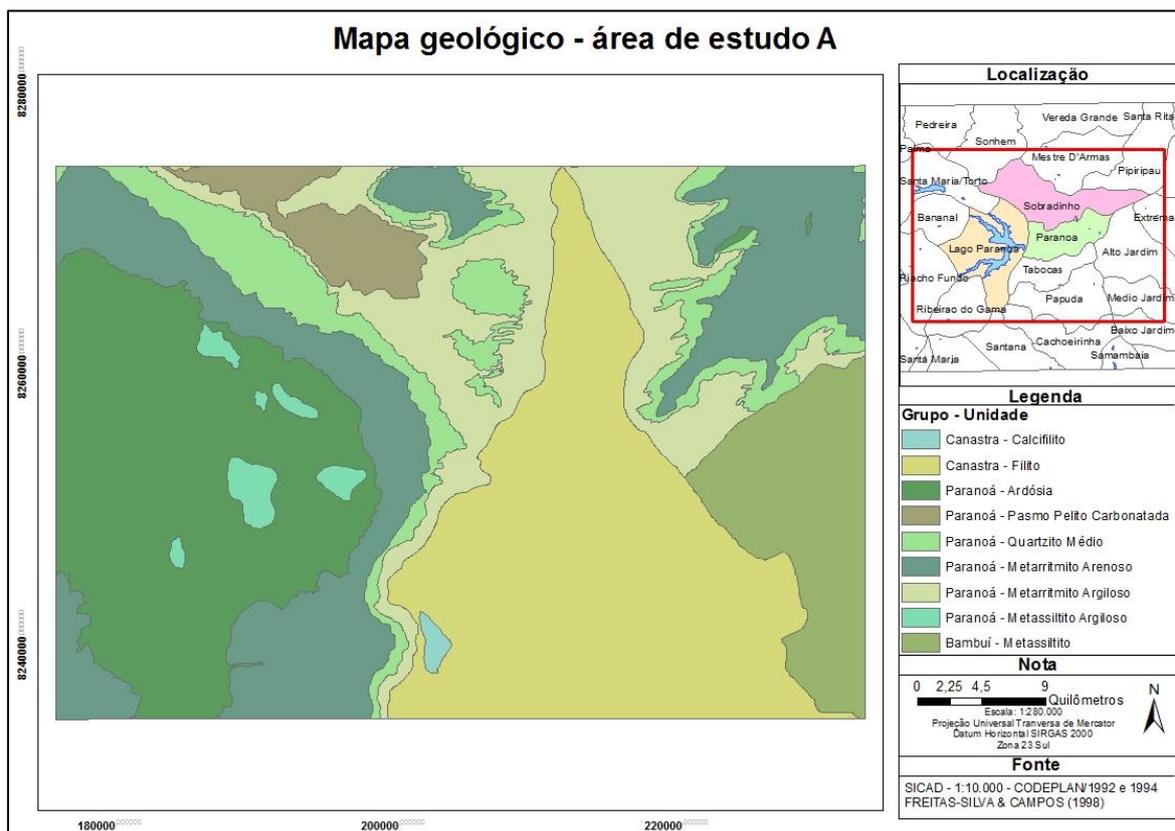


Figura 3.4 – Mapa geológico - área de estudo A  
Fonte: Freitas-Silva e Campos (1998)

Por sua vez, Faria (1995) propôs uma estratigrafia aplicável a porção externa da Faixa Brasília, atribuindo siglas às unidades da base para o topo sendo elas: SM, R1, Q1, R2, Q2, S, A, R3, Q3, R4, PC, entretanto na área de estudo ocorrem apenas as seis unidades do topo, que terão suas principais características descritas a seguir:

- **Unidade S - Metassilito Argiloso:** representa a base da estratigrafia do Grupo Paranoá no DF. É composta por um conjunto de metassilitos argilosos homogêneos, com que quando frescos apresenta coloração cinza esverdeada a amarelada e, com o aumento da alteração intempérica, passa a apresentar tons rosados e vermelho escuro. A área de exposição desta unidade é bastante restrita, sendo os raros afloramentos

observados localmente no interior do Domo de Brasília, onde esta unidade também foi frequentemente atravessada por poços tubulares.

- **Unidade A – Ardósia:** apresenta contato transicional com a Unidade S, sendo constituída por ardósias homogêneas de cor cinza esverdeada, sofrendo a alteração intempérica passa a apresentar tons vermelhos característicos. Neste conjunto, são observadas duas foliações penetrativas que representam clivagens ardosianas. Essa unidade não é bem exposta no Distrito Federal, principalmente, devido à baixa resistência aos processos de intemperismo, e os seus afloramentos podem ser observados em voçorocas, drenagens e cortes de estradas, como por exemplo, estrada Parque de Taguatinga e Sobradinho.
- **Unidade R<sub>3</sub> - Metarritmito Arenoso:** caracterizado por intercalações de estratos centimétricos a métricos de quartzitos finos a médios com níveis geralmente mais delgados de metassiltitos argilosos, metalamitos siltosos e metalamitos micáceos. Localmente são observados pacotes de até 10 metros de espessura que destacam do conjunto rítmico. A espessura total deste conjunto pode alcançar 90 metros.
- **Unidade Q<sub>3</sub> - Quartzitos Médios:** caracterizada por quartzitos finos a médios muito localmente grossos, brancos ou cinza claro (cinza escuro quando frescos), bem selecionados, maduros mineralogicamente, em geral muito silicificados e, onde encontram-se menos recristalizados, mostram grãos arredondados. Seu aspecto maciço é atribuído à intensa silicificação, sendo constante na maioria das exposições no Distrito Federal. Esta unidade sustenta as áreas de chapada mais elevadas do Distrito Federal, suas melhores exposições são observadas nas antigas explorações de areia e no Vale do Rio Paranoá a jusante da barragem homônima.
- **Unidade R<sub>4</sub> - Metarritmito Argiloso:** esta unidade é representada por um metarritmito homogêneo com intercalações centimétricas regulares de metassiltitos, metalamitos e quartzitos finos que apresentam coloração que variam de acordo com os diferentes graus de intemperismo (cinza, amarelada, rosada ou avermelhada). É bem exposta junto às bordas do Domo de Brasília e na porção externa do Domo de Sobradinho, marcando um relevo mais movimentado com vales mais encaixados.

- **Unidade PC - Pelito Carbonatada:** predominantemente pelítica com ardósias cinzas e metassiltitos argilosos associados com lentes de mármore finos que podem conter estruturas algais do tipo estromatólitos colunares e cônicos. São comuns os níveis decimétricos a métricos, lenticulares ou não, de quartzitos médios, grossos e até conglomeráticos, apresentando tonalidades escuras. Após um detalhamento estratigráfico Freitas-Silva e Campos (1998) denominaram esta unidade como Psamo Pelito Carbonatada (PPC). Esta unidade ocupa quase toda a porção norte do Distrito Federal.

O grupo Canastra é uma importante unidade litoestratigráfica que aflora, de forma contínua, por mais de 650 quilômetros desde de o sudoeste de Minas Gerais, no extremo sul da Faixa Brasília, até a região sudeste de Goiás e sul do Distrito Federal, na porção centro norte desta faixa. Quando comparado ao grupo Paranoá, o grupo Canastra apresenta uma maior densidade de afloramentos, distribuído no Distrito Federal no Alto Vale do Rio São Bartolomeu (porção centro-leste do DF) e no Vale do Rio Maranhão incluindo as sub-bacias do Rio Salinas e Córrego do Ouro (porção meio-norte do DF). Esta unidade é caracterizada, por um conjunto amplamente dominado por filitos variados, com contribuição restrita de quartzitos, calcifilitos, mármore finos e filitos carbonosos (Freitas-Silva e Campos, 1998).

O grupo Bambuí, por sua vez, se distribui na porção oriental do DF ao longo de todo o Vale do Rio Preto desde o Ribeirão Santa Rita (afluente da margem direita do Rio Preto). No DF, sua maior área é recoberta por uma espessa camada de latossolo vermelho, aflorando em drenagens e raros cortes de estradas. É composto por uma sequência essencialmente pelítica com metassiltitos argilosos e metargilitos apresentando cores de alteração que variam de tons violáceos a avermelhados, passando por cores rosadas e amareladas, porém quando mais frescas as rochas pelíticas passam a apresentar cores amareladas ou esverdeadas. Localmente são observados bancos de arcóseos e siltitos verdes, quando frescos, e rosados ou amarronzados, quando alterados (Freitas-Silva e Campos, 1998).

### **3.5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO B**

#### **3.5.1. Hidrografia**

A área de estudo B está inserida parcialmente nas unidades hidrográficas do Lago Paranoá, do Paranoá e do Sobradinho, conforme representado na Figura 3.5. A bacia hidrográfica do

Córrego Taquari, o foco desta pesquisa, faz parte da unidade hidrográfica do Lago Paranoá, e é constituída pelo próprio Lago Paranoá, pelas áreas que contribuem diretamente com o espelho d'água e pelas áreas de drenagem de pequenos córregos como o Cabeça de Veado, Canjerana e Antas, na região do Lago Sul, e na região do Lago Norte, o Taquari, Gerivá e Palha. A unidade hidrográfica do Lago Paranoá apresenta drenagem anelar, com o sentido principal do escoamento, de oeste para leste, e é considerada uma bacia de 7ª ordem (Ferrante *et al.*, 2001).

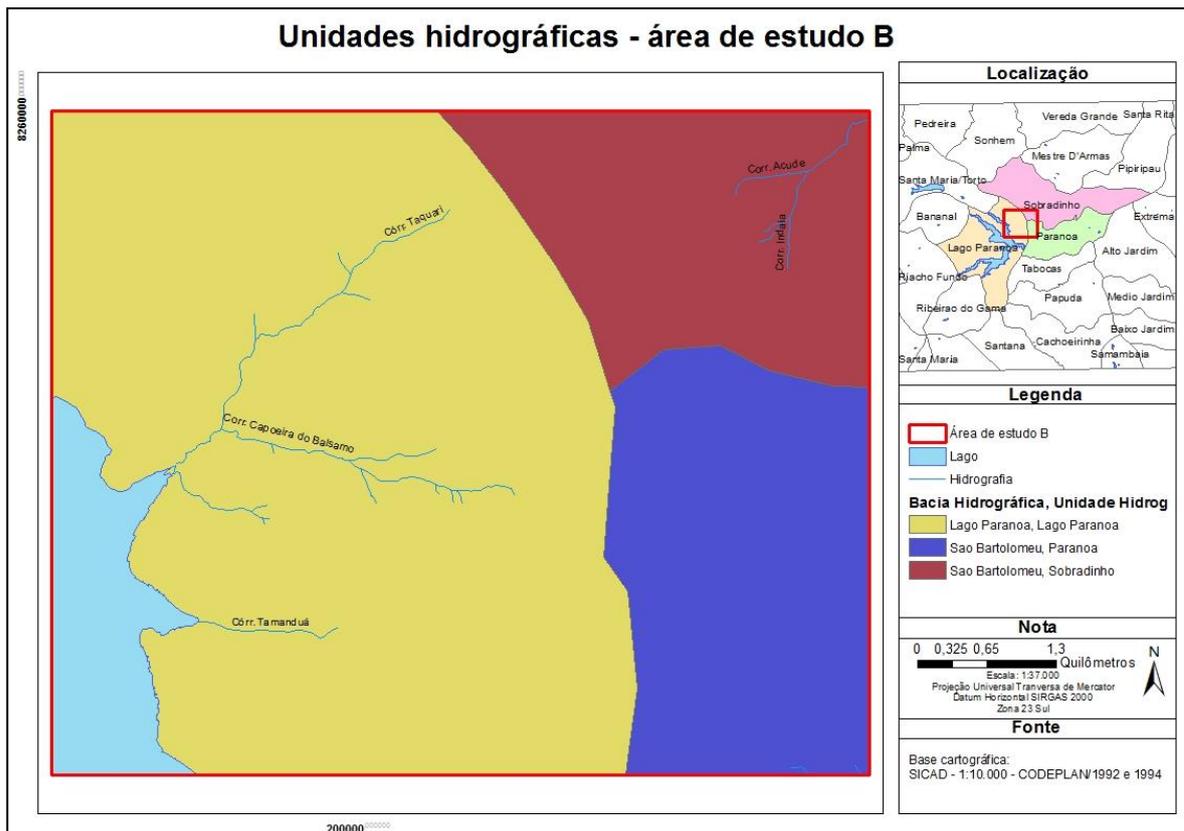


Figura 3.5 – Bacias hidrográficas e unidades hidrográficas - área de estudo B

Fonte: CODEPLAN (1994)

### 3.5.2. Pedologia

A Figura 3.6 representa o mapa pedológico da área de estudo B, onde é possível observar que a classe predominante são os latossolos, com cerca de 70% da área total, sendo que aproximadamente 54% (25,67 km<sup>2</sup>) corresponde a latossolo vermelho e 16% (7,61 km<sup>2</sup>) é latossolo vermelho-amarelo. A segunda classe de solo mais representativa na área de estudo é o cambissolo com aproximadamente 11 km<sup>2</sup>, que corresponde a 23% da área total. As demais classes de solo, esposossolo (0,38%) e solo hidromórfico indiscriminado (0,14%),

somam 0,52% da área de estudo. O restante da área é coberto por água, principalmente do Lago Paranoá. Essas classes já foram descritas de forma mais detalhada no item 3.4.2.

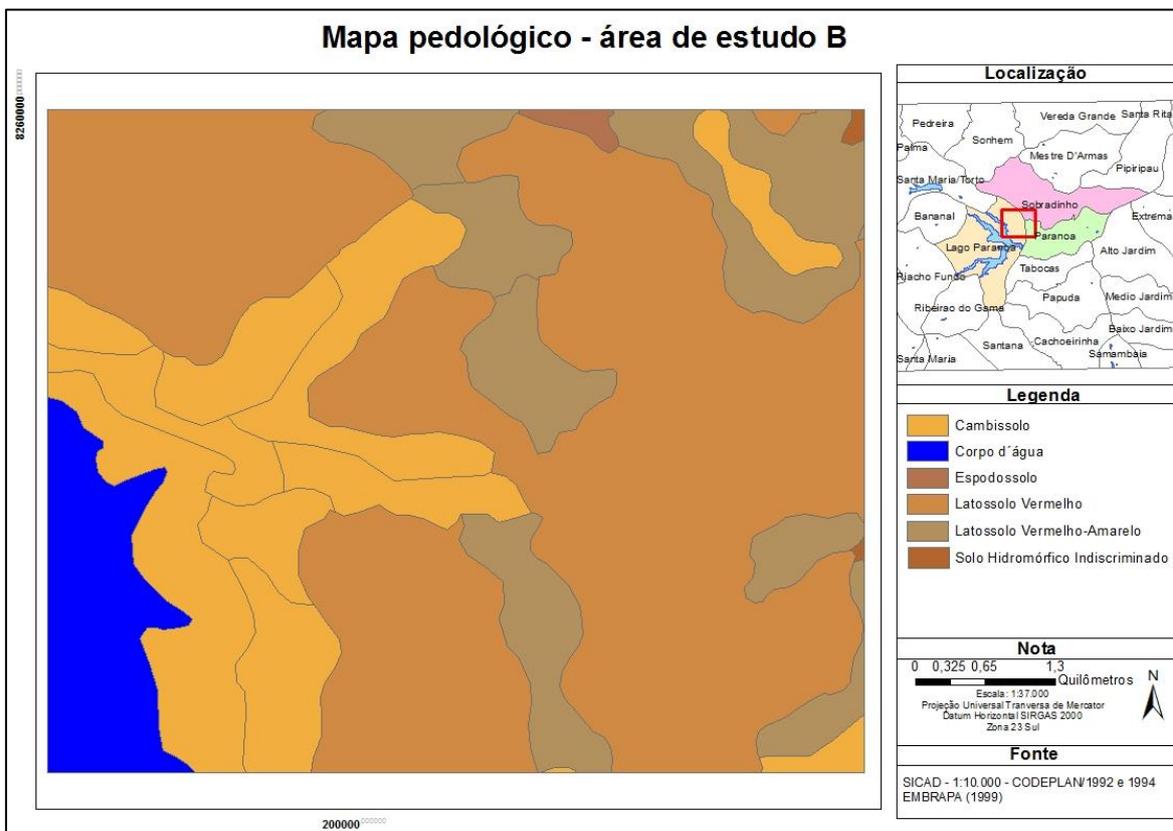


Figura 3.6 – Mapa pedológico - área de estudo B  
Fonte: Embrapa (1999)

### 3.5.3. Geomorfologia

O compartimento geomorfológico denominado Chapadas Elevadas é o tipo de paisagem predominante na área de estudo B, representando 47,84% da área total, ou seja, cerca de 23 km<sup>2</sup>, seguido pelo compartimento Planalto Intermediário, com 27,15% (12,89 km<sup>2</sup>) da área, conforme apresentado na Figura 3.7. Os compartimentos geomorfológicos denominados Rebordo e Escarpa ocorrem com menos frequência na área, 18,4% e 0,25%, respectivamente. Não há ocorrência do compartimento geomorfológico denominado Planícies e no restante da área há presença de lagos. Essa compartimentação já foi descrita de forma mais detalhada no item 3.4.3.

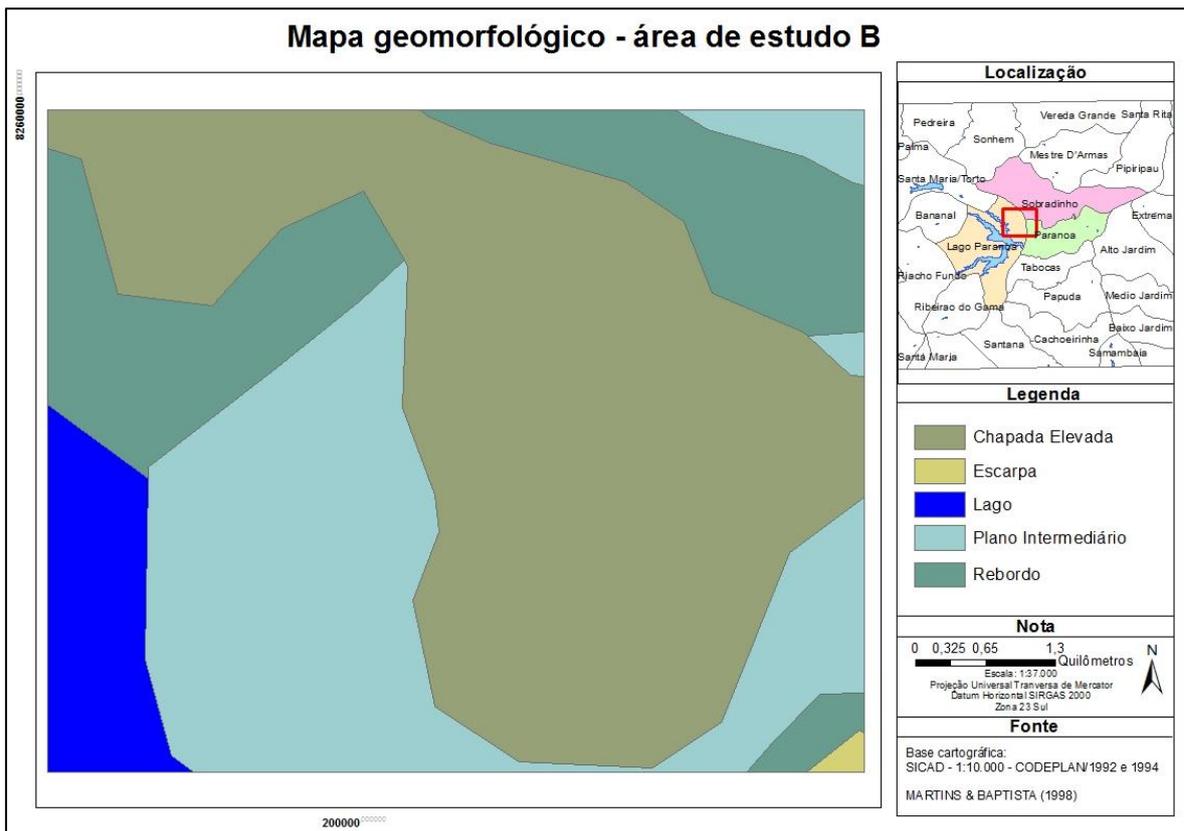


Figura 3.7 – Mapa geomorfológico - área de estudo B  
 Fonte: Martins e Baptista (1998)

### 3.5.4. Geologia

Na área de estudo B apenas o conjunto litológico Grupo Paranoá está presente, representado pelas unidades Ardósia (4,62% da área), Metarritmito Arenoso (55,66%), Quartzitos Médios (23,19%) e Metarritmito Argiloso (16,53%), conforme apresentado na Figura 3.8 e unidades descritas no item 3.4.4.

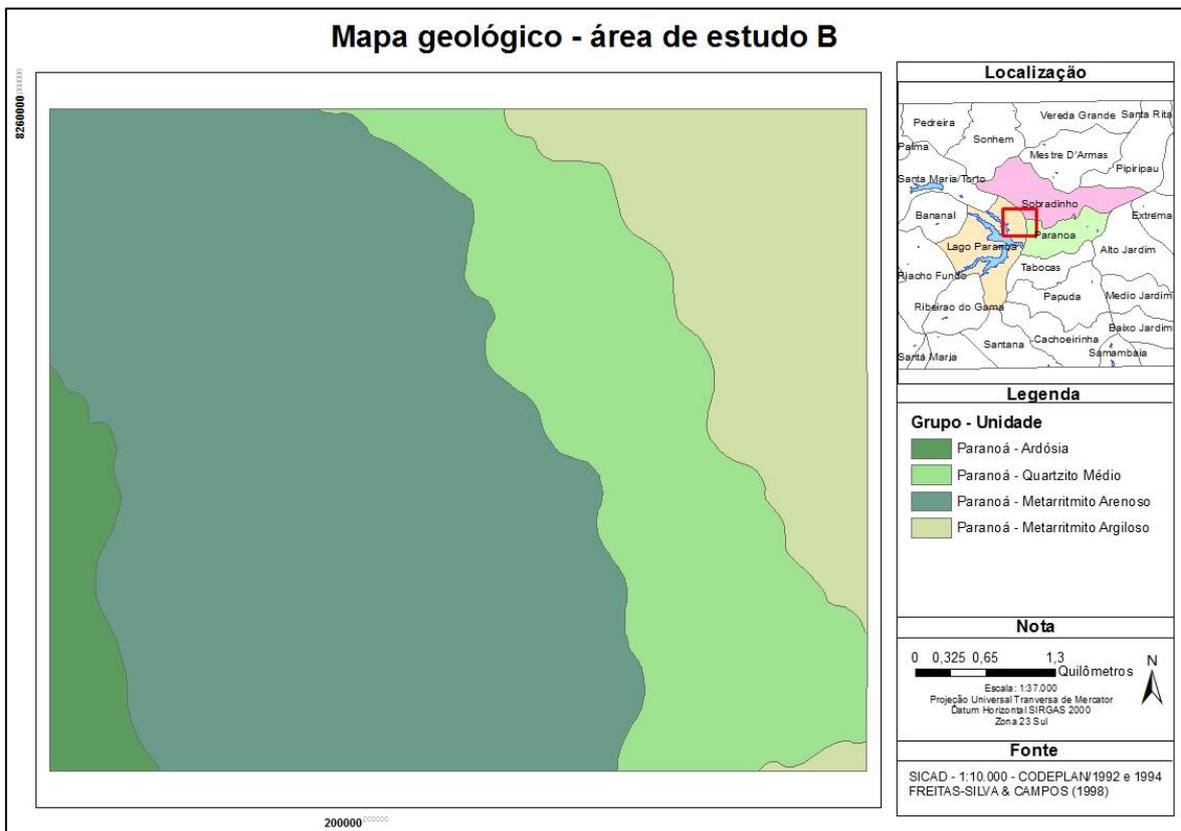


Figura 3.8 – Mapa geológico - área de estudo B  
 Fonte: Freitas-Silva e Campos (1998)

### 3.6. PLANO DIRETOR DE ORDENAMENTO TERRITORIAL DO DISTRITO FEDERAL - PDOT

O planejamento territorial do Distrito Federal foi estabelecido pela Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009, que aprovou a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT, que no Título III trata da Organização o Território, cuja função é orientar a ocupação adequada do solo seguindo as diretrizes setoriais desta lei. A finalidade do PDOT é auxiliar no pleno desenvolvimento das funções sociais da propriedade urbana e rural, e propiciar o bem-estar de seus habitantes a partir do uso socialmente justo e ecologicamente equilibrado de seu território (GDF, 2009b).

O PDOT institui o Macrozoneamento do Distrito Federal, com a divisão de seu território nas seguintes zonas (GDF, 2009b):

- **Macrozona Urbana** – as atividades dos setores secundário e terciário, que são predominantes nesta macrozona, devem contribuir para o desenvolvimento sustentável do território, não excluindo a presença de atividades do setor primário.

- **Macrozona Rural** – deve contribuir para a dinâmica dos espaços rurais multifuncionais destinados principalmente para atividades do setor primário, não excluindo a presença de atividades dos setores secundário e terciário.
- **Macrozona de Proteção Integral** – destinada à preservação da natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos recursos naturais. É composta pelas unidades de conservação.

A Macrozona Urbana se divide em (GDF, 2009b):

- **Zona Urbana do Conjunto Tombado** – é composta por áreas predominantemente habitacionais de média densidade demográfica, corresponde a área do Plano Piloto de Brasília e as demais áreas incorporadas em função de complementações ao núcleo original.
- **Zona Urbana de Uso Controlado I** – é composta por áreas predominantemente habitacionais de muito baixa densidade demográfica, com enclaves de baixa, média e alta densidades. Grande parte desta zona está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do lago Paranoá e na APA das bacias hidrográficas dos córregos do Gama e Cabeça de Veado.
- **Zona Urbana de Uso Controlado II** – é composta por áreas predominantemente habitacionais de baixa e média densidade demográfica, com enclaves de alta densidade. Estas áreas são sujeitas a restrições impostas pela sua sensibilidade ambiental e pela proteção dos mananciais destinados ao abastecimento de água. Por meio da recuperação ambiental e da proteção dos recursos hídricos, esta zona deve compatibilizar o uso urbano com a conservação dos recursos naturais.
- **Zona Urbana Consolidada** – é composta por áreas predominantemente urbanizadas ou em processo de urbanização, de baixa, média e alta densidade demográfica, servidas de infraestrutura e equipamentos comunitários. Nesta área é indicado o desenvolvimento das potencialidades dos núcleos urbanos, com acréscimo da dinâmica interna e melhoria da sua integração com áreas vizinhas.
- **Zona Urbana de Expansão e Qualificação** – é composta por áreas com propensão à ocupação urbana, preferencialmente no setor habitacional, e que apresentem

relação direta com áreas já implantadas. Esta zona é também integrada por assentamentos informais que necessitam de intervenções visando a sua qualificação. Ela deve ser planejada e ordenada para o desenvolvimento equilibrado das funções sociais da cidade e da propriedade urbana.

- **Zona de Contenção Urbana** – é composta por áreas urbanas que fazem fronteira com as áreas rurais, sendo caracterizada por ocupação habitacional de densidade demográfica muito baixa, de modo a criar uma zona de amortecimento entre o uso urbano mais intenso e a Zona Rural de Uso Controlado. Seu objetivo é assegurar a preservação e a manutenção das suas características naturais estabelecendo parâmetros de uso e ocupação restritivo do solo.

A Macrozona Rural se divide em (GDF, 2009b):

- **Zona Rural de Uso Diversificado** – é a área que apresenta atividade agropecuária consolidada, sendo predominante a agricultura comercial. Onde deve ser reforçada sua vocação rural e incentivada a verticalização da produção. Grande parte desta zona está localizada na bacia do rio Preto e do rio São Marcos.
- **Zona Rural de Uso Controlado** – é composta, principalmente, por atividades agropastoris, de subsistência e comerciais, sujeitas às restrições impostas pela sua sensibilidade ambiental e pela proteção dos mananciais destinados à captação de água para abastecimento público.

A Lei Complementar nº 803 (GDF, 2009b) define a Área de Proteção de Manancial (APM) como uma porção do território que se destina recuperação ambiental e à promoção do uso sustentável, devido a existência de pontos de captação de água para abastecimento público, sem que haja prejuízo a concessionária autorizada a captar e distribuir água de boa qualidade e em quantidade suficiente para o atendimento da população.

De acordo com o zoneamento territorial, a área de estudo B é dividida em: Macrozona de Proteção Integral, Zona Rural de Uso Controlado, Zona Urbana de Uso Controlado I, Zona Urbana de Uso Controlado II, Zona Urbana do Conjunto Tombado e Zona de Contenção Urbana conforme apresentado na Figura 3.9.

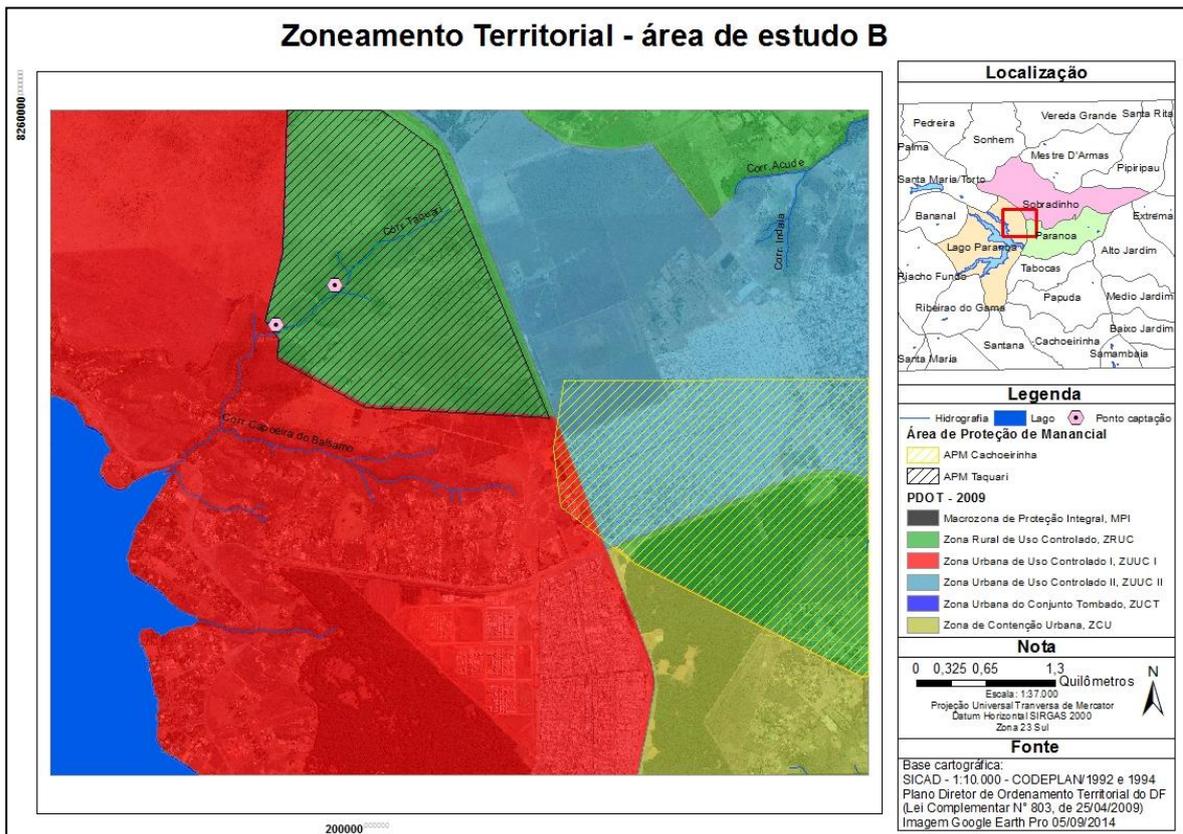


Figura 3.9 – Mapa de zoneamento territorial - área de estudo B  
Fonte: CODEPLAN (1994) e GDF (2009c)

### 3.7. PARANOÁ PARQUE

A área nas proximidades do Córrego Taquari, onde localiza-se o Paranoá Parque, e tem praticamente toda a área sob domínio e proteção da CAESB. A maior parte de sua vegetação natural já foi substituída por reflorestamentos de pinheiros e eucaliptos (Isaias, 2008), restando ainda áreas com vegetação de cerrado e mata de galeria e ciliar, conforme apresentado na Figura 3.10. É crescente o número de condomínios e parcelamentos irregulares, o que frente à fragilidade ambiental da Bacia do Lago Paranoá e sua importância para a sustentabilidade do lago e dos recursos hídricos da região, traduz-se numa gênese crescente de impactos ambientais sobre essa Bacia (Fonseca e Netto, 2001).

O empreendimento denominado Paranoá Parque é parte do Plano de Expansão do Paranoá, que visa satisfazer as demandas de moradia do DF, localizado na Região Administrativa do Paranoá, limítrofe a leste com a cidade do Paranoá, ao norte com a rodovia DF – 015 (Estrada Parque Tamanduá – EPTM) e a oeste com o reflorestamento de *Pinus* sp. e a linha de alta tensão (Figura 3.10) (Ecotech e Direcional Engenharia, 2012). A ocupação desta área para fins de usos urbanos é compatível com o PDOT (GDF, 2009b), disposto pela Lei

Complementar Distrital nº 803/2009, que classifica a área como Zona Urbana de Uso Controlado I, conforme apresentado na Figura 3.9.

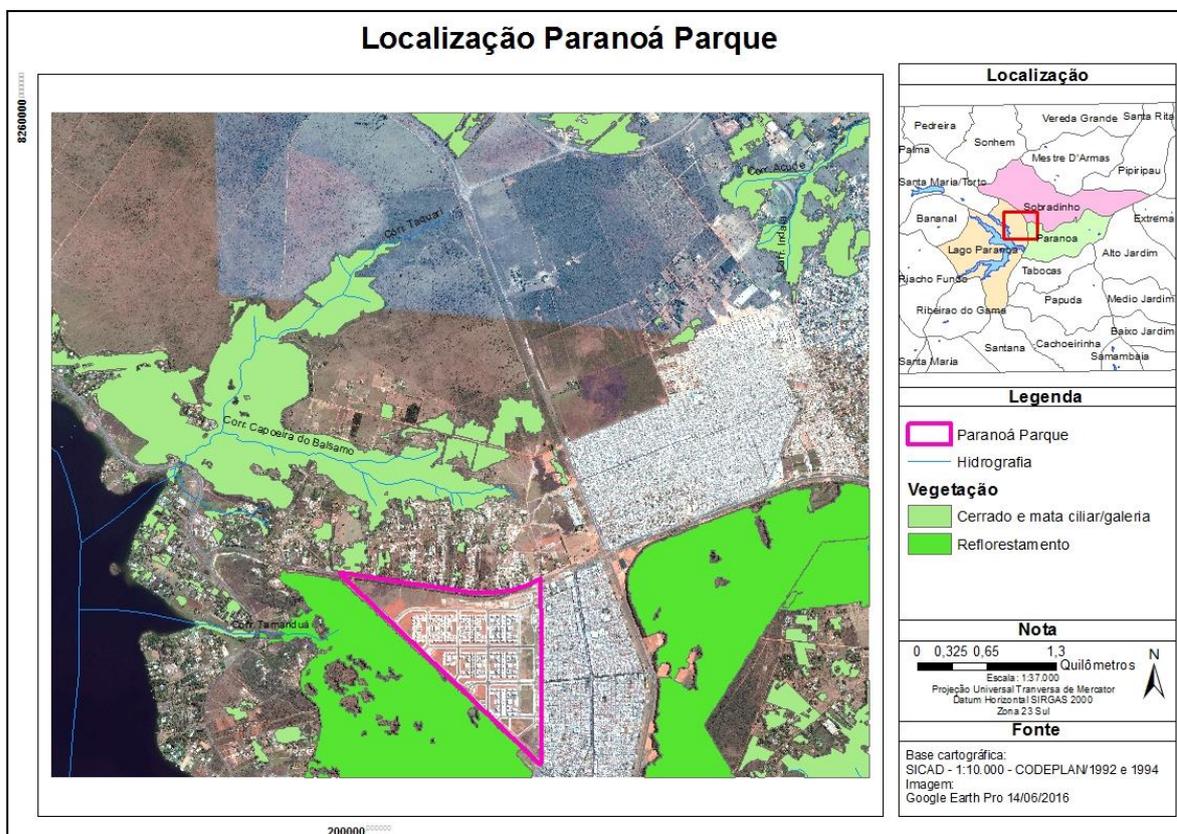


Figura 3.10 – Localização Paranoá Parque e vegetação área de estudo B  
 Fonte: CODEPLAN (1994) e Google Earth Pro (2016)

A RA Paranoá é caracterizada por ser um vetor de expansão urbana, com forte pressão para a ocupação dos espaços próximos, visto haver dois grandes aglomerados urbanos próximos, com facilidade de acesso, urbanização e disponibilidade de equipamentos públicos, bem como com a proximidade da área central do Distrito Federal (Ecotech e Direcional Engenharia, 2012).

O Paranoá Parque faz parte do Programa Morar Bem do GDF, iniciado em 10 de maio de 2012, quando a Secretaria de Habitação, Regularização e Desenvolvimento Urbano – SEDHAB lançou apresentação do primeiro pacote de habitações de interesse social com 10 mil unidades habitacionais. Este foi o primeiro empreendimento do Distrito Federal financiado pelo programa habitacional do Governo Federal, Minha Casa Minha Vida, visando atender famílias faixa 1, ou seja, com renda de até R\$ 1,6 mil e que satisfazem os critérios da Lei Distrital nº 3.877/2006 (Ecotech e Direcional Engenharia, 2012).

O Paranoá Parque foi inaugurado no dia 29 de março de 2014 e está distribuído em 27 quadras, composto de 390 edifícios de 4 andares com 16 unidades habitacionais cada um. No total, são 6.240 unidades de 46 m<sup>2</sup>, com dois quartos, sala, banheiro e cozinha ligada à área de serviço. Ainda conta com 14 praças, nove quadras poliesportivas, 26 quiosques, oito parques infantis, ciclovias, pista de skate, cinco academias para o público da terceira idade e outras facilidades. Foi implantado em uma área de 1.513.642,23 m<sup>2</sup> e com área edificada de 368.048,97 m<sup>2</sup> (SECOVI, 2016).

O capítulo seguinte apresenta a fundamentação teórica de conceitos envolvidos na classificação temática de imagens, na análise multicritério da vulnerabilidade ambiental, na análise de temperatura da superfície terrestre, na modelagem da dinâmica ambiental e no escoamento superficial, assim como suas aplicações práticas.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO

Para entender melhor como uma população está crescendo e ocupando a área de uma bacia hidrográfica é necessário que seja feita uma diferenciação espacial dos aspectos morfológicos, dos processos de uso e cobertura do solo e dos aspectos econômicos, em uma compreensão da dinâmica desses espaços (Castanho e Teodoro, 2010). Para realizar análises com dados espaciais e oferecer meios para o entendimento da ocupação do espaço físico usualmente são utilizados produtos do sensoriamento remoto e algoritmos de geoprocessamento inseridos em SIG.

A utilização de dados provenientes de sensoriamento remoto tem crescido em todo mundo, seja pela facilidade de obtenção ou pelas vantagens de sua utilização, tais como: i) aquisição de informações sem perturbar ou interferir na área ou objeto de estudo; ii) maneira sistemática de obtenção de dados em áreas de grande extensão; iii) fornecimento eficiente e econômico de informação espacial, espectral e temporal variada; e iv) possibilidade de organização, com a repetição de dados, séries temporais precisas e acuradas (Jensen, 2009).

Os dados históricos de sensoriamento remoto (SR) têm sido cada vez mais utilizados e explorados em ambiente computacional de um SIG para identificar a aglomeração espacial urbana (Sathish Kumar et al., 2013), avaliar a dinâmica do uso e ocupação do solo (Almeida *et al.*, 2015), calcular a vulnerabilidade ambiental (Zanella *et al.*, 2011; Pinese Júnior e Rodrigues, 2012), estimar o valor do modelo para cálculo de escoamento superficial – *Curve Number* (CN) (Zhan e Huang, 2004), entre outros.

Com o constante desenvolvimento da informática, tem surgido diversas ferramentas capazes de capturar, processar, armazenar e apresentar informações espaciais georreferenciadas. A ligação técnica e conceitual dessas ferramentas propiciou o desenvolvimento do Geoprocessamento, tecnologia responsável pelo processamento de dados geográficos (Benedetti, 2010).

Para Burrough e McDonnell (2010), os dados geográficos representam fenômenos do mundo real em relação a posição, com o respectivo sistema de coordenadas conhecido, aos atributos que não estão relacionados com a posição, como cor, custo, pH, incidência da doença, etc.,

e as inter-relações espaciais uns com os outros que descrevem como eles estão ligados entre si.

A utilização de instrumentos computacionais do geoprocessamento, como o SIG, possibilita a realização de diversas análises espaciais, com custos relativamente mais baixo do que pesquisas e levantamentos de campo, o que o torna útil sua aplicação, principalmente, em países com extensa dimensão territorial e com carência de informações para a tomada de decisões a respeito de problemas ambientais e urbanos (Câmara e Medeiros, 1998).

A evolução dos computadores e de programas específicos é, entre outros fatores, a causa do desenvolvimento dos SIGs, tornando-os capazes solucionar problemas de maneira mais rápida e eficaz do que em tempos passados. Com o mapeamento dos espaços físicos torna-se possível conhecer melhor uma determinada região, já que os produtos obtidos pela utilização de um SIG podem representar fenômenos ambientais, sociais, econômicos e humanos, e dessa forma apresentar subsídios para a tomada de decisões (Fitz, 2008).

Segundo Burrough e McDonnell (2010), o SIG possui três importantes componentes, que são eles: o *hardware* (computador), o *software* (conjunto de programas específicos), o *peopleware* (adequado contexto organizacional, incluindo pessoas qualificadas) e os dados geográficos. São sistemas capazes de realizar o tratamento computacional de dados geográficos, pois armazena a geometria e os atributos de dados que estão localizados na superfície terrestre em uma projeção cartográfica qualquer, e esses dados são categorizados como georreferenciados.

A técnica de álgebra de mapas é uma aplicação prática dos Sistemas de Informações Geográficas vinculada ao geoprocessamento, onde são utilizados mapas temáticos diversos para a realização de análises de cunho espacial. Cada mapa utilizado constitui um Plano de Informação (PI) contendo um tema específico, que é sobreposto a outro que tenha as mesmas dimensões, porém com temática diferente, para obter um produto derivados dos PIs de origem (Fitz, 2008).

Devido a sua extensa possibilidade de aplicação, Câmara e Medeiros (1998) apresentam três possibilidades de utilização um SIG: i) produção de mapas; ii) análise espacial de fenômenos; ou iii) armazenamento e recuperação de informação espacial, a partir de um banco de dados geográficos.

## 4.2. USO E COBERTURA DO SOLO

A necessidade de identificar e classificar o uso e cobertura do solo é fundamental para conhecer o ambiente em que se vive, principalmente diante do cenário de rápida ocupação do espaço físico. Isso explica a importância do monitoramento da paisagem, sobretudo para subsidiar o planejamento racional da utilização do solo (Venturieri e Santos, 1998).

A cobertura do solo pode ser compreendida como a caracterização da superfície terrestre em relação aos meios físicos, químicos e biológicos, tais como, área construída, água, tipos de vegetação; já, o uso do solo relaciona-se com a finalidade para qual o solo é utilizado pelo homem, tais como, agricultura, pecuária, área residencial, recreação, entre outros (Turner *et al.*, 1994).

O uso do solo refere-se às atividades humanas desenvolvidas nas unidades de paisagem natural, que geralmente altera as condições de equilíbrio local. A alteração na cobertura vegetal é a primeira consequência da intervenção humana, desencadeando processos que podem não ser absorvidos pela unidade de paisagem e provocar diversos efeitos danosos (Crepani *et al.*, 2001).

O inadequado uso e manejo do solo acrescido da falta de ações conservacionistas implicam em perdas significativas de solo, de nutrientes, de matéria orgânica, de biodiversidade e de água, prejudicando o equilíbrio dos sistemas hídricos (Vaeza *et al.*, 2010), o que causa impactos a todos os componentes do ciclo hidrológico, como quantidade e qualidade da água, escoamento superficial e recarga de aquíferos (Mendes e Cirilo, 2001).

O sensoriamento remoto e geoprocessamento são ferramentas frequentemente utilizados para monitorar a dinâmica de uso e cobertura do solo, principalmente devido a frequência de atualização de dados, agilidade no processamento e viabilidade econômica (Vaeza *et al.*, 2010). Em países com dimensões continentais, como é o caso do Brasil, fotos aéreas e imagens de sensoriamento remoto são utilizadas para mapear grandes áreas com precisão, tornando-se fontes de informações detalhadas que auxiliam no gerenciamento de terras e recursos naturais.

Em estudos realizados em bacias hidrográficas é comum a utilização de imagens orbitais de alta resolução espacial para mapear e quantificar as mais diversas classes de uso e cobertura do solo, pois permitem que os resultados obtidos sejam mais precisos. A maioria dos estudos

de uso e ocupação do solo utilizam a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e para o acompanhamento da dinâmica de mudança na paisagem, pois seus limites são imutáveis dentro do horizonte do planejamento humano, o que facilita o acompanhamento das alterações naturais ou antrópicas (Vaeza *et al.*, 2010).

Para compreender melhor os processos naturais e antrópicos que causam mudanças na paisagem, foram desenvolvidos modelos de dinâmica ambiental, que tentam explicar os possíveis caminhos da evolução e as mudanças na paisagem, e assim avaliar suas implicações futuras (Soares-Filho *et al.*, 2002). Os modelos espaciais ou modelos de paisagem simulam mudanças nas características do ambiente através do território geográfico. Estes modelos são utilizados no entendimento dos mecanismos e dos processos de desenvolvimento de sistemas ambientais, de forma a caracterizar sua evolução diante das condições circunjacentes e representar cenários ambientais, socioeconômicos e políticos (Soares-Filho *et al.*, 2007).

Tem se tornado vasto os tipos de aplicações do geoprocessamento por meio de ferramentas de SIG, sendo que cada aplicação requer formas distintas de manipulação de dados geográficos, associados a diferentes características e propriedades que variam no espaço e no tempo. Dentre essas aplicações cita-se: análise e monitoramento de expansão urbana; monitoramento e previsão de mudanças de uso e cobertura do solo; monitoramento de recursos naturais; análise de vulnerabilidade ambiental; acompanhamento de processos erosivos; modelagem dinâmica ambiental; espacialização de eventos de precipitação, entre outros. A seguir serão apresentados trabalhos científicos que indicam como esses estudos estão atualmente sendo realizados e que servirão como embasamento teórico para o desenvolvimento do presente trabalho.

O estudo desenvolvido por Almeida *et al.* (2015) partiu da análise de dinâmica ambiental e temporal para verificar a dinâmica do uso e ocupação do solo no município de Pombal/PB. As imagens dos satélites Landsat e ResourceSAT, passaram por análise espacial utilizando o SIG Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (Spring) 5.2, por meio de algoritmos de processamento de imagens do tipo registro, filtragem e classificação temática, este último classificando em sete classes temáticas de uso e ocupação do solo, pelo método Maxver (Máxima Verossimilhança), com a obtenção de 9 amostras para cada classe, com desempenho médio acima de 90%. A imagem resultante da sobreposição dos planos de informação foi obtida por cruzamento usando lógica booleana, no ambiente de programação

em Linguagem Espacial de Georreferência Algébrica (LEGAL). Os autores concluíram que houve substituição da cobertura vegetal por atividades agropecuárias, cerca de 23%, além do aumento das áreas degradadas com solo exposto e alterações antrópicas, o que representou aumento da fragilidade do meio ambiente indicando que o município necessita de medidas de controle do desmatamento e recuperação de áreas degradadas.

O estudo desenvolvido por Wu *et al.* (2016) na cidade de Guangzhou, sul da China, utilizou uma série de imagens dos sensores MMS, TM, ETM+ e OLI do satélite Landsat, para avaliar a expansão urbana e seus efeitos sobre a mudança de uso e cobertura do solo ao longo de 35 anos (1979-2013). Foi realizada a classificação supervisionada utilizando o algoritmo Maxver para gerar os mapas de uso e cobertura do solo contendo nove classes, e pós-classificação em nos sistemas ArcGIS 10 e ENVI 5.0. A área urbana se expandiu com taxa de crescimento anual de 11,25 %, correspondendo no total a 1.512,24 km<sup>2</sup> de aumento. Conclui-se que as mudanças significativas no uso e cobertura do solo e a expansão urbana foram altamente correlacionadas ao desenvolvimento econômico, crescimento populacional, progresso técnico entre outros; e, que o aumento da área urbana acarretou em perda da cobertura natural com mudanças significativas no padrão e composição da paisagem, tornando-a cada vez mais fragmentada.

Nunes e Roig (2015), por sua vez, realizaram o mapeamento e a análise comparativa do uso e ocupação do solo da Bacia do Alto do Descoberto no DF, entre os anos 1994 e 2011 por meio de imagens do Landsat TM que foram classificadas no módulo do sistema ENVI FX, e rastreamento de coordenadas geográficas com receptores GPS para avaliar a exatidão temática da classificação temática realizada para o ano 2011. Os resultados evidenciaram uma significativa expansão agrícola da região, cerca de 11% da área da bacia, bem como uma perda de vegetação natural. O sistema de classificação foi bem-sucedido, com índice Kappa de 0,64.

Assim como os trabalhos citados, existe muitos outros trabalhos publicados recentemente que apresentam a classificação temática de imagens do satélite Landsat para analisar as alterações no uso e cobertura do solo buscando compreender a dinâmica desses processos para o planejamento de ações que possam minimizar os impactos sociais e ambientais por eles causados.

### 4.3. VULNERABILIDADE AMBIENTAL

As ações antrópicas, como o desmatamento da vegetação nativa, uso e cobertura do solo de forma inadequada, deterioração da qualidade do ar e da água, entre outros, podem causar diferentes tipos de impacto ao meio ambiente. Cada vez mais esses impactos têm despertado o interesse no estudo da vulnerabilidade ambiental, com destaque aqui para a vulnerabilidade ambiental referente aos processos erosivos.

A realização de mapeamento que indica o grau de vulnerabilidade ambiental norteia a prevenção de processos degradantes que podem ocorrer em uma bacia hidrográfica e, desta forma, apontam locais com risco de aparecimentos de processos erosivos ou de degradação dos recursos hídricos. A partir da abordagem dos fatores que afetam negativamente o meio ambiente, a análise da vulnerabilidade ambiental, apresenta as fragilidades de uma área quanto ao desenvolvimento de atividades e prevenção de danos ao ambiente (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012).

A determinação da vulnerabilidade ambiental pode subsidiar o planejamento e a gestão ambiental, já que permite avaliar, em uma determinada área, a condição de risco que ela se encontra em relação aos processos geoambientais, como erosão, contaminação de recursos hídricos e solo, dentre outros (Santos *et al.*, 2007).

O conceito de vulnerabilidade tem sido estudado em diferentes áreas do conhecimento, e pode ser classificada como natural e ambiental. De acordo com Grigio (2003), a vulnerabilidade natural visa apresentar a intensidade e distribuição da suscetibilidade do ambiente quando são considerados os fatores geomorfológicos, geológicos, pedológicos e de vegetação, enquanto a vulnerabilidade ambiental refere-se à suscetibilidade do ambiente às pressões antrópicas.

Foi apresentada por Crepani *et al.* (2001) a metodologia para elaboração de mapas de vulnerabilidade ambiental, que se baseia no conceito de Ecodinâmica (Tricart, 1977) e na utilização de imagens de satélite para estudos integrados, permitindo uma visão sinótica, repetitiva e holística da paisagem, reforçando a importância da utilização do SIG. Esta metodologia propõe a divisão das unidades territoriais básicas em duas categorias, as unidades de paisagem natural e os polígonos de intervenção antrópica. Sendo que uma unidade territorial básica é definida como uma entidade geográfica que pode ser diferenciada

de sua vizinhança por meio de seus atributos ambientais, e possui vínculos dinâmicos que a articulam a uma complexa rede integrada por outras unidades territoriais.

Para analisar a unidade de paisagem natural é necessário conhecer as informações fornecidas pela geologia, geomorfologia, pedologia e fitogeografia que, de forma integrada, representam um retrato do comportamento de cada unidade frente à sua ocupação. Os polígonos de intervenção antrópica são os representantes, nas imagens, da área física onde se dá a atuação humana que modifica as condições naturais, podendo ser localizados sobre uma única, ou várias unidades de paisagem natural, dependendo exclusivamente de suas dimensões (Crepani *et al.*, 2001).

Na metodologia proposta por Crepani *et al.* (2001), as unidades territoriais básicas são analisadas morfodinamicamente a partir dos princípios de Ecodinâmica (Tricart, 1977), onde os fatores naturais e antrópicos são classificados de acordo com graus de vulnerabilidade baseado nos processos de morfogênese e pedogênese por meio da ponderação de valores de caráter analítico e individual. A morfogênese é caracterizada pelos processos erosivos formadores de relevo, já a pedogênese é o processo de formação de um determinado solo. Quando predomina a morfogênese prevalecem os processos erosivos, modificadores das formas de relevo, e quando predomina a pedogênese prevalecem os processos formadores de solos.

A vulnerabilidade ambiental é, então, determinada pela integração das informações dos fatores por meio da atribuição de determinados pesos de importância para cada um deles. Entretanto, existem diversos critérios de comparação entre as alternativas para a determinação dos pesos, o que pode dificultar o processo de tomada de decisão. Um subsídio técnico que pode ser utilizado no processo de tomada de decisão é a aplicação de um método de análise multicritério. Destaca-se como principais características desse método a estruturação do problema que envolve a tomada de decisão, a caracterização do cenário em que o problema se encontra, a identificação dos principais atores intervenientes, a definição dos objetivos dos decisores e a explicitação das potenciais alternativas de decisão (Boas, 2006).

Um critério pode ser medido, avaliado e adotado como base para a tomada de decisão, quando submetido a uma análise multicritério e apresenta a inter-relação entre outros critérios definidos pelo problema. É atribuído, então, um peso para cada critério com o

objetivo de quantificar a relativa importância de cada um deles. Para aplicação da análise multicritério é necessário que o problema seja decomposto em uma hierarquia de critérios o que possibilitará uma análise de modo independente (Cordeiro, 2014).

O processo de decisão apoiado em métodos multicritérios tem o objetivo de tornar claro o problema e avaliar as alternativas que, geralmente, são conflitantes entre si. Frequentemente são utilizados métodos que se apoiam na abordagem de superação, a fim de extrair um subconjunto de um conjunto finito de alternativas ou então ordená-las (Almeida e Costa, 2003).

É constante a busca de metodologias que possibilitem integrar, em uma base comum, dados e informações diversas que possam auxiliar o desempenho de atores sociais no processo de tomada de decisão para uma efetiva gestão ambiental (Adami *et al.*, 2012). Nos SIGs, a análise multicritério é considerada como um processo em que são obtidas informações que auxiliam no processo de tomada de decisão a partir da transformação de dados geográficos e combinação de preferência dos atores sociais (Malczewski, 2006). A integração entre SIG e métodos multicritérios para suporte à tomada de decisão tem se mostrado efetiva e eficiente, apresentando como grande vantagem a possibilidade de utilização de diversas fontes de dados em uma base comum (Adami *et al.*, 2012).

O processo de tomada de decisão em uma análise multicritério possui duas etapas, a primeira é a análise do sistema de estudo que conduz à identificação, caracterização e hierarquização dos principais fatores que podem intervir na decisão e explicação das alternativas de decisão que se pretendem comparar. A segunda etapa é a avaliação do sistema, que tem como finalidade esclarecer a escolha de uma alternativa a partir da aplicação de métodos multicritérios como apoiadores da modelagem de preferências dos atores sociais e sua agregação (Bana e Costa, 1988).

Cada vez mais tem sido realizado estudos que buscam representar as alterações no uso e cobertura do solo e que, por vezes, conciliam os conceitos de vulnerabilidade natural e ambiental às técnicas de geoprocessamento, classificando as imagens para realização de modelagem de dinâmica ambiental que represente a evolução e a alteração de uso e cobertura do solo, buscando compreender melhor como ocorrem esses processos.

O estudo desenvolvido em Fortaleza/CE por Zanella *et al.* (2011) objetivou identificar as áreas de maior vulnerabilidade natural e ambiental, baseando-se no emprego da análise Ecodinâmica, fundamentada no conceito de estabilidade/instabilidade ambiental (Tricart, 1977). Foram utilizados SIGs na elaboração e integração dos mapas de geologia, geomorfologia, pedologia e cobertura vegetal para a confecção do mapa de vulnerabilidade natural. Do cruzamento do mapa de uso do espaço geográfico com o mapa de vulnerabilidade natural obteve-se o mapa de vulnerabilidade ambiental. Observou-se que a grande parte do município possui vulnerabilidade baixa e mediana, e as áreas com maior vulnerabilidade foram identificadas nos locais com infraestrutura urbana precária nas proximidades de rios, lagoas e campos de dunas.

O estudo desenvolvido por Pinese Júnior e Rodrigues (2012) objetivou avaliar o desempenho do método AHP na ponderação de fatores aplicados à obtenção da vulnerabilidade ambiental na bacia do rio Piedade/MG. Para isso, realizou-se o mapeamento e cruzamento de quatro critérios decisivos para a determinar a vulnerabilidade, a saber: declividade, pedologia, geologia e uso e ocupação da terra. Os autores concluíram que as áreas de preparo para plantio ou solo exposto apresentaram-se mais favoráveis à vulnerabilidade do ambiente, seguidos pelas áreas com declividade maior que 30%. O mapa de vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Piedade mostrou imparcialidade nos resultados e minimização de erros de julgamento durante o processo, devido a utilização do método de Análise Hierárquica de Processos (AHP).

Neste contexto, por meio de algoritmos de geoprocessamento, a análise multicritério baseada na AHP é uma ferramenta útil na determinação do grau de vulnerabilidade ambiental de uma área, sendo apresentada a seguir.

#### **4.3.1. Análise Hierárquica de Processos (AHP)**

Para abordar problemas onde existem diversos fatores que podem contribuir para o processo de tomada de decisão é útil a utilização de ferramentas de suporte à decisão. Para dar suporte ao estudo da vulnerabilidade ambiental, o cálculo dos pesos de compensação, que indica a importância de um fator em relação aos demais, pode ser realizado pela Análise Hierárquica de Processos (AHP - *Analytical Hierarchy Process*), proposta por Thomas Saaty, que se baseia na lógica de comparação pareada, por importância relativa (peso), preferências ou probabilidade, entre dois critérios, com relação ao critério no nível superior (Saaty, 1980).

A utilização de AHP como uma ferramenta de suporte a decisão com múltiplos critérios auxilia na organização e no estabelecimento de um modelo racional que realize a combinação de dados. Por isso, o método AHP é útil em processos de tomada de decisão multicritério, já que ele calcula os pesos dos critérios por meio de pares de comparação (Tanaka e Entani, 2007). Portanto, quanto se trata de análises ambientais esse método apresenta-se eficiente e com desempenho favorável, já que pode agrupar um grande número de variáveis em uma única avaliação (Miara e Oka-Fiori, 2007).

O método AHP consiste em três etapas, primeiramente o decisor deve dividir os problemas multicritérios em seus componentes, de forma a ordenar os possíveis atributos em níveis hierárquicos. Em seguida, deve ser realizada uma comparação par a par dos atributos em um mesmo nível hierárquico, e, por fim, é necessário garantir que a avaliação tenha consistência, pois as comparações apresentam elementos de juízo subjetivo. Caso o método apresente inconsistência as comparações devem ser realizadas novamente (Reyes, 2009). Após o cálculo dos pesos de cada fator é necessário a avaliação de sua aceitabilidade ou Razão de Consistência (RC), que revela erros de inconsistência nas classificações e interações pareadas e, de acordo com Saaty (1980), deve apresentar valor menor que 0,10, ou seja, o resultado desta razão deve ser menor que 10 %.

Assim, de acordo com Moreira *et al.* (2016), a análise hierárquica de processos apresenta uma base matemática que permite mensurar a consistência dos julgamentos realizados, assim como organizar e avaliar a importância relativa entre os fatores estudados. A estruturação do modelo hierárquico é composta por critérios, subcritérios e alternativas em um processo de comparação entre pares. Segundo os mesmos autores, para a aplicação do método, primeiramente é necessária a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências que, em seguida, é utilizada como *input* em uma matriz de comparação pareada para o cálculo de autovalores e autovetores dessa matriz. A AHP pondera todos os critérios e calcula um valor de razão de consistência, entre zero e um, onde um indica completa inconsistência do processo de julgamento. Com o estabelecimento de critérios de comparação para cada par de fatores, pode-se determinar um conjunto ótimo de pesos a serem utilizados na combinação de diversos mapas, sendo sua principal vantagem a avaliação do grau de potencialidade ao invés de somente identificar a presença ou ausência da potencialidade.

#### **4.4. TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE**

Dentre as diversas aplicações do sensoriamento remoto destaca-se a obtenção de informações de temperatura superficial, que se dá devido conversão do calor interno de um objeto em energia radiante, e para grande parte dos objetos há uma alta correlação positiva entre a temperatura cinética verdadeira do objeto e o fluxo radiante proveniente dos mesmos. Assim, esse fluxo radiante emitido pelos objetos pode ser captado e registrado por sensores de infravermelho a bordo de plataformas orbitais ou aerotransportadas (Jensen, 2009).

O infravermelho termal compreende a faixa do espectro eletromagnético entre 8 e 14  $\mu\text{m}$  e tem importância em trabalhos de sensoriamento remoto por estar associado com as emissões máximas de calor de um corpo (Fitz, 2008). O vapor de água, ozônio e carbono podem causar interferência nos dados obtidos pelo sensoriamento remoto termal, para evitar que isso aconteça e reduzir as distorções nas medições de temperatura que podem ser causadas pela atmosfera, é utilizada a faixa do espectro eletromagnético que vai de 10,5 a 12,5  $\mu\text{m}$  para posicionar as bandas espectrais dos sensores de infravermelho termal (Salisbury, 1992).

Os termômetros específicos ou sensores que atuam na faixa do infravermelho termal podem ser usados para aferir a temperatura do ar e de superfície. A utilização de termômetros para aquisição de dados geralmente relaciona-se com a existência de estações meteorológicas, que depende de recursos humanos especializados para calibração de equipamentos e acompanhamento das atividades, assim como periodicidade de monitoramento. Para contornar algumas dessas dificuldades tornou-se frequente a utilização de produtos resultantes de sensores termais, principalmente devido à proximidade dos valores obtidos por medição e estimados pelo sensor (Santos, 2010).

Atualmente existe uma gama de sensores termais a bordo de sensores orbitais ou aerotransportados, que atuam em diferentes resoluções espaciais, espectrais e temporais. As informações provenientes desses sensores têm sido significativamente empregadas em estudos sobre variabilidade termal dos mares e oceanos e sobre mudanças na cobertura e uso do solo (Gillett et al., 2008; Amiri *et al.*, 2009; Zhang et al., 2007; Weng et al., 2002).

A crescente utilização de dados orbitais proveniente do infravermelho termal está associada-se, dentre outras coisas, a proximidade dos dados de temperatura gerados a partir dos sensores com os dados de temperatura do ar medidos em estações meteorológicas. Gusso *et*

*al.* (2007) utilizaram imagens do sensor AVHRR a bordo dos satélites NOAA-15 e NOAA-16 e três métodos para mapear a temperatura da superfície terrestre no Rio Grande do Sul. A diferença entre a temperatura do ar e a temperatura estimada pelos métodos esteve entre 2,5 e 3,1 °C e valores de correlação entre 0,73 e 0,7; o que possibilitou concluir que o sensor é adequado para estimar temperatura da superfície terrestre, visto que os resultados se aproximaram da temperatura do ar medida por instrumentos meteorológicos convencionais.

A partir de dados de infravermelhos termal fornecidos pela banda espectral 6 do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5, Sobrinho *et al.* (2004) utilizaram três métodos para recuperação da temperatura da superfície terrestre e compararam os resultados obtidos com a temperatura da superfície terrestre medida *in situ*. Para a temperatura da superfície terrestre obtida pela equação de transferência radiativa, que só é aplicável quando há disponibilidade de radiossonda *in situ* está disponível, com aceitável desvio quadrático médio. Os algoritmos de Qin *et al.* (2001) e Jiménez-Muñoz e Sobrino (2003), citados por Sobrinho *et al.* (2004), não necessitam de radiossonda *in situ*, e apresentaram também valores aceitáveis de desvio quadrático médio, com melhores resultados obtidos com o algoritmo de Qin *et al.* (2001).

Schwarz *et al.* (2012) trabalham com conceito de ilhas de calor urbana e ilha de calor urbana de superfície, que podem ser quantificados com medições meteorológicas de temperatura do ar ou com temperatura de superfície terrestre detectadas remotamente. A aplicação da metodologia se deu por voos aéreos para captação de dados de temperatura de superfície terrestre e medições de campo da temperatura do ar em estações meteorológicas na cidade de Leipzig, na Alemanha. O estudo mostrou que a temperaturas do ar e da superfície terrestre estão relacionados, sendo a correlação maior quando considerado o pixel individual. A análise de variância indicou que as classes de cobertura do solo apresentaram influência estatisticamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre ambas temperaturas.

Existe uma série de fatores que podem influenciar tanto a temperatura de superfície como a temperatura do ar. Os fatores externos são incidência de radiação, ciclo diário e anual, latitude, tipos de cobertura, topografia, altitude, influência antrópica, entre outros. Já os fatores internos são umidade, composição química dos elementos do solo, entre outros (Santos, 2010).

O processo de alteração do uso e cobertura do solo por meio da substituição de cobertura natural e utilização destes espaços nas atividades antrópicas, é um dos fatores que tem

causado impactos no campo térmico local com a elevação da temperatura, podendo ocasionar desde simples desconforto térmico até ilhas de calor, sendo esta última decorrente de alterações mais robustas na temperatura, fenômeno observado em grandes cidades (Sousa e Ferreira, 2012).

A interferência de atividades antrópicas, por meio de ações como desmatamento, queimadas, aumento da mancha urbana, construção de edificações urbanas, impermeabilização resultante de construção de calçadas e asfaltos são responsáveis por significativas mudanças no uso e cobertura do solo que influencia o comportamento termal, tendendo para o aumento do registro de temperatura (Santos, 2010, Sousa e Ferreira, 2012). Os materiais urbanos possuem padrões de refletividade que favorecem a absorção da radiação solar que, na busca do equilíbrio térmico, emitem maior quantidade de calor sensível (Sousa e Ferreira, 2012).

Muitos estudos estão utilizando o processamento de imagens na faixa do infravermelho termal para estimar a temperatura de superfície terrestre e buscar compreender a relação entre o uso e cobertura do solo com a radiação, a seguir serão citados alguns deles. Amiri *et al.* (2009) utilizaram imagens do Landsat TM 4 e 5 e Landsat 7 ETM + da região metropolitana de Tabriz no Irã para analisar a variabilidade temporal do uso e cobertura da terra e da temperatura da superfície terrestre. O estudo mostrou que área de vegetação apresentava baixas temperaturas e à medida que ocorriam as mudanças de uso de solo devido a urbanização, a temperatura se elevou.

Kauwe *et al.* (2013) consideraram a dinâmica espacial e temporal da temperatura da superfície terrestre para quantificar sua resposta aos eventos de precipitação a partir de dados de satélite geostacionário. Os autores concluíram que a variação da temperatura está intimamente ligada aos tipos de cobertura do solo, que áreas mais densamente vegetadas, têm a resposta mais fraca às chuvas, enquanto em regiões com pouca vegetação ou desnudas tiveram variação mais alta da temperatura.

O estudo desenvolvido por Jenerette *et al.* (2016) utilizou imagens aéreas, com resolução espacial de 7 metros, da região metropolitana de Phoenix, AZ USA, para gerar dados térmicos e relacioná-los com características sociais sobre percepções de paisagens e doenças causadas pelo calor. Esses dados foram analisados juntamente com a classificação de cobertura terrestre, buscando compreender a influência da composição da paisagem na variabilidade de temperatura da superfície terrestre. Os resultados mostraram grandes

diferenças de temperatura, durante o dia variaram entre 35,1 e 67,4 ° C e durante a noite variaram entre 15,1 e 32,1 ° C.

Os trabalhos citados apresentam a importância e diferentes possibilidades de utilização dos dados obtidos de sensores do infravermelho termal. A análise dos mapas de temperatura de superfície terrestre desenvolvidos neste estudo auxiliam no entendimento de alguns processos envolvidos na evolução dinâmica de uso e cobertura do solo.

#### **4.5. MODELAGEM DA DINÂMICA AMBIENTAL DO USO E COBERTURA DO SOLO**

O emprego das geotecnologias enfatiza o uso de computadores na representação de fenômenos espaciais de forma estática, já que utiliza o mapa como forma de representação. Entretanto, grande parte desses fenômenos como mudança no uso e cobertura da terra, no escoamento superficial gerado por uma precipitação, no planejamento urbano, entre outros, são em sua essência fenômenos dinâmicos e sendo assim não são muito bem descritos por representações estáticas comumente utilizadas em SIG. Por essa razão, recentemente, as mudanças na paisagem estão sendo acompanhadas e estudadas por técnicas de modelagem da dinâmica ambiental, tornando-a uma ferramenta útil no planejamento, por possibilitar simulação de cenários futuros (Benedetti, 2010).

Em geral, a modelagem e em especial os modelos de previsão não estão livres de incertezas, pois elas podem estar associadas aos dados de entrada, a propagação dos erros do modelo e os erros implícitos no modelo devido à falta de total conhecimento dos processos envolvidos. Porém cabe ao modelador tentar reduzir essa incerteza, buscando conhecimento dos processos envolvidos na modelagem, utilização de algoritmo adequado e dados confiáveis e de qualidade (Sathish Kumar *et al.*, 2013).

A utilização da modelagem dinâmica visa superar as limitações geradas pelas técnicas de Geoprocessamento, realizando simulação numérica de processos que são dependentes do tempo. Um modelo dinâmico espacial é uma forma de representação matemática de um, ou vários, fenômenos que acontecem no mundo real (Burrough e McDonnel, 2010) e, por essa razão, cada vez mais os recursos computacionais têm contribuído com a simulação de fenômenos dinâmicos espaciais, tais como: mudança no uso do solo, expansão urbana, processos de ocupação, entre outros.

A modelagem dinâmica tem a finalidade de simular mudanças espaciais e temporais das características ambientais ligadas a um espaço geográfico, descrevendo quantitativamente um fenômeno e prevendo sua evolução, o que permite avaliar como um sistema evolui diante de um conjunto de circunstâncias, definidas pelo modelador, que podem proporcionar tais mudanças (Benedetti, 2010; Trentin e Freitas, 2010).

Os modelos de dinâmica ambiental, que reproduzem padrões espaciais de mudanças condizentes com a realidade, são um requisito importante para o entendimento de questões ambientais complexas em escala local, regional e global, tornando-se um importante instrumento de auxílio ao ordenamento territorial. Por isso, a modelagem dinâmica tem, cada vez mais, se tornado um campo de pesquisa bastante promissor, recebendo atenção especial de pesquisadores de diversas áreas (Soares-Filho *et al.*, 2007).

Existem diversos meios de obtenção de mapas que representem cartograficamente as mudanças de paisagem a partir de simulação da dinâmica ambiental, nos itens a seguir serão apresentadas as metodologias fundamentadas no conceito de pesos de evidência e de Autômatos Celulares (AC), as quais serão utilizadas neste estudo.

O estudo desenvolvido por Trentin e Freitas (2010) utilizou o modelo de autômato celular do *software* Dinamica EGO, desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais, na simulação do crescimento e das mudanças de uso na área urbana de Americana/SP, onde foram definidas quatro classes de uso da terra e que posteriormente, com base na situação atual de uso, foram simulados cenários de prognósticos para o curto (ano de 2010) e médio prazo (anos de 2014 e 2016). Os autores afirmaram que o *software* Dinamica EGO mostrou potencial para aplicações em estudos urbanos e apesar das deficiências e limitações do modelo de AC, o mesmo possibilita a espacialização das simulações, o que representa um progresso na área da modelagem. Os autores afirmam ainda que o tempo de processamento da modelagem foi considerável apesar de terem sido utilizadas poucas variáveis e a área de estudo possui reduzida extensão territorial. Alegam ainda que, quanto maior for o intervalo de tempo compreendido em cada período de simulação e o número de variáveis de transição do uso da terra, maior será o tempo demandado pelo modelo.

Por meio do sistema Dinamica EGO, Camacho-Sanabria *et al.* (2015) desenvolveram um modelo espacial de mudanças de uso e cobertura do solo para o município de Amanalco de Becerra, no Estado de Mexico, a partir de mapas de uso do solo e da vegetação para os anos

de 1989, 1997 e 2009, derivados de classificação temática por interpretação visual, em conjunto com variáveis cartográficas explicativas. As mudanças de uso e cobertura do solo foram modeladas em dois cenários, sendo o primeiro o modelo de tendência, o que pressupõe que as taxas anuais de mudança permanecem inalteradas para o período compreendido entre os anos de 1997-2009, e o segundo é o modelo agropastoril, que assume um aumento das taxas anuais de desmatamento pelo desenvolvimento das atividades agrícolas. A análise multitemporal das áreas florestais mostrou uma tendência para processos relacionados com o desmatamento, sendo que em ambos os cenários se observou a diminuição em áreas de floresta e o aumento em áreas de atividades agrícolas, o que levaria à perda da diversidade de espécies biológicas, deterioração e degradação dos solos, mudanças no microclima e modificação do funcionamento do rio Amanalco.

Por sua vez, Vieira *et al.* (2015) desenvolveram um estudo na bacia hidrográfica do Rio Vermelho em Goiás, da modelagem dinâmica da paisagem, com o *software* Dinamica EGO, aplicada à análise da cobertura e uso do solo. Inicialmente foram elaborados mapas de uso e cobertura do solo para dois períodos (anos de 1976 e 1987) onde foram discriminadas sete classes temáticas de uso do solo. Procedeu-se uma análise integrada dos dados acerca da caracterização física do sistema natural, da dinâmica histórica de ocupação e uso, da consolidação e da sustentabilidade socioeconômica e ambiental, integrando os conceitos de vulnerabilidade natural e ambiental. O estudo concluiu que a nova paisagem indica uma aceitável dinâmica de evolução natural, com alguns pontos críticos em relação a processos erosivos, de assoreamento de canal fluvial e recorrência de cheias e pastagens degradadas, que podem ser corrigidos com um reordenamento e manejo dos tipos de uso do solo. Além de apresentar a possibilidade de aplicação deste modelo em outras bacias (pequenas e médias) do bioma Cerrado.

A pesquisa desenvolvida na região do Vale do Rio Pardo no RS por Schroder *et al.* (2016) propôs determinar a taxa de desmatamento e regeneração, durante um período de 24 anos entre os anos 1990 e 2014, e realizar um prognóstico de uso e cobertura do solo para o ano de 2018. Com as imagens dos satélites Landsat 5 (anos de 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010) e Landsat 8 (ano de 2014), com 30 metros de resolução espacial realizou-se a classificação supervisionada por meio do *software* Spring e especificadas três classes de uso do solo, Floresta, Agropecuária e Áreas Urbanas. Utilizou-se o sistema Dinamica EGO para gerar mapas de uso e cobertura do solo para o ano de 2018. Conclui-se que houve um aumento de

0,58% ao ano da cobertura florestal da área de estudo, devido a diferença entre processos (desmatamento e regeneração) muito mais intensos (entre 3 e 6% da área total). O mapa estimado para 2018 indica que deve continuar a tendência de aumento de área florestal e aponta áreas que estão sujeitas ao desmatamento, permitindo melhor fiscalização da região.

As pesquisas citadas apontam para: i) a utilização de modelo de AC, como o utilizado pelo *software* Dinamica EGO, e é uma ferramenta útil e eficiente na modelagem da dinâmica ambiental; ii) a escolha de uma área pequena para serem realizadas as simulações de mudanças de paisagem, como é o caso da bacia hidrográfica do Córrego Taquari; iii) a definição de poucas classes temáticas de uso e cobertura do solo, conforme será apresentado no item 5.2.1, onde definiu-se as classes temáticas, de forma a viabilizar o processamento da modelagem; iv) a importância da utilização de produtos do sensoriamento remoto e de SIG no acompanhamento de mudanças de uso e cobertura do solo.

A utilização de modelagem dinâmica ambiental para a simulação de mudanças de paisagem, tem se tornado uma ferramenta importante na busca do entendimento dos impactos que podem ser causados nas componentes do ciclo hidrológico e, dentre esses componentes, nesta pesquisa será estudado o escoamento superficial direto. A seguir serão apresentados trabalhos que relacionam assuntos pertinentes ao tema e que utilizam o Método do SCS.

#### **4.5.1. Método dos pesos de evidência**

O cálculo da probabilidade de transição de uma determinada classe temática para outra é, nesta pesquisa, realizado pelo método dos pesos de evidência, que resulta na produção de um mapa de probabilidade de transição, onde é representado as áreas mais favoráveis para ocorrer uma mudança (Soares-Filho *et al.*, 2009). O método pesos de evidência consiste em um método bayesiano, no qual o efeito de uma variável espacial em uma transição é calculado independentemente de uma solução combinada. A probabilidade bayesiana que se relaciona aos conceitos de probabilidade prévia e posterior (*a priori* ou *a posteriori*), sendo fundamentada no Teorema de Bayes, que consiste na disposição de ocorrer um evento A tendo em vista a ocorrência passada de outro evento B (Trentin e Freitas, 2010). Os pesos de evidência representam cada influência sobre uma variável na probabilidade espacial de uma transição  $i \Rightarrow j$ , sendo calculados da seguinte forma:

$$O\{D|B\} = \frac{P\{D|B\}}{P\{\bar{D}|B\}} \quad \text{Equação (4.1)}$$

$$\log\{D|B\} = \log\{D\} + W^+ \quad \text{Equação (4.2)}$$

Onde  $W^+$  é o peso de evidência da ocorrência do evento  $D$ , dado um padrão espacial  $B$ . A probabilidade a *posteriori* de uma transição  $i \Rightarrow j$ , dado um conjunto de dados espaciais  $(B, C, D, \dots, N)$ , é expressa da seguinte maneira (Soares-Filho *et al.*, 2009):

$$P\{i \Rightarrow j | B \cap C \cap D \dots \cap N\} = \frac{e^{\sum W_N^+}}{1 + e^{\sum W_N^+}} \quad \text{Equação (4.3)}$$

Onde  $B, C, D$  e  $N$  são os valores das variáveis espaciais  $k$  que são medidas na localização  $x, y$  e representadas por seus pesos  $W^+_N$ .

Para determinar a probabilidade de ocorrer mudanças de uso do solo mediante variáveis explicativas, essas variáveis devem ser, então, independentes. Essa condição pode ser avaliada pelo Índice de Cramer (V) que utiliza a matriz de transição produzida pela tabulação cruzada de dois mapas temáticos, para verificar a independência entre os pares de variáveis, em que o índice varia de zero (reflete completa independência), a um (reflete completa dependência das variáveis). As matrizes de transição calculadas são denominadas de *Single Step Transition Matrix* e *Multiple Step Transition Matrix* (Matriz de Transição de Passo Único e Matriz de Transição de Passos Múltiplos), que conferem valores aos processos de transição ocorridos entre os mapas de uso e cobertura do instante inicial (tempo 1) e para o instante final (tempo 2). A matriz *Single Step* se refere aos processos de transição entre as classes durante todo o período de análise. A matriz *Multiple Step*, por sua vez, indica as transições ocorridas a cada passo de tempo do período analisado.

#### 4.5.2. Modelo de Autômatos Celulares (AC)

Segundo Wolfram (1983), o conceito de autômatos celulares foi introduzido originalmente por von Neumann e Ulam, nos anos 40, como uma possível idealização do sistema biológico e tendo a finalidade específica de modelar a autorreprodução biológica. Na época recebeu o

nome de espaços celulares e foram aplicados e reintroduzidos para uma grande variedade de propósitos, recebendo diferentes nomes.

O uso de autômatos celulares na simulação espacial tem se tornado cada vez mais comum, haja visto que são sistemas inerentemente dinâmicos. Eles podem ser incluídos em ambiente de SIG, devido à capacidade de reprodução dos fenômenos espaciais e sua facilidade de implementação (Benedetti, 2010), pois é uma ferramenta que busca obter possíveis previsões de mudanças que ocorrem no espaço e no tempo, baseadas em processos evolutivos. Este modelo representa diversos tipos de fenômenos espaciais dinâmicos, sejam eles físicos, biológicos ou sociais, como por exemplo, o espalhamento de fogo, dinâmica florestal, propagação de epidemias, crescimento urbano e mudanças no uso e cobertura do solo (Soares-Filho *et al.*, 2002; Trentin e Freitas, 2010).

No modelo de autômatos celulares todas as células são atualizadas simultaneamente a cada passo de tempo discreto, sendo que o estado de cada célula depende do seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com o arranjo de sua vizinhança (Soares-Filho *et al.*, 2007; Burrough e McDonnel, 2010).

Os autômatos celulares são apresentados como uma grade regular uniforme ou um campo matricial, sendo frequentemente infinito em sua extensão, com uma variável discreta em cada local, ou seja, em cada célula. Os valores das variáveis em cada célula são utilizados como forma de especificar o estado de um AC. Os autômatos celulares são definidos como idealizações matemáticas de sistemas físicos, onde os atributos assumem um conjunto de valores discretos, assim como o tempo e espaços também são discretos. Um AC evolui em passos de tempo discretos, de acordo com um conjunto pré-definido de regras locais, sendo que o valor da variável de uma célula é afetado e atualizado simultaneamente pelos valores das variáveis nas células vizinhas, encontrados no passo de tempo anterior, e a vizinhança de uma célula é formada pela própria célula e todas as demais localizadas nas suas adjacências (Wolfram, 1983).

#### **4.5.3. Plataforma de Simulação de Dinâmica Ambiental - Dinamica EGO**

O Dinamica EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) é um sistema *freeware* desenvolvido por Soares-Filho *et al.* (1998, 2002) criado e mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade

Federal de Minas Gerais. Por ser um sistema de modelo genérico de mudanças, o mesmo é utilizado como uma ferramenta de investigação da alteração de paisagens e da dinâmica de fenômenos espaciais. Assim, o Dinamica EGO trata-se de um modelo de dinâmica ambiental desenvolvido para simulação de paisagens, com características que otimizam a velocidade e recursos computacionais, como memória virtual e processamento paralelo. O Dinamica EGO é, então, um modelo de simulação espacial que utiliza o conceito de autômatos celulares, cujo ambiente de *software* está escrito nas linguagens C++ e Java, e apresenta uma série de algoritmos chamados *functors*, e cada um deles executa uma operação de simulação. Foram implementados algoritmos de análises espaciais mais comuns disponíveis em um SIG comercial, além de outros algoritmos desenvolvidos para simulações espaciais, o que inclui funções de transição, de calibração e métodos de validação (Soares-Filho *et al.*, 2009).

A calibração do modelo é realizada buscando-se avaliar os padrões de mudanças e fornecer as informações necessárias ao modelo. Esta etapa pode ser realizada por meio de teste de calibração com os autômatos celulares *Patch e Expander* do sistema Dinamica EGO, buscando-se o melhor ajuste entre o modelo gerado e a realidade observada oriunda do mapa de uso e cobertura do solo. O processo de calibração deverá considerar o ajuste do modelo em relação a dois aspectos: i) configuração espacial e ii) estrutura da paisagem, sendo que o ajuste considerado razoável para o modelo de simulação encontra-se acima de 75% (Soares-Filho *et al.*, 2007).

A partir do auxílio de sua interface gráfica, possibilita-se a criação de modelos simplesmente arrastando e conectando *functors* via seus portos, e cada um deles representa um conector para um elemento de dados, tais como, mapa, tabela, matriz, fórmula matemática ou constante. Dessa forma os modelos podem ser concebidos como um diagrama, cuja execução segue uma corrente de fluxo de dados. O conjunto de dados de entrada é manipulado por operadores do *software* produzindo um novo conjunto de dados de saída, como tabelas ou mapas. Além dos operadores convencionais, o programa inclui operadores chamados de especiais (*containers*), pois agrupam e determinam o comportamento para o conjunto de *functors* neles contidos, além disso há necessidade, por parte do modelador, de determinação interna de alguns parâmetros.

O Dinamica EGO utiliza um conjunto de mapas como dados de entrada, tais como, mapa da paisagem inicial (mapa de uso e cobertura do solo), mapa do tempo de permanência de cada célula no seu estado atual, e um conjunto de variáveis cartográficas, que estão divididas em

dois grupos, dinâmicas e estáticas. As variáveis estáticas, ou seja, que não se modificaram durante o período em que foi realizada a modelagem e suas informações são apresentadas em mapas estáticos, os exemplos desse tipo de variável são os dados vetoriais de distância até a drenagem e distância até as estradas, declividade, pedologia e vegetação. Já as variáveis dinâmicas são aquelas recalculadas a cada iteração do programa, são combinadas por meio de seus pesos de evidência, o que resulta na geração de mapas de probabilidades de transição. Após cada iteração, o *software* produz um novo mapa da paisagem, mapas de probabilidades de transição e mapas das variáveis dinâmicas.

O Dinamica EGO usa, como regras locais, um recurso de alocação de mudanças, composto por dois processos de transição complementares, os *functors Expander e Patcher*, além de um módulo de difusão. Ambos utilizam um mecanismo nucleador de manchas, tendo como parâmetros de entrada a isometria, variância e tamanho médio das manchas e operando sobre o mapa de probabilidades de transição. A função *Expander* é responsável pela expansão ou contração de manchas prévias de uma classe, enquanto a função *Patcher* é responsável por formar novas manchas. O módulo de difusão leva um processo de transição  $i \Rightarrow j$ , a migrar para novas áreas, em função de uma saturação assintótica de células  $j$  dentro de uma vizinhança especificada (Soares-Filho *et al.*, 2007). Ambos os algoritmos de transição do sistema Dinamica EGO adotam um mecanismo estocástico de seleção. O algoritmo aplicado faz a leitura do mapa de uso do solo para identificar as células com maiores probabilidades, e depois os dados são organizados em uma matriz. As células são então selecionadas de forma aleatória no sentido decrescente. No segundo momento é realizada novamente o escaneamento do mapa de uso do solo para executar as transições selecionadas.

Com a propriedade de geração de cenários prospectivos, o Dinamica EGO, é importante para identificar mudanças que podem ocorrer no uso e cobertura do solo da bacia do Córrego Taquari e entorno. As consequências dessas mudanças, são dentre outras, a alteração do escoamento superficial direto, devido a impermeabilização da área e retirada da vegetação. A análise da variação do escoamento superficial direto será fundamentada nos conceitos do Método SCS, apresentados a seguir.

#### **4.6. MÉTODO DO SOIL CONSERVATION SERVICE**

A urbanização tem alterado as paisagens naturais, implicando nas mudanças de uso e cobertura do solo. Para estudar e entender esses processos, tem sido empregada os sistemas

de informação geográfica, a modelagem do crescimento urbano e a geração de cenários prospectivos, importantes ferramentas para o planejamento e gestão urbana, pois a partir disso podem ser estudados os impactos e a sustentabilidade de um sistema hidrológico urbano (Sathish Kumar *et al.*, 2013).

As alterações de uso do solo podem causar impactos significativos sobre o escoamento superficial e as características hidrológicas. O escoamento superficial é especialmente importante nas áreas urbanas, pois o aumento de superfícies impermeáveis tende a aumentar esse escoamento, podendo causar danos ambientais, sociais e materiais (Ozdemir e Elbas, 2015). As consequências das chuvas intensas e outros eventos climáticos extremos são muito influenciados pelo uso do solo, para evitar danos materiais é importante, então, que se reduza o tamanho e a duração dos picos de vazão (Kalantari *et al.*, 2014).

A quantidade de escoamento superficial direto é uma resposta da bacia hidrográfica a uma precipitação total, e um componente crítico para a análise hidrológica. O escoamento superficial direto é fortemente afetado por fatores topográficos, tais como forma, comprimento e inclinação da bacia hidrográfica, sendo também afetado por fatores meteorológicos, como, precipitação, evaporação, infiltração e armazenamento (Moon *et al.*, 2016). O escoamento superficial direto também varia espacialmente dentro de uma bacia hidrográfica para diferentes tipos de solo e uso e cobertura do solo (Melesse e Shih, 2002; USDA-NRCS, 2004).

Devido à distribuição espacial do uso do solo o papel do sensoriamento remoto e do SIG no cálculo do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica é fornecer uma fonte de dados de entrada ou auxiliar na estimativa de coeficientes da equação e os parâmetros do modelo (Nagarajan e Poongothai, 2012) como para o cálculo do parâmetro *Curve Number* (CN) (Zhan e Huang, 2004).

Conceitualmente, os modelos baseados em eventos de chuva-vazão expressam a relação entre a quantidade de chuva e o escoamento superficial direto em uma bacia hidrográfica (Moon *et al.*, 2016). Estes modelos são amplamente utilizados em diversos seguimentos da gestão de recursos hídricos. Os modelos chuva-vazão são, por sua vez, ferramentas úteis tendo em vista a carência de dados fluviométricos em pequenas bacias hidrográficas brasileiras, além de apresentar boa flexibilidade em prever comportamentos futuros que são consequências das alterações de uso e ocupação do solo (Sartori *et al.*, 2005).

Vários modelos são empregados para estimar o escoamento superficial direto (i.e. chuva excedente), dentre eles um destaque especial é dado ao modelo, desenvolvido em 1950, pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), o antigo *Soil Conservation Service* (SCS), do *United States Department of Agriculture* (USDA). Este modelo é o *Runoff Curve Number Method*, ou simplesmente conhecido como Método do SCS, utilizado para estimar a parcela de chuva total que irá se transformar em escoamento superficial direto (USDA-NRCS, 2004). O modelo agrupa os solos dos Estados Unidos em quatro grupos (A, B, C e D), de acordo com sua capacidade de infiltração e produção de escoamento (Sartori *et al.*, 2005).

Este método foi inicialmente desenvolvido para pequenas bacias hidrográficas agrícolas (USDA-NRCS, 2004), sendo largamente utilizado nos Estados Unidos da América (EUA) ganhando abrangência internacional devido à credibilidade da agência desenvolvedora, a simplicidade e versatilidade, a estabilidade, dependência de apenas um parâmetro e a capacidade de resposta as propriedades da bacia hidrográfica (Ponce e Hawkins, 1996).

A escolha da utilização deste método está relacionada a facilidade de seu uso, e a possibilidade de considerar a cobertura do solo, tornando viável a simulação de cenários e pela boa base de conhecimentos e parâmetros para sua aplicação. Entretanto as informações necessárias para a definição de seu parâmetro foram determinadas apenas para condições específicas dos EUA (Sartori, 2010; Moon *et al.*, 2016). Por essa razão a aplicação do Método do SCS em outras áreas para estimar o escoamento direto pode apresentar alguns problemas, como a superestimação e subestimação do escoamento superficial direto, motivo pela qual muitas modificações foram sugeridas para ajustar tanto a fórmula usada para calcular o escoamento como o *Curve Number* (CN) médio da bacia hidrográfica (Moon *et al.*, 2016).

O Método do SCS introduziu o conceito de uma curva número, que é uma representação quantitativa da relação existente entre as características do solo, seu uso e cobertura e as condições que podem interferir no movimento da água, sendo que a resultante potencial para o escoamento deve ser gerada a partir de uma precipitação de determinada magnitude (Shi *et al.*, 2009).

Para estimar o escoamento superficial direto pelo Método do SCS calcula-se a lâmina de chuva em excesso (Q) para um evento de chuva (P) utilizando um parâmetro chamado *Curve Number* ou Número da Curva de Escoamento (CN). Esse parâmetro combina os principais

fatores que afetam a geração do escoamento, incluindo as características hidrológicas dos solos, a partir da definição de grupos hidrológicos de solo, as condições antecedentes da bacia, a cobertura da terra e as práticas conservacionistas (Hawkins, 1975). Em bacias hidrográficas que não possuem dados de monitoramento de chuva e vazão para a calibração do parâmetro CN, é comum que sua seleção seja feita em função do grupo hidrológico do solo, do uso e manejo da solo, utilizando a tabela original publicada em manuais dos EUA (Sartori, 2010).

Por sua vez, o CN é utilizado para determinar o quanto de chuva infiltrou no solo e quanto tornou-se escoamento superficial. Se o valor do número da curva for alto significa que houve baixa infiltração e que alta quantidade de chuva se tornou escoamento, essas características são comumente encontradas em áreas urbanas. Quando o valor da curva for baixo, significa dizer que houve alta infiltração e baixo escoamento, podendo indicar uma área rural ou de solo seco (Zhan e Huang, 2004).

Desta forma, o escoamento superficial direto gerado em uma bacia hidrográfica é consequência de uma certa quantidade de precipitação. E os modelos conhecidos como chuva-vazão são utilizados para estimar o escoamento superficial indicando a relação entre a quantidade de chuva e o escoamento superficial direto em uma bacia hidrográfica. Para melhor compreender esses modelos descreve-se sua formulação de forma mais detalhada, no item a seguir.

Zhan e Huang (2004) desenvolveram estudos sobre a ferramenta *ArcCN-Runoff* (ArcCN-escoamento), uma extensão do *software* ArcGIS, que pode ser aplicada na determinação dos valores de CNs e no cálculo do escoamento ou da infiltração para um evento de precipitação em um divisor de águas, baseado na variação espacial de informações de solo e uso do solo. Ao contrário do modo matricial (*raster*), o *ArcCN-Runoff* pode ser utilizado o formato de qualquer polígono, mantendo os limites irregulares da bacia inalterados. Há um banco de dados de CN implementado e o usuário pode desenvolver seu próprio banco de dados. A implementação de técnicas de geoprocessamento, como dissolução, intersecção e tabelas de referência CN melhoram a eficiência e reduzem o tempo de processamento para o cálculo do escoamento superficial.

Nagarajan e Poongothai (2012) buscaram avaliar a quantidade de escoamento superficial de uma bacia hidrográfica na Índia utilizando o modelo SCS-CN com técnicas de

sensoriamento remoto e SIG. Para calcular e prever o escoamento da bacia foram considerados os dados de uso e cobertura do solo, o grupo hidrológico do solo e os fatores de condição de umidade antecedente. No modelo SCS-CN baseada em SIG, o CN e valores diários de precipitação foram usadas como entradas para calcular o escoamento diário. Os autores concluíram que integração de dados de sensoriamento remoto e aplicação do modelo SCS-CN em um ambiente SIG é uma ferramenta poderosa para a estimar o escoamento superficial.

Kalantari *et al.* (2014) analisaram as mudanças na vazão de pico e escoamento total resultante de seis medidas de uso do solo simuladas em uma bacia hidrográfica na Noruega, combinado com uma série de dados meteorológicos e um modelo hidrológico distribuído (MIKE SHE), aplicado para quantificar o efeito de cenários de uso do solo na vazão de pico e no escoamento total, de forma a identificar as melhores medidas para reduzi-los. Para isso, determinou-se: o impacto do desmatamento na quantidade e na intensidade do escoamento superficial; a eficácia das medidas simuladas a montante (reflorestamento, buffers de vegetação e hidrovias gramadas) em reduzir a quantidade e a intensidade do escoamento superficial. Para definir o tamanho e a intensidade da precipitação em períodos específicos de tempo de retorno, foi utilizada a curva IDF e a precipitação máxima de curto prazo entre os anos de 1974 e 2008. Os períodos de retorno utilizados foram 2, 5, 10 e 50 anos, para a realização da modelagem foi escolhido um evento de tempestade específico para cada um deles.

Concluiu-se então que, a implementação de diferentes medidas de uso do solo apresentou diferentes impactos sobre a resposta hidrológica e a quantidade de escoamento superficial. Das medidas corretivas testadas, o reflorestamento foi a mais eficiente em reduzir o pico de vazão e o escoamento superficial total, principalmente em tempestades pequenas. O reflorestamento próximo a saída da bacia foi mais eficiente do que a montante da bacia, indicando a importância do planejamento das medidas de uso considerando sua distribuição espacial.

Já os estudos desenvolvidos por Ozdemir e Elbas (2015) em duas bacias hidrográficas urbanas e vizinhas em Istambul, Turquia, buscaram compreender os impactos causados pela mudança de uso do solo no escoamento direto aplicando o Método do SCS. Utilizou-se dados diários de precipitação, grupos hidrológicos do solo e uso do solo de três diferentes datas (1982, 1996 e 2012). O impacto da mudança do uso do solo e desempenho do modelo foram

avaliados com a regressão chuva-vazão, o coeficiente de determinação e o teste de eficiência Nash–Sutcliffe usando dados de escoamento de referência com base nas condições de uso da terra em 1982. Observou-se, entre os anos de 1996 e 2012, um aumento das superfícies impermeáveis em ambas as bacias, concluindo-se que essas mudanças de uso da terra nas duas bacias impactaram diretamente na distribuição CN e nas condições do escoamento superficial, e que as diferentes decisões de uso do solo, por parte de autoridades políticas, influenciam de forma diferente o escoamento superficial gerado pela bacia hidrográfica.

Conclui-se também que a lâmina de escoamento superficial é mais influenciada pelas mudanças de uso do solo em superfícies impermeáveis na bacia urbana do que por características de chuva. Já que o mesmo tipo de precipitação resulta em distintas lâminas de escoamento superficial para bacias urbanas com diferentes condições de uso do solo.

O modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi utilizado por Rodrigues *et al.* (2015) para analisar a dinâmica da vazão, buscando avaliar o impacto provocado pelas alterações de uso do solo na disponibilidade de água da bacia do Rio Pará, em Minas Gerais. O modelo SWAT permite para avaliar os impactos de mudanças no uso do solo em diferentes variáveis do ciclo hidrológico, tais como escoamento superficial, fluxo de águas subterrâneas, evapotranspiração, geração de sedimentos, nutrientes e qualidade da água. Para ajustar o modelo hidrológico foram utilizados dados de topografia, uso da terra, cobertura vegetal, pedologia, hidrologia, fluviometria, precipitação, temperatura, vento, umidade do ar e radiação solar. Para elaboração do mapa de uso e cobertura do solo, utilizou-se métodos de classificação temática e reconhecimento de padrões de um mosaico de três imagens orbitais do Landsat 5 TM. A alteração no uso do solo pela supressão da vegetação original de Cerrado e de Floresta Estacional Semidecidual para implantação de pastagem em 38% do território da bacia resultou na diminuição em média de 8,36% na evapotranspiração e no aumento de cerca de 10% na vazão da bacia.

Conforme apresentado por esta revisão bibliográfica, diferentes metodologias e modelos podem ser empregados para avaliar os impactos causados nos componentes do ciclo hidrológico pela alteração do uso e cobertura do solo. Nota-se também que para realizar a previsão de escoamento superficial direto diante dos cenários prospectivos de uso e cobertura do solo necessita-se de uma série histórica de dados com medição mais frequente do que mensal, que atualmente está disponível para a bacia de estudo. A insuficiência de dados hidrológicos da bacia hidrográfica do Córrego Taquari, como precipitação e vazão,

voltados a modelagem hidrológica, impossibilita a calibração do modelo de previsão de escoamento superficial. Sendo assim, a proposta desta pesquisa é realizar de uma análise de sensibilidade de aplicação do Método do SCS, visto a importância que as alterações de uso e cobertura do solo podem representar sobre a alteração no escoamento superficial direto de uma bacia.

#### 4.6.1. Relação chuva-vazão

De acordo com USDA-NRCS (2004) a versão inicial da relação chuva-vazão foi descrita por Mockus (1949), que apresentou o gráfico de escoamento total *versus* a chuva total durante uma tempestade com uma tendência côncava para cima e indicou que, em casos de pequenas chuvas, não há escoamento superficial devido à totalidade de sua infiltração. Com o aumento da precipitação a tendência é que a curva se torne assintótica a uma linha paralela à linha de igualdade.

Para determinar uma equação que descreve o padrão da curva considerou-se que a condição em que não houvesse abstração inicial, ou seja,  $I_a = 0$ , desse forma, a curva apropriada resultou da hipótese que a relação entre a perda efetiva por infiltração no solo e a capacidade máxima de perda por infiltração após o escoamento iniciar é igual a relação entre o escoamento superficial direto e o volume máximo possível de escoar, ou seja:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad \text{Equação (4.4)}$$

Onde:

- $F$  = Volume de água retido no solo após o escoamento iniciar, em polegadas
- $S$  = Potencial máxima retenção após escoamento iniciar ( $S \geq F$ ), em polegadas
- $Q$  = Escoamento real, em polegadas
- $P$  = Precipitação real ( $P \geq Q$ ), em polegadas

Para satisfazer a conservação de massa, tem-se:

$$F = P - Q \quad \text{Equação (4.5)}$$

Substituindo a definição de  $F$  da Equação (4.5) na Equação (4.4) e isolando  $Q$ , tem-se:

$$Q = \frac{P^2}{P + Q} \quad \text{Equação (4.6)}$$

A Equação (4.6) representa a relação entre a precipitação e o escoamento, sem conter o termo de abstração inicial ( $I_a$ ) que envolve a parcela de chuva que é interceptada, infiltrada antes do escoamento iniciar e armazenada em depressões superficiais. Quando a abstração inicial não é zero, a quantidade de chuva disponível para o escoamento não é mais  $P$  e sim  $(P - I_a)$ . Substituindo  $P$  por  $(P - I_a)$  na Equação (4.4) obtém-se:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad \text{Equação (4.7)}$$

A retenção total para uma chuva consiste em  $I_a$  e  $F$ , de modo que a equação conservação de massa, Equação (4.5), pode ser expressa por:

$$F = (P - I_a) - Q \quad \text{Equação (4.8)}$$

Substituindo  $F$  da Equação (4.8) na Equação (4.7) e isolando  $Q$  a equação de escoamento superficial resultante é a seguinte:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{Equação (4.9)}$$

A partir de eventos chuva-vazão observados em pequenas bacias, onde o tempo de retardamento é mínimo, pode se determinar a abstração inicial, sendo ela a precipitação que ocorre antes do escoamento superficial começar. A infiltração durante o início da chuva é bastante variável e depende de fatores como selamento superficial, intensidade da chuva e umidade do solo. Já a interceptação e o armazenamento nas depressões superficiais pode ser estimado a partir das condições reais de cobertura e superfície do solo. Pela dificuldade de estimar a infiltração, estabelecer uma relação para estimar as abstrações iniciais torna-se uma tarefa complexa. Por esse motivo assumiu-se que  $I_a$  é uma função do parâmetro  $S$ , ficando estabelecida a seguinte relação:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad \text{Equação (4.10)}$$

A relação chuva-vazão é obtida substituindo Equação (4.10) para a abstração inicial na Equação (4.9), tem-se:

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{para } P \geq 0,2 \cdot S \quad \text{Equação (4.11)}$$

$$Q = 0 \quad \text{para } P \leq 0,2 \cdot S$$

Para tornar o método mais indutivo com o parâmetro que reflita as condições da terra, foi proposta a seguinte equação, que é a transformação do parâmetro  $S$  em polegadas:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad \text{Equação (4.12)}$$

Onde CN é adimensional e representa o número da curva de escoamento superficial, 10 e 1000 são números em polegadas escolhidos para que o novo parâmetro variasse positivamente com o escoamento e dentro de um limite, de zero a 100,  $S$  em polegadas. Para utilizar o parâmetro  $S$  em milímetros, USDA-NRCS (2004) recomenda a seguinte equação:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad \text{Equação (4.13)}$$

Isolando o  $S$ , tem-se:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação (4.14)}$$

O escoamento superficial direto é gerado a partir de uma precipitação, para efeito de cálculo definiu-se uma chuva de projeto conforme apresentado no item 4.6.4. Já o parâmetro CN será escolhido em função do uso e manejo do solo e também do grupo hidrológico, no qual o solo foi classificado, para tanto são utilizadas tabelas de escolha do CN apresentadas no item a seguir.

#### **4.6.2. Grupos hidrológicos de solos (GHS)**

O solo é classificado em quatro grupos hidrológicos de acordo com o potencial de escoamento superficial, sendo denominados como A, B, C e D, onde A se refere ao grupo com menor potencial de escoamento e D o grupo de maior potencial. O escoamento superficial é influenciado pelas características do solo, dessa forma, de acordo com a combinação de suas propriedades, diferentes tipos de solo podem causar o mesmo tipo de influência na geração do escoamento superficial (Sartori, 2010).

O objetivo da classificação do solo é indicar a influência das características do solo no processo de geração de escoamento superficial, desta maneira, independente da declividade

da bacia hidrográfica e de sua cobertura vegetal, é possível classificar os solos de acordo com as propriedades que governam os processos hidrológicos da bacia hidrográfica (Sartori, 2010).

Originalmente os grupos hidrológicos de solo foram atribuídos com base em medições de precipitação e escoamento para estimar a infiltração, proposto por Musgrave (1955). Segundo o mesmo autor, a infiltração pode ser estimada para cada combinação entre tipo de solo e cobertura vegetal, ou seja, para cada complexo hidrológico solo-cobertura. Essa estimativa pode ser usada para calcular o excesso de precipitação, para cada área da bacia, e a combinação desses cálculos é utilizada para estimar o escoamento de toda a bacia hidrográfica. O escoamento estimado pode ser comparado com eventos registrados de chuva e vazão, dessa forma as divergências no cálculo da infiltração podem sofrer reajuste até que o escoamento superficial observado esteja de acordo com o calculado, em seguida a estimativa da infiltração pode ser aplicada para a bacia hidrográfica. Com este estudo, baseado na infiltração, foi observado que as características gerais dos solos poderiam ser descritas em quatro grupos hidrológicos, a saber:

Grupo A – inclui areia muito permeável e profunda, silte bem agregado e profundo, de origem eólica, ambos apresentam pouca argila e coloides. O silte contém quantidade suficiente de matéria orgânica para fornecer boa agregação. A taxa de filtração mínima maior 7,62 mm/h.

Grupo B – inclui solos arenosos e franco siltosos de profundidade moderada e com infiltração acima da média. A capacidade mínima de infiltração varia de 3,81 a 7,62 mm/h.

Grupo C – inclui solos rasos em todas as classes texturais, com taxa de filtração mínima abaixo da média (1,27 a 3,81 mm/h).

Grupo D – inclui solo de elevada taxa de expansão na superfície ou na subsuperfície devido ao alto teor de argila ou coloide. A capacidade mínima de infiltração é de aproximadamente 1,27 mm/h.

A classificação feita por Musgrave (1955) sofreu algumas modificações para incluir características dos solos que não estavam sendo contempladas por ela, e assim ela foi incorporada ao Método do SCS (SCS, 1972) e hoje é internacionalmente conhecida por definir os grupos hidrológicos da seguinte forma:

Grupo A – inclui solos com baixo potencial de escoamento superficial e altas taxas de infiltração, mesmo quando completamente molhados. São essencialmente de areias e cascalhos, ambos profundos e muito bem drenados e com alta taxa de transmissão de água.

Grupo B – inclui solos que, quando completamente molhados, apresentam taxas moderadas de infiltração. São solos de moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa, e com moderada taxa de transmissão de água.

Grupo C – inclui solos que, quando completamente molhados, apresentam baixas taxas de infiltração, consistem essencialmente de solos com uma camada que impede o movimento da água para baixo e de solos com textura moderadamente fina a fina, e com baixa taxa de transmissão de água.

Grupo D – inclui solos com alto potencial de escoamento. Quando estão completamente molhados eles têm baixas taxas de infiltração e consistem essencialmente de solos argilosos com elevado potencial de expansão. Solos com lençol subterrâneo permanentemente elevado, solos com uma densa camada de argila ou camada de argila na superfície ou próxima dela, e solos rasos sobre material quase impermeável, e com taxa de transmissão de água muito baixa.

A aplicação dos dois tipos de classificação apresentados está atrelada à taxa mínima de infiltração na área de estudo, dados que nem sempre são medidos e estão disponíveis. Um critério mais simples, baseada na classe textural do solo, foi proposto por Brakensiek e Rawls (1983) e em uma publicação do SCS (1986) para associar os solos aos grupos hidrológicos.

Grupo A – Areia, Areia franca ou Franco arenoso; Grupo B – Franco ou Franco siltoso; Grupo C – Franco argilo arenoso; e, Grupo D – Franco argiloso, Franco argilo siltoso, Argila arenosa, Argila siltosa ou Argila.

A classe textural silte não é apresentada nessa classificação, porém ela é considerada como uma extensão do grupo hidrológico B. Quando não existem outros critérios que possam ser utilizados na classificação, este método baseado na classe textural é bastante utilizado. Entretanto em solo que tenham mudança textural ao longo do perfil a classificação pode se tornar complexa, já que é baseada apenas na textura superficial do solo, não considerando seus diferentes horizontes (Sartori, 2010).

A atual publicação da USDA-NRCS (2009) que revisa a classificação hidrológica dos solos buscando diminuir a subjetividade do processo, é baseada na condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) do horizonte menos permeável do perfil de solo, na profundidade da camada impermeável e na profundidade do nível d'água subterrâneo, não sendo considerada a inclinação da superfície. O solo é classificado de acordo com as seguintes características:

Grupo A – Quando o solo está completamente molhado apresenta baixo potencial de escoamento. Apresenta alta permeabilidade, pois a água é transmitida livremente através do solo. O solo possui menos que 10 % de argila e mais que 90 % de areia ou cascalho. Solos pertencentes às classes texturais areia franca, franco arenoso, franco, ou franco siltoso podem ser incluídos neste grupo caso tenham mais de 35 % de fragmentos rochosos ou sejam bem agregados, de baixa densidade.

Grupo B – Os solos neste grupo, quando estão completamente molhados, têm potencial moderadamente baixo de escoamento. Transmissão de água através do solo é desimpedida, ou seja, apresenta permeabilidade moderadamente alta. Os solos apresentam entre 10 e 20 % de argila e 50 a 90 % de areia. A textura de areia franca ou franco arenoso. Alguns solos pertencentes às classes texturais franco, franco siltoso, silte, ou franco argilo arenoso podem ser classificados neste grupo se forem bem agregados, de baixa densidade, ou se apresentarem mais que 35 % de fragmentos rochosos.

Grupo C – Solos neste grupo, quando completamente molhados, têm potencial moderadamente elevado de escoamento superficial. A sua permeabilidade é moderadamente baixa, pois a transmissão de água através do solo é um pouco restrita. Os solos normalmente possuem entre 20 e 40 % de argila e menos de 50 % de areia e são de textura franco, franco siltoso, franco argilo arenoso, franco argiloso, e franco argilo siltoso. Alguns solos pertencentes às classes texturais argila, argila siltosa, ou argila arenosa podem ser incluídos neste grupo se forem bem agregados, de baixa densidade, ou se apresentarem mais que 35 % de fragmentos rochosos.

Grupo D – Solos neste grupo, quando estão completamente molhados, têm potencial elevado de escoamento superficial. O movimento de água através do solo é restrito ou muito restrito, ou seja, apresenta permeabilidade baixa ou muito baixa. Os solos têm tipicamente mais que 40 % de argila e menos que 50 % de areia e são de textura argilosa. Em algumas áreas, eles também têm elevado potencial de contração-expansão. Todos os solos com profundidade a

uma camada impermeável menor que 50 cm e todos os solos com lençol subterrâneo dentro dos primeiros 60 cm de profundidade pertencem a este grupo.

Grupos hidrológico duplo – Alguns solos são classificados no grupo D baseado somente na presença de lençol d'água subterrâneo menor que 60 cm de profundidade, apesar da condutividade hidráulica saturada ser favorável para a transmissão de água. No caso desses solos depois de encharcados estiverem adequadamente drenados podem ser atribuídos aos grupos hidrológicos duplos (A/D, B/D, e C/D), com base na sua condutividade hidráulica saturada e na profundidade do lençol freático. A primeira letra se aplica às condições após drenagem e a segunda letra se aplica à condição natural não drenada.

Se os dados de condutividade hidráulica saturado são disponíveis e considerados confiáveis, eles devem ser usados juntamente com a profundidade do lençol freático para classificação do solo em um grupo hidrológico, as informações apresentadas na Tabela 4.1 podem ser usadas para determinar o grupo hidrológico de um solo. (USDA-NRCS, 2009).

Tabela 4.1 – Critérios para classificação hidrológica de solos  
(USDA-NRCS, 2009)

<b>Profundidade da camada impermeável<sup>(1)</sup></b>	<b>Profundidade do lençol subterrâneo<sup>(2)</sup></b>	<b>K<sub>s</sub> da camada menos permeável (μm/s)</b>	<b>K<sub>s</sub> intervalo de profundidade</b>	<b>GHS<sup>(3)</sup></b>
< 50 cm	–	–	–	D
50 a 100 cm	< 60 cm	> 40 μm/s	0 a 60 cm	A/D
		>10 a ≤ 40 μm/s	0 a 60 cm	B/D
		>1 a ≤ 10 μm/s	0 a 60 cm	C/D
		≤ 1 μm/s	0 a 60 cm	D
	≥ 60 cm	> 40 μm/s	0 a 50 cm	A
		> 10 a ≤ 40 μm/s	0 a 50 cm	B
		> 1 a ≤ 10 μm/s	0 a 50 cm	C
		≤ 1 μm/s	0 a 50 cm	D
> 100 cm	< 60 cm	> 10 μm/s	0 a 100 cm	A/D
		> 4 a ≤ 10 μm/s	0 a 100 cm	B/D
		> 0,40 a ≤ 4 μm/s	0 a 100 cm	C/D
		≤ 0,40 μm/s	0 a 100 cm	D
	60 a 100 cm	> 40 μm/s	0 a 50 cm	A
		> 10 a ≤ 40 μm/s	0 a 50 cm	B
		> 1 a ≤ 10 μm/s	0 a 50 cm	C
		≤ 1 μm/s	0 a 50 cm	D
	> 100 cm	> 10 μm/s	0 a 100 cm	A
		> 4 a ≤ 10 μm/s	0 a 100 cm	B
		> 0,40 a ≤ 4 μm/s	0 a 100 cm	C
		≤ 0,40 μm/s	0 a 100 cm	D

<sup>(1)</sup> Uma camada impermeável tem um K<sub>sat</sub> menor do que 0,01 μm/s.

<sup>(2)</sup> Lençol freático alto durante qualquer mês durante o ano.

<sup>(3)</sup> GHS duplo é aplicado somente para solos úmidos (lençol freático menor de 60 cm de profundidade). Se estes solos podem ser drenados, um GHS menos restritivo pode ser atribuído, dependendo da K<sub>sat</sub>.

Alguns pesquisadores apresentaram estudos visando adaptar a classificação hidrológica dos solos para os solos brasileiros. Essas adaptações se tornam necessárias visto que os solos brasileiros apresentam taxas mínimas de infiltração mais elevadas e características que não se enquadram na classificação norte-americana. As tabelas a seguir trazem a classificação proposta por Sartori *et al.* (2005) para solos brasileiros.

Tabela 4.2 – Grupos hidrológicos do SCS segundo condições de solos brasileiros  
(Sartori *et al.*, 2005 adaptado por Bielenki Júnior e Barbassa, 2012)

<b>Característica</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>Profundidade do solo</b>	Muito profundo (>2) ou profundo (1 a 2 m)	Profundo (1 a 2 m)	Profundo (1 a 2 m) ou pouco profundo (0,5 a 1 m)	Solo raso (<0,5 m)
<b>Resistência e tolerância a erosão</b>	Alta	Moderada	Baixa	Pouquíssima
<b>Taxa mínima de infiltração</b>	- Alta taxa de infiltração - Solos bem drenados ou excessivamente drenados	Moderada taxa de infiltração	Baixa taxa de infiltração	Taxa de infiltração muito baixa
<b>Razão textural</b>	Solos porosos com baixo gradiente textural < 1,2	Solos porosos com gradiente textural de 1,2 a 1,5	São solos com gradiente textural > 1,5 comumente com mudança textural abrupta	Muito variável

Tabela 4.3 – Classificação hidrológica para solos brasileiros  
(Sartori *et al.*, 2005 adaptado por Bielenki Júnior e Barbassa, 2012)

GHS	Pedologia e textura	Características
A	Latossolo amarelo, latossolo vermelho-amarelo, latossolo vermelho, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; latossolo amarelo e latossolo vermelho-amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.	-Solos de textura média; -Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; -Solos com argila de atividade baixa, minerais de argila 1:1; -Textura dos horizontes superficial e subsuperficial: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.
B	Latossolo amarelo e latossolo vermelho-amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; latossolo bruno; nitossolo vermelho; neossolo quartzarênico; argissolo vermelho ou vermelho-amarelo de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.	-Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; -Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; -Solos com argila de atividade baixa, minerais de argila 1:1; -Textura dos horizontes superficial e subsuperficial: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.
C	Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou argissolo vermelho, argissolo vermelho-amarelo e argissolo amarelo, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; cambissolo de textura média e cambissolo háplico ou húmico, mas com características físicas semelhantes aos latossolos (latossólico); espodossolo ferrocárbico; neossolo flúvico.	-Solos associados a argila de atividade baixa; -Textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.
D	Neossolo lítólico; organossolo; gleissolo; chernossolo; planossolo; vertissolo; alissolo; luvisolo; plintossolo; solos de mangue; afloramentos de rocha; demais cambissolos que não se enquadram no grupo C; argissolo vermelho-amarelo e argissolo amarelo, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.	-Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade, minerais de argila 2:1; -Solos argilosos associados à argila de atividade alta; -Solos orgânicos.

A definição do valor de CN é realizada após os solos estarem devidamente classificados de acordo com a classificação hidrológica do solo. Para isso serão apresentadas no item a seguir tabelas que relacionam o uso e cobertura do solo com os GHS resultando na indicação de um valor de CN, que será posteriormente utilizado para calcular o escoamento superficial direto.

#### 4.6.3. Parâmetro CN

Conforme apresentado no item 4.6, o parâmetro CN é função das características hidrológicas, uso e cobertura do solo e condições de umidade antecedente (AMC - *Antecedent Moisture Conditions*). As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os valores de CN para os GHS em termos de uso, ocupação, percentual de impermeabilização para condições de umidade antecedente médias (AMC II).

Tabela 4.4 – CN em função da descrição da área e do GHS com AMC II para área urbana (SCS, 1986 adaptado por Bielenki Júnior e Barbassa, 2012)

Descrição das Áreas		CN			
		Grupos hidrológicos			
Uso, ocupação, impermeabilização e condições hidrológicas		A	B	C	D
Espaços abertos, parque, jardim, cemitério, campos de golfe	Em condições ruins, cobertura gramada < 50%	68	79	86	89
	Em condições normais, cobertura gramada de 50 a 75%	49	69	79	84
	Em boas condições. Cobertura gramada > 75%	39	61	74	80
	Estacionamentos, pavimentos, telhados, etc.	98	98	98	98
	Ruas e estradas pavimentadas e com sistema de drenagem	98	98	98	98
Área impermeabilizada	Ruas e estradas pavimentadas com valas e faixas laterais de servidão	83	89	92	93
	Ruas e estradas com cascalho ou pedregulhos com faixa lateral de servidão	76	85	89	91
	Ruas e estradas de terra com faixa lateral de servidão	72	82	87	89
	Área comercial com impermeabilização média de 85%	89	92	94	95
	Área industrial com impermeabilização média de 72%	81	88	91	93
	<500 m <sup>2</sup> e 65%	77	85	90	92
	1000 m <sup>2</sup> e 38%	61	75	83	87
Área residencial com lote de área e impermeabilização médias	1300 m <sup>2</sup> e 30%	57	72	81	86
	2000 m <sup>2</sup> e 25%	54	70	80	85
	4000 m <sup>2</sup> e 20%	51	68	79	84
	8000 m <sup>2</sup> e 12%	46	65	77	82
	Área terraplanada sem vegetação	77	86	91	94

Tabela 4.5 – CN em função da descrição da área e do GHS com AMC II para área rural (SCS, 1986 adaptado por Bielenki Júnior e Barbassa, 2012)

Descrição das Áreas		Condições hidrológicas	CN			
			Grupos hidrológicos			
Tipo de cobertura	Manejo		A	B	C	D
Área não semeada	Solo exposto	----	77	86	91	94
	Com resíduos vegetais	Más	76	85	90	93
		Boas	74	83	90	93
Plantação em fileira	Em fileiras retas	Más	72	81	88	91
		Boas	67	78	85	89
	Em fileira reta e resíduos vegetais	Más	71	80	87	90
		Boas	64	75	82	85
	Ao longo de curvas de nível	Más	70	79	84	88
		Boas	65	75	82	86
	Ao longo de curvas de nível com resíduos vegetais	Más	69	78	83	87
		Boas	64	74	81	85
	Ao longo de curvas de nível e terraceado	Más	66	74	80	82
		Boas	62	71	78	81
	Ao longo de curvas de nível, terraceado e com resíduos vegetais	Más	65	73	79	81
		Boas	61	70	77	80
Plantação de cereais	Em fileiras retas	Más	65	76	84	88
		Boas	63	75	83	87
	Em fileira reta e resíduos vegetais	Más	64	75	80	84
		Boas	60	72	80	84
	Ao longo de curvas de nível	Más	63	74	82	85
		Boas	61	73	81	84
	Ao longo de curvas de nível com resíduos vegetais	Más	62	73	81	84
		Boas	60	72	80	83

Tabela 4.5 – Continuação...

Descrição das Áreas			CN				
			Grupos hidrológicos				
Tipo de cobertura	Manejo	Condições hidrológicas	A	B	C	D	
Plantação de cereais	Ao longo de curvas de nível e terraceado	Más	61	72	79	81	
		Boas	59	70	78	81	
	Ao longo de curvas de nível, terraceado e com resíduos vegetais	Más	60	72	78	81	
		Boas	58	69	77	80	
Plantação de legumes, forragens de rotação via semeadura manual ou com equipamento	Em fileira reta	Más	66	77	85	89	
		Boas	58	72	81	85	
	Ao longo de curvas de nível	Más	64	75	83	85	
		Boas	55	69	78	83	
		Ao longo de curvas de nível e terraceado	Más	63	73	80	83
			Boas	51	67	76	80
Florestas	Resíduos florestais, pequenas árvores e mato são destruídos pela pastagem ostensiva e queimada regular	Más	45	66	77	83	
		Normais	36	60	73	79	
	Floresta explorada, mas não queimada, e alguns resíduos florestais cobrindo o solo	Boas	30	55	70	77	
Pastagens de uso contínuo	< 50% solo com cobertura ou pastagem ostensiva sem resíduos agrícolas	Más	68	79	86	89	
	50 a 75% solo com cobertura sem pastagem ostensiva	Normais	49	69	79	84	
	> 75% solo com cobertura e leve ou ocasional pastagem	Boas	39	61	74	80	
Mato, mistura de arbustos, erva-daninha, grama com predominância de arbustos	< 50% do solo coberto	Más	48	67	77	83	
	50 a 75% do solo coberto	Normais	35	56	70	73	
	> 75% do solo coberto	Boas	30	48	65	73	

Tabela 4.5 – Continuação...

Descrição das Áreas		CN				
		Grupos hidrológicos				
Tipo de cobertura	Manejo	Condições hidrológicas	A	B	C	D
		Más	57	73	82	86
Combinação de bosque e gramado como pomar ou floresta manejada (50% de floresta e 50% de gramado)		Normais	43	65	76	82
		Boas	32	58	72	79
			30	58	71	78
Terra com vasta extensão de gramas para lavoura e silagem			59	74	82	96

Para o cálculo do escoamento superficial futuro na área de estudo, em função do cenário prospectivo do uso e cobertura do solo determinado pelo modelamento da dinâmica ambiental, haverá necessidade de se estabelecer uma previsão da precipitação, por meio do cálculo da chuva de projeto.

#### 4.6.4. Chuva de projeto

Há um elevado interesse, por parte de profissionais e pesquisadores, no que diz respeito ao que se pode esperar das chuvas para o futuro, ao invés do que aconteceu no passado. Muitos tipos de análises hidrológicas exigem a estimativa da intensidade da chuva para certa duração e frequência de ocorrência, diante disso, o histórico das chuvas é um dado importante para que, de forma estatísticas, seja determinada as chuvas previstas para o futuro, a chamada chuva de projeto (Haan *et al.*, 1993).

Para estimar a chuva de projeto considera-se um hietograma de intensidade de precipitação constante, com duração igual ou superior ao tempo de concentração da bacia hidrográfica, com o intuito de garantir a contribuição de toda a área drenada. Um dos métodos mais utilizados para a definição da chuva de projeto consiste na adoção de chuvas padronizadas, que são obtidas a partir das relações IDF (Intensidade - Duração - Frequência). A intensidade corresponde à relação entre altura precipitada e sua duração, para uma dada frequência de

ocorrência num determinado número de anos, traduzida em período de retorno. Os registros históricos de alturas de precipitação *versus* duração são tabulados e processados estatisticamente, resultando nas curvas IDF de uma determinada localidade (Canholi, 2015).

A partir da equação IDF define-se o total precipitado e a distribuição temporal dos volumes precipitados que condicionará o volume infiltrado e a forma do hidrograma de escoamento superficial direto, originado pela chuva excedente. A equação apresentada a seguir foi proposta pelo GDF (2009a), e relaciona a intensidade média da chuva, sua duração e período de retorno, período em que o evento é igualado ou superado:

$$I = \frac{1574,70 \cdot T^{0,207}}{(D + 11)^{0,884}} \quad \text{Equação (4.15)}$$

Onde:

$I$  = Intensidade da chuva, em mm/h

$T$  = Tempo de retorno, em anos

$D$  = Duração da chuva, em min

O tempo de retorno ( $T$ ) é definido como a recíproca da probabilidade de excedência, e também reflete o grau de proteção ao qual a população está sujeita. Trata-se, portanto, de escolher qual o risco aceitável pela comunidade (Tucci, 2000). A equação proposta pela Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (Novacap) é ajustada para valores menores de precipitação e, portanto, de tempo de retorno menor ou igual a cinco anos (GDF, 2009a).

A duração da chuva pode ser considerada igual ou maior do que o tempo de concentração da bacia hidrográfica, que é o tempo necessário para o descolamento da água que precipitou no ponto mais distante da bacia até a seção principal. É também definido como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma. Existem muitas fórmulas para calcular o tempo de concentração de uma bacia, a Equação (4.16) citada por McCuen *et al.* (1984) foi definida para bacias urbanizadas com área inferior a 21 km<sup>2</sup>, comprimento do canal menor que 11 km e baixa declividade do talvegue.

$$t_c = \frac{5,862 \cdot L^{0,6}}{S^{0,3}} \quad \text{Equação (4.16)}$$

Onde:

- $t_c$  = Tempo de concentração, em min
- $L$  = Comprimento do talvegue, em km
- $S$  = Declividade do talvegue, em m/m

O tempo de concentração é necessário para calcular a chuva de projeto, esta, por sua vez, utiliza-se como a estimativa da precipitação na área da bacia hidrográfica. Para calcular o escoamento superficial direto, pela relação de chuva-vazão, utiliza-se a precipitação estimada, juntamente com o potencial de retenção máximo, sendo que este último depende diretamente do parâmetro CN.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

São descritos a seguir os materiais utilizados e a metodologia aplicada na pesquisa.

### 5.1. MATERIAL

Para o desenvolvimento das etapas propostas, foram utilizados algoritmos de geoprocessamento inseridos nos sistemas ArcGIS 10 e Spring 5.4.3 para criação de banco de dados, classificação temática de imagens e para geração de mapas de vulnerabilidade ambiental, de temperatura de superfície terrestre e de escoamento superficial. A modelagem ambiental para formulação de cenários prospectivos de uso e cobertura do solo foi desenvolvida na plataforma de simulação ambiental Dinamica EGO.

Os dados cartográficos utilizados foram obtidos por meio do processamento das imagens de sensores orbitais, que estão descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Imagens de sensores remotos orbitais

Satélite	Data	Resolução espacial	Fonte
Landsat 5 TM, cena 221/71	18/09/1985	30 m; 120 m - termal	DGI/INPE (2016)
	14/09/1995		/ USGS (2016)
	09/09/2005		
	18/07/2009		
	24/07/2011		
Landsat 8 OLI/TIRS, cena 221/71	16/07/2014	30 m; 15 m - pancromático; 100 m - termal	USGS, 2016
	07/09/2016		
Alos AVNIR- 2/PRISM	08/2009	10 m; 2,5 m - pancromático	-
RapidEye REIS	01/09/2011	5 m	MMA, 2016
	19/04/2014		
Ikonos	30/08/2011	1 m	Google Earth Pro, 2016
	05/09/2014		
	14/06/2016		

Para a análise da área de estudo A foram utilizadas imagens dos satélites Landsat 5 e 8, que apesar de apresentar baixa resolução espacial dispõem de maior volume de dado, o que

possibilitou o estudo da evolução do uso e cobertura do solo de 1985 a 2016. Na área de estudo B necessitou-se de imagens com melhor qualidade de resolução espacial, devido ao tamanho da área, por essa razão foram utilizadas imagens dos satélites Alos e RapidEye com datas diferentes das utilizadas na área de estudo A.

Os produtos cartográficos utilizados foram: os mapas pedológico (Embrapa, 1999), geomorfológico (Martins e Baptista, 1998), geológico (Freitas-Silva e Campos, 1998); todos com escala 1:100.000.

Os *shapefiles* de curva de nível do DF, rede de drenagem, estradas, lagos e limite do DF foram obtidos da base cartográfica SICAD 1:10.000. O mapa das unidades hidrográficas do DF, de 1994, elaborado pela extinta SEMATEC em parceria com a CODEPLAN (1994). O modelo digital de terreno (MDT), *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) de 30 metros de resolução.

Foram utilizados também dados meteorológicos (precipitação, temperatura máxima, mínima e média, insolação, umidade relativa do ar média, velocidade do vento média) disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da Estação Brasília, localizada nas coordenadas geográficas 15°46'48" de latitude sul e 47°55'12" longitude oeste, com altitude de 1159,57 m, que se encontra operante desde 12 de setembro de 1961 (INMET, 2017).

## **5.2. MÉTODOS**

Este estudo foi desenvolvido por meio da análise multitemporal do uso e cobertura do solo da área da bacia hidrográfica do Córrego Taquari e seu entorno; do estudo da vulnerabilidade ambiental das áreas de estudo; análise das temperaturas da superfície terrestre e sua relação com o uso e cobertura do solo; da determinação de cenários prospectivos de uso e cobertura do solo; e da análise da influência da dinâmica de uso e cobertura do solo ao longo dos anos sobre o escoamento superficial direto. Foi dividido em cinco etapas, apresentadas na Figura 5.1 e descritas a seguir.

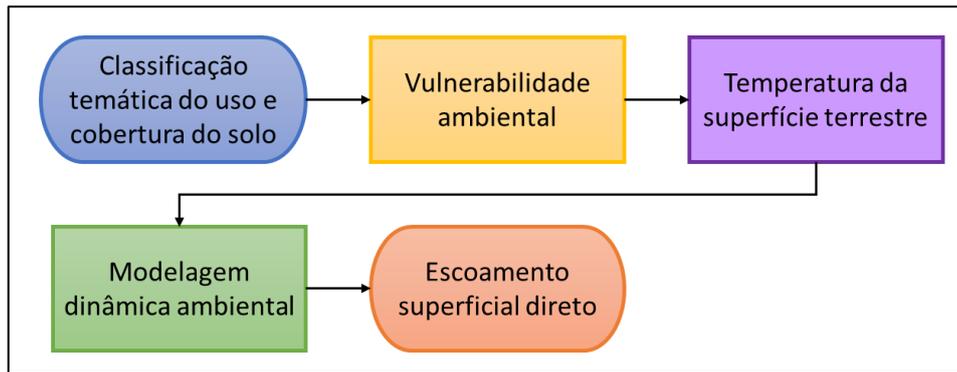


Figura 5.1 – Fluxograma metodológico geral

Na primeira etapa foi realizada a classificação temática do uso e cobertura do solo em uma escala multitemporal, para analisar sua dinâmica e reconhecer a evolução da paisagem entre os anos de 1985 e 2016 para a área de estudo A, utilizando imagens do Landsat TM 5 e Landsat OLI/TIRS 8; e 2009 e 2014 para a área de estudo B, utilizando imagens do ALOS AVNIR-2/PRISM e RapidEye REIS. Os mapas de uso e cobertura do solo gerados nessa etapa são o principal subsídio para o estudo e obtenção da vulnerabilidade ambiental das áreas de estudo.

Na segunda etapa, a partir da classificação temática de uso e cobertura do solo, foi determinado o grau vulnerabilidade ambiental da área de estudo, de forma a identificar a(s) área(s) que apresenta maior grau de vulnerabilidade ambiental a processos erosivos, resultante das modificações causadas pelo processo de ocupação antrópica da bacia de estudo.

Na terceira etapa foram produzidos mapas de temperatura da superfície a partir de imagens cujo comprimento de onda apresenta-se na faixa do termal, banda 6 e 10 dos satélites Landsat TM 5 e Landsat OLI/TIRS 8, respectivamente.

Na quarta etapa foi selecionada a área do Paranoá Parque do GDF, para realizar a simulação dinâmica ambiental por meio do sistema Dinamica EGO, com isso foram gerados cenários prospectivos que apresentam os processos envolvidos na dinâmica de uso e cobertura do solo, representados cartograficamente por meio de mapas de uso e cobertura futura do solo.

Na quinta e última etapa utilizou-se a classificação temática do uso e cobertura do solo e os cenários prospectivos gerados, respectivamente, na primeira e quarta etapa, para analisar como a evolução do processo de antropização da área de estudo altera o valor do CN médio

da bacia e influencia a geração do escoamento superficial direto resultante de uma determinada precipitação, segundo o método do SCS.

### 5.2.1. Produção dos mapas de uso e cobertura do solo

Para a classificação temática do uso e cobertura do solo da área de estudo A, foram utilizadas as imagens multiespectrais das bandas 1 a 5 e 7 do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat 5, para os anos 1985, 1995 e 2005, obtidos pelo *site* da Divisão de Geração de Imagens do INPE; cuja cena representa o Distrito Federal e refere-se à órbita 221 e ao ponto 71. Além de imagens multiespectrais das bandas 1 a 9 do sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8, cena 221/71, do ano de 2016, obtidas pelo *site* da *U.S. Geological Survey*.

No que tange à classificação temática do uso e cobertura do solo da área de estudo B, foram utilizadas imagens multiespectrais de 2009 do satélite ALOS sensor AVNIR-2, que opera nas regiões espectrais do visível e infravermelho possuindo 4 bandas; e do sensor PRISM que apresenta uma banda pancromática. As imagens multiespectrais do satélite RapidEye sensor REIS, bandas 1 a 5, cena 2331802, de 2011 e 2014, adquiridos pelo *site* do Geo Catálogo do Ministério do Meio Ambiente. E imagens do satélite Ikonos, baixadas do Google Earth Pro datadas de 2011 e 2014. A Tabela 5.2 apresenta de forma sucinta as imagens utilizadas nesta etapa e suas características.

Tabela 5.2 – Imagens utilizadas na classificação temática

Satélite	Sensor	Bandas espectrais	Data
Landsat 5	TM	1, 2, 3, 4, 5 e 7	18/09/1985, 14/09/1995 09/09/2005
Landsat 8	OLI	1 a 9	07/09/2016
ALOS	AVNIR-2	1 a 4	08/2009
	PRISM	1	08/2009
RapidEye	REIS	1 a 5	01/09/2011 19/04/2014
Ikonos	-	-	30/08/2011 05/09/2014 14/06/2016

A metodologia para a produção dos mapas de uso e cobertura do solo consta em Almeida *et al.* (2012) e está apresentada na Figura 5.2, cujos passos metodológicos são descritos a seguir.

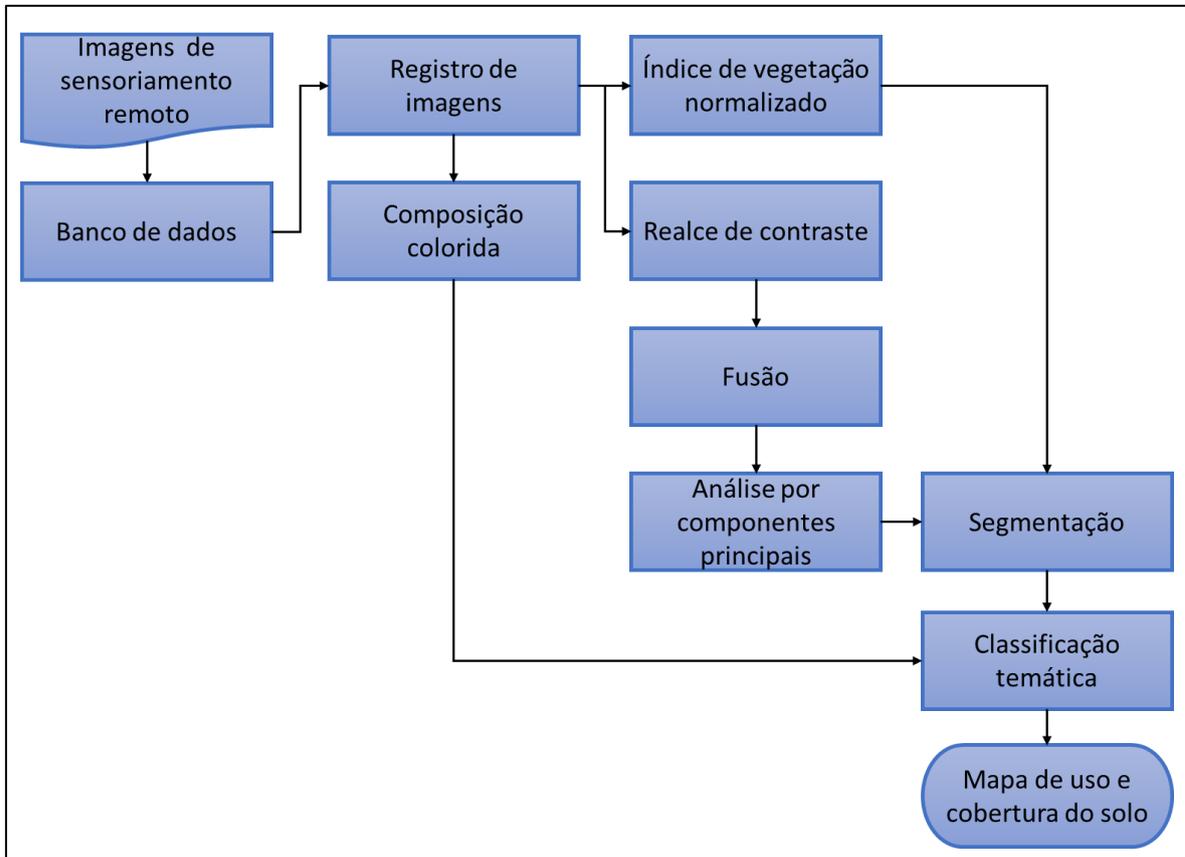


Figura 5.2 – Fluxograma metodológico para produção de mapas de uso e cobertura do solo

- Banco de dados: para iniciar a classificação no Spring criou-se um banco de dados e um projeto, onde foram adicionadas todas as imagens, *shapefiles* e demais planos de informação utilizados para o desenvolvimento deste estudo. Foram criados dois projetos um deles para trabalhar com as imagens do Landsat, com projeção cartográfica UTM e datum WGS-84; e outro para as imagens do RapidEye com projeção cartográfica UTM e datum SIRGAS 2000. Sendo que ao final, todos os mapas gerados pela classificação de uso e cobertura do solo foram transformados para o datum SIRGAS 2000.
- Registro de imagens: trata-se da etapa de transformação geométrica responsável por relacionar as coordenadas geográficas (latitude e longitude) com as coordenadas da imagem (linha e coluna), por meio de pontos de controle, a fim de georreferenciar a imagem a uma base cartográfica. Os pontos de controle foram adquiridos das imagens multiespectrais do satélite Landsat 8, pois essas imagens são disponibilizadas pelo USGS

em bases cartográficas georreferenciadas. As imagens do satélite Ikonos, obtida por meio do software Google Earth Pro, com 1 metro de resolução espacial, foram registradas para que em seguida fosse realizado um mosaico de 6 imagens, para compor a cena que envolve a área de estudo B.

- Composição falsa-cor: para visualizar as imagens, foram relacionadas as bandas espectrais aos canais coloridos do sistema do Spring: vermelho (R), verde (G) e azul (B). Para as imagens do Landsat 5 foi realizada a combinação falsa-cor RGB543; a combinação para as imagens do Landsat 8 foi do tipo falsa-cor RGB654; a composição colorida para as imagens Alos e RapidEye foram RGB321, que foram as composições que melhor separaram visualmente as áreas de solo das áreas de vegetação.
- Realce de contraste: esta etapa foi realizada para melhorar a qualidade visual das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano, possibilitando a melhor distinção dos objetos. O realce foi realizado na composição falsa-cor (da etapa anterior) utilizando o algoritmo de classe linear para a expansão do histograma.
- Fusão: esta etapa está relacionada a fusão de imagens que apresentam diferentes resoluções espaciais com objetivo de proporcionar melhor identificação visual, para tanto, as imagens multiespectrais foram convertidas do espaço de cor RGB (*Red-Green-Blue*) para o IHS (*Intensity-Hue-Saturation*), em seguida o canal “I” foi substituído pela imagem pancromática com resolução espacial de 15 e de 2,5 metros, do Landsat 8 e do ALOS, respectivamente. Para a fusão das imagens do RapidEye, o canal “I” foi substituído pela imagem do satélite Ikonos obtida por meio do software Google Earth Pro, cuja resolução espacial é de 1 metro. Depois da substituição do canal “I” foi realizada uma nova conversão para o espaço RGB. Com isso, as imagens do Landsat 8, do ALOS e do RapidEye foram otimizadas e apresentam resolução espacial de 15, 2,5 e 1 metro, respectivamente.
- Índice de vegetação normalizado: foram utilizadas as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo das imagens de satélites, pois nessas regiões a vegetação apresenta, respectivamente, sua principal banda de absorção e banda de maior reflectância. Para realizar esse procedimento foram utilizadas as bandas 3 e 4 do Landsat 5; bandas 4 e 5 do Landsat 8; bandas 3 e 4 do Alos; e bandas 3 e 5 do RapidEye. O índice de vegetação normalizado (NDVI - *Normalize Difference Vegetation Index*) aumenta o

contraste espectral entre a vegetação e o solo destacando as áreas de vegetação, que são apresentadas em tons muito claros, das áreas sem cobertura vegetal, que aparecem em tons mais escuros. Para o seu cálculo foi utilizada a Equação (5.1), com o algoritmo de operações aritméticas do Spring. Para melhorar a qualidade do contraste da imagem foram realizados testes que definiram os valores dos parâmetros de *ganho* e *offset* mais adequados e que estão apresentados na Tabela 5.3.

$$NDVI = Ganho * \left( \frac{A - B}{A + B} \right) + Offset \quad \text{Equação (5.1)}$$

Onde:

*A* = Banda do infravermelho próximo

*B* = Banda do vermelho

*Ganho* = Fator multiplicativo

*Offset* = Fator aditivo

Tabela 5.3 – Valores de *ganho* e *offset* utilizados nas imagens NVDI

Satélite	Ganho	Offset
Landsat 5	350	100
Landsat 8	400	100
ALOS	350	120
RapidEye 2011	350	100
2014	250	100

- Análise por componentes principais: essa é uma técnica de realce que gera um novo conjunto de imagens cujas bandas individuais apresentam informações não disponíveis em outras bandas, de forma a reduzir ou remover a redundância espectral. Esse procedimento foi realizado por meio do algoritmo Componentes Principais do Spring, utilizando, para as imagens do Landsat 5, as bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7; para as imagens do Landsat 8, as bandas espectrais 1 a 7, 9 e as imagens resultantes da fusão; para as imagens do satélite ALOS, as bandas espectrais 1 a 4 e as imagens resultantes da fusão; e para as imagens do RapidEye, as bandas espectrais 1 a 5 e as imagens resultantes da fusão. Foi utilizada a banda espectral resultante de cada uma das análises por componentes principais, denominada CP-1, por apresentar a maior parte das informações espectrais.

- **Segmentação:** a imagem foi dividida em regiões que correspondem às áreas temáticas que serão utilizadas na fase de treinamento da classificação temática por regiões. Essas regiões são entendidas como um conjunto de "pixels" contíguos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade de resposta espectral. A segmentação foi realizada utilizando as três primeiras imagens obtidas pelas análises por componentes principais e a imagem gerada pelo cálculo do índice de vegetação normalizado. Para isso, foram realizados diversos testes a fim de definir valores dos parâmetros necessários para o algoritmo de segmentação de imagens: o limiar de similaridade e a área mínima dos polígonos, sendo os valores que melhor se adequaram a segmentação proposta apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores de limiar de similaridade e área mínima dos polígonos utilizados nas imagens segmentadas

Satélite		Similaridade	Área
Landsat 5		10	100
Landsat 8		10	100
ALOS		20	100
RapidEye	2011	50	50
	2014	20	100

- **Classificação temática das imagens:** esse é o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos. Para a classificação temática utilizou-se a imagem de índice de vegetação normalizado, as três primeiras imagens de componentes principais e a imagem segmentada. Foi utilizado o classificador Bhattacharya para a classificação por regiões que utiliza, além de informação espectral de cada pixel, a informação espacial que envolve a relação entre os pixels e seus vizinhos obtida a partir da imagem segmentada. Realizou-se a fase de treinamento de amostras de diferentes tipos de usos do solo, na área de estudo A utilizou-se sete classes temáticas: agricultura, área urbanizada, campo, cerrado, corpo d'água, mata ciliar/galeria e solo exposto; a área de estudo B foi classificada em quatro classes temáticas: área urbanizada, campo e solo exposto, corpo d'água e vegetação, sendo que a última engloba áreas de silvicultura (área de reflorestamento com *Pinus* sp.), cerrado e mata ciliar/galeria. A redução do número de classes temáticas de sete para quatro foi necessária, pois, a área de estudo B foi utilizada para simulação da dinâmica ambiental no sistema Dinamica

EGO, que requer menor número de classes temáticas possível devido à complexidade da modelagem ambiental.

### 5.2.2. Vulnerabilidade ambiental

Para determinar a vulnerabilidade ambiental à processos erosivos das áreas de estudo A e B a ser representada em um mapa cartográfico, foram utilizados em formato *shapefile*, o mapa de uso e cobertura do solo resultante do item 5.2.1, as curvas de nível do DF, os mapas de pedologia, geomorfologia e geologia. Os passos metodológicos estão apresentados na Figura 5.3.

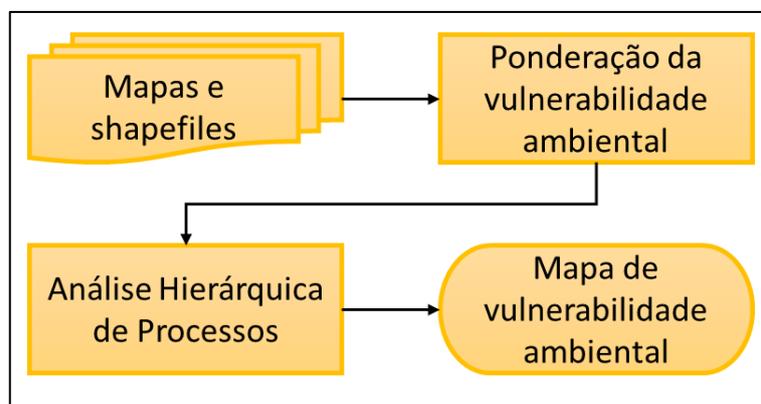


Figura 5.3 – Fluxograma para obtenção dos mapas de vulnerabilidade ambiental

A metodologia para produção dos modelos digitais de terreno (MDT) das áreas de estudo A e B consta de Almeida *et al.* (2012) e os mesmos estão apresentados nas Figura 5.4 e Figura 5.5, e foram obtidos a partir das curvas de nível de 5 metros do Distrito Federal, para isso utilizou-se as ferramentas *3D Analyst Tools* e *Create TIN* do software ArcGIS gerando assim uma grade triangular, que em seguida foi convertida para o formato *raster*.

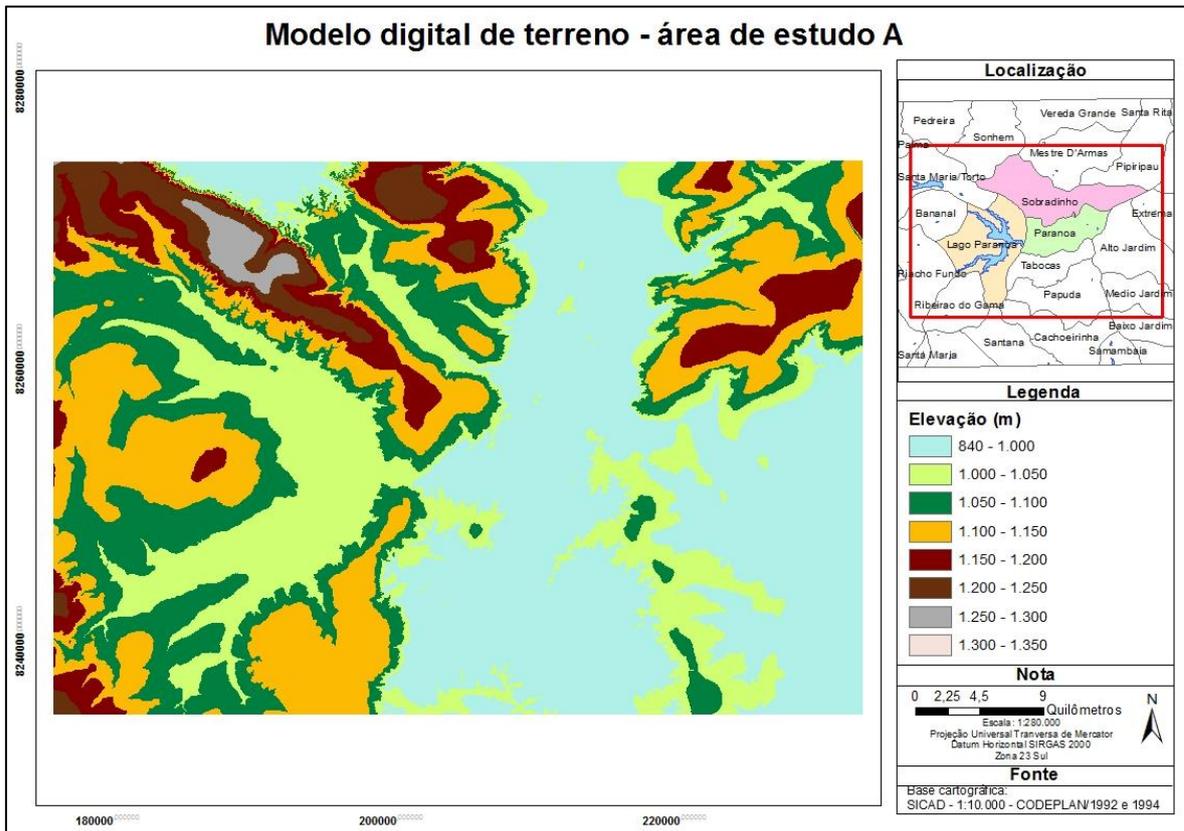


Figura 5.4 – Modelo digital de terreno - área de estudo A

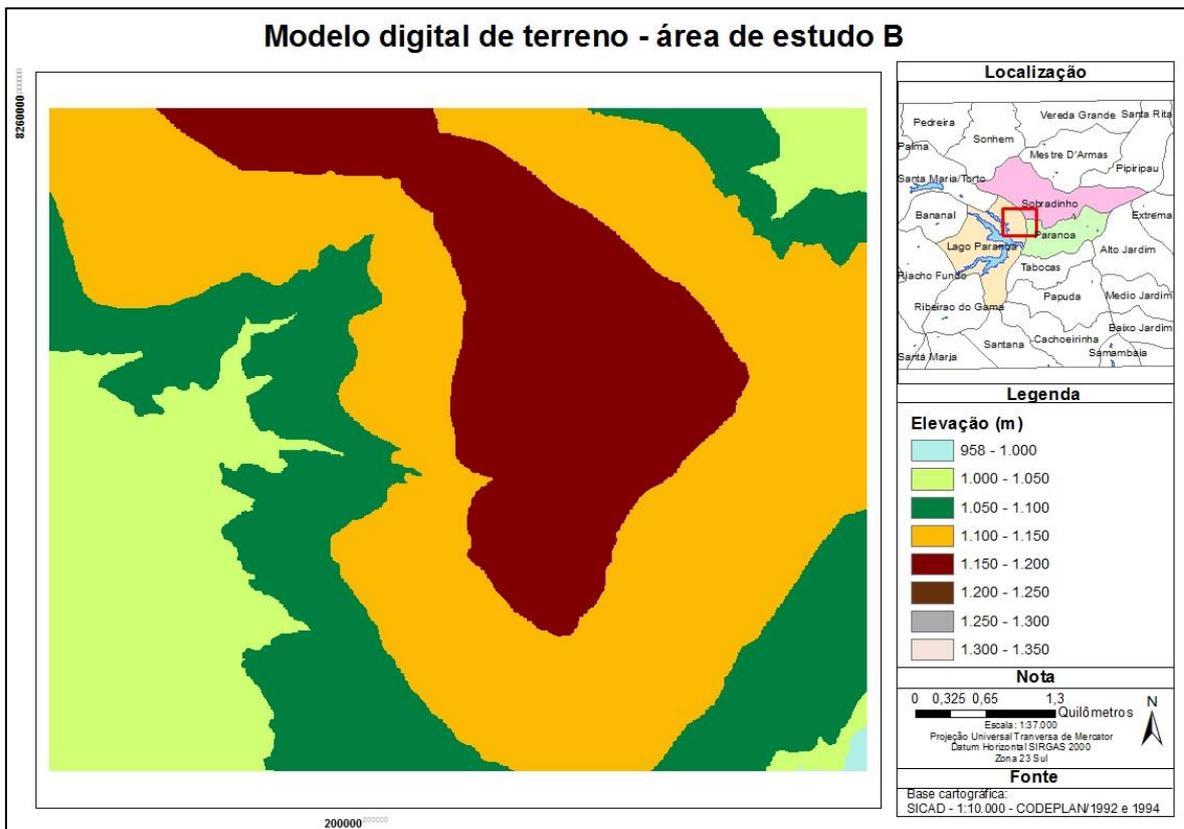


Figura 5.5 – Modelo digital de terreno - área de estudo B

A hierarquização da vulnerabilidade ambiental de cada classe ou tema será considerada a distribuição dos seus valores que variam entre 1,0 (estável) a 3,0 (vulnerável), por meio de ponderações de valores ou pesos de caráter analítico e individual a cada tema, os fatores e critérios que serão analisados para determinar a vulnerabilidade ambiental da área estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Fatores e critérios que serão analisados

<b>Fatores</b>	<b>Critério</b>
Uso e cobertura do solo	Proteção da paisagem
Declividade	Graus de declividade
Pedologia	Maturidade pedogenética
Geomorfologia	Altimetria e declividade
Geologia	Análise litológica

#### 5.2.2.1. Ponderação dos valores de vulnerabilidade natural

A ponderação dos valores para elaborar o mapa de vulnerabilidade ambiental a processos erosivos, a partir dos fatores apresentados na Tabela 5.5, foi proposto por Crepani *et al.* (2001). Com os valores aqui indicados, os mapas temáticos de uso e cobertura do solo, de declividade, de pedologia, de geomorfologia e de geologia foram reclassificados por meio da ponderação para que todos os fatores ambientais apresentem escala numérica de um a três. Em seguida esses mapas foram transformados em imagens temáticas, cujo valor do pixel corresponde ao peso atribuído na ponderação. A vulnerabilidade se dividi em 5 classes, conforme explicitado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valor e classe de vulnerabilidade  
(Crepani *et al.*, 2001, adaptado)

<b>Valor</b>	<b>Classe</b>	<b>Grau de vulnerabilidade</b>
1,0 a 1,3	Muito baixa	Estável
1,4 a 1,7	Baixa	Moderadamente estável
1,8 a 2,2	Moderada	Medianamente estável/vulnerável
2,3 a 2,6	Alta	Moderadamente vulnerável
2,7 a 3,0	Muito alta	Vulnerável

a) Uso e cobertura do solo

A ponderação para o fator uso e cobertura do solo foi realizada de acordo com o grau de interferência das ações antrópicas sobre a área de interesse, observando a presença ou ausência de cobertura vegetal, edificações e impermeabilização do solo. Para tanto, foi analisado a relação entre a classe de uso e cobertura do solo e o impacto ambiental que pode ser causado por processos erosivos. Para classes que apresentam menor influência antrópica e menor grau de impacto ambiental foram atribuídos valores próximos a 1,0 e para as áreas mais antropizadas foram atribuídos valores próximo a 3,0, conforme apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Valor de vulnerabilidade natural para uso e cobertura do solo

Área de estudo A	Área de estudo B	Grau de vulnerabilidade
Mata ciliar/galeria	Vegetação	1,0
Cerrado		
Agricultura	-	1,5
Área urbanizada	Área urbanizada	2,0
Campo	Campo e solo exposto	2,5
Solo exposto		

b) Declividade

Para produzir o mapa de declividade o primeiro passo foi corrigir e preencher erros de depressão que resultaram do processo de interpolação que gerou o MDT e que não correspondem a um corpo hídrico. Para isso utilizou-se no sistema ArcGIS o comando *Fill* pertencente a ferramenta *Spatial Analyst Tools/Hydrology*. Em seguida a declividade foi produzida no ArcGIS por meio do comando *Slope* pertencente a ferramenta *3D Analyst Tools/Raster Surface*. O modelo de declividade foi, então, reclassificado em 5 classes, usando a ferramenta *Spatial Analyst Tools/Reclass* e o comando *Reclassify* do ArcGIS, conforme classificação prevista por Crepani *et al.* (2001) apresentada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Valor de vulnerabilidade natural para classes de declividade (Crepani *et al.*, 2001)

<b>Classes morfométricas</b>	<b>Declividade (%)</b>	<b>Valores de vulnerabilidade</b>
Muito Baixa	< 2	1,0
Baixa	2 – 6	1,5
Média	6 –20	2,0
Alta	20 - 50	2,5
Muito Alta	> 50	3,0

c) Pedologia

A pedologia participa da caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem natural e a maturidade dos solos (Crepani *et al.*, 2001). As condições de estabilidade permitem o predomínio de solos bem desenvolvidos, maduros e lixiviados, e caso prevaleçam os processos erosivos modificadores de relevo e que geram solos jovens e pouco desenvolvidos, então a unidade é considerada vulnerável. A Tabela 5.9 apresenta os valores de vulnerabilidade natural para a pedologia.

Tabela 5.9 – Valor de vulnerabilidade natural dos solos  
(Crepani *et al.*, 2001, adaptado)

<b>Classificação de solos (Camargo <i>et al.</i>, 1987)</b>	<b>Classificação de solos (Embrapa, 1999)</b>	<b>Vuln.</b>
Latossolos Amarelos	Latossolos Amarelos	1,0
Latossolos Vermelho-Amarelos	Latossolos Vermelho-Amarelos	
Latossolos Vermelho-Escuros	Latossolos Vermelhos	
Latossolos Roxos	Latossolos Vermelhos	
Latossolos Brunos	Latossolos Brunos	
Latossolos Húmicos	Latossolos (...) Húmicos	
Latossolos Húmicos Brunos	Latossolos Bruno (...) Húmicos	
Podzólicos Amarelos	Argissolos	2,0
Podzólicos Vermelho-Amarelos	Argissolos Vermelho-Amarelos	
Podzólicos Vermelho-Escuros	Argissolos Vermelho	
Terras Roxas Estruturadas	Nitossolos	
Brunos Não-Cálcicos	Luvissolos	
Brunizéns	Chernossolos	
Brunizéns Avermelhados	Chernossolos	
Rendzinas	Chernossolos	
Planossolos	Planossolos	
Solos Hidromórficos (abruptico)	Planossolos	
Podzóis Hidromórficos	Espodossolos	
Cambissolos	Cambissolos	2,5
Solos Litólicos	Neossolos Litólicos	3,0
Solos Aluviais	Neossolos Flúvicos	
Regossolos	Neossolos Regolíticos	
Areias Quartzosas	Neossolos Quartzarênicos	
Vertissolos	Vertissolos	
Solos Orgânicos	Organossolos	
Solos Hidromórficos (não abruptico)	Gleissolos	
Glei Húmico	Gleissolos Plintossolos	
Glei Pouco Húmico	Gleissolos Plintossolos	
Plintossolo	Plintossolos	
Laterita Hidromórfica Distrófica	Plintossolos	
Solos Concrecionários Lateríticos	Plintossolos	
Afloramento Rochoso	Afloramento Rochoso	

#### d) Geomorfologia

Martins e Baptista (1998) propuseram uma compartimentação geomorfológica baseada nas características descritivas do relevo como altimetria e declividade, levando em consideração os sistemas morfodinâmicos, que são entendidos como os processos morfogenéticos atuantes sobre a paisagem. Desta maneira, as áreas representativas dos compartimentos geomorfológicos são as chapadas elevadas, rebordos, escarpas, planos intermediários e planícies.

Baseado nos princípios da Ecodinâmica (Tricart, 1977), Crepani *et al.* (2001) apresentaram um modelo que buscou, de forma empírica e relativa, avaliar o estágio de evolução morfodinâmica das unidades territoriais básicas, atribuindo valores de estabilidade às categorias morfodinâmicas. Unindo os conceitos da compartimentação geomorfológica de Martins e Baptista (1998) e da evolução morfodinâmica de Crepani *et al.* (2001) propôs-se os valores de vulnerabilidade natural conforme apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Valor de vulnerabilidade natural para geomorfologia

<b>Compartimento geomorfológico</b>	<b>Relação pedogênese/morfogênese</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
Chapada Elevada	Prevalece a pedogênese	1,0
Plano Intermediário		
Rebordo	Equilíbrio pedogênese/ morfogênese	2,0
Escarpas	Prevalece a morfogênese	3,0
Planícies		

#### e) Geologia

De acordo com Crepani *et al.* (2001) os critérios que devem ser levados em consideração para a atribuição de valores de vulnerabilidade natural com relação à geologia, são a própria evolução do ambiente geológico e as informações relativas ao grau de coesão das rochas. Os valores da vulnerabilidade natural das unidades geológicas foram atribuídos a partir de uma análise litológica e estão apresentadas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Valor de vulnerabilidade natural para litologia  
(Crepani *et al.*, 2001, adaptado)

<b>Litologia</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7
Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito	1,8
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9
Estauroлита xisto, Xistos granatíferos	2,0
Filito, Metassilito	2,1
Ardósia, Metargilito	2,2
Mármore	2,3
Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos, Metarritmito arenoso	2,4
Conglomerados, Subgrauvacas, Calcifilito	2,5
Grauvacas, Arcózios, Metarritmito argiloso	2,6
Siltitos, Argilitos	2,7
Folhelhos	2,8
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos, Carbonato	2,9
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc.	3,0

#### 5.2.2.2. Análise Hierárquica de Processos

Determinou-se a influência mútua entre os fatores compostos pelos mapas temáticos de uso e cobertura do solo, de declividade, de pedologia, de geomorfologia e de geologia por meio da análise hierárquica de processos, proposta por Saaty (1980). O processo iniciou com a construção de uma matriz de comparação pareada denominada matriz de decisão, utilizando a escala fundamental proposta por Saaty (1980) apresentada na Tabela 5.12, em que a comparação entre os dois fatores indica qual deles é mais importante e a comparação entre fatores iguais são considerados de valor igual a um.

Tabela 5.12 – Valores de AHP para comparação pareada  
(Saaty, 1980, adaptado)

Esala de valor	Definição	Explicação
1	Importância igual	Os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial	Um fator é claramente fortemente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada	Um fator é muito fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
1/3, 1/5, 1/7, 1/9	Valores intermediários entre julgamentos	Possibilidade de compromissos adicionais

Cada elemento da matriz indica quanto o fator da linha é importante em relação ao fator coluna, correspondente. 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 que originaram a matriz de comparação pareada (Saaty, 1980).

$$MCP = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & 1/a_{ij} \\ \sum a_{i1} & \sum a_{i2} & \cdots & \sum a_{ij} \end{bmatrix} \quad \text{Equação (5.2)}$$

Onde:

$MCP$  = Matriz de comparação pareada

$i$  = Índice que representa a linha

$j$  = Índice que representa a coluna

A matriz normalizada foi calculada pela divisão de cada elemento da matriz de comparação pareada pela somatória dos elementos da coluna.

$$MN = \frac{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \cdots & 1/a_{ij} \end{bmatrix}}{\begin{matrix} \sum a_{i1} & \sum a_{i1} & \cdots & \sum a_{i1} \end{matrix}} \quad \text{Equação (5.3)}$$

Onde:

- $MN$  = Matriz normalizada
- $i$  = Índice que representa a linha
- $j$  = Índice que representa a coluna

Em seguida foi realizada a normalização desses valores, onde a soma de cada linha da matriz normalizada foi dividida pela ordem da matriz  $n$ , resultando no valor do Peso Relativo ( $P$ ) de cada fator. A somatória destes resultados encontrados deve ser igual a 1,0.

$$\begin{aligned} \sum a_{1j}/n &= P_1 \\ \sum a_{2j}/n &= P_2 \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ \sum a_{ij}/n &= P_i \end{aligned} \quad \text{Equação (5.4)}$$

O cálculo do  $\lambda_{max}$  indica o valor máximo do autovetor  $\lambda$ , e é obtido pela Equação (5.5)

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]}{P_i} \quad \text{Equação (5.5)}$$

Onde  $[Aw]$  é a matriz resultante do produto da matriz de comparação pareada pela matriz dos pesos relativos ( $P_i$ ).

Quando  $\lambda_{max}$  estiver mais próximo de  $n$  implica uma boa estimativa dos coeficientes da matriz. O Índice de Consistência (IC) estima o grau de consistência da matriz pareada e foi calculado pela seguinte fórmula:

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad \text{Equação (5.6)}$$

Após o cálculo dos pesos de cada critérios é necessário avaliar sua aceitabilidade por meio da Razão de Consistência (RC), obtido pela Equação (5.7), que de acordo com Saaty (1980) deve apresentar valor menor que 0,10.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad \text{Equação (5.7)}$$

Sendo IR o Índice Randômico, que é derivado de uma amostra de 500 matrizes recíprocas geradas de forma randômica. Os valores de IR estão apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n (Saaty, 1980, adaptado)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

O mapa final da vulnerabilidade ambiental foi obtido por meio de algoritmo de álgebra de mapas, com o uso da Equação (5.8), a qual contém os pesos calculados pelo método AHP. No cálculo, utilizou-se a ferramenta *Spatial Analyst Tools/Map Algebra* e o comando *Raster Calculator* do software ArcGIS. O resultado do cruzamento dos mapas temáticos foi distribuído em cinco classes de vulnerabilidade ambiental conforme apresentado na Tabela 5.6.

$$VA = P_1 \cdot C_1 + P_2 \cdot C_2 + P_3 \cdot C_3 + P_4 \cdot C_4 + P_5 \cdot C_5 \quad \text{Equação (5.8)}$$

Onde:

VA = Vulnerabilidade ambiental

$P_n$  = Peso critério 1, Peso critério 2, Peso critério 3, Peso critério 4, Peso critério 5

$C_1$  = Critério referente ao uso e cobertura do solo

$C_2$  = Critério referente à declividade

$C_3$  = Critério referente à pedologia

$C_4$  = Critério referente à geomorfologia

$C_5$  = Critério referente à geologia

### 5.2.3. Mapas de temperatura da superfície terrestre

#### 5.2.3.1. Temperaturas obtidas com as imagens do Landsat 5

Para o cálculo da temperatura aparente da superfície terrestre utilizou-se banda espectral do infravermelho termal, cuja resolução espectral é de 10,4 a 12,5  $\mu\text{m}$ , resolução espacial de 120 metros e que se encontra na banda 6 do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5, que foi georreferenciada utilizando a ferramenta registro do Spring, conforme procedimentos descritos no item 5.2.1. A metodologia para obtenção da temperatura da superfície foi proposta por Malaret *et al.* (1985) e converte o número digital (DN - *Digital Number*) associado a cada pixel da imagem do canal termal em valores de temperatura aparente da superfície, por meio da modelo de regressão quadrática apresentado na Equação (5.9).

$$T_K = 209,831 + 0,834.DN - 0,00133.DN^2 \quad \text{Equação (5.9)}$$

Onde:

$T_K$  = Temperatura aparente da superfície, em Kelvin

$DN$  = Número digital associado a banda 6

Após os dados de temperatura em Kelvin serem computados e armazenados em uma grade numérica específica, foram convertidos para graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), por meio da Equação (5.10).

$$T_C = T_K - 273,15 \quad \text{Equação (5.10)}$$

Onde:

$T_C$  = Temperatura aparente da superfície, em graus Celsius

Para produção do mapa de temperatura aparente da superfície, a partir dos novos valores de  $T_C$  obtidos com a aplicação da Equação 5.10, foram utilizados algoritmos específicos de álgebra de mapas no *software* ArcGIS.

Esta metodologia não contempla correções relacionadas aos efeitos atmosféricos e de emissividade, por essa razão pode ocorrer subestimação dos valores de temperatura da superfície (Steinke *et al.*, 2010). Entretanto, Azevedo e Souza (2013) destacam que há uma alta relação de correspondência entre a temperatura de superfície estimada pelo método aqui apresentado e pelo algoritmo METRIC desenvolvido por Allen *et al.* (2005), que utiliza o DN para obtenção da radiância espectral e da emissividade superficial, parâmetros utilizados no cálculo da temperatura superficial aparente. Contudo os autores destacam que o método

proposto por Malaret *et al.* (1985) é recomendado por ser mais prático e mais fácil de implementação computacional.

### 5.2.3.2. Temperaturas obtidas com as imagens do Landsat 8

Nesta etapa foi utilizada a banda 10 do infravermelho termal do sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) a bordo do satélite Landsat 8, que apresenta resolução espectral na faixa de 10,6 a 11,19  $\mu\text{m}$  e resolução espacial de 100 metros.

Para o cálculo da temperatura aparente de superfície foram utilizados algoritmos específicos de álgebra de mapas no *software* ArcGIS e as equações fornecidas no *website* do *United State Geological Survey* (USGS), onde são descritos os procedimentos para utilização de produtos do Landsat 8. A metodologia apresentada a seguir foi descrita por USGS (2017).

Os dados de DN apresentados na banda 10 foram convertidos em radiação do topo da atmosfera (TOA - *Top Of Atmosphere*) usando os fatores de redimensionamento de radiação fornecidos pelo arquivo de metadados ( $M_L$  e  $A_L$ ) e por meio da seguinte equação:

$$L_\lambda = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad \text{Equação (5.11)}$$

Onde:

$L_\lambda$  = Radiância espectral TOA, em Watts/( $\text{m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m}$ )

$M_L$  = Fator de redimensionamento multiplicativo da banda 10

$Q_{cal}$  = Nível de cinza associado a banda 10 (DN)

$A_L$  = Fator de redimensionamento aditivo da banda 10

Em seguida a radiância espectral foi convertida para temperatura aparente de superfície usando as constantes térmicas fornecidas do arquivo de metadados ( $K_1$  e  $K_2$ ), por meio da seguinte fórmula:

$$T_C = \left[ \frac{K_2}{\ln \left( \frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)} \right] - 273,15 \quad \text{Equação (5.12)}$$

Onde:

$T_C$  = Temperatura aparente da superfície, em graus Celsius

$L_\lambda$  = Radiância espectral TOA, em Watts/( $\text{m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m}$ )

$K_1$  = Constante de conversão térmica da banda 10

$K_2 =$  Constante de conversão térmica da banda 10

A importância do estudo da temperatura da superfície terrestre vem da relação e da associação feita com as condições de uso e cobertura do solo. Com o processo de urbanização, a vegetação dá espaço à casas, edifícios, pavimentação e calçamento, o que implica na elevação da temperatura local e pode causar desconforto térmico, além de desequilíbrio do microclima local. Buscou-se também relacionar a temperatura da superfície terrestre com as informações meteorológicas locais, as características do solo e sua capacidade de infiltração.

## 5.2.4. Modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo

Foi desenvolvida a modelagem da dinâmica de uso e cobertura do solo na área de estudo B e suas subdivisões, que são apresentadas neste trabalho. Para tanto, foi utilizado o sistema Dinamica EGO de acordo com metodologia de Dias (2011), e conforme passos descritos a seguir e apresentados na Figura 5.6.

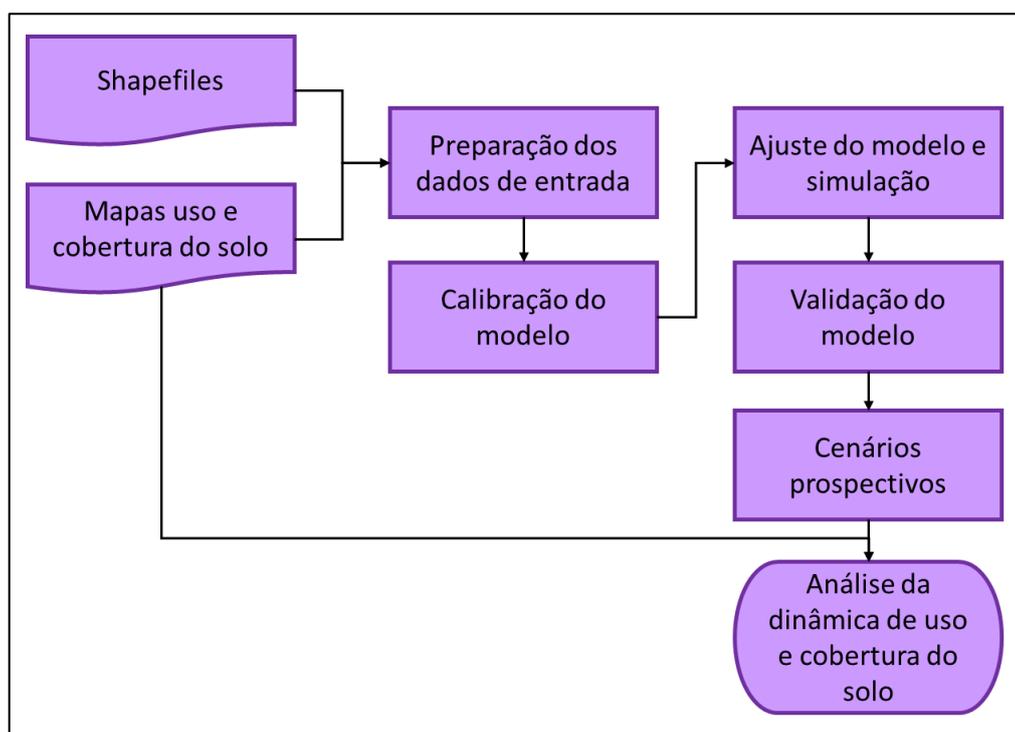


Figura 5.6- Fluxograma da modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo

### 5.2.4.1. Dados de entrada

Os dados utilizados como entrada no modelo fornecem informações sobre o uso e cobertura do solo, como áreas urbanas e rurais, vegetação, drenagem, rede viária e declividade. Para tanto, utilizou-se os mapas de uso e cobertura do solo dos anos 2009, 2011 e 2014 da área de estudo B gerados conforme o item 5.2.1, que indicam as variações temporais entre as diferentes classes temáticas avaliadas.

No sentido de otimizar o processo de modelagem os mapas sofrem adaptação, tendo seu número de classes temáticas reduzido de sete para cinco, pois quanto maior o número de atividades distintas usadas maior tende a ser a complexidade do modelo (Batty *et al.*, 1999). As classes temáticas utilizadas nesta etapa foram: área urbanizada, campo e solo exposto,

corpos d'água e vegetação, e esta última resultante da união das classes temáticas de cerrado, de mata ciliar/galeria e de silvicultura.

Utilizou-se também nesta etapa os mapas estáticos, sendo eles, o da rede de drenagem, o de estradas e o de declividade. Foram elaborados mapas de distância (*buffers*) a partir dos mapas de drenagem e estradas. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Buffer Wizard* do *software* ArcGIS para o cálculo de *buffers*, com faixas de 200 e 100 metros, respectivamente, de forma a representar as áreas de influência ao redor da feição a uma distância específica. Em seguida, os mapas estáticos foram convertidos para o formato matricial e, utilizando o *functor Create Cube Map*, foram compactados em um só arquivo denominado “cubo *raster*”, onde são dispostos em camadas no *software* Dinamica EGO.

Além dos mapas estáticos, foram utilizados os mapas dinâmicos, que são assim denominados por serem 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*, que recebeu como entrada o mapa de uso e cobertura do solo do ano 2009 e gerou 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, com a mesma resolução espacial e o mesmo número de colunas e linhas, por meio da função de conversão de formato do *software* ArcGIS, com as mesmas coordenadas no espaço geográfico, sendo o sistema de referência espacial GCS SIRGAS 2000, com datum D\_SIRGAS\_2000.

#### 5.2.4.2. Calibração do modelo

Nessa etapa foram realizados testes no sistema Dinamica EGO buscando identificar, em um determinado período de tempo, parâmetros que definam o melhor ajuste entre o modelo e a realidade observada do mapa de uso e cobertura do solo. Para isso, a calibração foi realizada em duas etapas, sendo a primeira o cálculo das matrizes de transição, e a segunda a determinação dos pesos de evidência.

##### a) Matriz de transição

Nesta etapa foram elaboradas as matrizes de transição para analisar as mudanças ocorridas no uso e cobertura do solo em um período de tempo, denominadas de matriz de passo único

e de passos múltiplos. A matriz de passo único representa as mudanças ocorridas durante todo o período analisado e a matriz de passos múltiplos corresponde às mudanças que ocorreram em uma unidade de tempo, ou seja, em um ano.

As taxas de transição foram calculadas para os períodos compreendidos entre os anos 2009 e 2011, e entre os anos de 2011 e 2014, por meio do algoritmo *Determine Transition Matrix*, que executa uma tabulação cruzada entre as classes temáticas dos mapas de uso e cobertura do solo nos anos estudados.

#### b) Pesos de evidência

Para a obtenção dos pesos de evidencia primeiramente foram definidos os intervalos para a derivação dos mesmos utilizando o modelo *Determine Weights of Evidence Ranges*, para tanto, foram calculadas faixas que classificam as variáveis em escalas contínuas de cinza. Nesta etapa utilizou-se os mapas de uso e cobertura do solo para o instante final e inicial e os mapas de variáveis estáticas e dinâmicas. Obteve-se como resultado um arquivo esqueleto dos pesos de evidência. Em seguida, foram calculados os coeficientes dos pesos de evidência, utilizando-se o mesmo conjunto de dados do passo anterior e com o arquivo esqueleto dos pesos de evidência, por meio do modelo *Determine Weights of Evidence Coefficients*.

Pressupõe-se que os mapas das variáveis utilizados, para o método dos Pesos de Evidência, sejam independentes entre si. Para avaliar a existência de dependência ou associação entre diferentes variáveis de dois mapas, o sistema Dinamica EGO emprega diferentes métodos, sendo aqui utilizado o *Índice de Cramer*. A alta correção indica que uma variável é muito semelhante a outra e seu uso não traz benefícios a simulação, sendo assim, as variáveis altamente correlacionadas não serão consideradas no modelo e o cálculo da correlação foi realizado utilizando o modelo *Weights of Evidence Correlation* do sistema Dinamica EGO.

### 5.2.4.3. Construção do modelo de simulação e validação

#### a) Modelo de simulação

No sistema Dinamica EGO, após a realização dos procedimentos anteriormente mencionados, o modelo de simulação de uso e cobertura do solo para o ano escolhido (função do mapa de uso e cobertura do solo) foi ajustado, por meio dos algoritmos de autômatos

celulares, o *Patcher* e o *Expander*, que produzem os padrões espaciais de mudanças na transição do uso do solo. Foi também estabelecida a quantidade de células a serem alteradas para cada função de transição, ou seja, a quantidade considerada para a expansão de manchas existentes e a quantidade considerada para a criação de novas manchas.

Por meio da variação dos parâmetros de entrada das funções *Expander* e *Patcher* são formadas manchas representativas das transições com uma variedade de tamanhos e formas. Os parâmetros de entrada dessas funções são denominados de *Mean Patch Size* (tamanho médio), *Patch Size Variance* (variância) e *Patch Isometry* (isometria). O tamanho médio e a variância da mancha são dados em hectares (Trentin e Freitas, 2010) e a isometria pode variar entre zero a dois, sendo que quanto mais próximo de dois mais isométrica são as manchas, ou seja, são mais agregadas (Soares-Filho *et al.*, 2007).

#### b) Validação do modelo de simulação

A validação do modelo de simulação envolve a elaboração de modelos de diferença e de similaridade. Para a validação do modelo compara-se o mapa de referência (mapa de uso e cobertura do solo do ano escolhido) com o mapa simulado, de forma a quantificar o grau de semelhança entre ambos, sendo a comparação feita por meio de método baseados em proximidade. Para Soares-Filho *et al.* (2009), mesmo os mapas que não são exatamente semelhantes podem apresentar padrões similares e concordância espacial nas proximidades de uma célula.

Foi desenvolvido por Hagen (2003) um método para avaliar a similaridade de um conjunto de mapas com dados categóricos, por meio de lógica *Fuzzy* denominado de *kfuzzy*, e envolve tanto a incerteza da localização quanto a incerteza da categoria. O algoritmo utilizado no sistema Dinamica EGO é uma modificação do método proposto por Hagen (2003), denominado *Calc Reciprocal Similarity*, no qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor proporção, pelas células vizinhas. A validação é feita utilizando uma função de decaimento exponencial com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central (Soares-Filho *et al.*, 2009). O procedimento de comparação é resumidamente apresentado na Figura 5.7.

#### 5.2.4.4. Obtenção de cenários prospectivos do uso e cobertura do solo

Nesta etapa realizou-se a simulação de cenários prospectivos por meio de mapas de uso e cobertura do solo para curto prazo, a partir dos padrões do modelo calibrado e validado no sistema Dinamica EGO. Não é recomendável realizar o cenário prospectivo de longo prazo, pois as mudanças são complexas de serem previstas e sujeitas a erros por alterações inesperadas. Assim, a simulação de cenários prospectivos por meio de mapas de uso e cobertura do solo foi realizada para um curto prazo de até cinco anos, a partir do ano de simulação e calibração do modelo que é o mapa de uso do solo mais atual.

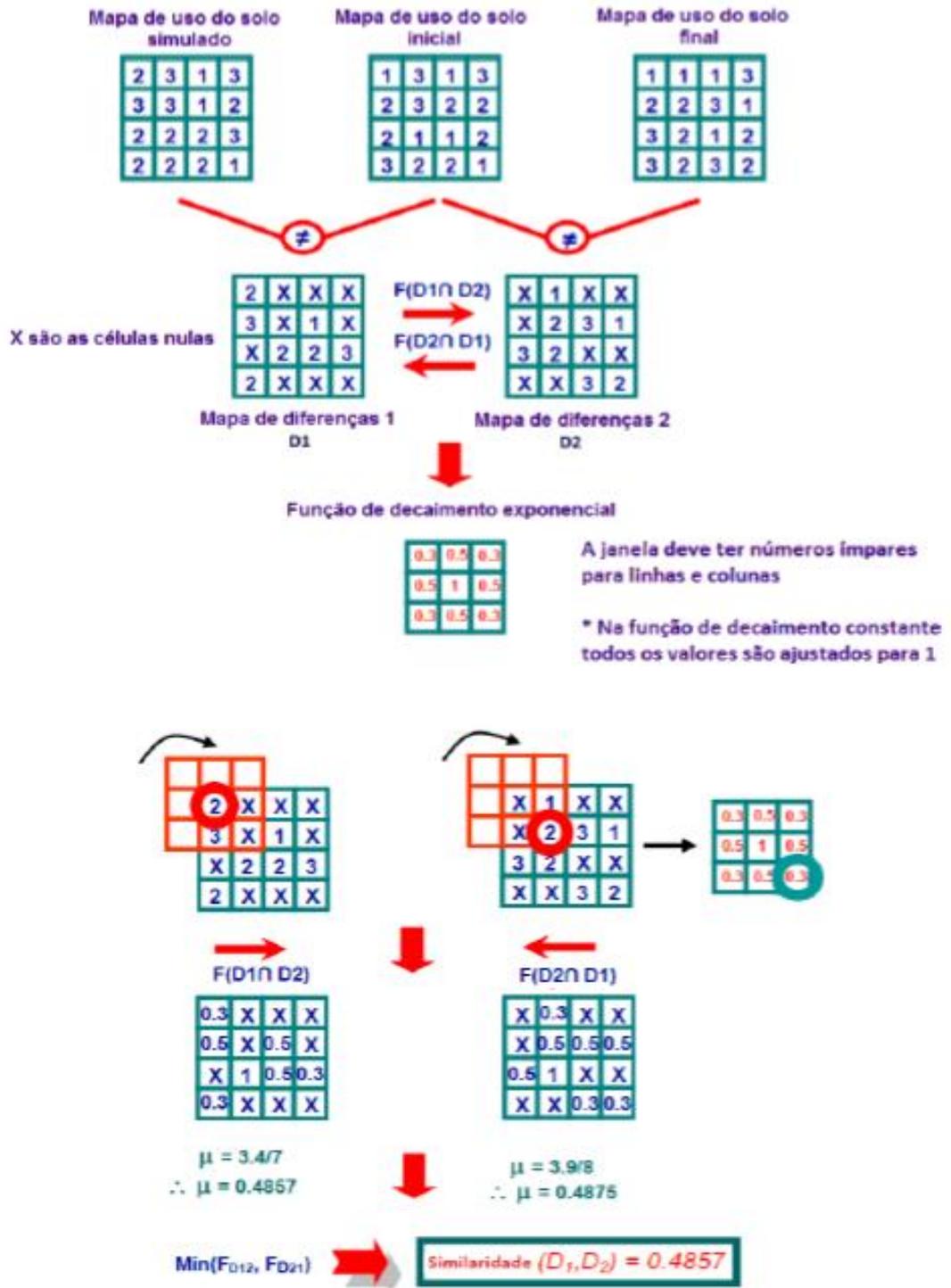


Figura 5.7 – Representação do método de comparação Fuzzy (Soares-Filho *et al.*, 2009 modificado por Salazar, 2015)

## 5.2.5. Método do SCS

### 5.2.5.1. Parâmetros da bacia hidrográfica

Além dos parâmetros hidrológicos relacionados à cobertura do solo, são obtidos também parâmetros da morfologia fluvial da bacia do Córrego Taquari, tais como: área da bacia, comprimento dos talwegues e declividade dos canais, todos calculados em ambiente de SIG, conforme a formulação definida por Almeida *et al.* (2013):

- Área da bacia: calcula-se a área do polígono que representa a bacia, em km<sup>2</sup>;
- Comprimento do talvegue: calcula-se a partir da vetorização dos córregos visíveis na imagem de satélite, onde será medido o comprimento dos mesmos, em km;
- Declividade do talvegue: obtém-se a partir dos vetores que representavam os córregos e as curvas de nível que compõe a planta planialtimétrica, em m/m, pela seguinte fórmula:

$$S = \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Equação (5.13)}$$

Onde:

$S$  = Declividade do talvegue, em m/m

$\Delta H$  = Diferença entre a cota maior e menor, em m

$L$  = Comprimento do talvegue

### 5.2.5.2. Parâmetro CN

O cálculo do escoamento superficial direto foi realizado na bacia hidrográfica do Córrego Taquari conforme os procedimentos representados na Figura 5.8 e descritos a seguir.

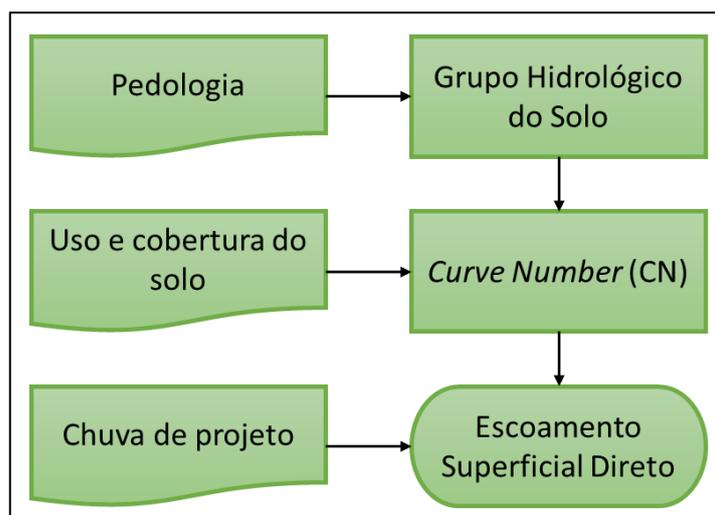


Figura 5.8 – Fluxograma do cálculo do escoamento superficial direto

Para determinar o grupo hidrológico do solo conforme definido pelo Método do SCS, no ambiente computacional do ArcGIS, foi realizada uma sobreposição do PI limite da bacia hidrográfica do Córrego Taquari no mapa temático de pedologia, de forma a identificar os tipos de solo presentes na bacia. Com o auxílio da Tabela 4.3, que apresenta a classificação hidrológica dos solos brasileiros para Método do SCS segundo Sartori (2005) definiu-se os GHS para os tipos de solo presentes na bacia, resultando em um PI que apresente os GHS, para a área da bacia.

Em seguida, utilizou-se a ferramenta *Spatial Analyst Tools/Map Algebra* e o comando *Raster Calculator* do *software* ArcGIS para realizar o cruzamento entre o PI de GHS e o mapa de uso e cobertura do solo dos anos, 2011, 2014 e 2019 (cenário simulado), destacando as informações de classes de usos e cobertura do solo, conforme informações contidas nas Tabela 4.4 e Tabela 4.5, Desta forma, esta etapa resultou em três PIs em formato *raster* com os valores de CNs da bacia hidrográfica do Córrego Taquari, referente aos anos de 2011, 2014 e 2019.

### 5.2.5.3. Cálculo do escoamento superficial

Após determinar os valores de CN da bacia para os três anos de estudo, foi estimado o escoamento superficial direto por meio de uma determinada precipitação, conforme anteriormente apresentado no item 4.6.1, para isso foi necessário calcular: i) o tempo de concentração pela Equação (4.16), para os três anos de estudo; ii) utilizando este parâmetro, foi calculada a intensidade da chuva de projeto pela Equação (4.15), para tempo de retorno

de 5 anos; e iii) o potencial máxima retenção ( $S$ ) pela Equação (4.14), que é função do parâmetro CN, para cada tempo, que resultou em três imagens *raster* com informação do potencial máxima retenção em cada pixel. O escoamento superficial direto ( $Q$ ) foi, então, calculado pela Equação (4.11).

Ao final foi realizada uma análise de sensibilidade do escoamento superficial direto gerado por uma chuva de projeto e calculado pelo Método do SCS, para um mapa antigo de uso e cobertura do solo (2011), para um mapa mais atual de uso e cobertura do solo (2014) e para um cenário prospectivo de uso e cobertura do solo (2019), de forma a identificar o comportamento do escoamento superficial direto em resposta da urbanização da bacia hidrográfica.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela metodologia proposta estão descritos neste item.

### 6.1. USO E COBERTURA DO SOLO

A classificação temática das imagens de sensores remotos produziu os mapas de uso e cobertura do solo conforme os procedimentos metodológicos descritos no item anterior.

#### 6.1.1. Mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo A

Para a área de estudo A foram gerados mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2016 conforme apresentados nas Figura 6.1, Figura 6.2, Figura 6.3 e Figura 6.4.

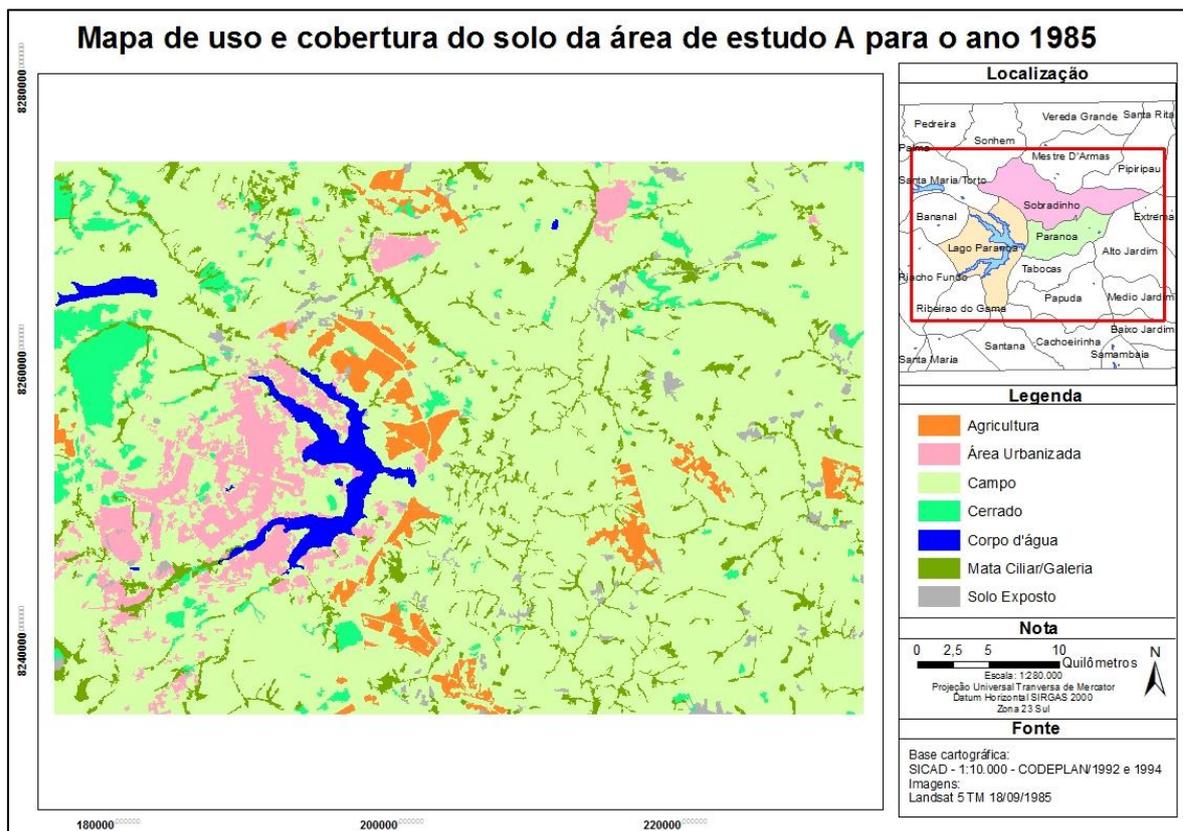


Figura 6.1 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 1985

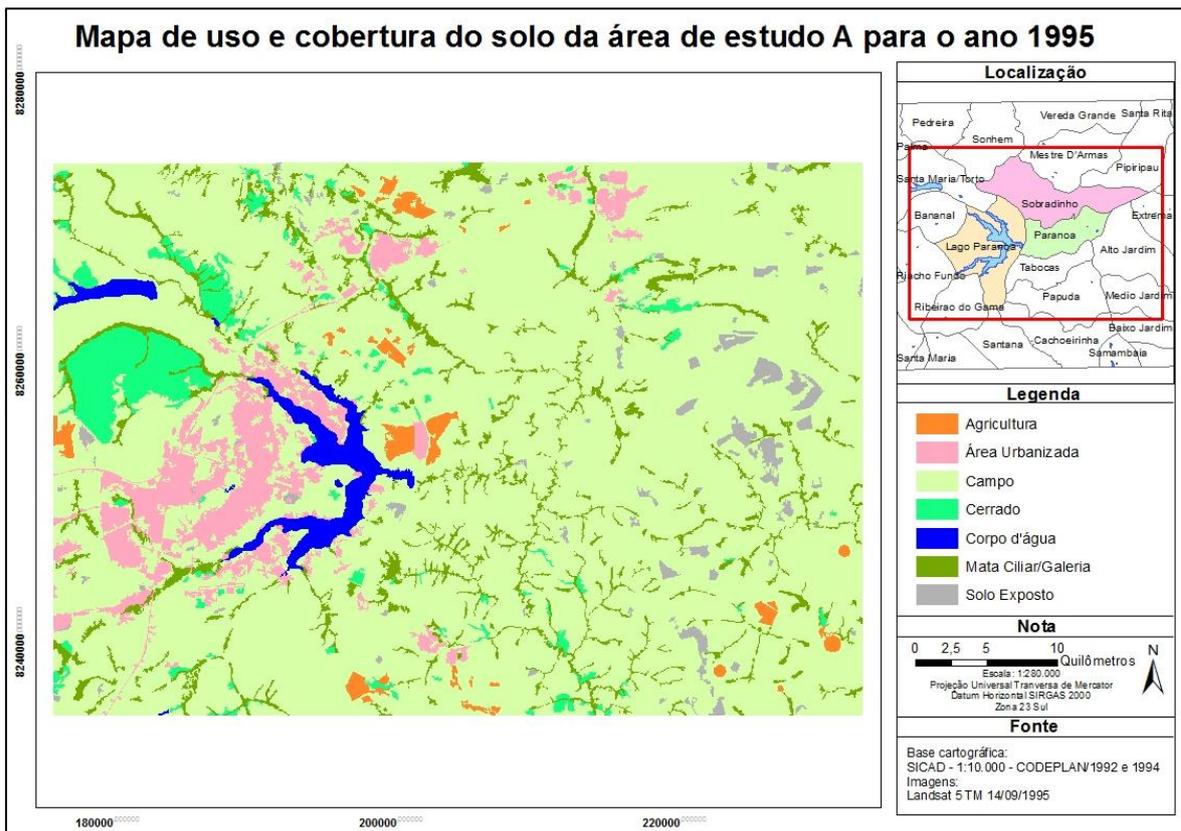


Figura 6.2 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 1995

Os valores de áreas das classes temáticas foram relacionados e analisados nesses diferentes períodos de tempo evidenciando as modificações ocorridas no uso e cobertura do solo em cada uma delas. A Tabela 6.1 apresenta a análise da alteração de área das classes temáticas no período compreendido entre os anos de 1985 e 1995, onde observou-se o decréscimo de 64,54% da área de agricultura, que passou de 80,59 para 28,58 km<sup>2</sup>, em contrapartida a área de solo exposto aumentou 6,83 km<sup>2</sup>, representando uma taxa de variação de 21,04%. O acréscimo de cerca de 40 km<sup>2</sup> na área de campo, representa uma variação de 2,31% em sua área, o que indica que grande parte da área de agricultura foi transformada em campo e solo exposto. A área urbanizada apresentou um aumento de 4,57%, passando de 134,45 para 140,59 km<sup>2</sup>, sendo essa a menor variação observada da classe temática área urbanizada durante todo o período de análise, ou seja, entre 1985 a 2016. As demais classes tiveram pouca ou nenhuma alteração de área durante o período de análise.

Tabela 6.1 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 1985 - 1995

Classes temáticas	Área em 1985		Área em 1995		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Agricultura	80,59	3,59	28,58	1,27	-64,54
Área urbanizada	134,45	5,98	140,59	6,25	4,57
Campo	1.732,33	77,07	1.772,42	78,81	2,31
Cerrado	87,15	3,88	87,16	3,88	0,00
Corpo d'água	45,47	2,02	45,62	2,03	0,34
Mata ciliar/galeria	135,22	6,02	135,29	6,02	0,05
Solo exposto	32,48	1,44	39,31	1,75	21,04
Total	2.247,68	100,00	2.248,97	100,00	-

De forma geral as alterações observadas principalmente com a diminuição de área destinadas a agricultura e com o aumento do campo e da área urbanizada pode estar relacionada ao processo de urbanização da área vivido na Região do Centro-Oeste do país, e principalmente no Distrito Federal. Segundo o Censo Demográfico de 1991 do IBGE a população do Centro-Oeste era de 9.427.601 habitantes e o Distrito Federal era de 1.601.094 habitantes (IBGE, 2013).

A dinâmica de evolução das classes temáticas durante os anos de 1995 e 2005 encontra-se detalhada na Tabela 6.2 e pode ser visualizada nos mapas de uso e cobertura do solo obtidas pela classificação temática das imagens nas Figura 6.2 e Figura 6.3. Assim como observado na análise anterior, houve uma redução na classe agricultura e aumento de área urbanizada. A diminuição na área de agricultura foi cerca de 12 km<sup>2</sup>, representando uma variação de 41,05%. Já a área urbanizada passou de 140,59 para 178,05 km<sup>2</sup>, sendo 26,65% de acréscimo. O solo exposto teve a maior taxa variação de área durante o período de análise, sendo sua diminuição de 74,68%. As classes campo, cerrado, corpo d'água e mata ciliar/galeria não apresentaram alterações significativas.

Na Contagem Populacional de 1996 o Distrito Federal contava com 1.806.354 habitantes, o que representou um aumento de 12,82% da população entre 1991 e 1996. Já no Censo Demográfico realizado no ano 2000, o Distrito Federal tinha população de 2.051.146 habitantes, representando aumento de 13,55% no contingente populacional quando comparado com a Contagem Populacional de 1996. Entre os anos de 1991 e 2000 a região

Centro-Oeste aumentou a população em 23,43%, passando a ter 11.636.728 habitantes (IBGE, 2013).

Tabela 6.2 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 1995 - 2005

Classes temáticas	Área em 1995		Área em 2005		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Agricultura	28,58	1,27	16,85	0,75	-41,05
Área urbanizada	140,59	6,25	178,05	7,92	26,65
Campo	1.772,42	78,81	1.774,57	78,95	0,12
Cerrado	87,16	3,88	87,04	3,87	-0,13
Corpo d'água	45,62	2,03	46,03	2,05	0,90
Mata ciliar/galeria	135,29	6,02	135,23	6,02	-0,05
Solo exposto	39,31	1,75	9,95	0,44	-74,68
Total	2.248,97	100,00	2.247,72	100,00	-

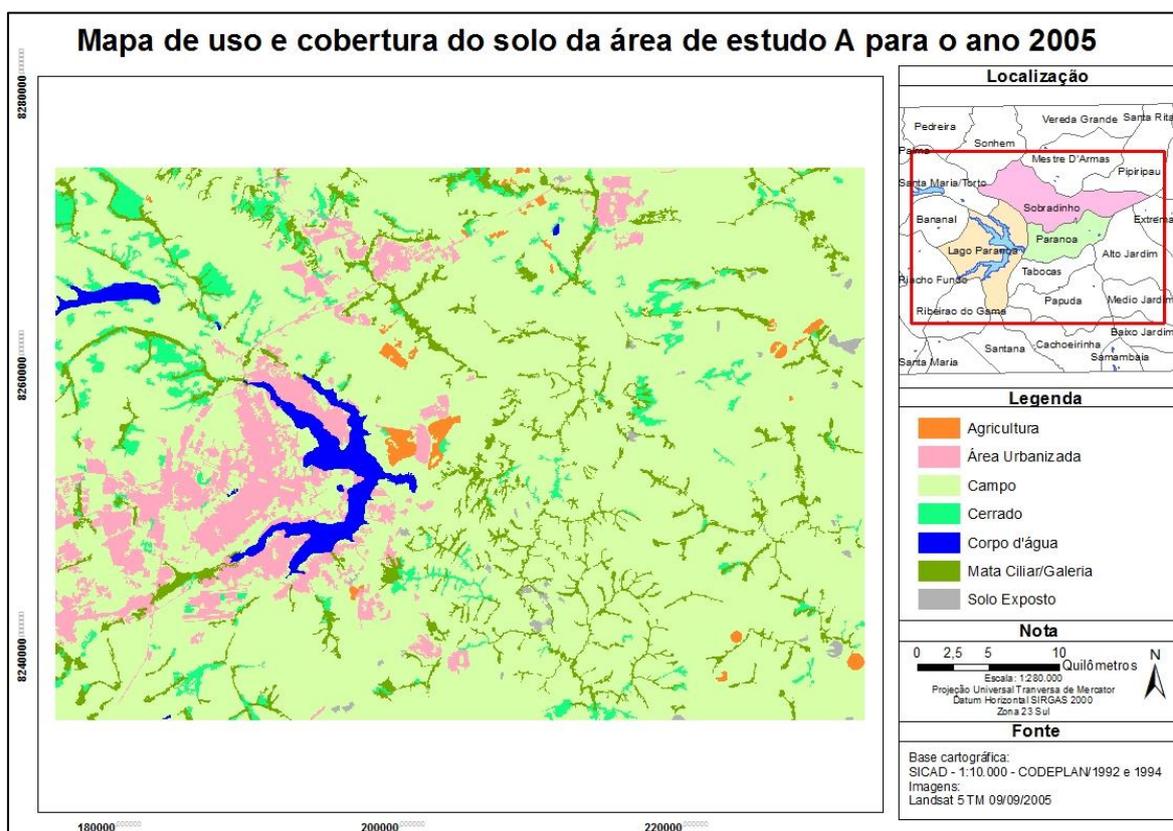


Figura 6.3 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 2005

A Tabela 6.3 apresenta a análise da evolução das classes temáticas para o período de 2005 a 2016 e pode ser visualizada nos mapas de uso e cobertura do solo obtidas pela classificação temática das imagens nas Figura 6.3 e Figura 6.4, indicando que entre os dois períodos já analisados, este teve a maior taxa de variação da área urbanizada, 43,68%, o que representa um aumento de 77,77 km<sup>2</sup> nesta classe. No solo exposto houve um incremento de 27,89 km<sup>2</sup> em sua área, sendo esta a classe que apresentou maior taxa de variação no referido período de análise. A variação no tamanho de área representada pela classe solo exposto relaciona-se as queimadas ocorridas em áreas de campo, o que é bastante comum na região, principalmente no período de seca, que inicia em meados de maio e se estende até setembro. Observa-se também um decréscimo de 106,81 km<sup>2</sup> na área de campo que, de forma geral, foi a classe temática que mais perdeu área para as atividades antrópicas (área urbanizada, solo exposto e agricultura).

Dados do IBGE (2013) demonstram que entre os anos de 2000 e 2007 houve um crescimento de 19,73% na população do Distrito Federal, passando a ter 2.455.903 habitantes, já entre os anos 2007 e 2010 o crescimento populacional foi de apenas 4,65%, contabilizando população de 2.570.160 habitantes no Censo Demográfico de 2010. A região Centro-Oeste do Brasil continuou seguindo a tendência de crescimento populacional, de 20,81% entre 2000 e 2010, passando para 14.058.094 habitantes contabilizados no Censo Demográfico de 2010.

Tabela 6.3 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2005 - 2016

Classes temáticas	Área em 2005		Área em 2016		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Agricultura	16,85	0,75	20,20	0,90	19,91
Área urbanizada	178,05	7,92	255,82	11,38	43,68
Campo	1.774,57	78,95	1.667,76	74,20	-6,02
Cerrado	87,04	3,87	86,60	3,85	-0,51
Corpo d'água	46,03	2,05	44,19	1,97	-3,99
Mata ciliar/galeria	135,23	6,02	135,26	6,02	0,02
Solo exposto	9,95	0,44	37,84	1,68	280,24
Total	2.247,72	100,00	2.247,67	100,00	-

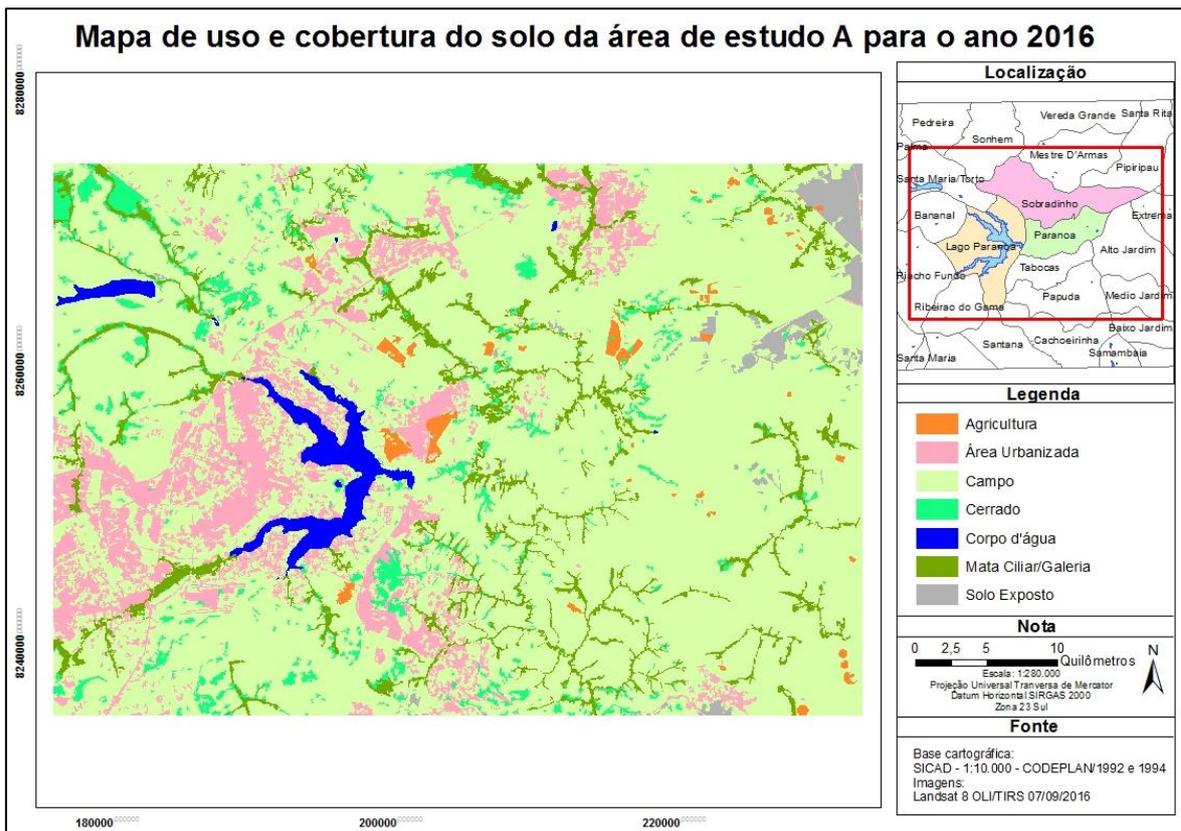


Figura 6.4 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo A para o ano 2016

A análise do período completo que compreende os anos de 1985 a 2016 está apresentada na Tabela 6.4. No ano de 1985 as classes temáticas mais representativas na área de estudo A eram o campo e a mata ciliar/galeria que, juntas, somavam cerca de 83% da área total. Já no ano de 2016 as classes temáticas de campo e da área urbanizada foram as mais representativas, com cerca de 86% da área total. De maneira geral houve uma pequena diminuição do campo e um significativo aumento na área urbanizada, o que reforça a ocorrência do processo de urbanização da área. A área urbanizada foi a classe temática que teve maior incremento de área com 121,38 km<sup>2</sup>, passando de 134,45 para 255,82 km<sup>2</sup>. As classes temáticas de campo e agricultura diminuiram sua área em 64,58 km<sup>2</sup> e 60,39 km<sup>2</sup>, respectivamente. Apesar da variação ao longo dos anos na análise geral do período, ou seja, entre os anos de 1985 e 2016, o solo exposto aumentou sua área em apenas 5,36 km<sup>2</sup>, passando de 32,48 para 37,84 km<sup>2</sup>.

Com a consolidação de Brasília, a nova Capital do Brasil, foi gradualmente implantado, pela Secretaria de Agricultura, na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá, o Plano Agrícola do Distrito Federal, onde foram criados 25 núcleos rurais, colônias agrícolas e combinados agroubanos, que por mais de trinta anos foi de grande importância para Brasília no

suprimento de hortaliças, frutas, leite e ovos. Entretanto, durante os anos 80, mas, principalmente na década de 1990, a maior parte dessas áreas agrícolas sofreram parcelamento, ocasionando expansão urbana por meio de loteamentos irregulares (Cruz *et al.*, 2001). Muitos desses núcleos rurais foram implantados na área de estudo, e por essa razão observou-se durante o período de análise (1985-2016) houve um aumento significativo da área urbanizada e, em contrapartida, a diminuição de áreas destinadas a agricultura.

Tabela 6.4 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 1985 - 2016

Classes temáticas	Área em 1985		Área em 2016		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Agricultura	80,59	3,59	20,20	0,90	-74,93
Área urbanizada	134,45	5,98	255,82	11,38	90,28
Campo	1.732,33	77,07	1.667,76	74,20	-3,73
Cerrado	87,15	3,88	86,60	3,85	-0,63
Corpo d'água	45,47	2,02	44,19	1,97	-2,80
Mata ciliar/galeria	135,22	6,02	135,26	6,02	0,03
Solo exposto	32,48	1,44	37,84	1,68	16,52
Total	2.247,69	100,00	2.247,67	100,00	-

Apesar de apresentar uma das maiores taxas de crescimento populacional da última década, a região Centro-Oeste corresponde apenas com 7,37% da população nacional em 2010. É caracterizado pelo predomínio de densidade populacional linear ao longo de estradas, onde as baixas densidades convivem com densas manchas urbanas, representadas pelas capitais estaduais e distrital, e com uma dispersão dos demais centros urbanos. O crescimento populacional está associado a geografia da agricultura mecanizada que, apesar de ser responsável por um espaço rural com baixas densidades demográficas, ocasionou também um crescimento demográfico de diversos municípios, por meio de elevadas taxas anuais de crescimento populacional, sobretudo em suas áreas urbanas. Esses fatos reafirmam uma estreita associação entre as dinâmicas agrícola e demográfica, com forte repercussão no crescimento dos centros urbanos nessa região (IBGE, 2013).

### 6.1.2. Mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo B

Os mapas de uso e cobertura do solo dos anos 2009, 2011 e 2014, para a área de estudo B, estão apresentados nas Figura 6.5, Figura 6.6 e Figura 6.7.

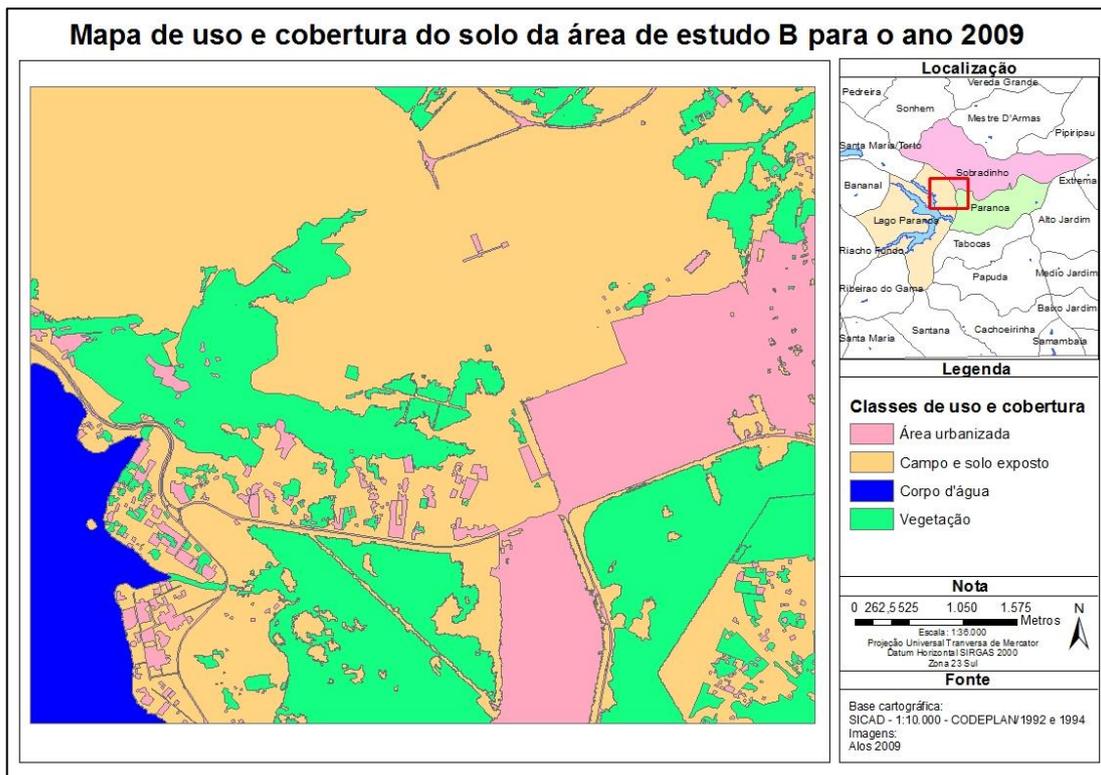


Figura 6.5 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo B para o ano 2009

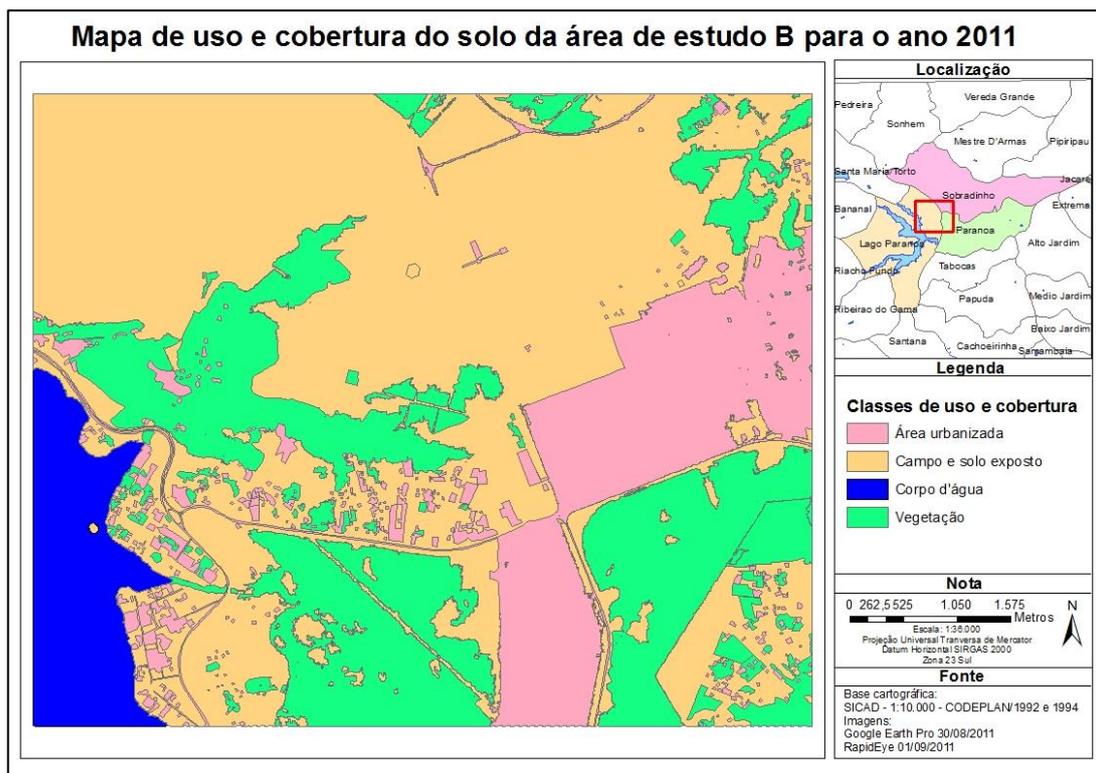


Figura 6.6 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo B para o ano 2011

O processo evolutivo de alteração do uso e cobertura do solo dentro do período de análise (anos entre 2009-2014) foi subdividido em períodos menores. A primeira análise está apresentada na Tabela 6.5, formada pela tabulação cruzada das classes temáticas entre os

anos de 2009 e 2011. A classe temática de área urbanizada foi a que sofreu maior alteração neste período, com aumento de 3,79% de área, que corresponde ao acréscimo de 0,28 km<sup>2</sup>, e a classe temática vegetação reduziu cerca de 1,70% de sua área, passando de 12,08 para 11,87 km<sup>2</sup>. Por sua vez, as áreas das classes temáticas do campo e solo exposto tiveram modificações muito pequenas, com redução de apenas 0,05 km<sup>2</sup>.

Tabela 6.5 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2009 - 2011

Classes temáticas	Área em 2009		Área em 2011		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Área urbanizada	7,29	15,34	7,56	15,92	3,79
Campo e solo exposto	25,22	53,10	25,17	52,98	-0,20
Corpo d'água	2,91	6,12	2,90	6,11	-0,15
Vegetação	12,08	25,43	11,87	24,99	-1,70
Total	47,49	100,00	47,51	100,00	-

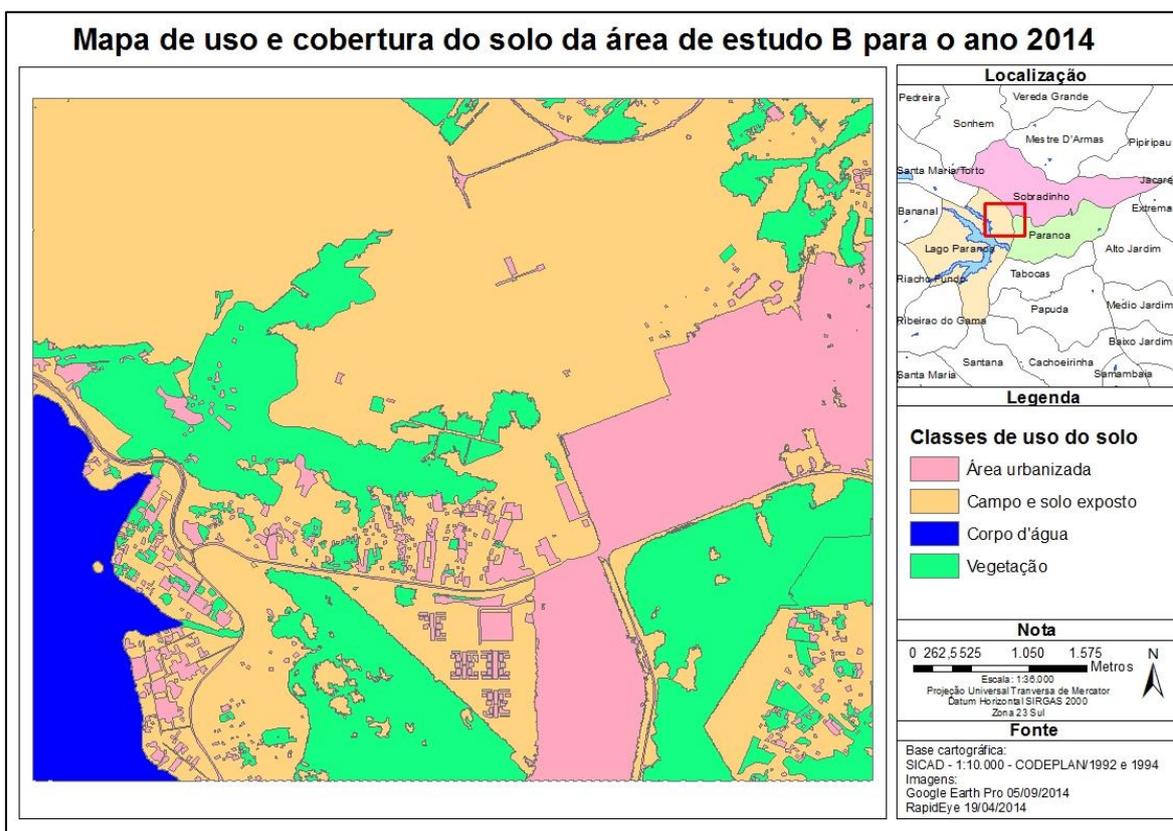


Figura 6.7 – Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo B para o ano 2014

A Tabela 6.6 apresenta as alterações ocorridas no uso e cobertura do solo entre os anos de 2011 e 2014, representadas nas Figura 6.6 e Figura 6.7, respectivamente, sendo a vegetação

a classe temática que sofreu a maior alteração, com redução de cerca de 8,64% de sua área, passando de 11,87 para 10,85 km<sup>2</sup>. As classes temáticas de campo e solo exposto e da área urbanizada tiveram aumento de área de 0,57 e 0,43 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Tabela 6.6 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2011 - 2014

Classes temáticas	Área em 2011		Área em 2014		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Área urbanizada	7,56	15,92	7,99	16,83	5,72
Campo e solo exposto	25,17	52,98	25,74	54,21	2,28
Corpo d'água	2,90	6,11	2,90	6,11	0,03
Vegetação	11,87	24,99	10,85	22,84	-8,64
Total	47,51	100,00	47,49	100,00	-

Tanto na análise visual dos mapas como na tabulação cruzada das classes temáticas apresentada nas Tabela 6.5, Tabela 6.6 e Tabela 6.7, nota-se que a maior alteração ocorrida nas classes temáticas de uso e cobertura do solo foi a redução da vegetação observada entre os anos de 2011 e 2014, devido a implantação e construção da Plano de Expansão do Paranoá, denominado Paranoá Parque. Na Tabela 6.7 nota-se que a classe temática de vegetação sofreu uma redução de 10,19%, o que implica em dizer que houve redução de 1,23 km<sup>2</sup> de área desta classe, que se transformou em área urbanizada e em campo e solo exposto com acréscimo de 0,71 e 0,43 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Tabela 6.7 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2009 - 2014

Classes temáticas	Área em 2009		Área em 2014		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Área urbanizada	7,29	15,34	7,99	16,83	9,72
Campo e solo exposto	25,22	53,10	25,74	54,21	2,08
Corpo d'água	2,91	6,12	2,90	6,11	-0,12
Vegetação	12,08	25,43	10,85	22,84	-10,19
Total	47,49	100,00	47,49	100,00	-

## **6.2. VULNERABILIDADE AMBIENTAL**

Por meio da metodologia descrita no item 5.2.2, foi realizada a ponderação dos valores de vulnerabilidade natural, que resultou na produção dos mapas temáticos de vulnerabilidade natural baseados nas características de uso e cobertura do solo, de declividade, de pedologia, de geomorfologia e de geologia. Esses mapas temáticos ponderados foram utilizados para produzir mapa de vulnerabilidade ambiental das áreas de estudo A e B, a fim de analisar como o processo histórico de urbanização pode ter influenciado os aspectos ambientais das áreas estudadas.

### **6.2.1. Ponderação dos valores de vulnerabilidade natural**

Será apresentado a seguir cada um dos fatores considerados para este estudo e sua devida ponderação, tanto para a área de estudo A como para B. A reclassificação da vulnerabilidade foi definida de acordo com a Tabela 5.6, sendo que a classe muito baixa foi definida com grau de vulnerabilidade estável e com valores de 1,0 a 1,3; a classe baixa representa áreas com grau de vulnerabilidade moderadamente estável e com valores de 1,4 a 1,7; a classe moderada representa áreas com grau de vulnerabilidade medianamente estável/vulnerável e com valores entre 1,8 e 2,2; a classe alta representa áreas com grau de vulnerabilidade moderadamente vulnerável e com valores de 2,3 a 2,6; por fim, a classe muito alta representa áreas com grau de vulnerabilidade vulnerável e com valores de 2,7 a 3,0.

#### **a) Uso e cobertura do solo**

Baseado no critério de interferência antrópica e de suas consequências em processos erosivos na área de estudo foi realizada a ponderação do fator uso e cobertura do solo de acordo com valores de vulnerabilidade natural para o tema, conforme apresentado na Tabela 5.7.

A Figura 6.8 representa o mapa de distribuição da vulnerabilidade natural de acordo com as características de uso e cobertura do solo para o ano de 2016 na área de estudo A, indicando que a vulnerabilidade natural classificada como muito baixa está presente em 11,84% da área de estudo, porcentagem que equivale a 266,05 km<sup>2</sup>; 0,9% da área de estudo (20,20 km<sup>2</sup>) é classificada como baixa vulnerabilidade; a classe de vulnerabilidade natural moderada representa 11,38% da área total, ou seja, 255,82 km<sup>2</sup>. A classe de vulnerabilidade natural alta representa 75,88% da área total, ou seja, 1705,60 km<sup>2</sup>, sendo esta a classe mais representativa da área de estudo A. A classe de vulnerabilidade muito alta não tem representação na área.

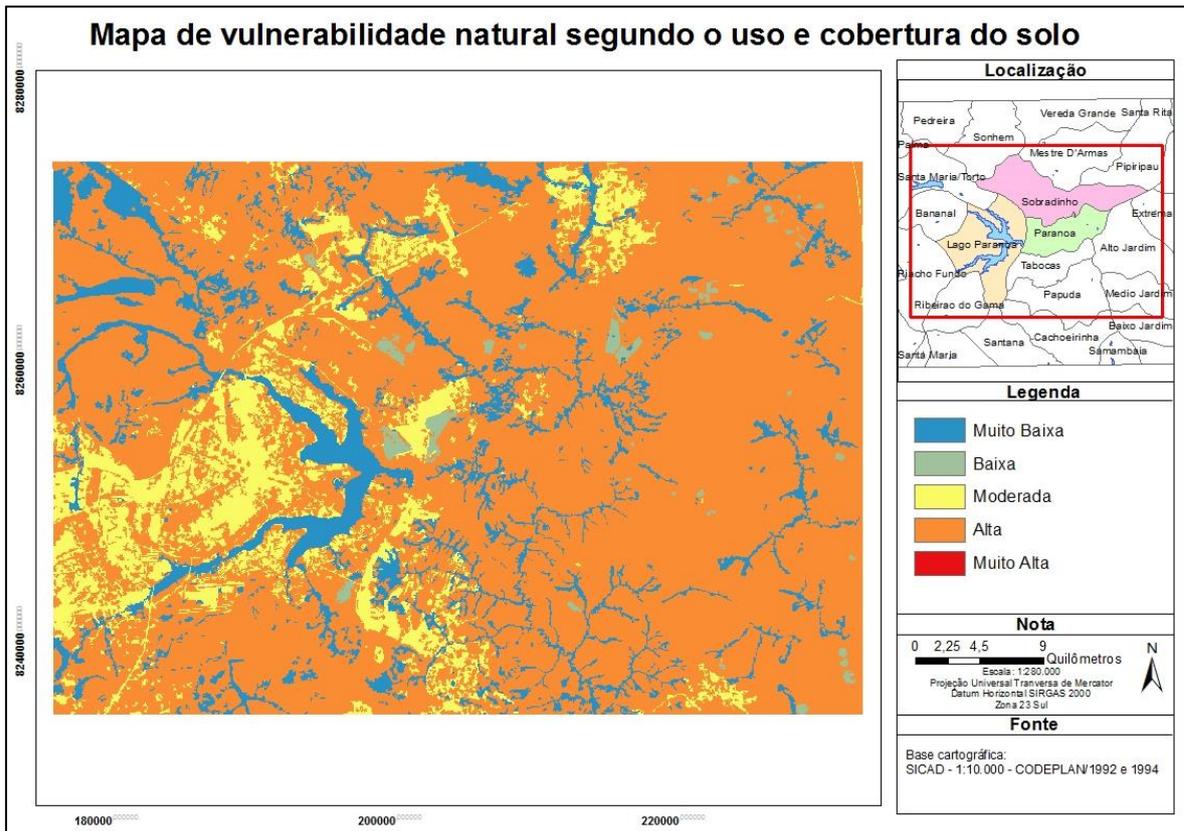


Figura 6.8 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo o uso e cobertura do solo - área de estudo A

A Figura 6.9 indica a distribuição espacial das classes de vulnerabilidade natural, por meio das características do uso e cobertura do solo para o ano de 2014 na área de estudo B, sendo que 13,75 km<sup>2</sup> (28,95%) faz parte da classe muito baixa de vulnerabilidade natural; a vulnerabilidade natural classificada como moderada é a de menor representação com apenas 7,99 km<sup>2</sup>, ou seja, 16,83% da área total; a vulnerabilidade natural classificada como alta representa a maior parte da área de estudo B, com 54,21%, o que equivale a 25,74 km<sup>2</sup>, esta área é classificada como área de campo e solo exposto, que devido à ausência de vegetação ou sua baixa densidade pode contribuir para o erosão do solo. Não há representação das classes baixa e muito alta vulnerabilidade natural.

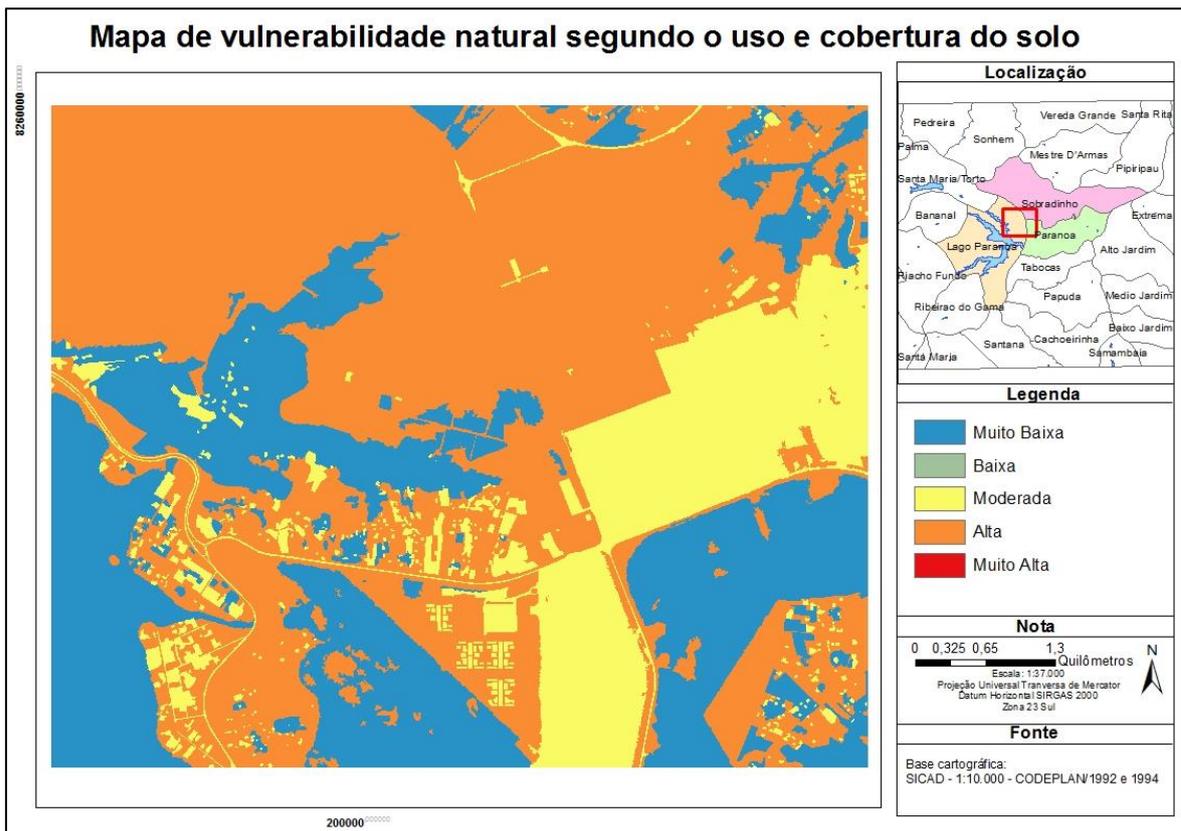


Figura 6.9 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo o uso e cobertura do solo - área de estudo B

#### b) Declividade

Por meio da utilização do MDT gerou-se o mapa de declividade em porcentagem da área de estudo, representados nas Figura 6.10 e Figura 6.12, para a área de estudo A e B, respectivamente. Para a reclassificação destes mapas considerou-se a divisão de cinco classes de vulnerabilidade natural conforme descrito na Tabela 5.8 que resultou nos mapas de vulnerabilidade natural segundo a declividade, para as duas áreas de estudo, apresentadas nas Figura 6.11 e Figura 6.13, respectivamente.

A Figura 6.11 é a representação da vulnerabilidade natural segundo a declividade para a área de estudo A, onde cerca de 91% da área total de estudo está classificada entre as classes de vulnerabilidade natural muito baixa, baixa e moderada, sendo a porcentagem e a área de, 18,44% (415 km<sup>2</sup>), 45,45% (1022,78 km<sup>2</sup>) e 27,44% (617,39 km<sup>2</sup>), respectivamente. A classe de vulnerabilidade natural alta representa 7,57% da área total, o que equivale a 170,37 km<sup>2</sup> e a classe de vulnerabilidade natural muito alta corresponde apenas 24,73 km<sup>2</sup> (1,1%).

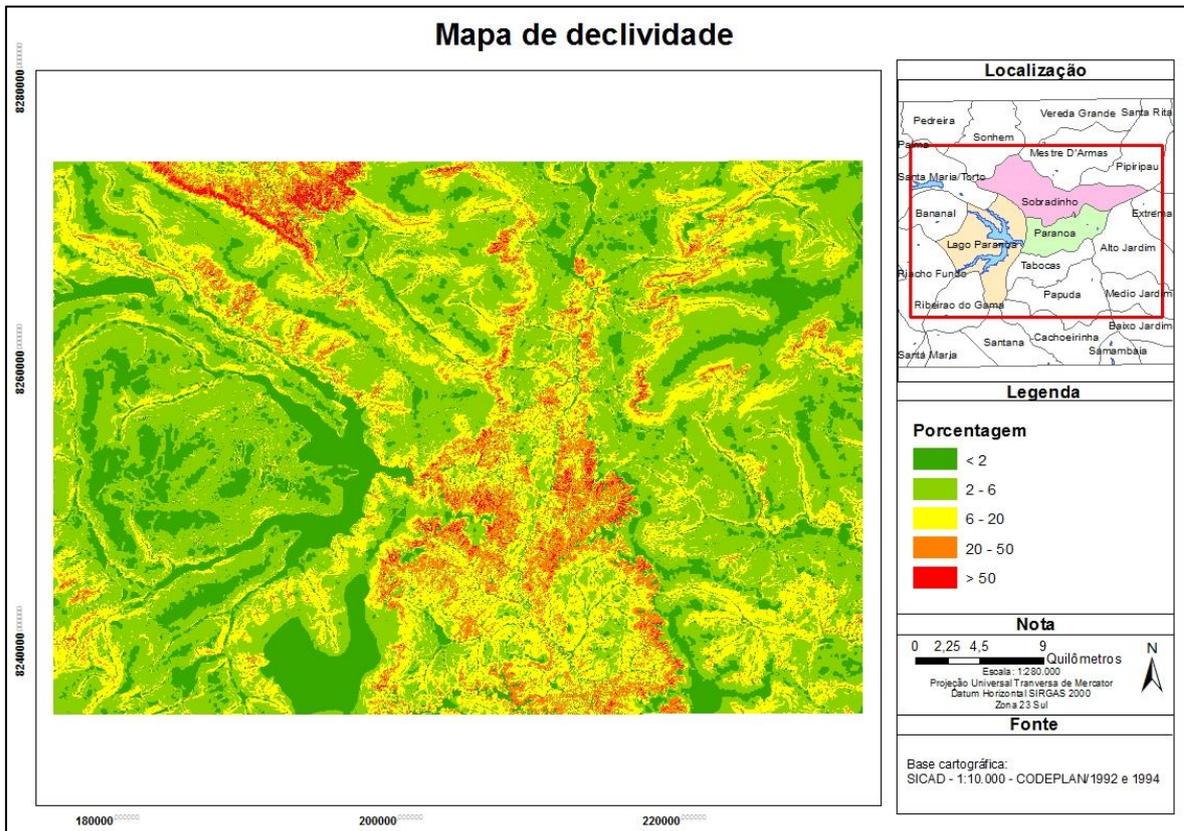


Figura 6.10 – Mapa de declividade - área de estudo A

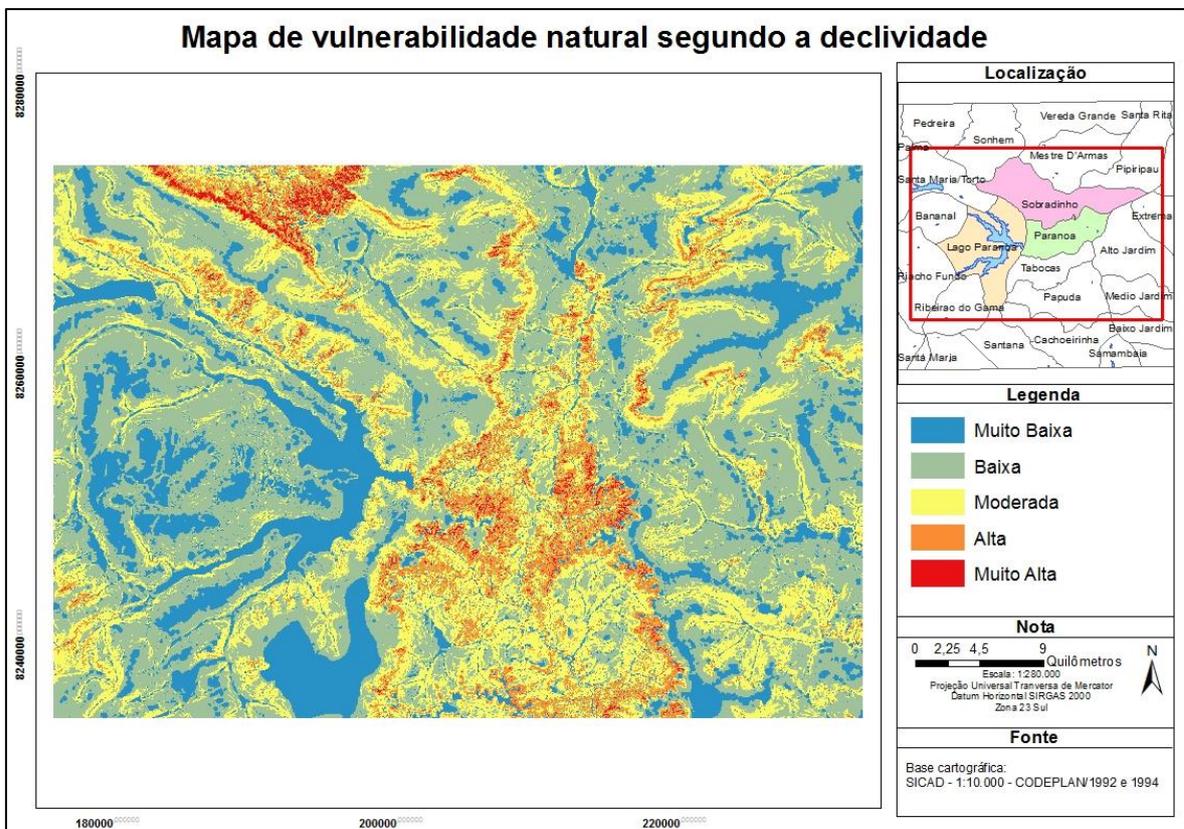


Figura 6.11 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a declividade - área de estudo A

A distribuição espacial das classes de vulnerabilidade natural segundo a declividade para a área de estudo B, está representada na Figura 6.13, indica que 6,39 km<sup>2</sup> (13,46%) da área pertence à classe de vulnerabilidade natural muito baixa; enquanto 29,21 km<sup>2</sup> (61,53%) da área é classificada com de vulnerabilidade natural baixa, sendo esta a classe mais representativa; a classe de vulnerabilidade natural moderada é indicada em 10,16 km<sup>2</sup> (21,39%) da área; 1,69 km<sup>2</sup> (3,55%) pertence à classe de vulnerabilidade natural alta; e, a classe de vulnerabilidade natural muito alta é a menos representativa em termo de área, visto que apenas 0,08% da área pertence a essa classe, o que equivale a 0,037 km<sup>2</sup>.

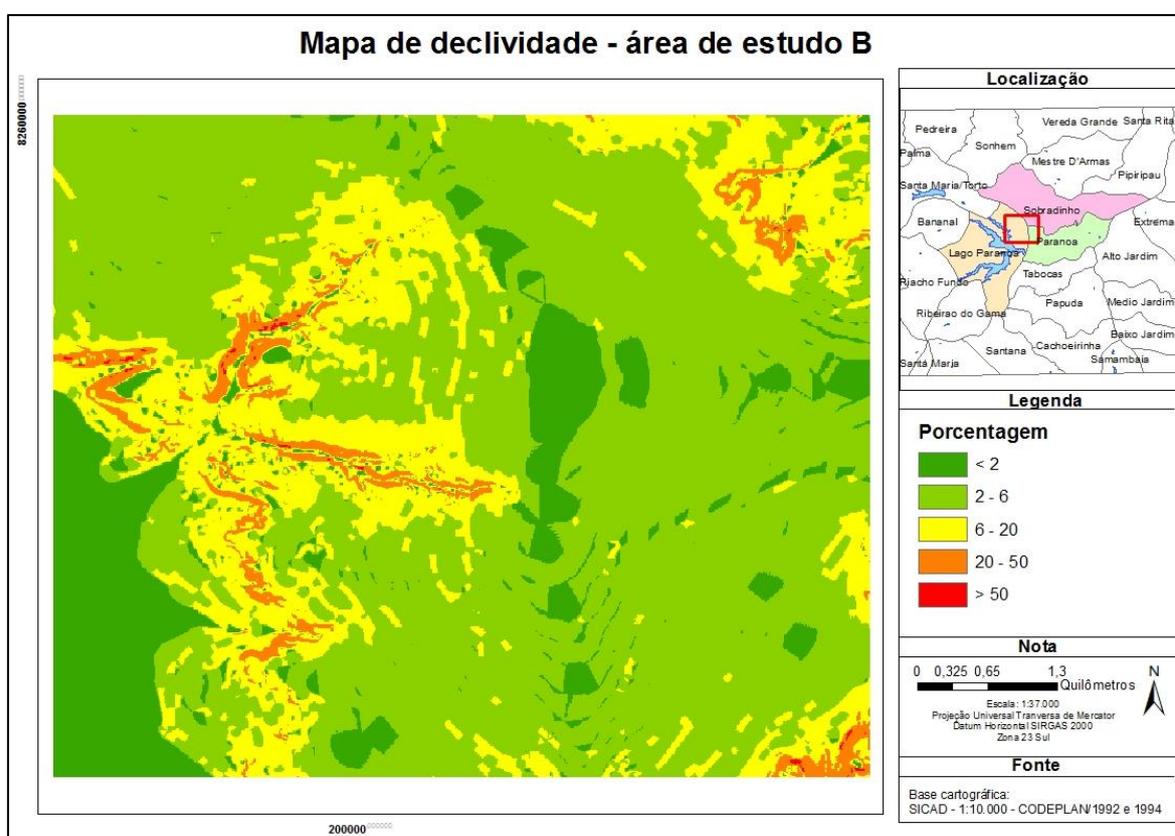


Figura 6.12 – Mapa de declividade - área de estudo B

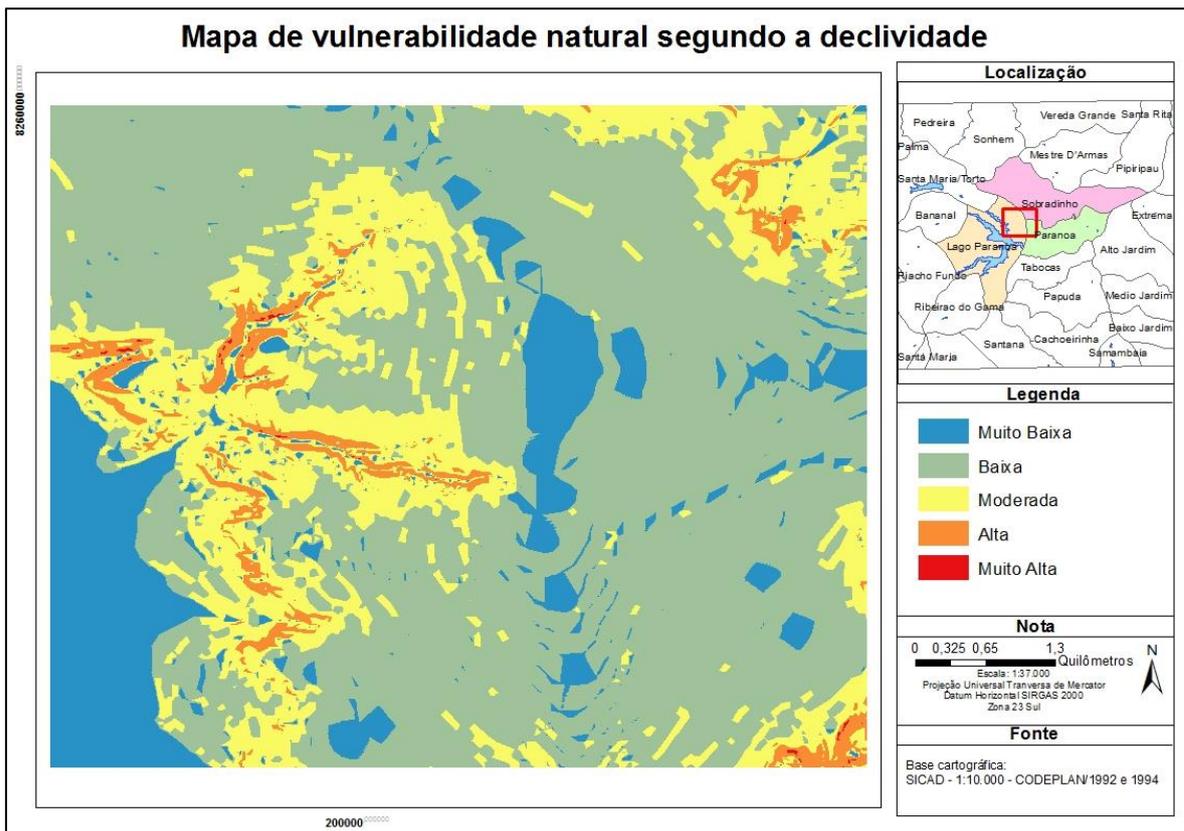


Figura 6.13 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a declividade - área de estudo B

### c) Pedologia

A ponderação dos valores do fator pedologia foi realizado seguindo a descrição da Tabela 5.9 e resultou no mapa de vulnerabilidade natural segundo a pedologia da área de estudo A apresentado na Figura 6.14, que indica que a grande parte da área de estudo (66,36%) apresenta vulnerabilidade natural muito baixa, principalmente devido a presença de latossolo, por ser o tipo de solo mais representativo na área e por não apresentar características que possam indicar alto grau de vulnerabilidade a erosão. Não há área com baixa vulnerabilidade natural; a classe moderada encontra-se apenas em 1,05% da área; alta vulnerabilidade natural é representada por 28,06%, o que equivale a 631,36 km<sup>2</sup>; e a classe muito alta corresponde a 4,54% da área total.

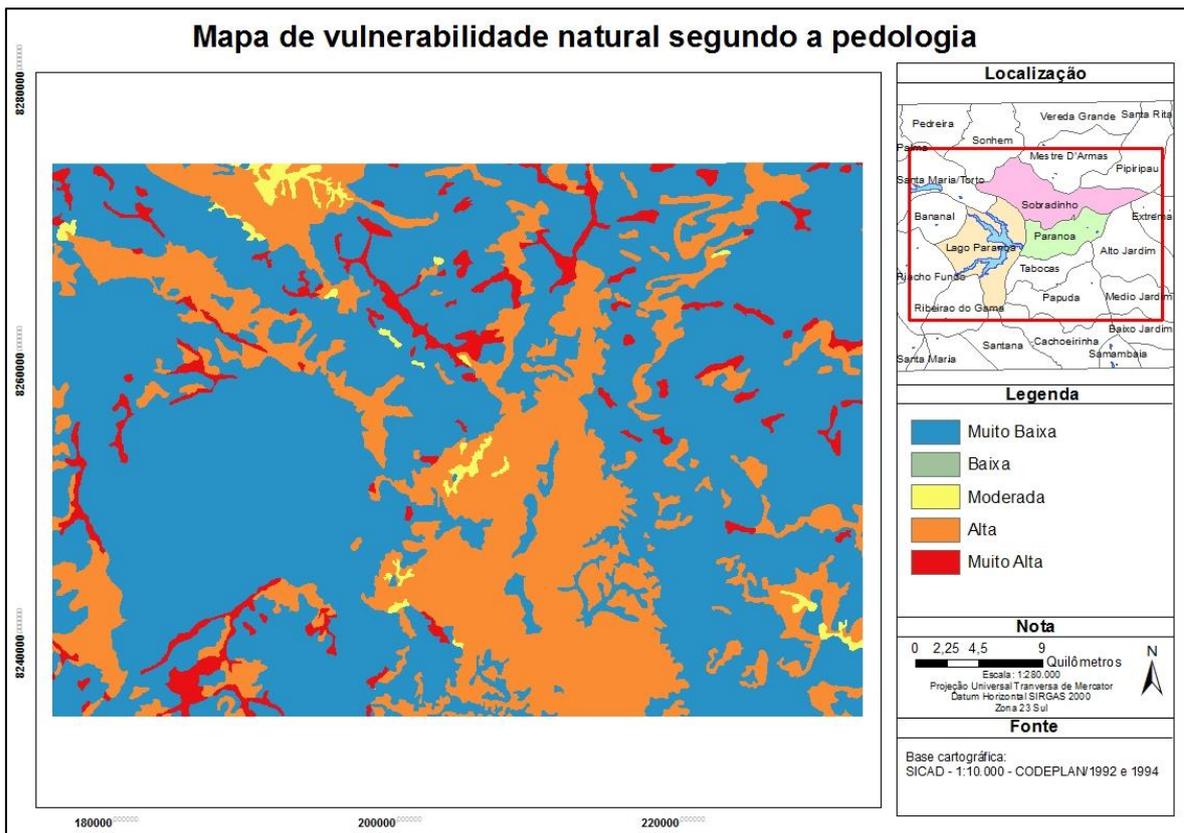


Figura 6.14 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a pedologia - área de estudo A

A Figura 6.15 é a representação da vulnerabilidade natural segundo a pedologia da área de estudo B, e assim como apresentado na Figura 6.14, a maior parte da área de estudo B (76,55%) está representada pela classe de vulnerabilidade natural muito baixa, com área de 36,35 km<sup>2</sup>. Não há área de vulnerabilidade natural classificada como baixa vulnerabilidade natural; a classe de vulnerabilidade natural moderada é representada por apenas 0,38% da área total, que equivale a uma área de 0,18 km<sup>2</sup>; 22,93% da área de estudo B está classificada como alta vulnerabilidade natural e possui uma área de 10,89 km<sup>2</sup>; e, a classe de vulnerabilidade natural muito alta tem a menor representação em área, com 0,14%, ou seja, 0,068 km<sup>2</sup> da área de estudo B.

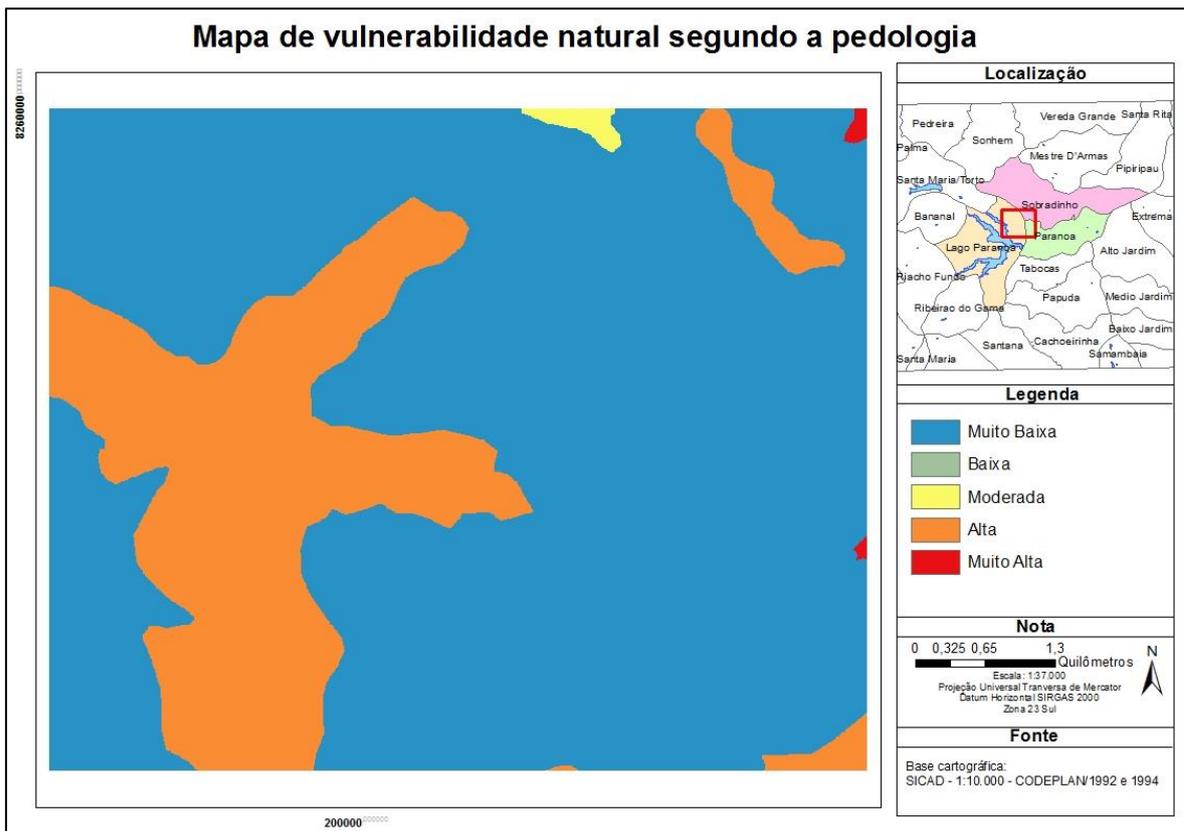


Figura 6.15 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a pedologia - área de estudo B

#### d) Geomorfologia

A geomorfologia sofreu ponderação dos valores para sua reclassificação de acordo com a Tabela 5.10, que resultou nos mapas de vulnerabilidade natural segundo a geomorfologia da área de estudo A e da área de estudo B, que serão descritos a seguir.

A vulnerabilidade natural segundo à ponderação da geomorfologia da área de estudo A é apresentada na Figura 6.16 e indicou que 76,27% da área pertence à classe de vulnerabilidade natural muito baixa, o que equivale a uma área de 1.716,24 km<sup>2</sup>; não há área cuja vulnerabilidade natural seja classificada como baixa ou alta; 10,23%, ou seja, 230,29 km<sup>2</sup> da área tem vulnerabilidade natural moderada; e o restante da área, cerca de 303,65 km<sup>2</sup> pertence à classe de vulnerabilidade natural muito alta. Em termos geomorfológicos, 86,51% da área de estudo A se define com vulnerabilidade natural de baixa a moderada.

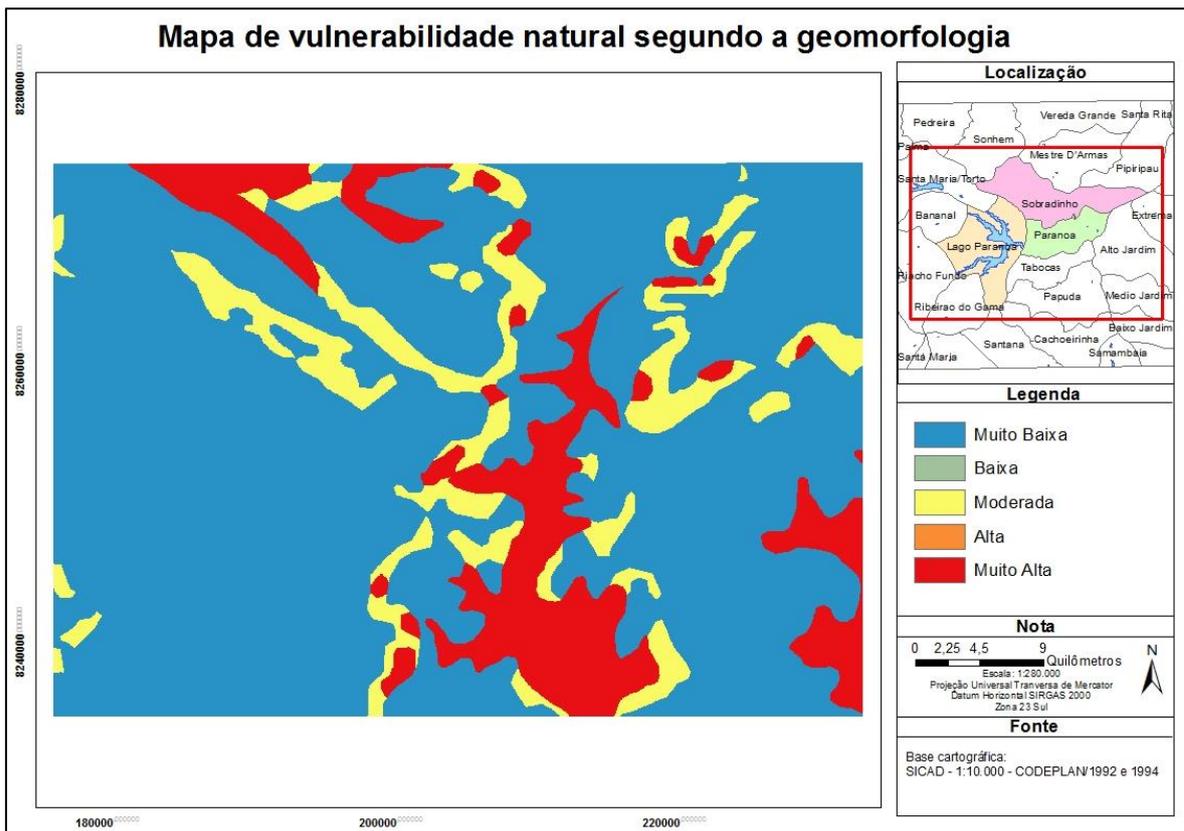


Figura 6.16 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geomorfologia - área de estudo A

A vulnerabilidade natural segundo à ponderação da geomorfologia da área de estudo B é apresentada na Figura 6.17, onde houve predomínio de áreas classificadas com vulnerabilidade natural muito baixa, com 81,35% da área total, que equivale a 38,63 km<sup>2</sup>; 8,74 km<sup>2</sup> (18,40%) pertence à classe vulnerabilidade natural moderada; e com menor representação está a classe de vulnerabilidade natural muito alta, com 0,12 km<sup>2</sup> (0,25%); não houve área com vulnerabilidade natural baixa ou alta.

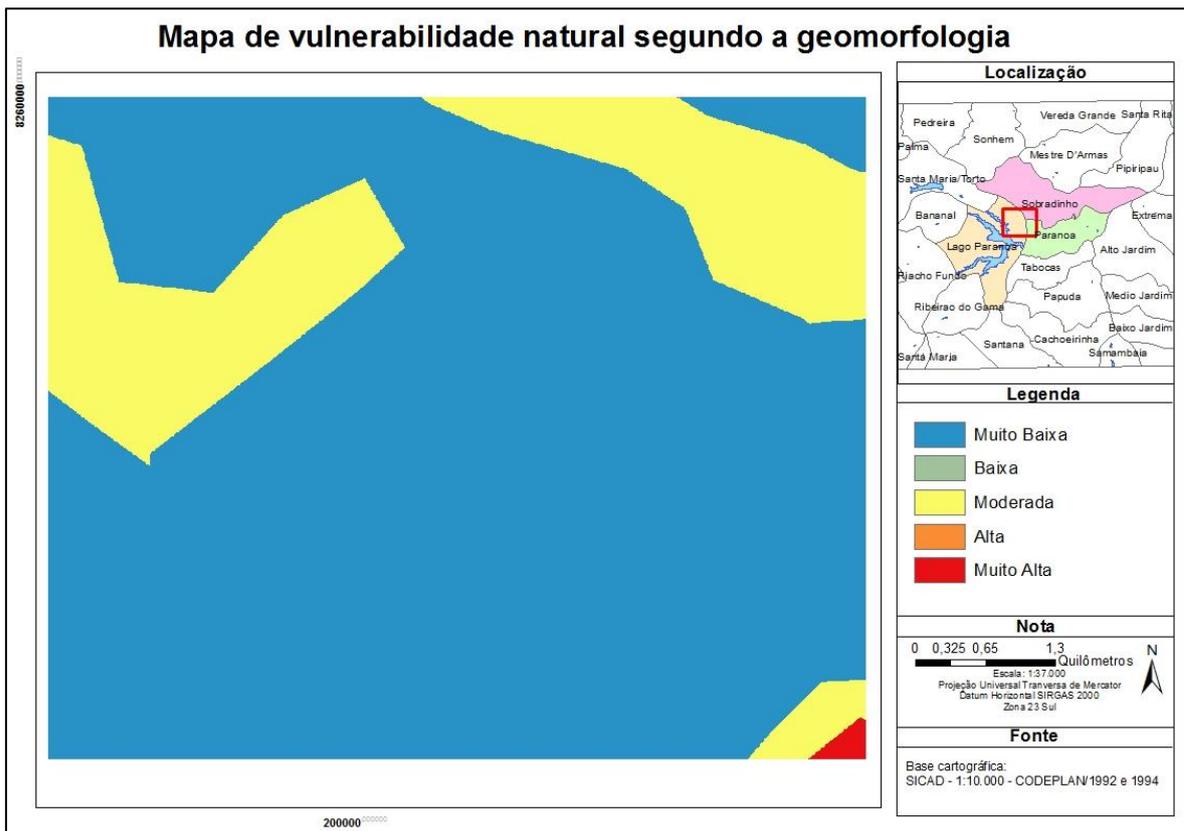


Figura 6.17 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geomorfologia - área de estudo B

#### e) Geologia

O fator de geologia foi reclassificado de acordo com a análise da litologia local e com o auxílio da Tabela 5.11. A distribuição espacial das classes de vulnerabilidade natural segundo a geologia para as áreas de estudo A e B está apresentada nas Figura 6.18 e Figura 6.19, respectivamente.

A vulnerabilidade natural segundo à ponderação da geologia da área de estudo A é apresentada na Figura 6.18, indica que cerca de 8,24% da área ou 85,53 km<sup>2</sup> é classificada com vulnerabilidade natural muito baixa; não há área de baixa vulnerabilidade natural; a classe de vulnerabilidade natural moderada é a que mais representa geologicamente a área de estudo A, visto que 1253,96 km<sup>2</sup> da área está enquadrada nessa classe, o que representa 55,73% da área total. Por sua vez, a classe de vulnerabilidade natural alta possui uma área de 743,74 km<sup>2</sup>; e a classe de vulnerabilidade natural muito alta é a menos representativa em termos de área, pois apenas 66,95 km<sup>2</sup> pertencem a esta classe.

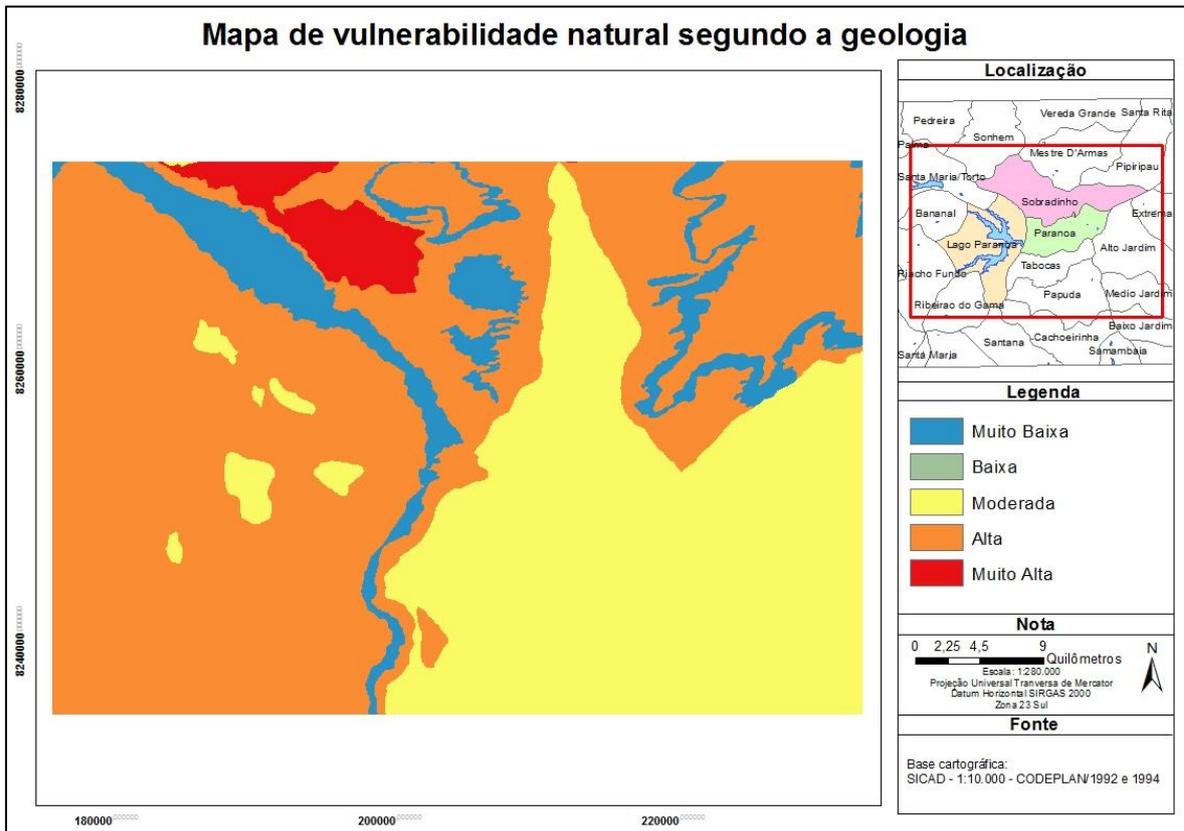


Figura 6.18 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geologia - área de estudo A

A vulnerabilidade natural segundo à ponderação da geologia da área de estudo B é apresentada na Figura 6.19, e indica que 11,01 km<sup>2</sup> (23,19%) pertence à classe de vulnerabilidade natural muito baixa. Por sua vez, 2,19 km<sup>2</sup> (4,62%) pertence à classe de vulnerabilidade natural moderada; e a classe de vulnerabilidade natural alta abrange 72,20% da área total de estudo, o equivalente a 34,29 km<sup>2</sup>, sendo assim é, em termos de área, a mais representativa das classes de vulnerabilidade natural, e as unidades de metarritmito, arenoso e argiloso são as que conferem essa característica. Não houve na área de estudo B representação das classes de vulnerabilidade natural baixa e muito alta.

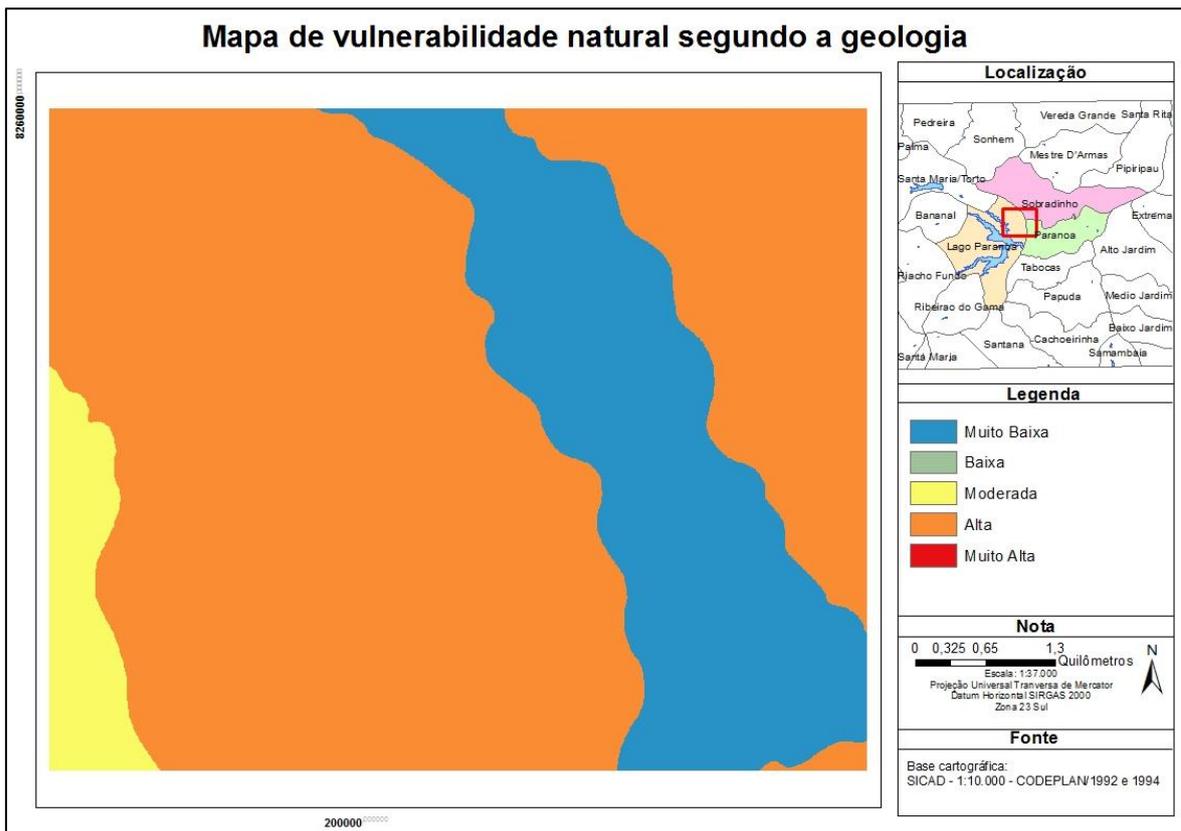


Figura 6.19 – Mapa de vulnerabilidade natural segundo a geologia - área de estudo B

### 6.2.2. Análise Hierárquica de Processos

Os critérios utilizados para definir o grau de importância dos cinco fatores analisados foram, o levantamento bibliográfico, a escala e a resolução espacial dos dados utilizados, que resultaram na construção da matriz de comparação pareada apresentada na Tabela 6.8. A relação entre os fatores é definida pela comparação dos mesmos, de forma pareada, sendo assim, o método AHP interpreta matematicamente esses valores e define uma hierarquização imparcial (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012).

O uso e cobertura do solo foi definido como o fator de maior importância, por estar associado aos impactos ambientais resultantes da ação antrópica, principalmente com relação a retirada da cobertura vegetal, fato observado com a classificação temática das imagens das áreas de estudo. A declividade é o fator seguinte em grau de importância, devido sua influência nas formas de relevo, podendo favorecer o arraste de sedimentos da superfície do solo decorrente principalmente da ação da chuva, potencializada em áreas com maiores declividades.

Em termos de importância, depois da declividade, encontra-se a pedologia e geomorfologia, definidas com o mesmo grau de importância, pois, as características do solo e de relevo da

paisagem influenciam na definição de vulnerabilidade ambiental, em especial, em se tratando de processos erosivos do solo. As unidades litológicas definem a geologia de uma área e exercem significativa influência sobre a formação do solo, porém tal fato é observado com o passar de muitos anos. Devido ao curto período de análise, principalmente, da área de estudo B, este fator foi definido como o de menor importância para a análise da vulnerabilidade ambiental.

Tabela 6.8 – Matriz de comparação pareada

Fatores	Uso e				
	cobertura do solo	Declividade	Pedologia	Geomorfologia	Geologia
Uso e cobertura do solo	1	3	5	5	7
Declividade	1/3	1	3	3	5
Pedologia	1/5	1/3	1	1	3
Geomorfologia	1/5	1/3	1	1	3
Geologia	1/7	1/5	1/3	1/3	1
Somatória	1,88	4,87	10,33	10,33	19,00

A Tabela 6.9 apresenta a matriz normalizada e o peso relativo de cada fator considerado, sendo que a primeira foi definida por meio da divisão de cada elemento da matriz de comparação pareada pela somatória da coluna em questão; já o peso relativo foi obtido por meio da somatória de cada linha da matriz normalizada dividido pela ordem da matriz.

Tabela 6.9 – Matriz normalizada

Fatores	Uso e					Pesos relativos
	cobertura do solo	Declividade	Pedologia	Geomorfologia	Geologia	
Uso e cobertura do solo	0,533	0,616	0,484	0,484	0,368	0,497
Declividade	0,178	0,205	0,290	0,290	0,263	0,245
Pedologia	0,107	0,068	0,097	0,097	0,158	0,105
Geomorfologia	0,107	0,068	0,097	0,097	0,158	0,105
Geologia	0,076	0,041	0,032	0,032	0,053	0,047
Somatória	-	-	-	-	-	1,000

De acordo com Pinese Júnior e Rodrigues (2012), o procedimento de ponderação e normalização dos dados decorrentes da aplicação do método AHP podem reduzir os erros

de julgamento, o que resulta em mapas de vulnerabilidade ambiental com certa imparcialidade nos resultados e com boa diferenciação dos níveis de vulnerabilidade de uma área quanto aos processos geoambientais e antrópicos. Assim, para o cálculo do autovetor  $\lambda_{max}$  é necessário calcular a matriz  $Aw$ , que é resultante do produto da matriz de comparação pareada pela matriz de pesos relativos, conforme demonstrado a seguir:

$$Aw = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,497 \\ 0,245 \\ 0,105 \\ 0,105 \\ 0,047 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,614 \\ 1,277 \\ 0,532 \\ 0,532 \\ 0,273 \end{bmatrix}$$

Por meio da Equação (5.5) calculou-se o  $\lambda_{max}$ :

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

$$\lambda_{max} = \frac{1}{5} \left[ \frac{2,614}{0,497} + \frac{1,277}{0,245} + \frac{0,532}{0,105} + \frac{0,532}{0,105} + \frac{0,273}{0,047} \right] = 5,1274$$

O Índice de consistência foi calculado pela Equação (5.6):

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

$$IC = \frac{(5,1274 - 5)}{(5 - 1)}$$

$$IC = 0,0318$$

Para verificar a consistência no desenvolvimento do método, calculou-se a Razão de Consistência (RC) por meio da Equação (5.7), sendo IR igual a 1,12 obtido pela Tabela 5.13.

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

$$RC = \frac{0,0318}{1,12}$$

$$RC = 0,0284$$

Saaty (1980) defende que o valor de razão de consistência seja menor que 0,10, portanto os pesos utilizados para o modelo são aceitáveis, visto que a razão de consistência calculada foi de 0,0284. A diminuição da subjetividade na determinação dos pesos relativos e a análise do grau de coerência adotado pelo usuário por meio da razão de consistência, são apontados como vantagens da utilização do método (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012).

Com a definição e validação dos pesos dos fatores, o mapa de vulnerabilidade ambiental da área foi produzido pela Equação (5.8):

$$VA = 0,497. (uso e cobertura do solo) + 0,245. (declividade) + 0,105. (pedologia) + 0,105. (geomorfologia) + 0,047. (geologia)$$

Os dados descritos e detalhados a seguir fazem referência a Tabela 6.10, que contém a distribuição das classes de vulnerabilidade ambiental das áreas de estudo A e B, em termos de área e porcentagem de área.

Tabela 6.10 – Vulnerabilidade ambiental em termos de área e porcentagem

Classe de vulnerabilidade	Valor	Área de estudo A		Área de estudo B	
		Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Muito baixa	1,0 – 1,3	126,01	5,61	8,37	17,63
Baixa	1,3 – 1,7	351,49	15,66	11,49	24,20
Moderada	1,7 – 2,2	1.376,05	61,31	24,15	50,87
Alta	2,2 – 2,6	383,86	17,10	3,46	7,30
Muito alta	2,6 – 3,0	7,13	0,32	0,00	0,00

A análise da área de estudo A, por meio da Tabela 6.10 e do mapa de vulnerabilidade ambiental apresentado na Figura 6.20, indica que 5,61% da área total pertence à classe de vulnerabilidade ambiental muito baixa o que equivale, em área, a 126,01 km<sup>2</sup>, nessas áreas identificou-se principalmente a presença de mata ciliar/galeria, cerrado e de corpos d'água, como lagos e reservatórios. A classe de vulnerabilidade ambiental baixa representa cerca de 15,66% do total de área, ou seja, 351,49 km<sup>2</sup>, isto ocorre principalmente devido a presença

de áreas com classe temática de agricultura e área urbanizada. A classe de vulnerabilidade ambiental moderada representa mais da metade da área de estudo A, com aproximadamente 61,31% da área total, cerca de 1.376,05 km<sup>2</sup> e está associada a presença de classe temática campo. As áreas com classe de vulnerabilidade ambiental alta é de 17,10% da área total, com 383,86 km<sup>2</sup>. A classe de vulnerabilidade muito alta representa 0,32% da área total, ou seja, 7,13 km<sup>2</sup>.

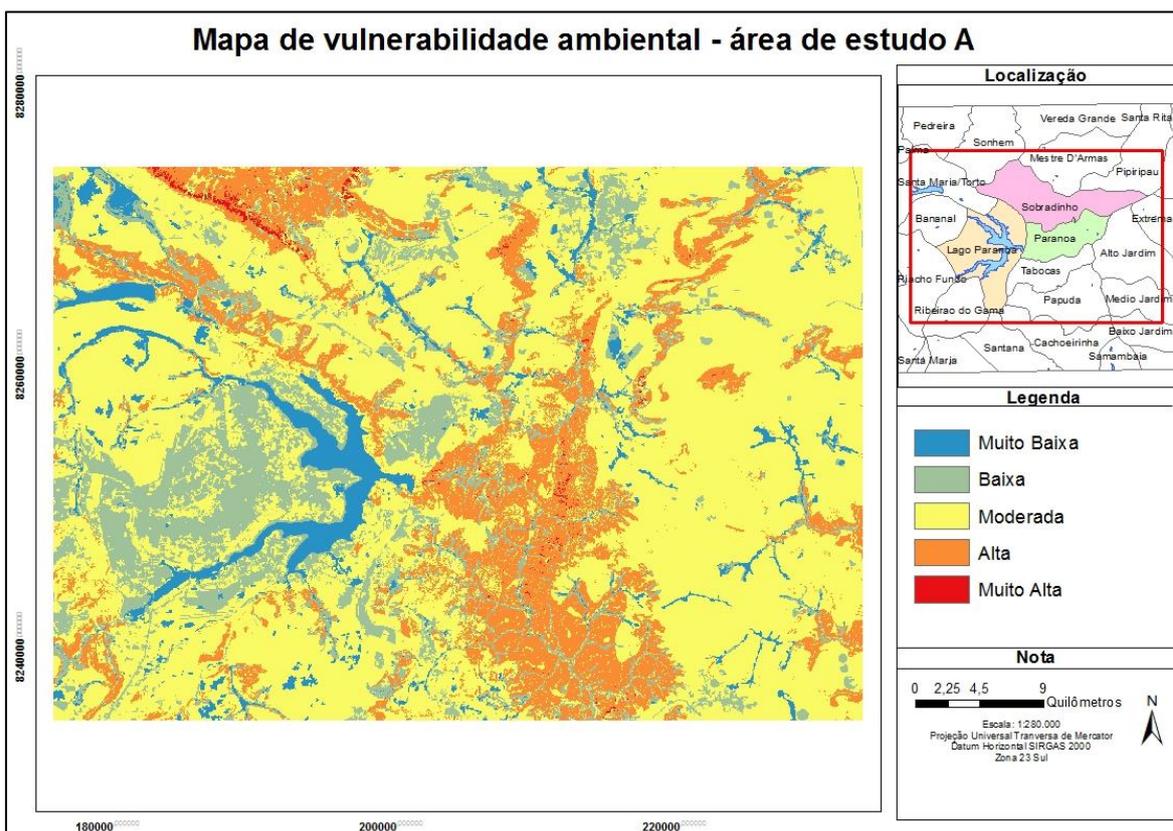


Figura 6.20 – Mapa de vulnerabilidade ambiental - área de estudo A

A análise da área de estudo B, por meio da Tabela 6.10 e do mapa de vulnerabilidade ambiental apresentado na Figura 6.21 indica que 17,63% da área total foi definida com vulnerabilidade ambiental muito baixa, este valor abrange cerca de 8,37 km<sup>2</sup>. Foi identificada nesta classe, principalmente, área do lago e área com vegetação de reflorestamento de *Pinus* sp.; com a presença de latossolo vermelho e, em menor quantidade, latossolo vermelho-amarelo; com predomínio de declividade até 6% (muito baixa e baixa).

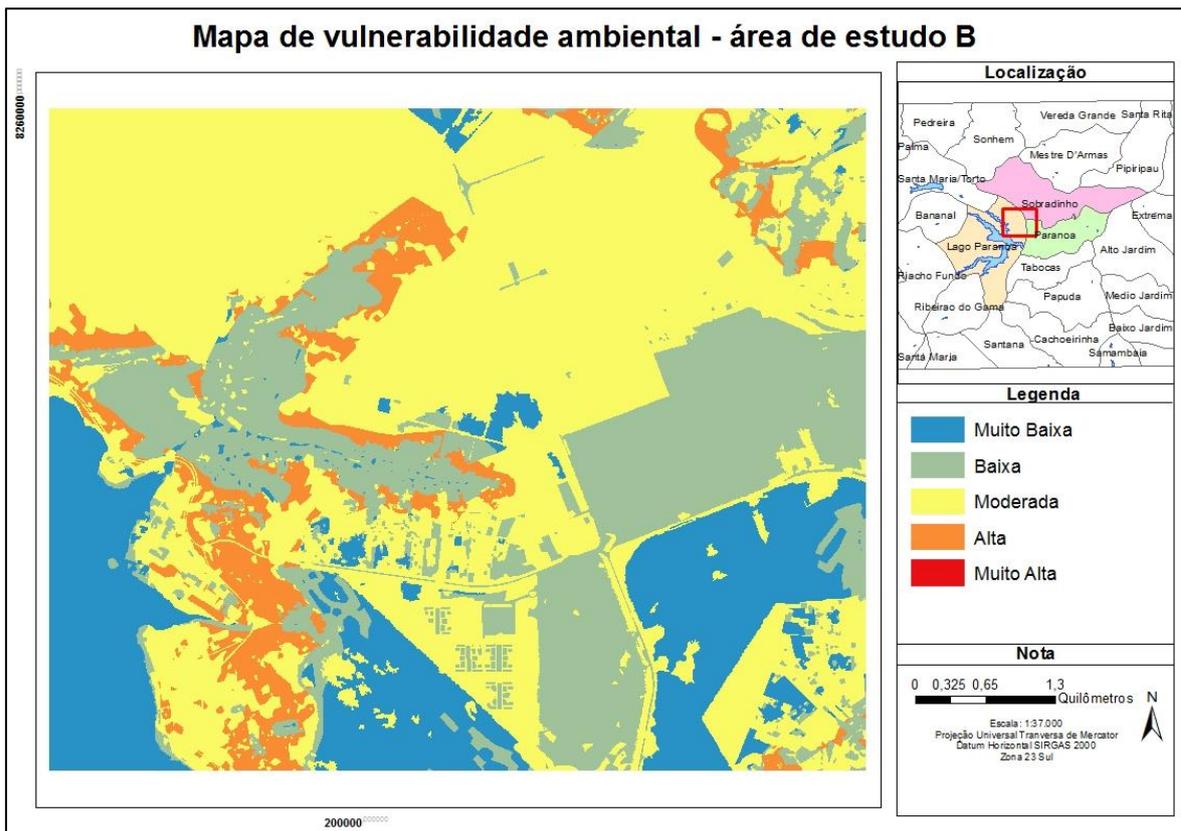


Figura 6.21 – Mapa de vulnerabilidade ambiental - área de estudo B

Na área de estudo B há predomínio, então, das classes de vulnerabilidade ambiental baixa, moderada e alta que, juntas, somam 75,07% da área total. A classe de baixa vulnerabilidade ambiental representa 24,20% da área de estudo B, o equivalente a 11,49 km<sup>2</sup>, e está associada principalmente área urbanizada e a área de vegetação de cerrado e mata ciliar/galeria. De maneira geral, a área urbanizada apresenta declividade de muito baixa a baixa, com a presença de latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo, e os fatores geologia e geomorfologia são bastante variáveis; já as áreas com cerrado e mata ciliar/galeria possuem declividade de média a alta, por estarem próximas a corpos hídricos, com presença dominante de cambissolo, e geomorfologia com área de rebordo e plano intermediário e unidades de metarritmito arenoso e metarritmito argiloso.

A classe de vulnerabilidade ambiental moderada representa 50,87% da área total, ou seja, 24,15 km<sup>2</sup>, e encontra-se principalmente em área com de uso e cobertura do solo classificada como campo, com declividade de muito baixa a baixa, com solo predominante do tipo latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo e geomorfologia predominante de chapadas elevadas.

A classe de vulnerabilidade ambiental alta está presente em 3,46 km<sup>2</sup>, o que representa 7,30% da área de estudo B, com uso do solo na classe temática campo, com declividade de 2 a 20%, ou seja, de baixa a média, presença de latossolo vermelho, latossolo vermelho-amarelo e cambissolo, sendo a geomorfologia e a geologia com características variadas. Não há representação da classe de vulnerabilidade ambiental muito alta. Pinese Júnior e Rodrigues (2012) corroboram os resultados obtidos, já que concluíram que nas áreas classificadas com vulnerabilidade muito alta os riscos ambientais aumentam.

### **6.3. MAPAS DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE**

Os mapas de temperatura da superfície terrestre foram elaborados de acordo com os procedimentos metodológicos descritos no item 5.2.3.

#### **6.3.1. Área de estudo A**

Os mapas de temperatura aparente da superfície terrestre elaborados para a área de estudo A, em datas específicas, para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2016 estão apresentados nas Figura 6.22, Figura 6.23, Figura 6.24 e Figura 6.25. Os dados de temperatura de solo foram relacionados com os dados de precipitação disponíveis no site do INMET, da Estação Brasília e com as características de uso e cobertura do solo.

Por meio da análise visual do mapa de temperatura da superfície terrestre da Figura 6.22 observou-se para data de obtenção da imagem Landsat, 18 de setembro de 1985, que as temperaturas predominantes na área da imagem variavam entre 29 a 33 °C, com média de temperatura em torno de 30 °C. Não houve precipitação neste dia, nem nos dias antecedentes a este, e foi registrado durante o mês de setembro 55,2 mm de precipitação, distribuído durante sete dias.

As temperaturas mais baixas foram identificadas em áreas representados pela classe temática corpo d'água, sendo elas de no máximo 21 °C; as classes temáticas de agricultura e mata ciliar/galeria apresentaram temperatura de superfície terrestre entre 21 a 25 °C; a classe temática área urbanizada tiveram as temperatura variando entre 27 a 31 °C; as classes temáticas com temperaturas mais elevadas e mais variáveis, acima de 27 °C foram campo, cerrado e solo exposto; indicativo de que áreas vegetadas tendem a apresentar temperaturas mais baixas do que área com pouca ou sem nenhuma vegetação.

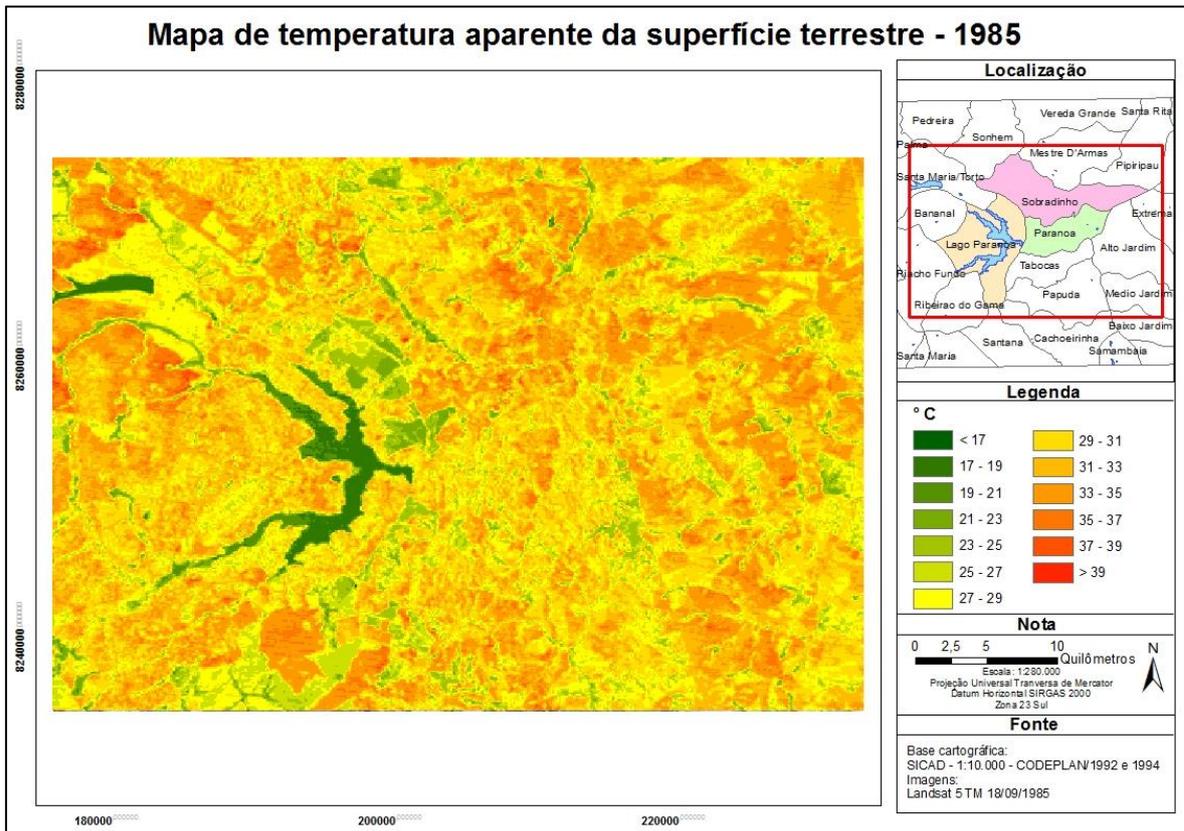


Figura 6.22 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 18 de setembro de 1985 - área de estudo A

Por meio da análise visual do mapa de temperatura da superfície terrestre, na Figura 6.23, observou-se para data de obtenção da imagem Landsat, 14 de setembro de 1995, que as temperaturas predominantes estavam em torno de 27 a 29 °C, sendo a média de aproximadamente 28 °C. Não houve precipitação neste dia, nem nos dias antecedentes a este, e a precipitação mensal foi a mais baixa registrada (0,6 mm) entre os meses de setembro de 1985, 1995, 2005 e 2016, que se distribuiu em apenas 2 dias. Apesar da densidade populacional, o Plano Piloto de Brasília é bastante arborizado, e de acordo com Jenerette *et al.* (2016) a vegetação tem significativo efeito de resfriamento em área urbanizada, o que justifica o predomínio de temperatura de superfície em torno de 26 a 28 °C.

A Figura 6.23 demonstra que a classe temática corpo d'água apresenta as menores temperaturas, entre 19 a 23 °C; em seguida tem-se as classes temáticas de agricultura e mata ciliar/galeria, com temperaturas de superfície terrestre variando entre 21 a 25 °C; a classe temática cerrado apresentou temperatura variando entre 25 e 27 °C; a classe temática área urbanizada tiveram as temperatura variando entre 25 e 29 °C; as classes temáticas campo e

solo exposto apresentaram temperaturas variando entre 27 a 37 °C, e assim como observado em 1985 estas foram as classes temáticas com temperaturas mais elevadas.

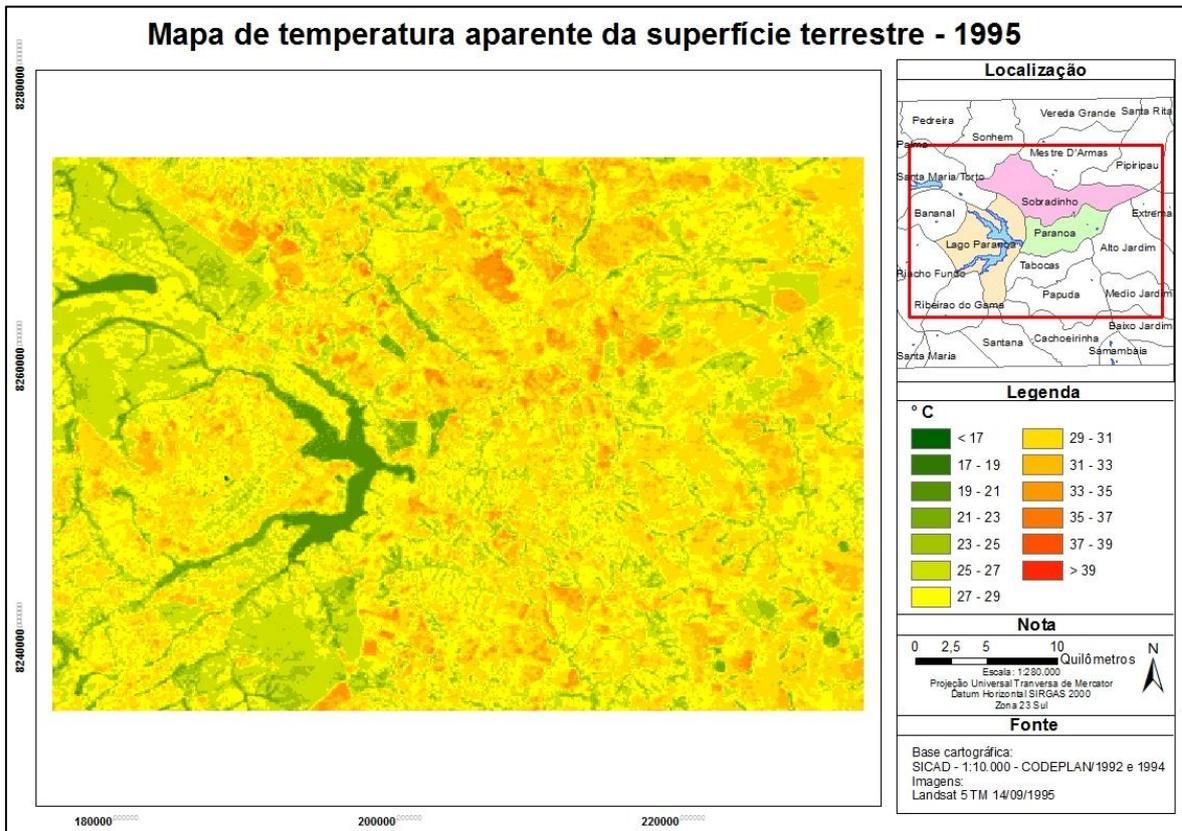


Figura 6.23 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 14 de setembro de 1995 - área de estudo A

Por meio da análise visual do mapa de temperatura da superfície terrestre da Figura 6.24, observou-se para data de obtenção da imagem Landsat, 09 de setembro de 2005, que o mapa revela que as temperaturas predominantes estavam na faixa de 21 a 23 °C e a temperatura média era de 22,5 °C. A precipitação mensal registrada foi de 55,9 mm. Assim como nos anos anteriores não houve precipitação no dia em que a imagem da banda espectral do infravermelho termal do Landsat TM 5 foi obtida, porém registrou-se uma precipitação no dia 07 de setembro de 2005, que pode ter contribuído para a redução na temperatura da área, visto que este foi o mapa que apresentou as temperaturas mais baixas.

A Figura 6.24 demonstra que a classe temática corpo d'água apresenta as menores temperaturas, sendo elas no máximo 17 °C; em seguida tem-se as classes temáticas de agricultura e mata ciliar/galeria, com temperaturas de superfície terrestre variando entre 17 a

19 °C; as classes temáticas cerrado, campo, área urbanizada e solo exposto apresentaram temperatura variando entre 21 e 29 °C.

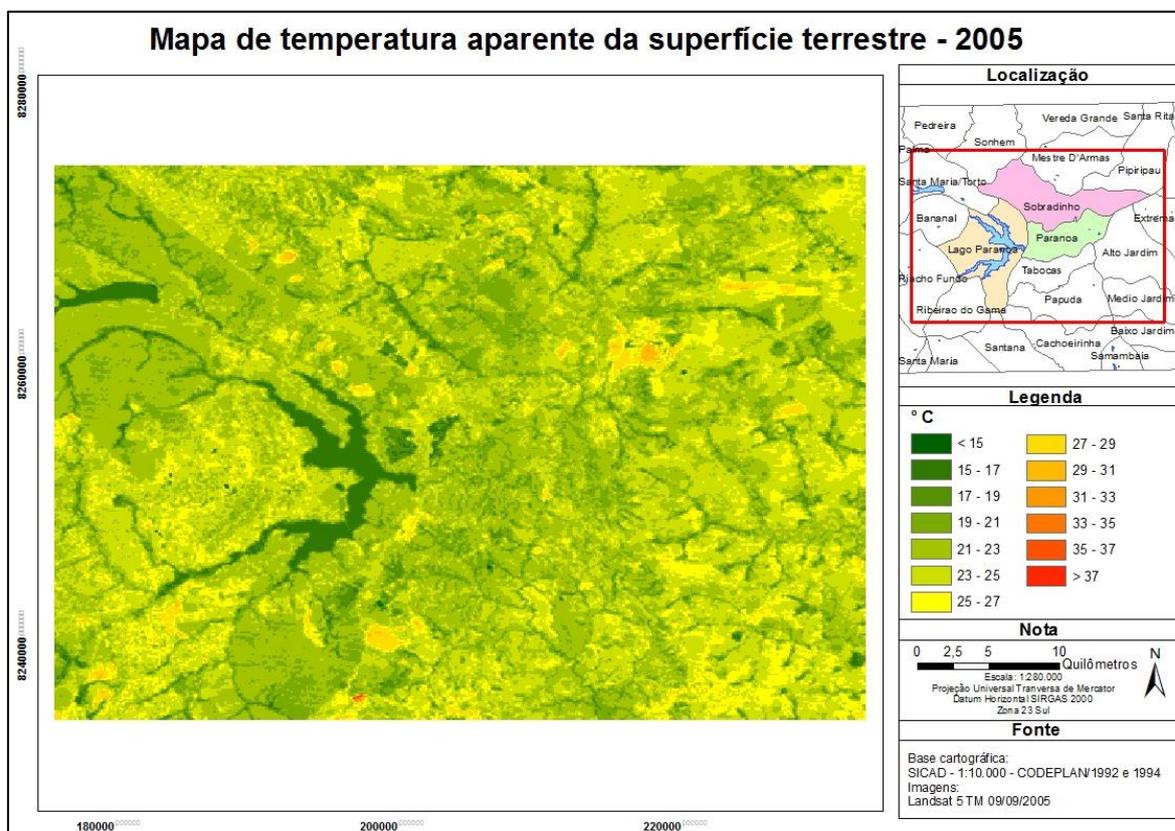


Figura 6.24 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 09 de setembro de 2005 - área de estudo A

Por meio da análise visual do mapa de temperatura da superfície terrestre da Figura 6.25, observou-se para data de obtenção da imagem Landsat, 07 de setembro de 2016, a maior parte das temperaturas estavam em torno de 29 a 33 °C, sendo a temperatura média para este dia de 31,5°C. A precipitação registrada neste mês é exatamente igual a setembro de 2005, que foi distribuída em 5 dias, não havendo registro de volume precipitado no dia 07, nem nos dias antecedentes a este no mês de setembro.

Comparando as temperaturas aparentes da superfície terrestre de 1985, 1995, 2005 e 2016, observou-se que, neste último, as temperaturas foram mais elevadas para toda a área de estudo A, corroborando os dados obtidos por Steinke *et al.* (2010), que demonstram que a metodologia de Malaret *et al.* (1985), utilizada nas imagens do Landsat 5, ou seja, nos três primeiros anos analisados, pode subestimar os resultados obtidos. A Figura 6.25 demonstra que a classe temática corpo d'água apresenta as menores temperaturas, entre 21 a 23 °C; em

seguida tem-se as classes temáticas de agricultura e mata ciliar/galeria, com temperaturas de superfície terrestre variando entre 23 a 27 °C; a classe temática área urbanizada tiveram as temperatura variando entre 27 e 31 °C; as classes temáticas campo, cerrado e solo exposto apresentaram temperaturas superiores a 27 °C.

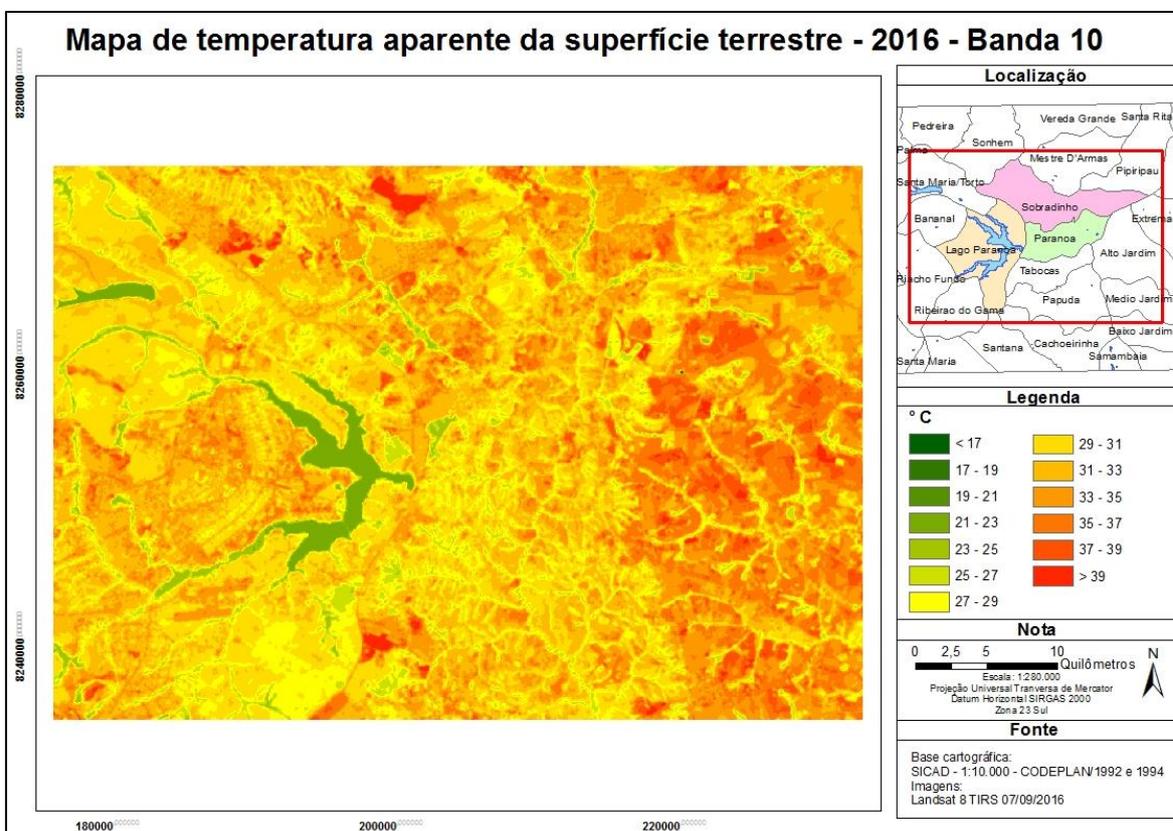


Figura 6.25 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 07 de setembro de 2016 - área de estudo A

Observou-se que no período de 11 anos houve aumento da temperatura média da superfície terrestre, passando de 22,5 °C, em 2005, para 31,5 °C, em 2016. A elevação da temperatura da superfície terrestre pode estar associada a ausência de precipitação nos dias antecedentes a obtenção da imagem de satélite, ao processo de urbanização da área, com crescimento das classes temáticas área urbanizada e solo exposto, assim como apresentado no item 6.1.1, ou ainda devido a subestimação da temperatura pela metodologia proposta por Malaret *et al.* (1985), utilizada para calcular a temperatura de superfície terrestre dos anos 1985, 1995 e 2005.

A precipitação registrada para os meses de setembro dos anos estudados esteve em torno de 55 mm, o valor se aproximou da média para o mês, de 43,81 mm, calculada a partir da série

histórica de precipitação, entre os anos de 1980 e 2016. O ano de 1995 é uma exceção ao observado neste estudo, já que a precipitação registrada foi muito abaixo da média, inferior a 1 mm, fato este que não é incomum para a região, pois já foram registrados meses de setembro que não houve precipitação (0 mm), podendo estar relacionado a fenômenos climáticos, como El Niño e La Niña.

### 6.3.2. Área de estudo B

O mês de julho foi escolhido para proceder com as análises de temperatura da superfície terrestre, por essa razão, foram utilizadas imagens do infravermelho termal do Landsat 5 de 18/07/2009 e 24/07/2011; e do Landsat 8 de 16/07/2014.

A escolha do mês e do dia das imagens utilizadas nesta etapa dependeu dos dados históricos, de 1980 a 2016, disponíveis no *website* do INMET (2017), da estação meteorológica mais próxima ao local de estudo, a Estação Brasília. Por meio da análise da precipitação da série histórica observou-se que a média mensal foi de 5,13 mm em junho, 5,35 mm em julho, 20,07 mm em agosto e 43,81 mm em setembro. Desta forma o mês de junho foi, em média, o que apresentou menor precipitação, porém para os anos de interesse, o mês de julho foi o com menores índices pluviométricos, e por isso foi o escolhido, sendo que neste mês não houve precipitação em 2009 e 2011, e em 2014 a precipitação foi de 7,9 mm. Os demais dados meteorológicos da Estação Brasília para a data que as imagens do Landsat foram adquiridas estão apresentadas na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Dados meteorológicos na data da aquisição das imagens (INMET, 2017)

<b>Data</b>	<b>Precip<sup>1</sup> diária (mm)</b>	<b>Precip mensal (mm)</b>	<b>Temp<sup>2</sup> Máxima (°C)</b>	<b>Temp Mínima (°C)</b>	<b>Temp Compensada Média (°C)</b>	<b>Insolação (horas)</b>	<b>UR<sup>3</sup> Média (%)</b>	<b>Vel<sup>4</sup> Vento Média (mps)</b>
18/07/2009	0	0	25,6	14,2	19,00	9,8	56,00	1,33
24/07/2011	0	0	23,3	13,6	17,66	9,2	52,00	5,00
16/07/2014	0	7,9	25,9	11,4	18,66	9,1	52,75	2,00

<sup>1</sup>Precipitação; <sup>2</sup>Temperatura; <sup>3</sup>Umidade Relativa; <sup>4</sup>Velocidade

Os mapas de temperatura da superfície terrestre confeccionados conforme procedimentos descritos no item 5.2.3 estão apresentados nas Figura 6.26, Figura 6.27 e Figura 6.28.

Por meio da análise visual do mapa de temperatura da superfície terrestre, da Figura 6.26, observou-se para a data da obtenção da imagem Landsat, 18 de julho de 2009, que a área de estudo B apresenta uma temperatura média de 24,2 °C, com mínima de 19,65 °C e máxima de 30,98 °C, onde observou-se predomínio de temperatura na faixa de 25 a 26 °C.

Como esperado, a classe temática corpo d'água foi a que apresentou as menores temperaturas, inferiores a 22 °C. Com relação a classe temática vegetação, onde apresentou-se mais densa, principalmente na área de reflorestamento de *Pinus* sp., a temperatura foi mais amena, entre 19 a 21 °C, e observou-se ainda que do centro para as bordas da classe de vegetação houve um aumento gradativo da temperatura até a faixa de 24 °C, sendo assim a classe temática de vegetação teve variação de temperatura de 19 a 24 °C.

Por sua vez, a classe temática de área urbanizada apresentou temperaturas entre 25 a 29 °C. A classe temática campo e solo exposto foi a que indicou temperaturas mais elevadas, acima de 27 a 31 °C, devido à baixa densidade de vegetação e a presença áreas degradadas onde o solo apresenta-se exposto sem nenhum tipo de cobertura vegetal, corroborando os resultados obtidos por Sousa e Ferreira (2012) que relataram que áreas com cobertura de solo exposto, como áreas de plantio, queimadas e bairros sem cobertura asfáltica respondem pelas maiores temperaturas registradas.

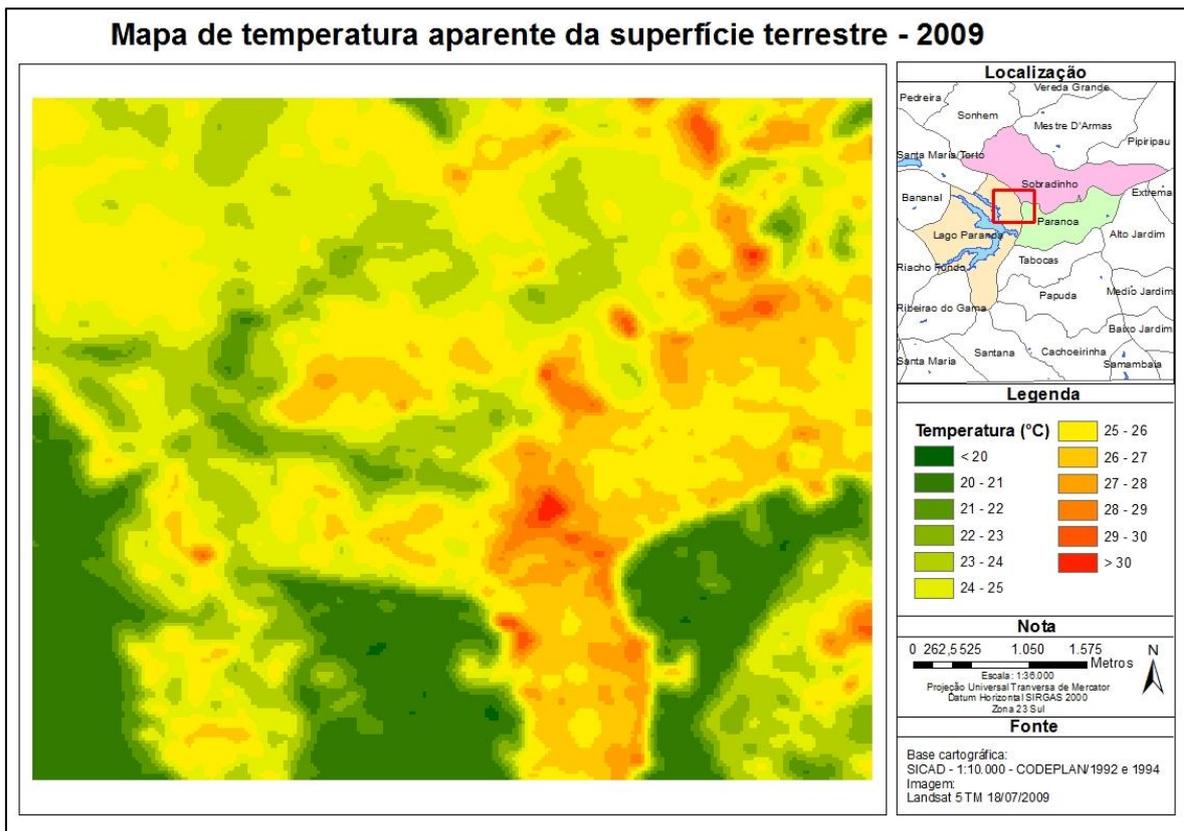


Figura 6.26 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 18 de julho de 2009  
área de estudo B

A análise visual do mapa de temperatura da superfície terrestre da Figura 6.27 observou-se para data de obtenção da imagem Landsat, 24 de julho de 2011, a temperatura média de 22,1 °C, com mínima de 13,4 °C e máxima de 30,09 °C com predomínio de temperatura menores que 20 °C. Apesar deste mapa ter apresentados as menores temperaturas entre os anos estudados mostrou-se com as mesmas tendências do anterior, sendo que as classes temáticas corpo d'água (inferior a 22 °C) e vegetação (16 a 25 °C) tiveram temperaturas mais baixas enquanto as classes temáticas área urbanizada (18 a 25 °C) e campo e solo exposto (19 a 30 °C) apresentaram as temperaturas mais elevadas.

Kauwe *et al.* (2013) afirmaram que a maior variabilidade na temperatura da superfície terrestre é resultante das variações diárias na velocidade do vento, alteração da radiação da superfície devido à presença de nuvens e poeira, além de erros aleatórios no processamento das imagens. Isso pode explicar as temperaturas mais baixas em grande parte do mapa de 24 de julho de 2011, já que neste ano foram registrados a maior velocidade média do vento e a menor temperatura média, quando comparada aos demais anos analisados, conforme apresentado na Tabela 6.11.

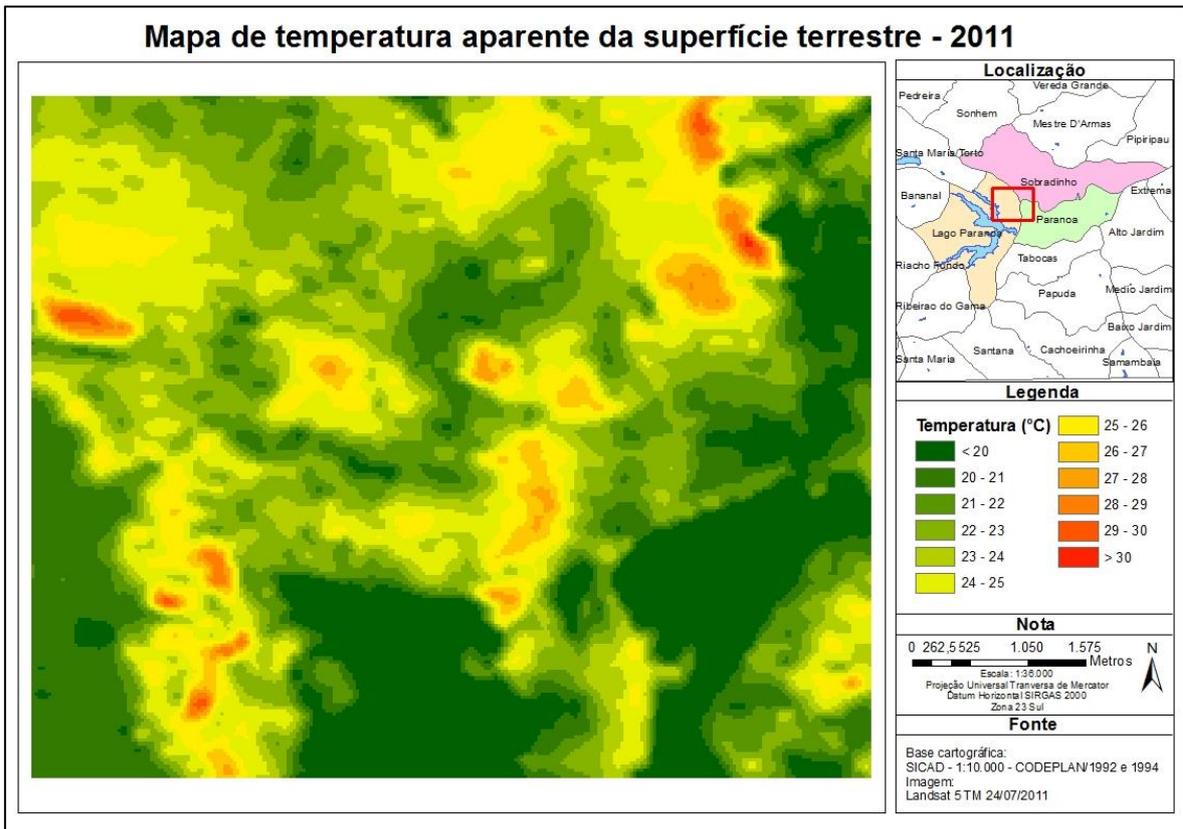


Figura 6.27 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 24 de julho de 2011  
área de estudo B

Por meio da análise visual do mapa de temperatura as superfície terrestre da Figura 6.28 observou-se que, para data de obtenção da imagem Landsat, 16 de julho de 2014, as temperaturas predominantes estavam em torno de 23 e 24 °C, sendo a média de aproximadamente 23 °C, a mínima de 18,6 °C e máxima de 31,26 °C.

Na Figura 6.28, assim como o mapa de temperatura da superfície terrestre de 18 de julho de 2009, a classe temática corpo d'água apresentou temperatura inferior a 22 °C. Na classe temática vegetação observou-se temperaturas mais baixas, porém variáveis, entre 19 °C a 23 °C, com destaque para a área de reflorestamento de *Pinus* sp. que, em grande parte, apresentou temperatura entre 19 e 20 °C. A classe temática área urbanizada teve sua temperatura variando entre 24 a 27 °C, e a classe temática campo e solo exposto teve as temperaturas mais variáveis, entre 22 a 31 °C.

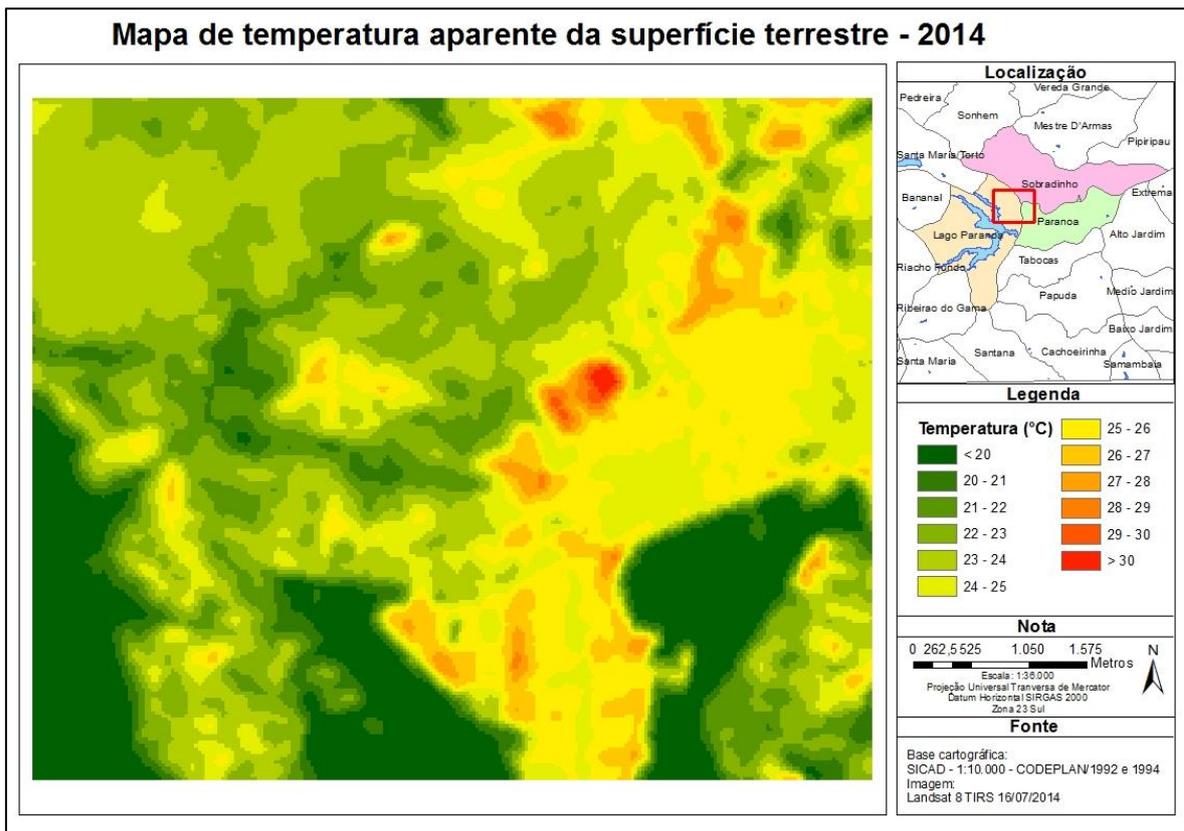


Figura 6.28 – Mapa de temperatura aparente da superfície terrestre em 16 de julho de 2014  
 área de estudo B

Quando se compara os mapas de temperatura da superfície terrestre em 18 de julho de 2009 e 16 de julho de 2014 observa-se, no geral, que o primeiro apresentou temperaturas da superfície mais elevadas, justificada pelo registro de dados meteorológicos como, temperatura mínima e média, insolação e umidade relativa, que apresentaram valores mais elevados.

Os latossolos presentes predominantemente na área de estudo B são solos com alta permeabilidade de água (Reatto *et al.*, 2004), e quando possuem uma maior granulometria aumentam sua capacidade de infiltração devido ao maior número de espaços vazios na estrutura do solo, com consequente maior drenagem das águas pluviais e menor escoamento superficial, o que pode resultar em condições favoráveis para o aquecimento da superfície quando não houver eventos de precipitação. Já em áreas com temperaturas de superfície terrestre mais amenas, pode indicar a presença de latossolo com granulometria mais fina, o que implica em infiltração e drenagem mais lenta e maior escoamento superficial, acarretando que as águas pluviais permaneçam por mais tempo no solo, retardando, assim, a elevação da temperatura de superfície do solo. Para a comprovar estas afirmativas, seria

interessante a realização de análises granulométricas da área de estudo B para pesquisar a sua relação com a variação da temperatura da superfície do solo, o que fica como indicação para trabalhos de pesquisas futuros.

O comportamento espectral na região do infravermelho termal da cobertura do solo é um fator relevante e que deve ser considerado para a análise da resposta termal e da capacidade de infiltração das águas pluviais, visto a variação durante o dia e a noite, devido, principalmente, à capacidade térmica dessa cobertura do solo em si, que determina a variação de temperatura de acordo com a quantidade de calor recebida. Os solos e rochas, por exemplo, apresentam baixa capacidade térmica com pico de emissão térmica entre as 12 horas e 16 horas, por essa razão aparecem mais quentes em imagens diurnas; a água, no entanto, por possuir alta capacidade térmica, apresenta baixa variação de temperatura durante as 24 horas do dia (Jensen, 2009). Corroborando os resultados de Jensen (2009), observou-se temperaturas de cobertura do solo mais elevadas em área temática de solo exposto e temperaturas mais amenas no trecho do Lago Paranoá, na área de estudo B.

Os fatores relacionados com as diferenças entre a natureza dos alvos da imagem, a emissividade desses alvos e os efeitos atmosféricos podem dificultar a determinação mais precisa da temperatura superfície terrestre em diversas escalas cartográficas. Segundo Steinke *et al.* (2010), um possível erro introduzido por não proceder com as correções atmosféricas e de emissividade dos alvos, pode ser considerado baixo quando a área de estudo é pequena e a imagem do infravermelho termal tiver sido obtida em um dia com tempo estável condições que se assemelham as aqui apresentadas.

#### **6.4. MODELAGEM DA DINÂMICA AMBIENTAL DO USO E COBERTURA DO SOLO**

Os procedimentos da modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo aplicados nesta etapa, na área de estudo B, foram descritos no item 5.2.4 e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

##### **6.4.1. Preparação dos mapas de entrada**

Os mapas de entrada utilizados para o desenvolvimento da modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo foram: mapa de uso e cobertura do solo dos anos de 2009, 2011 e 2014; e as variáveis estáticas: declividade, distância até as estradas e distância

até à rede de drenagem. Todos os mapas foram convertidos para formato TIFF, reamostrados para apresentar mesma resolução e mesmo número de linhas e colunas.

#### 6.4.2. Calibração do modelo

Para otimizar a modelagem e realiza-la de maneira mais satisfatória possível, nesta etapa, foram realizados 6 diferentes testes de modelagem de dinâmica ambiental, que serão descritos a seguir na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Testes de modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo

Teste	Mapa de uso e cobertura		Nº de classes temáticas	Maior similaridade obtido para janela 15x15 pixels	Resolução	Área de simulação (km <sup>2</sup> )
	Inicial	Final				
	T1	2009				
T2	2009	2011	4	0,46	1 m	47,49
T3	2009	2011	4	0,73	5 m	47,49
T4	2011	2014	5	0,50	1 m	47,49
T5	2011	2014	4	0,38	1 m	47,49
T6	2011	2014	3	0,46	1 m	5,44
T6_inf	2011	2014	3	0,61	1 m	2,72
T6_sup	2011	2014	3	0,60	1 m	2,72

A partir da análise dos testes de modelagem realizados e apresentados, resumidamente, na Tabela 6.12 observa-se que, comparando os testes T1 e T2, houve um pequeno aumento no valor de similaridade; entretanto, não o suficiente para definir a modelagem como satisfatória. Os mapas de uso e cobertura do solo utilizados no T2 passaram pelo processo de pós-classificação, onde foram corrigidos possíveis erros decorrentes do processo de classificação temática e, além disso, diminuiu-se uma das classes temáticas agregando-se duas classes temáticas, campo e solo exposto, nos mapas de uso e cobertura do solo, visto que quanto maior o número de classes temáticas mais complexa e imprecisa se torna a modelagem da dinâmica ambiental (Batty *et al.*, 1999). Os resultados do T2 demonstram que considerando a janela com tamanho de 15x15 pixels, ou seja, quando se observa uma janela com resolução de 15 metros, a similaridade entre o mapa simulado e o mapa real foi de apenas 46%.

As dificuldades de alcançar resultados satisfatórios na fase de simulação decorrem da alta resolução espacial das imagens de satélite utilizadas na confecção dos mapas de uso e cobertura de solo (1 metro), que torna a modelagem dinâmica ambiental mais demorada e menos precisa. Considerando isto, os mapas de entrada do teste T3 foram reamostrados para que o pixel passasse de 1 metro para 5 metros de resolução espacial, com isso a similaridade entre o mapa real e simulado foi de 73% para a janela com tamanho de 15x15 pixels. Porém, considerando que nessa janela a resolução é de 75 metros, esta abordagem acaba por não ser muito interessante visto que a alta similaridade foi alcançada em detrimento da qualidade da resolução espacial.

Por sua vez, entre os anos de 2009 e 2011 não houveram mudanças representativas no uso e cobertura do solo, afirmativa que não representa o observado entre os anos de 2011 e 2014. Diante disto, mesmo que a simulação utilizando os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 2009 e 2011 alcançasse um valor de similaridade acima de 50%, a revalidação da simulação, feita utilizando os mesmos parâmetros dos autômatos celulares (AC), *Patcher* e *Expander*, e probabilidade, para os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 2011 e 2014 não representaram de forma adequada as mudanças nesse período, já que estas datas foram mais significativas devido à retirada de vegetação para implantação do Plano de Expansão do Paranoá. Por essas razões, buscou-se construir o modelo da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo utilizando os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 2011 e 2014, como mapa inicial e final, respectivamente.

O teste T4, indicou que a similaridade encontrada foi de no máximo 50%, utilizando os mapas de uso e cobertura dos anos de 2011 e 2014 que não haviam passado pelo processo de pós-classificação, estando ainda com cinco classes temáticas. Com as imagens pós-classificadas realizou-se o T5, que indicou valores de similaridade muito baixa, em torno de 38%. Na busca da otimização, buscou-se focar a modelagem da dinâmica ambiental na área que mais houve mudanças durante o período de análise, ou seja, nas proximidades do Paranoá Parque. Esta análise foi proposta visto que em 2014 o empreendimento não havia sido concluído e a área ainda estava sujeita às pressões antrópicas e, portanto, às mudanças no uso e cobertura do solo, e, a partir desses dados podem ser gerados os cenários prospectivos de curto prazo.

Foi realizado, então, o teste T6, onde notou-se aumento da similaridade entre o mapa real e o mapa simulado, alcançando 46%. No teste T6 os mapas de uso e cobertura do solo foram

recortados em uma área menor, envolvendo apenas as proximidades do Paranoá Parque como apresentado na Figura 6.29, que foram utilizadas na simulação 3 classes temáticas de uso e cobertura do solo, as classes temáticas área urbanizada, campo e solo exposto e vegetação.

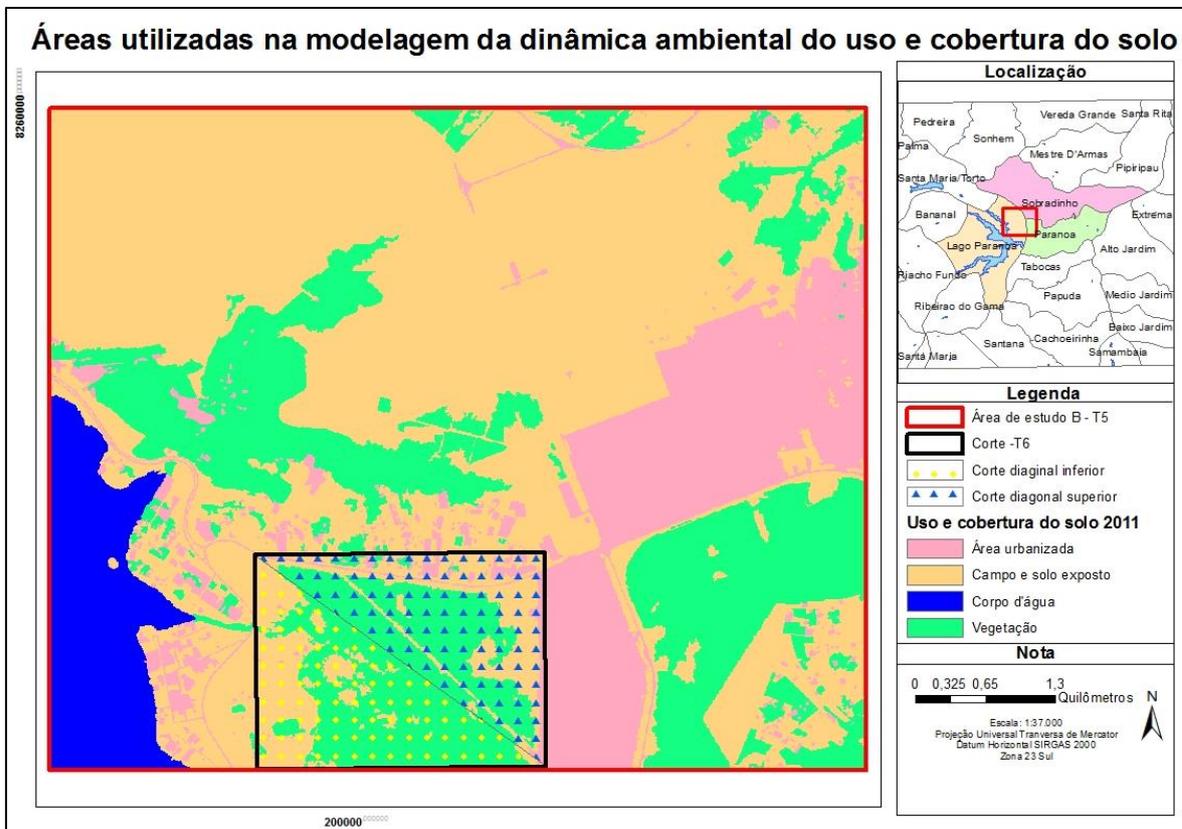


Figura 6.29 – Mapa das áreas utilizadas na modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo da área de estudo B

Com a finalidade de obter o melhor o valor de similaridade as imagens foram recortadas traçando-se uma diagonal do canto superior esquerdo ao canto inferior direito (Figura 6.29), denominadas apenas imagens inferior (inf) e superior (sup). Os testes T6\_inf e T6\_sup foram realizados aplicando os parâmetros de *AC*, *Patcher* e *Expander*, e probabilidade do T6, que teve melhor valor de similaridade, resultando em similaridade de 0,61 e 0,60, respectivamente.

Nas etapas seguintes está representada a modelagem dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo da área de estudo B para os testes T5 e T6 e os testes com corte diagonal (T6\_inf e T6\_sup). Os procedimentos para calibração do modelo foram divididos em duas etapas, o cálculo das matrizes de transição e a obtenção dos pesos de evidência, que são apresentados a seguir.

a) Cálculo das matrizes de transição

As matrizes de transição de passo único e de passos múltiplos, dos testes T5, T6, T6\_inf e T6\_sup, estão apresentadas e descritas a seguir. A Tabela 6.13 representa a matriz de transição de passo único para o T5, considerando o período (passo) de tempo de três anos. A maior taxa de transição foi observada da classe temática de vegetação para classe temática de campo e solo exposto, de 7,15%, seguida de 1,76% que corresponde a taxa de transição estimada da classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada e, por fim, a mudança da classe temática campo e solo exposto para classe temática de área urbanizada, definida com 1,07% de porcentagem de transição. Para as demais classes temáticas, a taxa de transição foi de zero, ou próxima a zero, o que significa de não houve mudanças significativas no período para essas classes temáticas.

Tabela 6.13 – Matriz de transição de passo único – T5

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Corpo d'água</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0052	0,0001	0,0007
Campo e solo exposto	0,0107	-	0,0001	0,0011
Corpo d'água	0,0000	0,0002	-	0,0000
Vegetação	0,0176	0,0715	0,0000	-

A Tabela 6.14 representa a matriz de transição de passos múltiplos para o teste T5, com a taxa de transição para o passo de tempo de um ano, da classe temática de vegetação para a classe temática de campo e solo exposto foi de 2,74%; da classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada foi de 0,60%; e da classe temática de campo e solo exposto para classe temática de área urbanizada foi de 0,36%. As transições entre as demais classes temáticas foram suficientemente pequenas para serem consideradas.

Tabela 6.14 – Matriz de transição de passos múltiplos – T5

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Corpo d'água</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0017	0,0000	0,0002
Campo e solo exposto	0,0036	-	0,0000	0,0004
Corpo d'água	0,0000	0,0000	-	0,0000
Vegetação	0,0060	0,0247	0,0000	-

A Tabela 6.15 representa a matriz de transição de passo único para o teste T6, as três transições mais significativas na área foram, a transição da classe temática de vegetação para classe temática de campo e solo exposto com taxa de 22,55%; da classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de área urbanizada, a transição foi de 6,57%; e da classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada, a transição foi de 5,59%.

Tabela 6.15 – Matriz de transição de passo único – T6

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0095	0,0003
Campo e solo exposto	0,0657	-	0,0010
Vegetação	0,0559	0,2255	-

A Tabela 6.16 representa a matriz de transição de passos múltiplos para o teste T6, a taxa de 8,56% representa a transição da classe temática de vegetação para a classe temática de campo e solo exposto; a transição da classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de área urbanizada ocorreu com taxa de 2,25%; e da classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada foi de 1,87%. Observa-se aumento nos valores de taxa de transição quando comparados aos dados resultantes do T6, devido à diminuição da área utilizada na modelagem da dinâmica, onde encontram-se significativas mudanças no uso e cobertura do solo.

Tabela 6.16 – Matriz de transição de passos múltiplos – T6

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0032	0,0001
Campo e solo exposto	0,0225	-	0,0004
Vegetação	0,0187	0,0856	-

A Tabela 6.17 representa a matriz de transição de passo único para o teste T6\_inf (imagem da diagonal inferior), em que a taxa de transição foi de: 2,30% entre a classe temática de área urbanizada e a classe temática de campo e solo exposto; 1,45% entre a classe temática de vegetação e a classe temática de campo e solo exposto; 0,8% entre a classe temática de área urbanizada e a classe temática de vegetação; 0,49% entre a classe temática de campo e solo exposto e a classe temática de área urbanizada; 0,14% da classe temática campo e solo exposto para a classe temática de vegetação; e não houve transição entre a classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada.

Tabela 6.17 – Matriz de transição de passo único – T6\_inf

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0230	0,0008
Campo e solo exposto	0,0049	-	0,0014
Vegetação	0,0000	0,0145	-

A Tabela 6.18 representa a matriz de transição de passos múltiplos para o teste T6\_inf, em que a taxa de transição foi de 0,77% entre a classe temática de área urbanizada e a classe temática de campo e solo exposto; 0,49% entre a classe temática de vegetação para a classe temática de campo e solo exposto; 0,03% entre a classe temática de área urbanizada para a classe temática de vegetação; 0,17% entre a classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de área urbanizada; 0,05% entre a classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de vegetação; e não houve transição entre a classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada.

Tabela 6.18 – Matriz de transição de passos múltiplos – T6\_inf

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0077	0,0003
Campo e solo exposto	0,0017	-	0,0005
Vegetação	0,0000	0,0049	-

A Tabela 6.19 representa a matriz de transição de passo único para o teste T6\_sup (imagem da diagonal superior), a maior taxa foi representada pela transição entre a classe temática de vegetação para a classe temática de campo e solo exposto, que foi de 47,81%. Entre a classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de área urbanizada a taxa foi de 12,50%; entre a classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada, a taxa de transição foi de 12,27%; entre a classe temática de área urbanizada para a classe temática de campo e solo exposto, a transição foi de 0,86%; enquanto entre a classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de vegetação foi de 0,05%; e a taxa de transição entre a classe temática de área urbanizada para a classe temática de vegetação foi de 0,02%.

Tabela 6.19 – Matriz de transição de passo único – T6\_sup

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0086	0,0002
Campo e solo exposto	0,1250	-	0,0005
Vegetação	0,1227	0,4781	-

A Tabela 6.20 representa a matriz de transição de passos múltiplos para o teste T6\_sup, as taxas de transição foram de: 22,12% entre a classe temática de vegetação para a classe temática de campo e solo exposto; 4,37% entre a classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de área urbanizada; 4,26% entre a classe temática de vegetação para a classe temática de área urbanizada; 0,30% entre a classe temática de área urbanizada para a classe temática de campo e solo exposto; 0,02% entre a classe temática de campo e solo exposto para a classe temática de vegetação; e 0,01% entre a classe temática de área urbanizada para a classe temática de vegetação.

Tabela 6.20 – Matriz de transição de passos múltiplos – T6\_sup

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0030	0,0001
Campo e solo exposto	0,0437	-	0,0002
Vegetação	0,0426	0,2212	-

#### b) Obtenção dos pesos de evidência

O método dos pesos de evidência foi utilizado para calcular as probabilidades de transição de cada célula na fase de calibração do modelo da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, e por meio dos mapas de variáveis estáticas e dinâmicas foi gerado o esqueleto para o cálculo dos pesos de evidência. Nesta etapa definiram-se os intervalos ou faixas de distância das variáveis estáticas para cada transição encontrada, incluindo as distâncias até as classes de uso identificadas. O esqueleto estabelece as melhores faixas de distância para o cálculo dos pesos de evidência a partir da função *Determine Weights of Evidence Ranges*, do sistema Dinamica EGO. O arquivo com o esqueleto dos pesos foi utilizado juntamente com o cubo *raster* e os mapas inicial e final para o cálculo dos coeficientes dos pesos de evidência. Nesse modelo, o operador *Calc Distance Map* também foi usado para inclusão dos mapas de distância até as classes. O cálculo dos coeficientes dos pesos de evidência foi realizado por meio da função *Determine Weights of Evidence Coefficients*.

Para utilização do método de pesos de evidência, as variáveis devem ser espacialmente independentes entre si. A correlação entre os pares de variáveis foi verificada pelo cálculo do Índice de Cramer (V), que como entrada utilizou mapa de uso e cobertura do solo inicial (ano 2011), os mapas do cubo *raster* e os coeficientes dos pesos de evidência. As planilhas resultantes contendo a descrição dos pares de variáveis e o resultado correspondente ao teste estão apresentadas no Apêndice A.

Como não há consenso na literatura sobre o valor que deve ser considerado para corte da variável, e considerando que maior correlação é representada quanto maior for o valor, definiu-se, então, que valores superiores a 0,5 resultaria na exclusão da variável da análise. Observou-se então, que nenhum dos pares de variáveis apresentou grau de correlação superior a 0,4, o que indica independência entre os mapas.

#### **6.4.3. Construção do modelo de simulação e validação**

Com os procedimentos descritos no item 5.2.4.3 o modelo de simulação foi construído e procedeu-se com sua a validação, os resultados obtidos estão descritos no item a seguir.

##### a) Modelo de simulação

A etapa seguinte ao processo de calibração, é a construção do modelo de simulação para gerar um cenário simulado, utilizando como dados de entrada: o mapa inicial de uso e cobertura do solo referente ao ano de 2011; os mapas de variáveis, no formato de um mapa cubo *raster*; o arquivo contendo os coeficientes dos pesos de evidência; e a matriz de transição de múltiplos passos.

Foram adotados os valores de área em hectare dos parâmetros *Mean Patch Size* (tamanho médio), *Patch Size Variance* (variância) e *Patch Isometry* (isometria) para os *AC Patcher* e *Expander*, que são responsáveis pelo surgimento de novas manchas e pela expansão e contração de manchas de células de cada classe, respectivamente. A escolha desses parâmetros foi realizada após múltiplas tentativas de variação dos mesmos, de forma a produzir diferentes padrões espaciais de mapa simulado, que foram comparados ao mapa real de uso e cobertura, primeiramente por análise visual e, em seguida, por valores de similaridade, até alcançar valores aceitáveis de similaridade.

No teste T5 foram percebidas dificuldade de simulação, principalmente devido à heterogeneidade espacial da transição das classes temáticas, conforme apresentado no item anterior, onde determinadas classes temáticas demonstraram elevadas taxas de transição, enquanto para outras classes temáticas, praticamente não houve mudanças. Por essa razão, para o T5, os parâmetros dos AC *Patcher* e *Expander* foram definidos considerando, individualmente, a taxa de transição de uma classe para outra, e estão apresentados na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 – Parâmetros de *Patcher* e *Expander* escolhidos para o teste T5

<i>Mean Patch Size</i>				
Classe temática	Área urbanizada	Campo e solo exposto	Corpo d'água	Vegetação
Área urbanizada	-	0,010	0,010	0,010
Campo e solo exposto	0,001	-	0,010	0,010
Corpo d'água	0,010	0,010	-	0,010
Vegetação	0,001	0,001	0,010	-
<i>Patch Size Variance</i>				
Classe temática	Área urbanizada	Campo e solo exposto	Corpo d'água	Vegetação
Área urbanizada	-	0,020	0,020	0,020
Campo e solo exposto	0,002	-	0,020	0,020
Corpo d'água	0,020	0,020	-	0,020
Vegetação	0,002	0,002	0,020	-
<i>Patch Isometry</i>				
Classe temática	Área urbanizada	Campo e solo exposto	Corpo d'água	Vegetação
Área urbanizada	-	1,5	1,5	1,5
Campo e solo exposto	1,5	-	1,5	1,5
Corpo d'água	1,5	1,5	-	1,5
Vegetação	1,5	1,5	1,5	-
Probabilidade de transição = 0,95				

Os valores escolhidos tanto para os AC *Expander* como para o *Patcher*, dos testes T6, T6\_inf e T6\_sup foram de: 0,01 para *Mean Patch Size*, 0,02 para *Patch Size Variance*, 1,5 para *Patch Isometry* e 0,8 para a probabilidade de transição. Esses parâmetros apresentados serão utilizados na obtenção dos cenários prospectivos, descritos a diante. Os mapas de uso e

cobertura do solo do ano de 2014 simulados utilizando os parâmetros escolhidos por meio do Dinamica EGO estão apresentados na Figura 6.30.

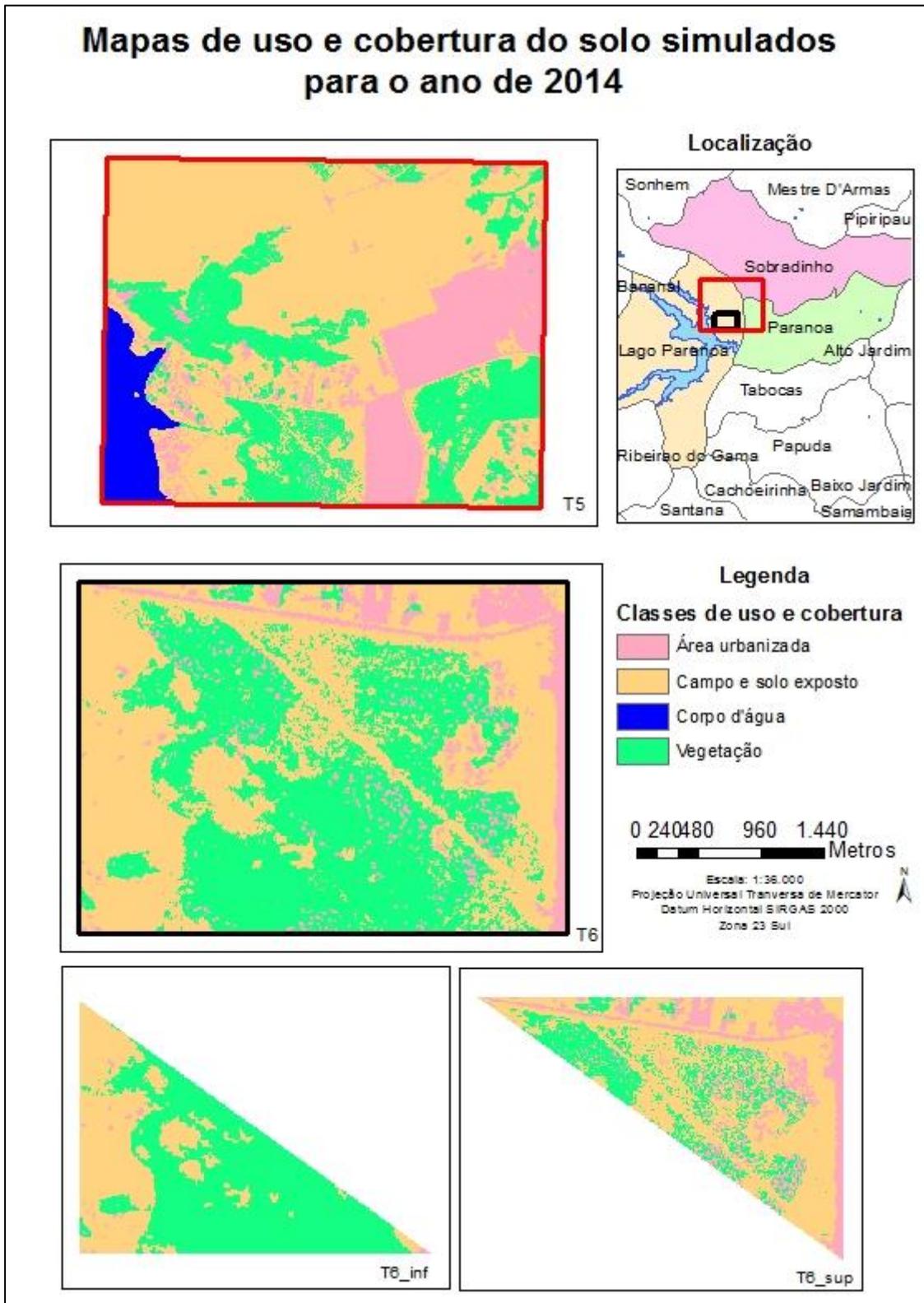


Figura 6.30 – Mapas de uso e cobertura do solo simulados para o ano de 2014

b) Validação do modelo de simulação

Os mapas de uso e cobertura do solo do ano de 2014 simulados apresentados no item anterior foram comparados com o mapa de uso e cobertura do solo do ano de 2014 obtido com os algoritmos de classificação temática de imagens. Nesta etapa aplicou-se o método de diferença e similaridade baseada na lógica *Fuzzy*, para calcular os erros e acertos do modelo da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo. Nesta fase, os mapas de entrada foram os de uso e cobertura do solo inicial (ano de 2011), final real (ano de 2014) e o simulado (ano de 2014).

Na Tabela 6.22 observa-se os valores de similaridade mínima obtidos por meio das funções de decaimento constante com diferentes tamanhos de janela de pixels, para o modelo entre os anos de 2011 e 2014 dos testes de simulação T5, T6, T6\_inf e T6\_sup.

Tabela 6.22 – Índices de similaridade mínima para o modelo 2011 – 2014

Windows Sizes (janela de pixels)	Resolução Espacial (m)	Índices de similaridade mínima			
		T5	T6	T6_inf	T6_sup
1x1	1	0,20	0,35	0,34	0,51
3x3	3	0,24	0,36	0,37	0,52
5x5	5	0,28	0,37	0,41	0,53
7x7	7	0,31	0,39	0,45	0,54
9x9	9	0,33	0,41	0,49	0,56
11x11	11	0,35	0,43	0,53	0,57
13x13	13	0,37	0,44	0,57	0,58
15x15	15	0,38	0,46	0,61	0,60

Na análise dos mapas de uso e cobertura do solo notou-se que a transição de uma classe temática não se dá de forma homogênea na área de estudo B, indicando mudanças consideráveis em alguns locais específicos, principalmente, devido a característica de morfologia dispersa da área urbanizada, resultando na heterogeneidade espacial das mudanças nas classes temáticas. Isto pode ter incrementado as dificuldades encontradas na fase de simulação dos dados do teste T5, que resultou em similaridade abaixo de 50%, mesmo quando foi considerada a janela de pixels de 15 metros.

Observou-se ainda que a medida que o tamanho da área utilizada na modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo diminuiu, houve um aumento gradativo no valor de similaridade. O teste T5 realizado na área de estudo B e, portanto, com área de 47,49 km<sup>2</sup>, apresentou similaridade máxima de 38%; enquanto a similaridade do teste T6 foi de 46%, sendo este realizado em área total de 5,44 km<sup>2</sup>, proveniente de um corte na área de estudo B; já para os testes T6\_inf e T6\_sup, a maior similaridade encontrada foi de 61% e 60%, respectivamente, sendo de 2,72 km<sup>2</sup> a área dos dados de entrada para cada uma das duas simulações.

No processo de modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, áreas com taxa de transição muito variável podem resultar na subestimação ou superestimação de formação ou expansão de manchas de classes temáticas, em determinados locais. Nos locais onde ocorreram poucas mudanças, as mesmas podem sofrer superestimação de formação ou expansão de manchas devido à influência de locais onde ocorrem muitas mudanças nas classes temáticas, assim como pode ocorrer subestimação em locais com muitas alterações na paisagem por influência daqueles onde ocorreram poucas mudanças. A divisão diagonal da área buscou confirmar essas afirmações, pois foi observado que a evolução de uso e cobertura do solo comportou-se de maneira distinta no mapa utilizado no T6, com basicamente dois padrões, o de poucas mudanças (diagonal inferior da imagem, T6\_inf), o de muitas mudanças (diagonal superior da imagem, T6\_sup), o que resultou no aumento da similaridade.

De forma geral, não foram observadas formações de classes temáticas de uso e cobertura do solo (manchas) em tamanho e quantidade suficiente para representar bem as mudanças que ocorreram. Quando testou-se aumentar os valores de tamanho médio, variância e isometria, houve redução de similaridade. Os testes T6\_inf e T6\_sup obtiveram os melhores valores de similaridade, o primeiro atingiu similaridade de 50% quando considerada a resolução de 11 metros, já o segundo com a resolução de 1 metro a similaridade foi de 51%. Ambos possuem mapas iniciais de uso e cobertura do solo com poucas áreas urbanizadas. Corroborando os resultados de Trentin e Freitas (2010) que destacam o desempenho apropriado do Dinamica EGO, sobretudo em aplicações relacionadas ao desmatamento; todavia, nas áreas que concentram maior detalhamento, como em áreas urbanas, a criação de manchas de classes temáticas de uso e cobertura do solo pela simulação não representa bem a realidade.

No T6\_sup o desmatamento de uma grande área de vegetação para o estabelecimento do Paranoá Parque, ocorrida em um período curto de tempo (2 anos), pode ser um fator que dificulta a modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, e demandaria a inclusão de variáveis específicas que pudessem explicar espacialmente esse comportamento.

O intuito da modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo não é a reprodução fiel da realidade e, sim, a verificação de padrões e determinação das principais tendências de modificação espacial das características de uso e cobertura do solo (Trentin e Freitas, 2010) que, entre outras coisas, busca auxiliar o planejamento urbano a fim de melhorar a qualidade de vida da população e reduzir os impactos decorrentes do processo de urbanização.

Outro fator relevante é a alta resolução das imagens de satélites utilizadas na produção dos mapas temáticos de uso e cobertura do solo que foi um fator positivo na etapa de classificação temática, porém pode ter dificultado o processo de modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, tendo em vista a dificuldade de se alcançar valores de similaridade acima de 50% entre o mapa real de uso e cobertura do solo e o seu correspondente simulado no sistema Dinamica EGO. O que implica também em um aumento significativo no tempo requerido nas etapas de simulação computacional, sendo que quanto maior a imagem e o número de classes temáticas maior também será esse tempo de processamento.

#### **6.4.4. Obtenção do cenário prospectivo de tendência histórica**

No modelamento da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo foram elaborados cenários prospectivos de tendência histórica, considerando taxas fixas de transição para o período da modelagem e projetando-as para o futuro. Os prognósticos de mudanças no uso e cobertura do solo partem dos modelos calibrados no sistema Dinamica EGO para a simulação do cenário do ano de 2014, pelos testes T5, T6, T6\_inf e T6\_sup. Foram utilizados os parâmetros de cada teste, definidos no item 6.4.3 juntamente com o mapa real de uso e cobertura do solo para o ano de 2014, para gerar cenários para o ano de 2019. Na Figura 6.31 apresenta-se o cenário prospectivo simulado para o uso e cobertura do solo para 2019 a partir do modelo calibrado pelo teste T5.

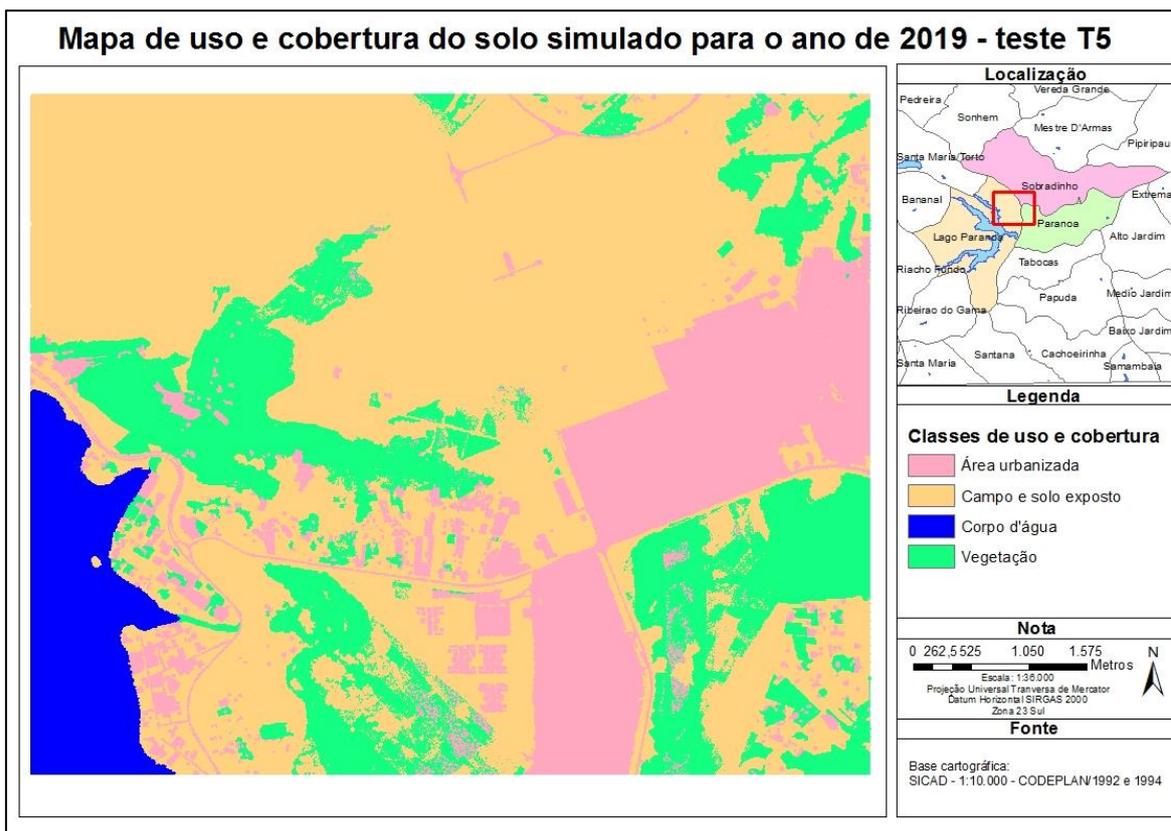


Figura 6.31 – Mapa de uso e cobertura do solo simulado para o ano de 2019 - teste T5

Na Tabela 6.23 observa-se que apenas a classe temática vegetação diminuiu sua área, em aproximadamente 14%, enquanto nas demais classes temáticas houve aumento de área em taxas percentuais de 8,63% e 3,16% para as classes temáticas de área urbanizada e de campo e solo exposto, respectivamente.

Tabela 6.23 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T5

Classes temáticas	Área em 2014		Área em 2019		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Área urbanizada	7,99	16,83	8,68	18,29	8,63
Campo e solo exposto	25,74	54,21	26,56	55,92	3,16
Corpo d'água	2,90	6,11	2,91	6,13	0,23
Vegetação	10,85	22,84	9,34	19,67	-13,90
Total	47,49	100,00	47,49	100,00	-

A Figura 6.32 apresenta o cenário prospectivo simulado para o uso e cobertura do solo para 2019 a partir do modelo calibrado pelos testes T6, T6\_inf e T6\_sup. Nas Tabela 6.24, Tabela 6.25 e Tabela 6.26 estão apresentados os valores de área para cada uma das classes temáticas

de uso e cobertura do solo, evidenciando assim como as modificações ocorridas entre o mapa real de uso e cobertura do solo do ano de 2014 e para o mapa simulado para o ano de 2019.

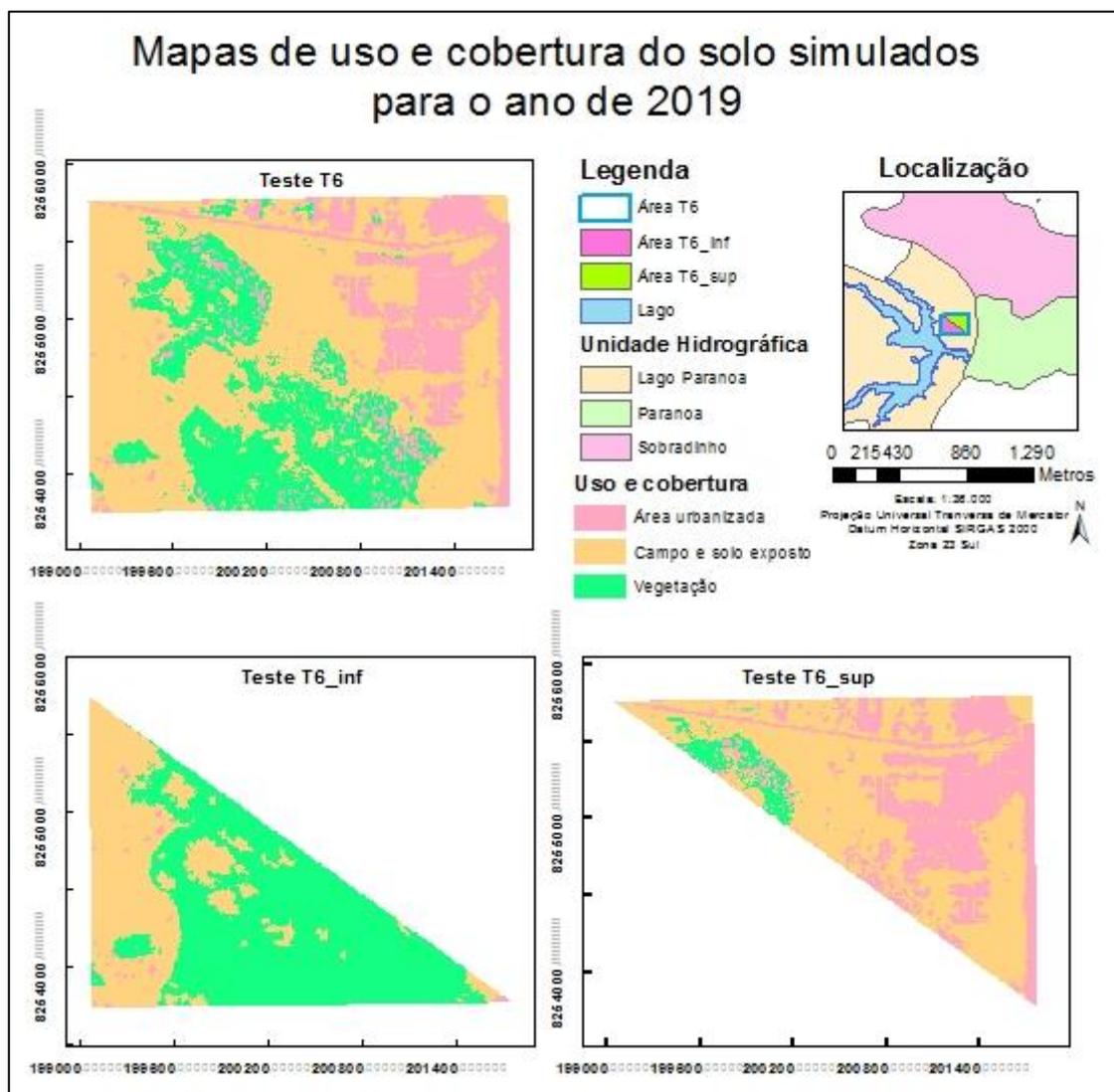


Figura 6.32 – Mapas de uso e cobertura do solo simulados para o ano de 2019 com os testes T6, T6\_inf e T6\_sup

A simulação de cenários prospectivos de uso e cobertura do solo pelos parâmetros do teste T6, indicou, na Tabela 6.24, que entre o ano de 2014 e para o simulado do ano de 2019 pode ocorrer aumento de cerca de 79,73% da classe temática de área urbanizada, que passaria de 0,60 para 1,07 km<sup>2</sup>; assim como 18,68% de incremento nas áreas das classes temáticas de campo e solo exposto, estas alterações ocorreriam em detrimento da diminuição de 42,18% da área da classe temática de vegetação.

Tabela 6.24 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T6

Classes temáticas	Área em 2014		Área em 2019		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Área urbanizada	0,60	10,99	1,07	19,75	79,73
Campo e solo exposto	2,57	47,29	3,05	56,13	18,68
Vegetação	2,27	41,72	1,31	24,12	-42,18
Total	5,44	100,00	5,44	100,00	-

A Tabela 6.25 demonstra que o T6\_inf foi o modelo que apresentou como um todo as menores variações, sendo o aumento de 33,74% da classe temática área urbanizada, a alteração mais significativa, porém com a área utilizada para simulação é pequena o aumento foi de apenas 0,01 km<sup>2</sup> do mapa de uso e cobertura do solo do ano de 2014 para o de 2019. A classe temática campo e solo exposto aumento de área foi de 3,13%, já a classe temática da vegetação reduziu em 2,29%.

Tabela 6.25 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T6\_inf

Classes temáticas	Área em 2014		Área em 2019		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Área urbanizada	0,02	0,81	0,03	1,08	33,74
Campo e solo exposto	1,00	36,85	1,03	38,00	3,13
Vegetação	1,69	62,34	1,66	60,92	-2,29
Total	2,72	100,00	2,72	100,00	-

A Tabela 6.26 demonstra que houve aumento da classe temática área urbanizada, passando de 0,58 para 0,99 km<sup>2</sup>, assim como na da classe temática campo e solo exposto, que passou de 1,57 km<sup>2</sup> em 2014 para 1,60 km<sup>2</sup> em 2019. Ao contrário da classe temática vegetação, que diminuiu de 0,57 para 0,13 km<sup>2</sup>, o que representa variação de 78,18%.

Tabela 6.26 – Área das classes temáticas de uso e cobertura do solo para T6\_sup

Classes temáticas	Área em 2014		Área em 2019		Variação (%)
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	
Área urbanizada	0,58	21,15	0,99	36,53	72,69
Campo e solo exposto	1,57	57,72	1,60	58,86	1,97
Vegetação	0,57	21,12	0,13	4,61	-78,19
Total	2,72	100,00	2,72	100,00	-

Entre os anos de 2011 e 2014 ocorreu a construção do empreendimento Paranoá Parque, sendo, portanto, incorporado ao processo de modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, podendo resultar no incremento nas taxas de transição das classes temáticas de vegetação e área urbanizada. Os resultados apresentados demonstraram que, independente dos parâmetros e do tamanho da área que utilizados para a geração dos cenários prospectivos, houve aumento da área urbana, o que na maioria das vezes aconteceu em decorrência da supressão da cobertura vegetal local.

O processo de ocupação antrópica de uma área pode resultar em impactos ambientais e sociais, tais como: diminuição das taxas de infiltração de água pluvial no solo; aumento do escoamento superficial; aumento da frequência de enchentes e inundações, causando perdas materiais e pessoais; carreamento de sedimentos para o leito dos corpos hídricos que causam seu assoreamento, redução da disponibilidade de água para consumo humano; elevação das temperaturas da superfície terrestre, com formação de ilhas de calor; entre outros, que no seu conjunto causam a diminuição de qualidade de vida da população.

A simulação realizada por meio do sistema Dinamica EGO foi considerada satisfatória, já que os resultados obtidos apontam para a importância do desenvolvimento e aplicação de políticas públicas de uso e ocupação do solo mais rígidas na região, considerando ainda, a legislação ambiental pertinente e a capacidade do meio ambiente de absorver as demandas por infraestrutura. Diante disto, ressalta-se a importância de estudar o comportamento e evolução da paisagem, por meio de levantamentos de uso e cobertura do solo, visando gerar resultados que possam auxiliar as lideranças responsáveis por tomar decisões voltadas para o planejamento da ocupação do território de forma a minimizar os possíveis impactos gerado.

## **6.5. BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO TAQUARI**

Visando particularizar as análises propostas por este estudo, realizou-se a delimitação da bacia hidrográfica do Córrego Taquari, definição de seus parâmetros, a modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, a descrição do uso e cobertura do solo para os anos de 2011, 2014 e o cenário simulado para 2019. Por fim, analisou-se o escoamento superficial direto para os anos de 2011, 2014 e o cenário simulado para 2019.

### 6.5.1. Delimitação e parâmetros da bacia hidrográfica

A Figura 6.33 representa a bacia hidrográfica do Córrego Taquari e a Tabela 6.27 indica seus parâmetros morfológicos, ambos foram definidos conforme os procedimentos apresentados por Almeida *et al.* (2013), com o auxílio do *software* ArcGIS.

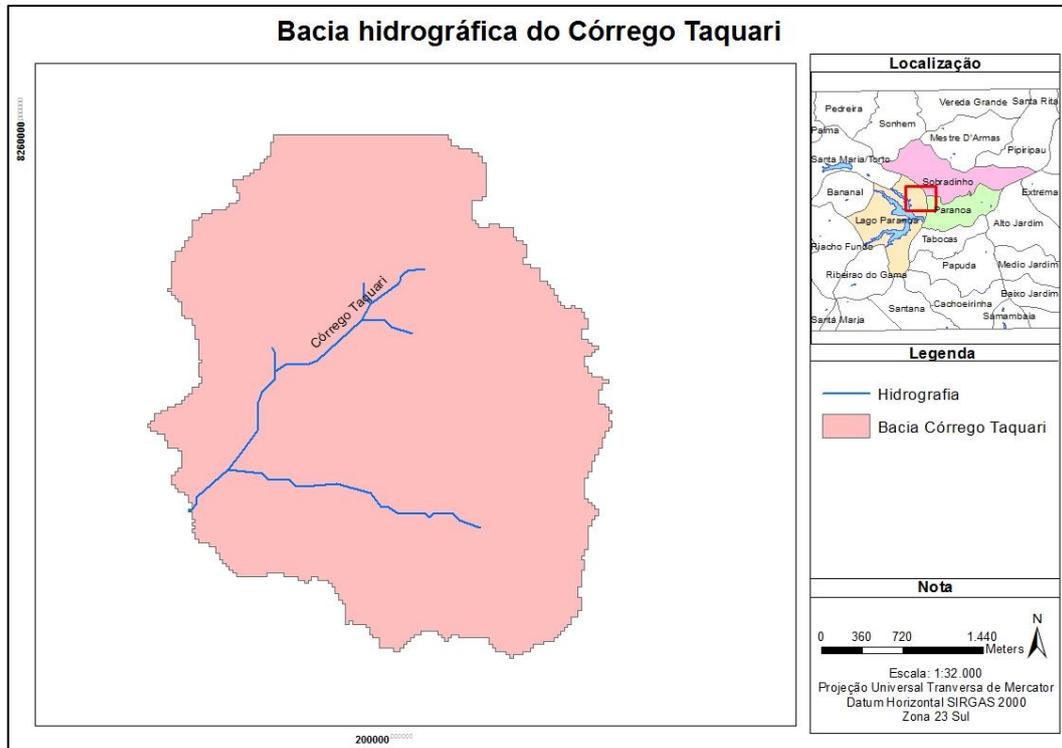


Figura 6.33 – Bacia do Córrego Taquari

Tabela 6.27 – Parâmetros morfológicos da bacia

Parâmetro	Valor
Área da bacia (km <sup>2</sup> )	14,08
Comprimento do talvegue (m)	3283,69
Cota máxima do talvegue (m)	1120,00
Cota mínima do talvegue (m)	1004,00

Por meio da Equação (5.13) calculou-se a declividade do talvegue:

$$S = \frac{\Delta H}{L} = \frac{1120 - 1004}{3283,69} = 0,035 \text{ m/m}$$

### 6.5.2. Modelagem dinâmica ambiental na bacia hidrográfica do Córrego Taquari

A preparação dos dados de entrada para serem utilizados na simulação da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, consistiu em fazer um recorte, com o *shapefile* da bacia hidrográfica, nos mapas de uso e cobertura do solo dos anos 2011 e 2014 e nos mapas das variáveis estáticas que compõem o cubo *raster* (declividade, distância até as estradas e distância até a drenagem). Esses mapas em formato TIFF, com resolução espacial de 1 m, foram reamostrados para que apresentassem o mesmo número de linhas e colunas, 4620 e 4180, respectivamente.

A tabulação cruzada dos mapas de uso e cobertura do solo inicial (ano 2011) e final (ano 2014) resultou na matriz de passo único, apresentada na Tabela 6.28, e na matriz de passos múltiplos, apresentada na Tabela 6.29.

A Tabela 6.28 indica que a maior taxa de transição foi observada da classe temática vegetação para a classe temática campo e solo exposto, estimada em 2,82%; seguida de 1,85% correspondente a taxa de transição entre a classe temática área urbanizada e a classe temática campo e solo exposto; a transformação da classe temática campo e solo exposto para a classe temática área urbanizada foi representada pela taxa de transição de 0,95%; e a taxa de transição da classe temática vegetação para a classe temática área urbanizada foi de 0,93%. Com isto, observa-se que a alteração mais significativa ocorreu com o desmatamento da vegetação, transformando-a na classe temática campo e solo exposto.

Tabela 6.28 – Matriz de transição de passo único

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0185	0,0032
Campo e solo exposto	0,0095	-	0,0009
Vegetação	0,0093	0,0282	-

Seguindo as mesmas tendências, a Tabela 6.29 indica que considerando o período de um ano, a taxa de transição entre a classe temática vegetação para a classe temática campo e solo exposto foi de 0,95%; a da classe temática área urbanizada para a classe temática campo e solo exposto a taxa de transição foi de 0,62%; a da classe temática campo e solo exposto para a classe temática área urbanizada a taxa de transição foi de 0,32%; e da classe temática

vegetação para a área urbanizada a taxa de transição foi de 0,31%. As transições entre as demais classes temáticas foram suficientemente pequenas para serem consideradas.

Tabela 6.29 – Matriz de transição de passos múltiplos

<b>Classes temáticas</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Campo e solo exposto</b>	<b>Vegetação</b>
Área urbanizada	-	0,0062	0,0011
Campo e solo exposto	0,0032	-	0,0003
Vegetação	0,0031	0,0095	-

Para o cálculo dos coeficientes dos pesos de evidência, realizado por meio da função *Determine Weights of Evidence Coefficients*, foram utilizados o arquivo com o esqueleto dos pesos, o cubo *raster* e os mapas inicial e final. Os valores dos coeficientes em diferentes faixas para cada variável, indicam seu efeito na ocorrência de determinada transição, desta forma, os valores positivos favorecem a transição, enquanto os valores negativos não favorecem a transição, já os valores próximos de zero não exercem efeito sobre a transição. As faixas onde os valores são positivos estão descritas a seguir:

- **Área urbanizada para campo e solo exposto:** esta transição é favorecida pelas declividades entre 2 e 3%, 4 e 5%, 6 a 9%, 29 e 30%, 33 e 34%; faixas de distância de 400 a 1.000 m da rede de drenagem; e, as faixas de distância das estradas entre 300 a 500 m e 700 a 900 m.
- **Área urbanizada para vegetação:** transição favorecida pelas declividades entre 11 a 24%, 25 a 31%, 32 a 33%, 42 a 43%, 48 a 49%; faixas de distância da rede de drenagem de 400 a 800 m; e, as faixas de distância das estradas entre 400 a 500 m, 800 a 900 m.
- **Campo e solo exposto para área urbanizada:** transição favorecida pelas declividades entre 2 a 4% e 5 a 6%; faixas de distância da rede de drenagem de 400 a 1.000 m; e, as faixas de distância das estradas entre 200 a 400 m, 700 a 800 m, 1.100 e 1.200 m.
- **Campo e solo exposto para vegetação:** esta transição é favorecida por declividades entre 7 a 42%, 45 a 46%, 50 a 51%; por faixas de distância da rede de drenagem de 400 a 600 m; e, por faixas de distância das estradas entre 400 a 1.300 m.

- **Vegetação para área urbanizada:** esta transição é favorecida por declividades entre 3 a 6%, 16 a 17%, 18 a 20%, 23 a 24%; por faixas de distância da rede de drenagem de 800 a 1.000 m; e, por faixas de distância das estradas entre 200 a 400 m, 700 a 800 m, 1.100 a 1.200.
- **Vegetação para campo e solo exposto:** esta transição é favorecida por declividades entre 2 a 6%, 7 a 8%; por faixas de distância da rede de drenagem de 400 a 600 m, 800 a 1.000 m; e, por faixas de distância das estradas entre 500 a 900 m, 1.200 a 1.400 m.

Por meio do mapa de uso e cobertura do solo inicial (ano de 2011), do cubo *raster* e dos coeficientes dos pesos de evidência, verificou-se a correlação existente entre os pares de variáveis com cálculo do Índice de Cramer (V). Os pares de variáveis não apresentaram alto grau de correlação, implicando independência entre os mapas. A matriz de correlação completa está apresentada no Apêndice B.

O modelo de simulação foi construído baseado no teste T6, visto que, com os parâmetros deste teste obteve-se os maiores valores de similaridade entre o mapa de uso e cobertura do solo obtido por meio de imagens de satélites e o mapa de uso e cobertura do solo simulado, conforme apresentado no item 6.4.3. Sendo assim, os valores tanto para o *AC Expander* como para o *Patcher* foram de: 0,01 para *Mean Patch Size*; 0,02 para *Patch Size Variance*; 1,5 para *Patch Isometry*; e 0,8 para a probabilidade de transição. Esses parâmetros foram utilizados para a simulação do mapa de uso e cobertura do solo de 2014, para a validação do modelo, assim como para a obtenção do cenário do uso e cobertura do solo simulado para o ano de 2019, este último apresentada na Figura 6.34. O índice de similaridade mínima entre o mapa de uso e cobertura do solo obtido na classificação temática e o simulado para o ano de 2014 foi de aproximadamente 43%, considerando-se a janela de pixels de 15x15 pixels.

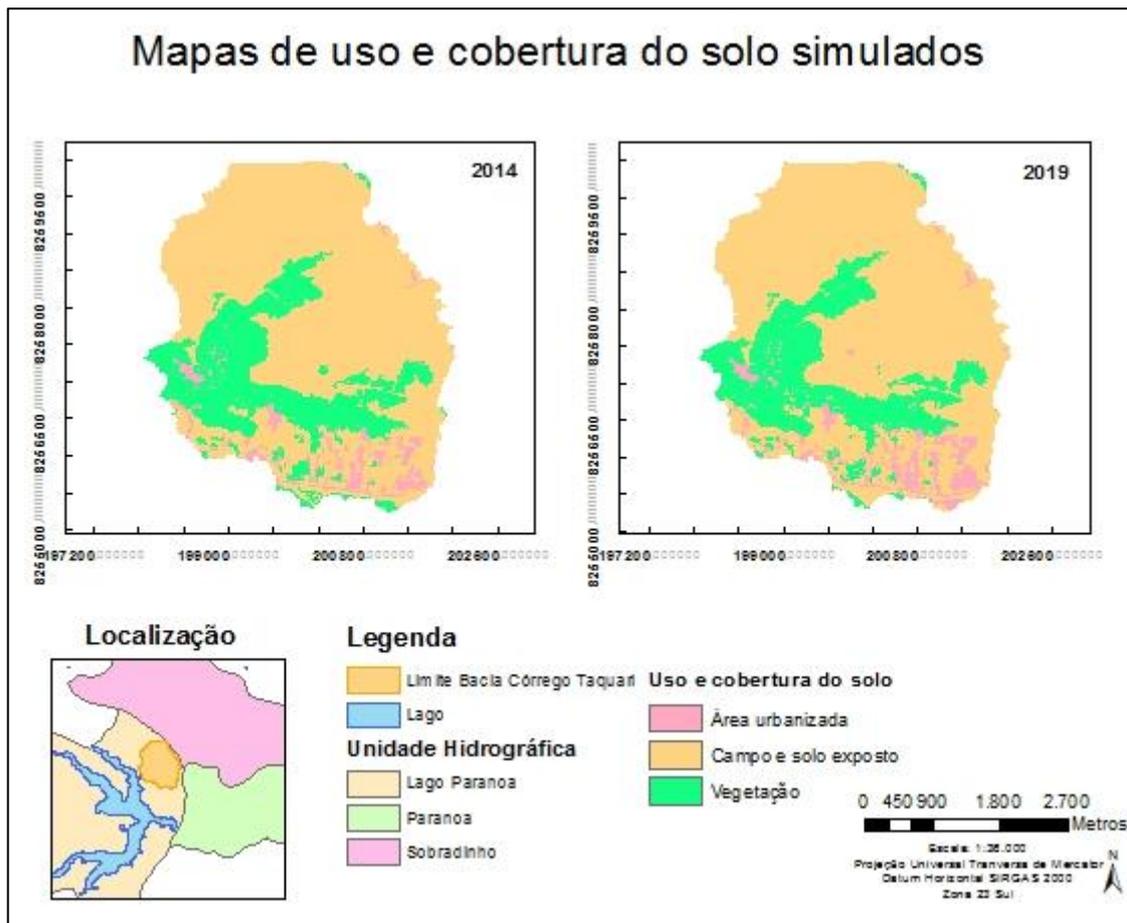


Figura 6.34 – Mapas de uso e cobertura do solo simulados para os anos 2014 e 2019

A descrição e análise dos mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2011, 2014 e o cenário simulado de 2019 está apresentada a no item a seguir.

### 6.5.3. Uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Córrego Taquari

Os mapas temáticos de uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica do Córrego Taquari para os anos de 2011, 2014 e o simulado de 2019 estão apresentados na Figura 6.35.

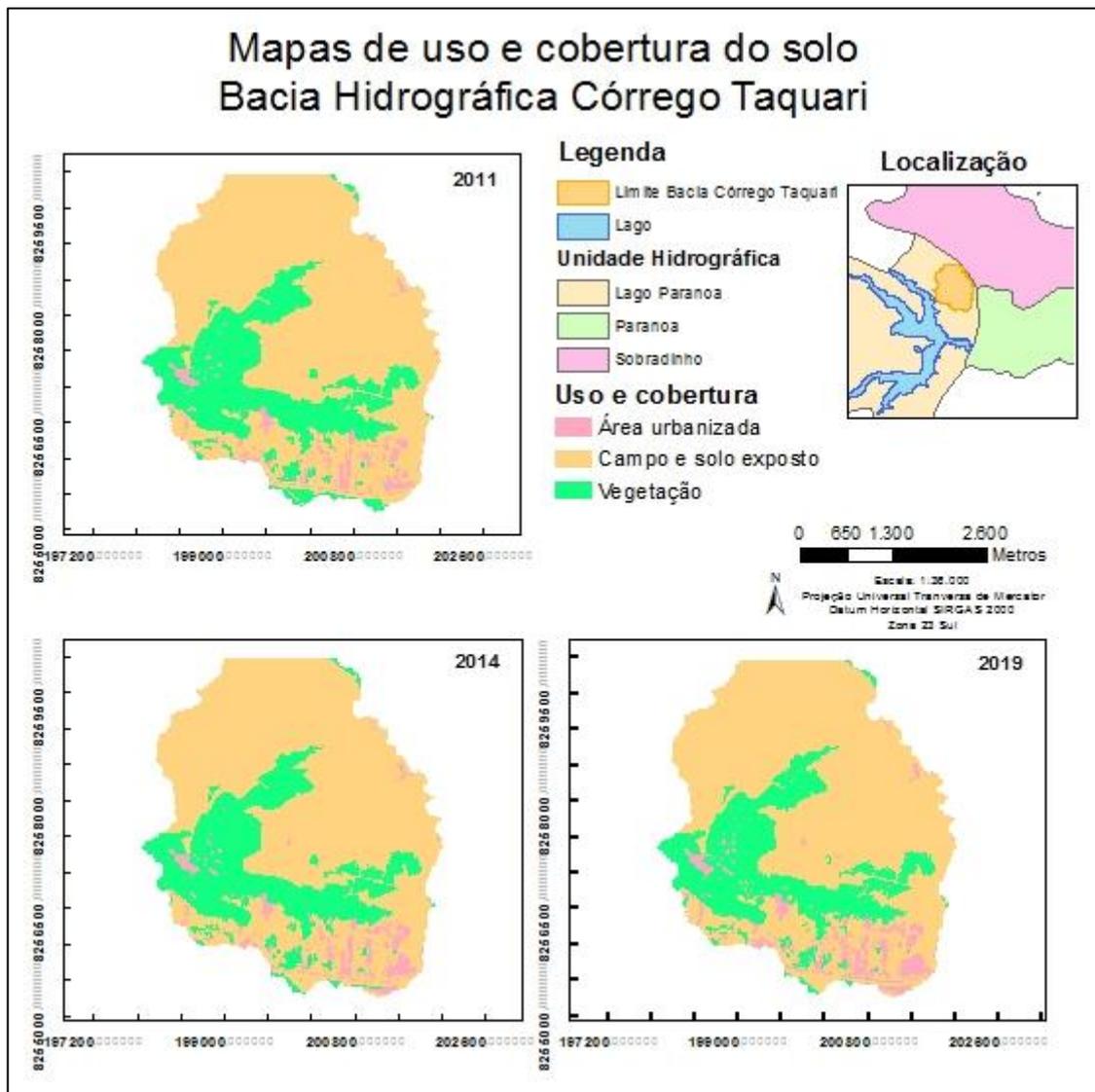


Figura 6.35 – Mapas de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Córrego Taquari

A Tabela 6.30 demonstra a evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas entre os anos 2011 e 2019. Considerando que o processo de dinâmica ambiental de uso e cobertura do solo, da bacia do Córrego Taquari, seja regido pelas taxas de transição definidas no item 6.5.2, observou-se que o processo de urbanização da área, entre os anos de 2011 e 2019, apresentado na Figura 6.35, foi representado por uma taxa de crescimento de 56,1%, o que implicou no incremento de 0,30 km<sup>2</sup> na área da classe temática de área urbanizada, sendo esta, a classe temática que apresentou maior taxa de variação. Durante o mesmo período, a classe temática campo e solo exposto aumentou apenas 0,02 km<sup>2</sup> em sua área, indicando a menor taxa de variação entre as classes temáticas, de 0,15%. A classe temática vegetação, por sua vez, teve redução de 0,32 km<sup>2</sup> de área, passando de 3,55 km<sup>2</sup>, em 2011, para 3,23 km<sup>2</sup>, em 2019, demonstrando taxa de variação de 8,92%. Diante do apresentado observa-se, em menores proporções, o desenvolvimento do processo de

urbanização na bacia hidrográfica do Córrego Taquari, principalmente com a retirada da vegetação nativa e implantação de edificações.

Tabela 6.30 – Evolução do uso e cobertura do solo por meio das classes temáticas para o período 2011 – 2019

Classes temáticas	Área em 2011		Área em 2014		Área em 2019	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Área urbanizada	0,54	3,84	0,66	4,67	0,84	5,99
Campo e solo exposto	9,99	70,95	10,00	71,00	10,01	71,05
Vegetação	3,55	25,22	3,43	24,34	3,23	22,96
Total	14,08	100	14,08	100	14,08	100

#### 6.5.4. Escoamento superficial direto

Algumas consequências da urbanização foram estudadas por meio da análise do escoamento superficial direto pelo Método do SCS, os resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita no item 5.2.5, estão apresentados a seguir.

Por meio do mapa pedológico, definiu-se os grupos hidrológicos dos solos presentes na bacia, sendo o GHS A atribuído as áreas com presença de latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo e o GHS C atribuído ao cambissolo, conforme apresentado na Figura 6.36.

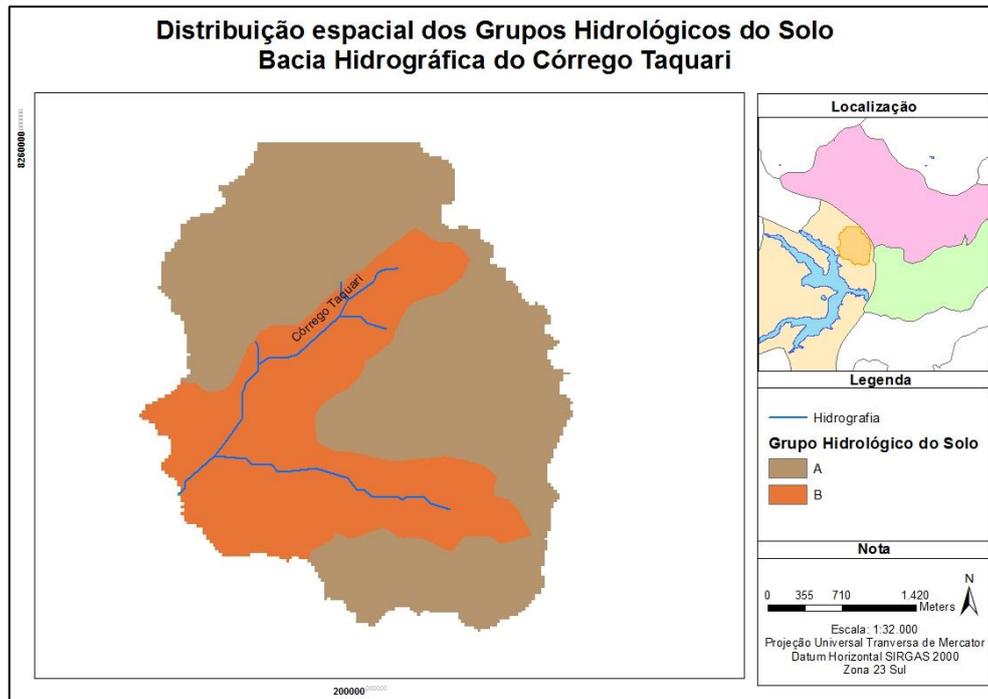


Figura 6.36 – Distribuição espacial dos Grupos Hidrológicos do Solo na bacia hidrográfica do Córrego Taquari

A Figura 6.37 resultou, então, do cruzamento dos mapas de GHS e uso e cobertura do solo, pelo algoritmo *Raster Calculator* da ferramenta *Spatial Analyst Tools/Map Algebra* do ArcGIS, onde foram definidos os valores de CN baseando-se na Tabela 4.3.

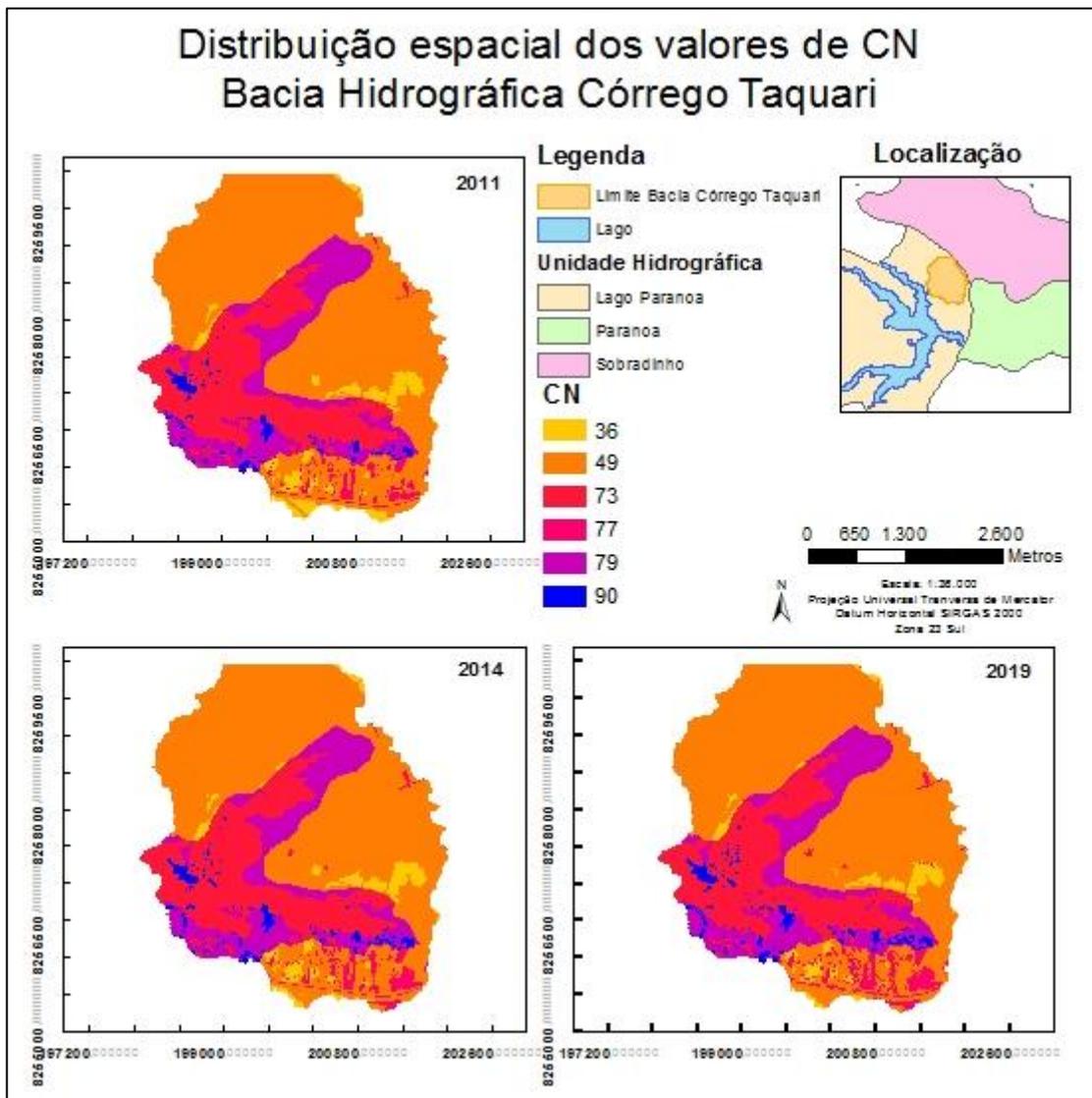


Figura 6.37 – Distribuição espacial dos valores de CN na bacia hidrográfica do Córrego Taquari

De acordo com a Figura 6.37, o valor mais baixo de CN, 36, é resultante de áreas de vegetação e GHS A, e indicando ambiente propício para muita infiltração e baixa taxa de escoamento de água proveniente de uma precipitação. O CN 49 resulta de área da classe temática de campo e solo exposto com GHS A; o CN 73 é representado por presença da classe temática vegetação e GHS C; o CN 77 resulta da classe temática área urbanizada com GHS A; o CN 79 foi identificado em áreas com a classe temática campo e solo exposto com GHS C; e o CN 90, foi o maior valor de CN da bacia e indica um ambiente propício para pouca infiltração e alto escoamento de águas provenientes de uma precipitação, é resultante da classe temática área urbanizada com GHS C.

O passo seguinte para obter o escoamento superficial da bacia, foi calcular a chuva de projeto, para isso foi necessário definir a duração da chuva, considerada igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica calculada pela Equação (4.16).

$$t_c = 5,862 \cdot \frac{3,28^{0,6}}{0,035^{0,3}}$$

$$t_c = 32,69 \text{ minutos}$$

Para o cálculo da chuva de projeto foi utilizada a Equação (4.15):

$$I = \frac{1574,70 \cdot 5^{0,207}}{(32,69 + 11)^{0,884}}$$

$$I = 77,94 \text{ mm/h}$$

A intensidade da chuva de projeto e o potencial máximo de retenção foram utilizados na Equação (4.11), por meio do algoritmo *Raster Calculator*, para calcular o escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Córrego Taquari, que resultou no mapa de escoamento dos anos de 2011, 2014 e 2019, conforme apresentado na Figura 6.38. Pelo método do SCS esse escoamento é expresso em milímetro de chuva excedente, ou seja, altura da lâmina d'água produzida por uma precipitação.

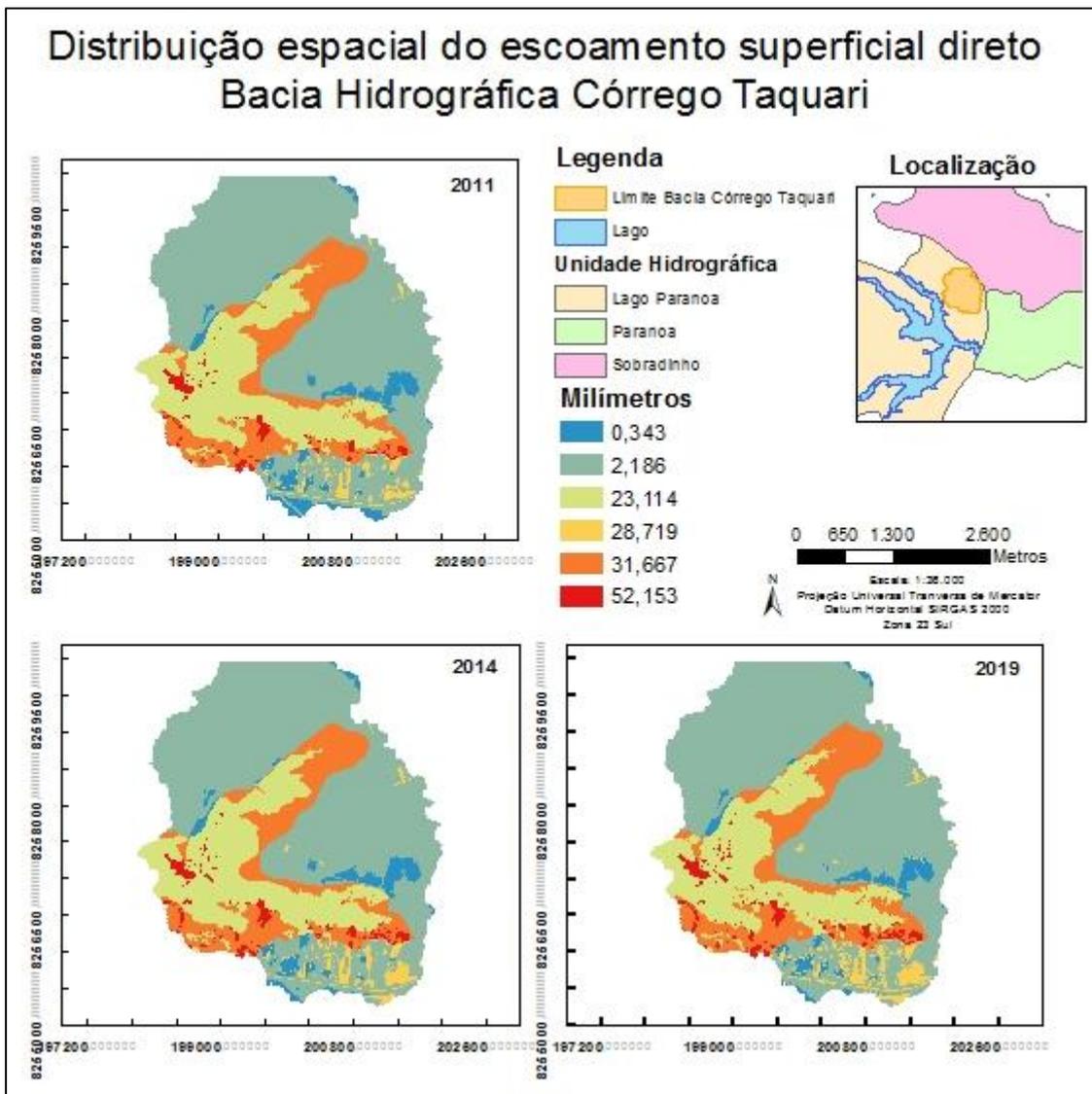


Figura 6.38 – Distribuição espacial do escoamento superficial direto na bacia hidrográfica do Córrego Taquari

Na Tabela 6.31 observa-se a distribuição espacial do escoamento superficial direto em relação a área da bacia hidrográfica do Córrego Taquari, para os anos de 2011, 2014 e 2019 (cenário simulado). O valor de escoamento superficial direto mais baixo, 0,343 mm, está associado a área com CN mais baixo, CN 36, enquanto áreas com escoamento de 52,153 mm associa-se a locais onde o valor de CN é 90. Analisando o período compreendido entre 2011 e 2019, os locais com escoamento superficial direto de 0,343 mm contabilizam redução 0,16 km<sup>2</sup> em área, o que representa uma taxa de variação de 25,4%; locais com o escoamento superficial direto de 2,186 mm reduziram sua área a uma taxa de 0,66%, ou seja, em 0,05 km<sup>2</sup> de área; já os locais com escoamento superficial direto 23,114 mm reduziram 5,41%, ou seja, 0,16 km<sup>2</sup>; os locais com escoamento superficial direto de 28,719 mm foram as que mais sofreram alteração, aumentando cerca de 0,21 km<sup>2</sup> em área, sendo sua taxa de variação

de 71,19%; enquanto áreas com escoamento superficial direto de 31,667 mm aumentaram apenas 3,22%, ou cerca de 0,07 km<sup>2</sup> de área; por fim, as áreas com 52,153 mm de escoamento superficial direto aumentaram 0,09 km<sup>2</sup>, o que implica em uma taxa de variação de 37,61%.

Tabela 6.31 – Distribuição do escoamento superficial na área da bacia

Escoamento superficial (mm)	Área em 2011		Área em 2014		Área em 2019	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
0,343	0,63	4,47	0,54	3,86	0,47	3,33
2,186	7,95	56,47	7,95	56,45	7,90	56,10
23,114	2,92	20,75	2,88	20,48	2,76	19,63
28,719	0,30	2,10	0,38	2,72	0,51	3,60
31,667	2,04	14,48	2,05	14,54	2,10	14,95
52,153	0,24	1,73	0,27	1,94	0,34	2,39
Total	14,08	100,00	14,08	100,00	14,08	100,00

Observou-se que houve redução nas áreas que apresentavam os valores mais baixos de escoamento superficial direto (0,343 mm, 2,186 mm e 23,114 mm), que em 2011 somavam aproximadamente 81,7% da área total da bacia hidrográfica, e em 2019 seria representada por de 79,1% da área total. No entanto, no mesmo período, houve aumento da áreas que apresentavam os valores de escoamento superficial direto mais elevados (28,719 mm, 31,667 mm e 52,153 mm), passando de 18,3%, em 2011, para 20,9%, em 2019. O que demonstra que com o passar dos anos, se o processo de urbanização da bacia hidrográfica do Córrego Taquari for mantido, o escoamento superficial direto tenderá a aumentar.

O estabelecimento de comunidades junto aos corpos hídricos é corriqueiro e histórico, porém, pode causar desequilíbrio ambiental, que resulta em enchentes e alagamentos, já que, durante uma precipitação, o pico de vazão do canal aumenta e é alcançado mais rápido do que normalmente aconteceria, se o ambiente não tivesse sofrido intervenção antrópica. Destaca-se ainda que a identificação de elevado escoamento superficial nas proximidades do corpo hídrico, principalmente devido à construção de residências, que associados a solos frágeis típicos de vertentes de rios, podem causar o carreamento de sedimentos e potencializar o processo de erosão do solo e assoreamento do rio, causando a instabilidade ambiental.

## 7. CONCLUSÕES

As técnicas de geoprocessamento aplicadas permitiram melhorar a resolução das imagens do satélite do RapidEye por meio do processo de fusão com as imagens do satélite Ikonos, baixadas pelo Google Earth Pro e georreferenciadas, aprimorando os produtos da classificação temática. A classificação temática das imagens de satélite e a análise multitemporal dos mapas e uso e cobertura do solo permitiu observar o processo evolutivo de mudança no uso e cobertura do solo para os anos 1985-1995, 1995-2005 e 2005-2016, para a área de estudo A; e 2009-2011 e 2011-2014, para a área de estudo B. O estudo da evolução de uso e cobertura do solo dividido em diferentes períodos de tempo, permitiu, definir de forma satisfatória, as mudanças ocorridas em cada uma das classes temáticas, identificando as taxas de variação de área de cada classe temática. As principais alterações ocorridas no uso e cobertura do solo demonstram urbanização do território por meio das transformações de áreas de campo e vegetação em área urbana, reafirmando a tendência de crescimento urbano do Distrito Federal, sendo a retirada da vegetação mais representativa na área de estudo B, devido a implantação do Paranoá Parque.

A definição de uma área macro e uma micro para análise das mudanças de uso e cobertura do solo permitiu o melhor entendimento dos processos de ocupação em diferentes escalas, principalmente, da bacia do Lago Paranoá, que se refletiu também na bacia hidrográfica do Córrego Taquari e seu entorno, visto que parte da região está sob proteção e cuidados da CAESB.

A utilização do método AHP para definir a hierarquização e ponderação dos fatores pela interpretação matemática dos valores, mostrou-se satisfatório, buscando reduzir erros e produzir mapas com certa imparcialidade nos resultados. A integração dos fatores naturais como, declividade, pedologia, geomorfologia e geologia e do fator antrópico como, uso e cobertura do solo, permitiu adicionar informação relevantes, com relação às características locais, ao processo de classificação da vulnerabilidade ambiental das áreas de estudo.

Com a distribuição espacial da vulnerabilidade ambiental é possível definir limitações de uso, principalmente para área mais vulneráveis, assim como propor a implementação de planos de conservação que busquem reduzir a presença de fatores ligados aos altos índices de vulnerabilidade ambiental, como o desmatamento e ocupação de área de vegetação nativa

nas proximidades do corpo hídrico, já que, naturalmente, o terreno costuma ter maior declividade e solo mais susceptível a erosão.

Os mapas de temperatura da superfície terrestre da área de estudo A estiveram relacionados com a precipitação registrada nas datas em que as imagens foram adquiridas, pois quando houve precipitação nos dias antecedentes ao imageamento observou-se redução na temperatura da superfície terrestre. Observou-se ainda a influência do uso e cobertura do solo com a temperatura de superfície terrestre, sendo a cobertura vegetal um fator importante para a caracterização do microclima local, visto que em áreas que apresentam cobertura vegetal mais densa verificam-se temperaturas mais amenas, elevando a sensação de conforto térmico, enquanto área sem vegetação (solo exposto) ou com baixa densidade de vegetação, apresenta as temperaturas mais elevadas.

Observou-se ainda, que a temperatura da superfície terrestre pode ser associada como indicador da capacidade de infiltração do solo. Já que na área de estudo B os solos com maior granulometria apresentam maior capacidade de infiltração e drenagem de águas pluviais e menor escoamento superficial, indicando condições favoráveis ao aquecimento do solo. Por sua vez, o solo com menor granulometria apresenta infiltração e drenagem mais lenta favorecendo o escoamento, o que faz com que as águas pluviais permaneçam por mais tempo no solo e a temperatura de superfície terrestre seja menor.

A modelagem da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, por meio do sistema Dinamica EGO, mostrou-se uma ferramenta eficiente para a elaboração de cenários prospectivos de curto prazo e apropriada para a análise das tendências de crescimento, redução e direcionamento das classes temáticas de uso e cobertura do solo. Além de permitir a usuários e tomadores de decisão uma visão, não somente dos processos atuais, como também dos processos históricos e de como estes podem afetar o futuro. Entretanto, os cenários prospectivos gerados pela simulação da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, na área de estudo B, implicam na continuidade do processo de ocupação antrópica, seguindo as tendências observadas, que se não forem mantidas as mesmas condições apresentadas nesta pesquisa pode haver mudanças nos cenários futuros.

Diante da grande variação das taxas de transição entre as classes temáticas, obtidas nesta pesquisa, observou-se que com a diminuição do tamanho da área utilizada na modelagem da

dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo houve aumento na similaridade entre o mapa de uso e cobertura obtido por classificação temática de imagens de satélite e o simulado.

Pode-se concluir que apesar das diferentes taxas de transição de classes temáticas de uso e cobertura do solo que uma área possa apresentar, com os devidos ajustes no modelo da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo, o sistema Dinamica EGO realiza de forma satisfatória simulação em pequenas áreas que sofrem pressão de fatores externos, mesmo que estes não sejam considerados como variáveis de entrada na respectiva modelagem.

Conclui-se ainda que, os dados de uso e cobertura do solo com alta resolução espacial, podem implicar no aumento do tempo computacional demandado para a modelagem da dinâmica ambiental, além de aumentar a dificuldade de obtenção de uma boa relação de similaridade entre o mapa de uso e cobertura do solo obtido com a classificação temática das imagens de sensores remotos e o mapa de uso e cobertura do solo simulado pelo sistema Dinamica EGO.

Apesar da ausência de dados para calibração do modelo, o estudo do escoamento superficial direto analisou, de forma empírica, as consequências que podem ser causadas em decorrência da urbanização local, caso ela ocorra de forma desordenada e sem implementação de políticas públicas que definam seu planejamento. Considerando que o processo de urbanização da bacia hidrográfica do Córrego Taquari acontecerá conforme observado e proposto por este trabalho, poderá haver aumento do escoamento superficial direto, principalmente decorrente da supressão da vegetação, da impermeabilização do solo e da construção de edificações nas proximidades do córrego, podendo causar impactos ambientais e sociais. Diante disso, destaca-se a importância do planejamento habitacional para o equilíbrio das componentes ambiental e social, visando melhora na qualidade de vida da população.

Observou-se a importância da visão sistêmica, para o desenvolvimento da pesquisa, que permitiu compreender a paisagem e as condições socioambientais buscando integrar as características inerentes dos processos naturais e antrópicos. Desta forma, espera-se que os resultados apresentados nesta pesquisa possam contribuir com o desenvolvimento de políticas públicas que auxiliem processo de ocupação ordenada do território na bacia hidrográfica do Córrego Taquari e seu entorno, minimizando os impactos que poderão ser causados pela urbanização local.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adami, S.F., Francisco, C.E.S., Coelho, R.M., Torres, R.B. (2012). “Análise multicriterial aplicada à priorização para recuperação de Áreas de Preservação Permanente: uma implantação em Sistemas de Informações Geográficas”. *Boletim Campineiro de Geografia*, 2(3), 465-478.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R. (2005). “A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning”. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 251-268.
- Almeida, A.T. e Costa, A.P.C.S. (2003). *Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*. Editora Universitária da UFPE, Recife, PE.
- Almeida, W.S., Souza, N.M., Camapum de Carvalho, J. (2012). “Produção de carta geotécnica preliminar de capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica Corumbá IV (GO)” In: Camapum de Carvalho, J., Neves, G.F., Carvalho, E.T. (orgs.) *Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais*. Série Geotecnia – UnB v. 4. Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 581-606.
- Almeida, W.S., Souza, N.M., Camapum de Carvalho, J., Reis Junior, D.S. (2013). “Análise morfométrica em bacias hidrográficas fluviais como indicadores de processos erosivos e aporte de sedimentos no entorno do reservatório da usina hidrelétrica (UHE) Corumbá IV”. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14(2), 135-149.
- Almeida, J.S., Melo, W.F., Andrade, A.B.A., Saldanha, H.G.A.C., Rodrigues, L.M.S. (2015). “Modelagem da dinâmica de uso e ocupação da terra no município de Pombal – PB”. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 10(1), 276 – 282.
- Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A., Alavipanah, S.K. (2009). “Spatial-Temporal Dynamics of Land Surface Temperature in Relation to Fractional Vegetation Cover and Land Use/Cover in the Tabriz Urban Area, Iran”. *Remote Sensing of Environment*, 13, 2606-2617.
- Azevedo, G.F. e Souza, N.M. (2013). “Uso de imagens Landsat TM 5 para análise da temperatura de superfície do Distrito Federal”. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 1869-1876, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Bana e Costa, C. (1988). “Introdução geral às abordagens multicritério de apoio à tomada de decisão”. *Investigação Operacional*, 8(1), 117-139.

- Baptista, G.M.M. (1998). “Caracterização climatológica do Distrito Federal.” In: Freitas-Silva, F.H. e Campos, J.E.G. (eds.) *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília, DF, Vol. 1, Parte V, 187-208.
- Batty, M., Xie, Y., Sun, Z. (1999). “Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata”. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(3), 205-233.
- Benedetti, A.C.P. (2010). *Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, RS, 166p.
- Bielenki Júnior, C. e Barbassa, A.P. (2012). *Geoprocessamento e recursos hídricos: aplicações práticas*. EdUFSCar, São Carlos, SP, 257p.
- Boas, C.L.V. (2006). *Modelo multicritérios de apoio à decisão aplicado ao uso múltiplo de reservatórios: Estudo da Barragem do Ribeirão João Leite*. Dissertação de Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente, Universidade de Brasília, Departamento de Economia, Brasília, DF, 145p.
- Brakensiek, D.L., Rawls, W.J. (1983). “Green-Ampt Infiltration Model Parameters for Hydrologic Classification of Soils”. In: Borelli, J. (ed.) *Specialty Conference on Advances in Irrigation and Drainage: Surviving external pressures*. American Society of Civil Engineers, Jackson Hole, EUA, 226-233.
- Burrough, P.A. e McDonnell, R.A. (2010). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York, EUA, 333p.
- Camacho-Sanabria, J.M., Juan-Pérez, J.I., Pineda-Jaimes, N.B. (2015). “Modeling of land use/cover changes: prospective scenarios in the Estado de Mexico. Case study – Amanalco de Becerra”. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 203-220.
- Câmara, G. e Medeiros, J.S. (1998). “Princípios básicos em geoprocessamento”. In: Assad. E.D.; Sano E.E. (eds.) *Sistemas de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura*. 2ª Ed., rev. e ampl. Embrapa - SPI, Brasília, DF, 3-11.
- Campana, N.A., Monteiro, M.P., Cordeiro Neto, O. e Koide, S. (1998). “Caracterização sócio-econômica do Distrito Federal”. In: Freitas-Silva, F.H. e Campos, J.E.G. (eds.) *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília, DF, Vol. 2, Cap I, 1- 44.

- Campos, J.E.G. e Freitas-Silva, F.H. (2001). “Geomorfologia”. In: Fonseca, F.O (org). Olhares sobre o Lago Paranoá. 1 ed. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH, Brasília, DF.
- Campos, J.E.G. (2004). “Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos”. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1), 41-48.
- Canholi, A.P. (2015). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Oficina de Textos, São Paulo, 384p.
- Castanho, R.B., Teodoro M.A. (2010). “O uso das geotecnologias no estudo do espaço agropecuário”. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research médium*, 1, 136-153.
- Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN). (1984). *Atlas do Distrito Federal*, GDF, Brasília.
- Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN). (1994). Mapa das Unidades Hidrográficas do DF - 1994 - SEMATEC/CODEPLAN - Escala 1:100.000.
- Conway, T.M. e Lathrop, R.G. (2005). “Alternative land use regulations and environmental impacts: assessing future land use in an urbanizing watershed”. *Landscape and Urban Planning*, 71(1), 1-15.
- Cordeiro, F.G. (2014). *Método para avaliação de risco ambiental de acidentes de trânsito envolvendo produtos perigosos usando análise multicritério*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, SP, 189p.
- Costa, F.H.S., Petta, R.A., Lima, R.F.S., Medeiros, C.N. (2006). “Determinação da Vulnerabilidade Ambiental na Bacia Potiguar, região de Macau (RN), Utilizando Sistemas de Informações Geográficas”, *Revista Brasileira de Cartografia*. (58/02), 119-127.
- Crepani, E., Medeiros, J.S., Hernandez, P., Florenzano, T.G., Duarte, V., Barbosa, C.C. (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial*. INPE, São Jose dos Campos, SP, 103p.
- Cruz, D.M.R., Valadão, L.T., Dolabella, R.H.C. (2001). “Uso e ocupação do solo”. In: Fonseca, F.O (org). Olhares sobre o Lago Paranoá. 1 ed. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH, Brasília, DF.

- 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 em Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, 102 p.
- Divisão de Geração de Imagens / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE). (2016). *Image Catalog*. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 17 out. 2016.
- Ecotech Tecnologia Ambiental e Consultoria Ltda. e Direcional Engenharia S/A (2012). *Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto ao Meio Ambiente – EIA/RIMA, para o parcelamento de solo urbano do Plano de Expansão do Paranoá, Paranoá Parque*. Brasília, DF. 1 CD.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). (1978). *Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal*. Boletim técnico nº 53. 1ª ed. SNLCS. Rio de Janeiro, RJ, 455p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). (1999). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Embrapa, Brasília, DF, 412p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). (2013). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3 ed. rev. ampl. Embrapa, Brasília, DF, 353p.
- Faria, A. (1995). *Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D’Aliança-Alto Paraíso de Goiás*. Tese de Doutorado em Geologia, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, 199p.
- Ferrante, J.E.T., Rancan, L., Netto, P.B. (2001). *Meio físico*. In: Fonseca, F.O (org). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. 1 ed. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH, Brasília, DF.
- Fitz, P.R. (2008). *Geoprocessamento sem complicação*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 157p.
- Fonseca, F.O. e Netto, P.B. (2001). *Parcelamentos Irregulares na Bacia do Lago Paranoá*. In: Fonseca, F.O (org). *Olhares sobre o Lago Paranoá*. 1 ed. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH, Brasília, DF.
- Freitas-Silva, F.H. e Campos, J.E.G. (1998). “Geologia do Distrito Federal.” In: Freitas-Silva, F.H. e Campos, J.E.G. (eds.) *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos*

*Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília, DF, Vol. 1, Parte I, 1- 44.

Gillett, P.N., Stott, A., Santer, B. (2008). “Attribution of cyclogenesis region sea surface temperature change to anthropogenic influence”. *Geophysical Research Letters*, 35(9), 1-5.

Google Earth Pro. (2016). *Software livre Google Earth Pro*. Acesso em: 12 jun. 2016.

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, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, RN, 253p.

Governo do Distrito Federal (GDF). (2009a). *Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Diagnóstico do sistema de drenagem, Volume 8, TOMO 1*. Brasília, DF, 73p. Disponível em: <  
[http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/servico\\_publicos/PDDUemPDF/14%20-%20diagnostico%20do%20sistema%20de%20drenagem%20tomo%20i.pdf](http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/servico_publicos/PDDUemPDF/14%20-%20diagnostico%20do%20sistema%20de%20drenagem%20tomo%20i.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2016.

Governo do Distrito Federal (GDF). (2009b). Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009. Aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT e dá outras providências. Disponível em: <  
[http://www.segeth.df.gov.br/images/pdot/leis/1at\\_lcdf\\_00803\\_2009\\_atualizada\\_lc854\\_2012\\_sem%20anexos.pdf](http://www.segeth.df.gov.br/images/pdot/leis/1at_lcdf_00803_2009_atualizada_lc854_2012_sem%20anexos.pdf)>. Acesso em: 03 mai. 2017.

Governo do Distrito Federal (GDF). (2012). *Revisão e Atualização do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal, Volume I Diagnóstico*. Brasília, DF, 789p. Disponível em: <  
[http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/programas/PGIRH2012/volume%201%20-%20diagnostico\\_rev01%20alterao%20%20fl.%2003.pdf](http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/programas/PGIRH2012/volume%201%20-%20diagnostico_rev01%20alterao%20%20fl.%2003.pdf)>. Acesso em: 20 mar. 2016.

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, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal, RN, 253p.

- Gusso, A., Fontana, D.C., Gonçalves, G.A. (2007). “Mapeamento da temperatura da superfície terrestre com uso do sensor AVHRR/NOAA”. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(2), 231-237.
- Haan, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C. (1993). *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. Academic Press, Inc, San Diego, California, 627p.
- Hagen, A. (2003). “Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps”. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3), 235-249.
- Hawkins, R.H. (1975). “The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff”. *Water Resources Bulletin*. 11(5), 887–891.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (1977). *Geografia do Brasil, região Centro-Oeste*, SEC/SEDG, Rio de Janeiro, vol. 4, 310p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2013). *Atlas do censo demográfico 2010*. IBGE, Rio de Janeiro, RJ, 156 p.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). (2017). BDMEP Dados históricos 1980 a 2016. Disponível em <[www.inmet.gov.br/](http://www.inmet.gov.br/)>. Acesso em: 05 abr. 2017.
- Isaias, F.B. (2008). *A sustentabilidade da água: proposta de um índice de sustentabilidade de bacias hidrográficas*. Dissertação de mestrado em Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Brasília, DF, 168p.
- Jenerette, G.D., Harlan, S.L., Buyantuev, A., Stefanov, W.L., Delet-Barreto, J., Ruddell, B.L., Myint, S.W., Kaplan, S., Li, X. (2016). “Micro-scale urban surface temperatures are related to land-cover features and residential heat related health impacts in Phoenix, AZ USA”. *Landscape Ecology*, 31(4), 745–760.
- Jensen, J.R. (2009). *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. 2ª Ed traduzida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São Paulo, Parêntese, 672 p.
- Kalantari, Z., Lyon, S.W., Folkson, L., French, H.K., Stolte, J., Jansson, P.E., Sassner, M. (2014). “Quantifying the hydrological impact of simulated changes in land use on peak discharge in a small catchment”. *Science of the Total Environment*, 466–467, 741–754.
- Kauwe, M.G., Taylor, C.M., Harris, P.P., Weedon, G.P., Ellis, R.J. (2013). “Quantifying Land Surface Temperature Variability for Two Sahelian Mesoscale Regions during the Wet Season”. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 1605-1619.

- Malaret, E., Bartolucci, L.A, Lozano, D.F., Anuta, P.E., McGillem, C.D. (1985). “Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper Data Quality Analysis”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(9), 1407-1416.
- Malczewski, J. (2006). “GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of literature”. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726.
- Martins, E.S. (1998). “Sistemas pedológicos do Distrito Federal.” In: Freitas-Silva, F.H. e Campos, J.E.G. (eds.) *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília, DF, Vol. 1, Parte III, 1- 25.
- Martins, E.S. e Baptista, G.M.M. (1998). “Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal.” In: Freitas-Silva, F.H. e Campos, J.E.G. (eds.) *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília, DF, Vol. 1, Parte II, 1-53.
- Mccuen, R.H., Wong, S.L., Rawls, W.J. (1984). “Estimating urban time of concentration”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(7), 887-904.
- Melesse, A.M. e Shih, S.F. (2002). “Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS”. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1), 173-183. doi:10.1016/S0168-1699(02)00111-4
- Mendes, C.A.B. e Cirilo, J.A. (2001). *Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação*. ABRH, Porto Alegre, RS, 536 p.
- Miara, M.A. e Oka-Fiori, C. (2007). “Análise por múltiplos critérios para a definição de níveis de fragilidade ambiental – um estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Cará-Cará, Ponta Grossa/PR”. *RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise*, 13, 85-98.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA). (2016). *Catálogo de imagens de satélite RapidEye do Ministério do Meio Ambiente*. Disponível em: < <http://geocatalogo.mma.gov.br/>>. Acesso em: 26 jul.2016.
- Mockus, V. (1949). *Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms. Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Report, Grand (Neosho) River Watershed*. USDA Soil Conservation Service.
- Moon, G.W., Ajmal, M., Ahn, J.H., Kim, T.W. (2016). “Investigating practical alternatives to the NRCS-CN method for direct runoff estimation using slope-adjusted curve numbers”. *Journal of Civil Engineering*, 00(0), 1-9.
- Moreira, F.R., Barbosa, C., Câmara, G., Almeida Filho, R (2016). “Inferência geográfica e suporte à decisão”. In Câmara, G., Davis, C., Monteiro, A.M.V. (eds.). *Introdução à*

- ciência da geoinformação*. INPE, São José dos Campos, SP, 1-49. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap9-inferencia.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2016.
- Musgrave, G.W. (1955). “How much of the rain enters the soil?”. In: USDA. *Water: The yearbook of agriculture*. Yearbook. Washington, EUA, 151–159.
- Nagarajan, N. e Poongothai, S. (2012). “Spatial Mapping of Runoff from a Watershed Using SCS-CN Method with Remote Sensing and GIS”. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(11), 1268-1277.
- Novaes Pinto, M. (1987). “Superfícies de aplainamento do Distrito Federal”. *Revista Brasileira de Geografia*, 49, 09-27.
- Novaes Pinto, M. (1988). “Aplainamento nos trópicos - uma revisão conceitual”. *Geografia*, 13(26): 119-129.
- Novaes Pinto, M. (1994). “Caracterização geomorfológica do Distrito Federal”. In: Novaes Pinto, M. (org.) *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2 ed. rev. ampl. UnB: SEMATEC, Brasília, DF, cap 1, 285-344.
- Nunes, J.F. e Roig, H.L. (2015). “Análise e mapeamento do uso e ocupação do solo da Bacia Do Alto Do Descoberto, DF/GO, por meio de classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa”. *Revista Árvore*, 39(1), 25-36.
- Ozdemir, H., Elbas, E. (2015). “Benchmarking land use change impacts on direct runoff in ungauged urban watersheds”. *Physics and Chemistry of the Earth*, 79-82, 100-107.
- Penteado, M.M. (1976). “Tipos de concreções ferruginosas nos compartimentos geomorfológicos do Planalto de Brasília”. *Notícia Geomorfológica*, 16, 39-53.
- Pinese Júnior, 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 – USP*. 23, 4-26.
- Ponce, V.M. e Hawkins, R.H. (1996). “Runoff curve number: Has it reached maturity?”. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11-19.
- Reatto, A., Martins, E.S., Farias, M.F.R., Silva, A.V., Carvalho Jr O.A. (2004). Mapa pedológico digital – SIG Atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, 31p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; n. 120).
- 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, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 181p.
- Rodrigues, E.L., Elmiro, M.A.T., Braga, F.A., Jacobi, C.M., Rossi, R.D. (2015). "Impact of changes in land use in the flow of the Pará River Basin, MG". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(1), 70–76.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York. 287p.
- 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, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 112p.
- Salisbury, W., D'aria, D.M. (1992). "Emissivity of terrestrial material in the 8-14m atmospheric window". *Remote Sensing of Environment*, 42, 83-106.
- Santos, L.J.C., Fiori, C.O., Canalli, N.E., Fiori, A.P., Silveira, C.T., Silva, J.M.F. (2007). "Mapeamento da vulnerabilidade geoambiental do estado do Paraná". *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4), 812-820.
- Santos, N.B.F. (2010). *Distribuições espaciais e temporais de temperaturas de superfície no Bioma Cerrado: Uma análise integrada a partir de dados orbitais de resolução moderada*. Tese de Doutorado em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 94p.
- Sartori, A., Lombardi Neto, F., Genovez, A.M. (2005). "Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte 1: Classificação". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4), 05-18.
- Sartori, A. (2010). *Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 235p.
- Sartori, A., Hawkins, R.H., Genovez, A.M. (2011). "Reference curve numbers and behavior for sugarcane on highly weathered tropical soils". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(11), 705-711.
- Sathish Kumar, D., Arya, D.S., Vojinovic, Z. (2013). "Modeling of urban growth dynamics and its impact on surface runoff characteristics". *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 124–135.

- Schroder, T., Pereira, R.S., Zimmermann, A.P.L., Redin, C.G., Fleck, M.D., Machado, L.M., Rocha, N.S. (2016). “Dinâmica do uso e cobertura do solo no vale do Rio Pardo, Rio Grande do Sul”. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 20(1), 372–380.
- Shi, Z.-H., Chen, L.-D., Fang, N.-F., Qin, D.-F., Cai, C.-F. (2009). “Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall runoff event analysis in the Three Gorges Area, China.” *Catena*, 77(1), 1-7. doi: 10.1016/j.catena.2008.11.006.
- Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., Großmann, K. (2012). “Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—An application for the city of Leipzig (Germany)”. *Ecological Indicators*, 18, 693–704.
- Sindicato da Habitação (SECOVI). (2016). Paranoá Parque, o primeiro empreendimento do Distrito Federal financiado pelo Minha Casa, Minha Vida. Disponível em <<http://www.secovi.com.br/nel/noticias/paranoa-parque-o-primeiro-empreendimento-do-distrito-federal-financiado-pelo-minha-casa-minha-vida/11485>>. Acesso em: 13 mai. 2017.
- Soares-Filho, B. S. (1998). *Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica*. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 299p.
- Soares-Filho, B.S., Cerqueira, G.C., Pennachin, C.L. (2002). “DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier”. *Ecological Modelling*, 154(3), 217-235.
- Soares-Filho, B.S., Cerqueira, G.C., Araújo, W.L., Voll, E. (2007). “Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular”. *Megadiversidade*, 3(1-2), 74-86.
- Soares-Filho, B.S., Rodrigues, H.O., Costa, W.L. (2009). *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO, Guidebook*. Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Disponível em: <<http://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:start>>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paolini, L. (2004). “Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5”. *Remote Sensing of Environment*, 90, 434–440.

- Soil Conservation Service (SCS). (1972). *National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology*. USDA.
- Soil Conservation Service (SCS). (1986). *Urban Hydrology of Small Watersheds*. USDA (Technical Release 55).
- Sousa, S.B. e Ferreira, L.G. (2012). “Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002 – 2011)”. *Revista Franco-Brasileira de Geografia*, (15).
- Steinke, V.A., Steinke, E.T., Saito, C.H. (2010). “Estimativa da temperatura de superfície em áreas urbanas em processo de consolidação: reflexões e experimento em Planaltina-DF”. *Revista Brasileira de Climatologia*, 6(6), 37-56.
- Tanaka, H. e Entani, T. (2007). “Interval estimations of global weights in AHP by upper Approximation”. *Fuzzy Sets and Systems*, 158(17), 1913-1921.
- Trentin, G. e Freitas, M.I.C. (2010). “Modelagem da dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP”. *Revista Brasileira de Cartografia*, (62), 291-305.
- Tricart, J. (1977). *Ecodinâmica*. Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ecodinamica.pdf>>. Acesso em: 13 mar 2016.
- Tucci, C.E.M. (2000). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2ª Ed. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: ABRH, Porto Alegre, RS, 943p.
- Turner, B.L., Meyer, W. B., Skole, D. (1994). “Global land-use/land cover change: Towards an integrate study”. *Ambio*, 23(1), 91-95.
- United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). (2004). “Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall”. In: \_\_\_\_\_. *National Engineering Handbook: Part 630, Hydrology*. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/>>. Acesso em: 02 mar. 2016.
- United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). (2009). “Chapter 7: Hydrologic Soil Groups”. In: \_\_\_\_\_. *National Engineering Handbook: Part 630, Hydrology*. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/>>. Acesso em: 03 mar. 2016.
- United State Geological Survey (USGS). (2016). “Earth Explorer”. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 21 set. 2016.

- United State Geological Survey (USGS). (2017). “Using the USGS Landsat 8 Product”. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>>. Acesso em: 19 mar. 2017.
- Vaeza, R.F., Oliveira Filho, P.C., Maia, A.G., Disperati, A.A. (2010). “Uso e ocupação do solo em bacia hidrográfica urbana a partir de imagens orbitais de alta resolução”. *Floresta e Ambiente*, 17(1), 23-29.
- Vieira, P.A., Ferreira, M.E., Ferreira, L.G. (2015). “Modelagem dinâmica da paisagem aplicada à análise da cobertura e uso do solo na bacia hidrográfica do Rio Vermelho, Estado de Goiás”. *Revista Brasileira de Cartografia*, (67/6), 1217-1230.
- Venturieri, A. e Santos, J.R. (1998). “Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal”. In: Assad. E.D.; Sano E.E. (eds.) *Sistemas de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura*. 2ª Ed., rev. e ampl. Embrapa - SPI, Brasília, DF, 351-371.
- Weng, Q. (2002). “Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modeling”. *Journal of Environmental Management*, 64(3), 273–284.
- Wolfram, S. (1983). “Estatistical mechanics of cellular automata”. *Reviews of Modern Physics*, 55(3), 601-944.
- Wu, Y., Li, S., Yu, S. (2016). “Monitoring urban expansion and its effects on land use and land cover changes in Guangzhou city, China”. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(54), 1-15. doi 10.1007/s10661-015-5069-2
- Zanella, M.E., Dantas, E.W.C., Olímpio, J.L.S. (2011). A vulnerabilidade natural e ambiental do município de Fortaleza/CE”. *Boletim Goiano de Geografia*, 31(2), 13-27.
- Zhan, X. e Huang, M.L. (2004). “ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps”. *Environmental Modelling & Software*, 19, 875-879.
- Zhang, J., Wang, Y., Wang, Z. (2007). “Change analysis of land surface temperature based on robust statistics in the estuarine area of Pearl River (China) from 1990 to 2000 by Landsat TM/ETM+ data”. *International Journal of Remote Sensing*, 28(10), 2383–2390.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A - CORRELAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA SIMULAÇÃO AMBIENTAL

As tabelas a seguir demonstram o resultado da análise de correlação, pelo Índice de Cramer, das variáveis estáticas e dinâmicas utilizadas na simulação da dinâmica ambiental para os testes T5, T6, T6\_inf e T6\_sup, respectivamente.

Tabela A.1 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T5

<b>Área urbanizada para Campo e solo exposto</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2104
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_2	0,1465
declividade/distance_to_2	0,0655	estradas/distance_to_3	0,1548
declividade/distance_to_3	0,0000	estradas/distance_to_4	0,0892
declividade/distance_to_4	0,0000	distance_to_2/distance_to_3	0,1298
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_2/distance_to_4	0,1656
drenagem/distance_to_2	0,1119	distance_to_3/distance_to_4	0,0000
drenagem/distance_to_3	0,1928		
<b>Área urbanizada para Corpo d'água</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2104
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_2	0,1456
declividade/distance_to_2	0,0546	estradas/distance_to_3	0,1471
declividade/distance_to_3	0,1334	estradas/distance_to_4	0,0889
declividade/distance_to_4	0,0000	distance_to_2/distance_to_3	0,1502
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_2/distance_to_4	0,1396
drenagem/distance_to_2	0,1134	distance_to_3/distance_to_4	0,1446
drenagem/distance_to_3	0,1933		
<b>Área urbanizada para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2106
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_2	0,1464
declividade/distance_to_2	0,0000	estradas/distance_to_3	0,1479
declividade/distance_to_3	0,0000	estradas/distance_to_4	0,0890
declividade/distance_to_4	0,1019	distance_to_2/distance_to_3	0,0000
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_2/distance_to_4	0,1629
drenagem/distance_to_2	0,1139	distance_to_3/distance_to_4	0,1267
drenagem/distance_to_3	0,1994		

<b>Campo e solo exposto para Área urbanizada</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2863
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1629
declividade/distance_to_1	0,0000	estradas/distance_to_3	0,2439
declividade/distance_to_3	0,0000	estradas/distance_to_4	0,0973
declividade/distance_to_4	0,0000	distance_to_1/distance_to_3	0,7029
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_4	0,0000
drenagem/distance_to_1	0,2118	distance_to_3/distance_to_4	0,0000
drenagem/distance_to_3	0,2207		

<b>Campo e solo exposto para Corpo d'água</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2949
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1631
declividade/distance_to_1	0,0000	estradas/distance_to_3	0,2309
declividade/distance_to_3	0,0000	estradas/distance_to_4	0,0979
declividade/distance_to_4	0,0000	distance_to_1/distance_to_3	0,0000
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_4	0,2308
drenagem/distance_to_1	0,2105	distance_to_3/distance_to_4	0,0000
drenagem/distance_to_3	0,2188		

<b>Campo e solo exposto para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2781
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1649
declividade/distance_to_1	0,0000	estradas/distance_to_3	0,2539
declividade/distance_to_3	0,0000	estradas/distance_to_4	0,0972
declividade/distance_to_4	0,0000	distance_to_1/distance_to_3	0,2045
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_4	0,0000
drenagem/distance_to_1	0,2113	distance_to_3/distance_to_4	0,0000
drenagem/distance_to_3	0,2240		

<b>Corpo d'água para Área urbanizada</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2658
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1450
declividade/distance_to_1	0,1031	estradas/distance_to_2	0,1596
declividade/distance_to_2	0,1096	estradas/distance_to_4	0,0832
declividade/distance_to_4	0,1397	distance_to_1/distance_to_2	0,1922
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_4	0,2319

drenagem/distance_to_1	0,1546	distance_to_2/distance_to_4	0,2280
drenagem/distance_to_2	0,1212		

**Corpo d'água para Campo e solo exposto**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2819
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1453
declividade/distance_to_1	0,0963	estradas/distance_to_2	0,1474
declividade/distance_to_2	0,0797	estradas/distance_to_4	0,0868
declividade/distance_to_4	0,0000	distance_to_1/distance_to_2	0,1499
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_4	0,1758
drenagem/distance_to_1	0,1542	distance_to_2/distance_to_4	0,1889
drenagem/distance_to_2	0,1070		

**Corpo d'água para Vegetação**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_4	0,2756
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1538
declividade/distance_to_1	0,1344	estradas/distance_to_2	0,1503
declividade/distance_to_2	0,0818	estradas/distance_to_4	0,0820
declividade/distance_to_4	0,1107	distance_to_1/distance_to_2	0,1713
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_4	0,2464
drenagem/distance_to_1	0,1522	distance_to_2/distance_to_4	0,1952
drenagem/distance_to_2	0,1083		

**Vegetação para Área urbanizada**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_3	0,1985
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1589
declividade/distance_to_1	0,0000	estradas/distance_to_2	0,1405
declividade/distance_to_2	0,0536	estradas/distance_to_3	0,2033
declividade/distance_to_3	0,0000	distance_to_1/distance_to_2	0,1078
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_3	0,0000
drenagem/distance_to_1	0,1592	distance_to_2/distance_to_3	0,1057
drenagem/distance_to_2	0,1095		

**Vegetação para Campo e solo exposto**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_3	0,2034
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1573
declividade/distance_to_1	0,0822	estradas/distance_to_2	0,1365
declividade/distance_to_2	0,0621	estradas/distance_to_3	0,2056

declividade/distance_to_3	0,0000	distance_to_1/distance_to_2	0,1238
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_3	0,1359
drenagem/distance_to_1	0,1588	distance_to_2/distance_to_3	0,1206
drenagem/distance_to_2	0,1075		

**Vegetação para Corpo d'água**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1595	drenagem/distance_to_3	0,1970
declividade/estradas	0,0796	estradas/distance_to_1	0,1559
declividade/distance_to_1	0,0844	estradas/distance_to_2	0,1384
declividade/distance_to_2	0,0000	estradas/distance_to_3	0,1957
declividade/distance_to_3	0,1186	distance_to_1/distance_to_2	0,1129
drenagem/estradas	0,1008	distance_to_1/distance_to_3	0,1574
drenagem/distance_to_1	0,1589	distance_to_2/distance_to_3	0,1246
drenagem/distance_to_2	0,1072		

Tabela A.2 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T6

**Área urbanizada para Campo e solo exposto**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1824	drenagem/distance_to_2	0,1447
declividade/estradas	0,2294	drenagem/distance_to_3	0,1238
declividade/distance_to_2	0,1243	estradas/distance_to_2	0,1748
declividade/distance_to_3	0,0678	estradas/distance_to_3	0,1316
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_2/distance_to_3	0,3636

**Área urbanizada para Vegetação**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1824	drenagem/distance_to_2	0,1141
declividade/estradas	0,2294	drenagem/distance_to_3	0,0920
declividade/distance_to_2	0,0549	estradas/distance_to_2	0,1390
declividade/distance_to_3	0,0825	estradas/distance_to_3	0,1006
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_2/distance_to_3	0,2654

**Campo e solo exposto para Área urbanizada**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1824	drenagem/distance_to_1	0,2088
declividade/estradas	0,2294	drenagem/distance_to_3	0,1195
declividade/distance_to_1	0,0960	estradas/distance_to_1	0,1684
declividade/distance_to_3	0,0884	estradas/distance_to_3	0,1295

drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_3	0,1471
<b>Campo e solo exposto para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1824	drenagem/distance_to_1	0,2092
declividade/estradas	0,2294	drenagem/distance_to_3	0,1102
declividade/distance_to_1	0,0875	estradas/distance_to_1	0,1751
declividade/distance_to_3	0,1223	estradas/distance_to_3	0,1197
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_3	0,2321
<b>Vegetação para Área urbanizada</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1824	drenagem/distance_to_1	0,2116
declividade/estradas	0,2294	drenagem/distance_to_2	0,1468
declividade/distance_to_1	0,0854	estradas/distance_to_1	0,1741
declividade/distance_to_2	0,0788	estradas/distance_to_2	0,1818
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_2	0,1740
<b>Vegetação para Campo e solo exposto</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1824	drenagem/distance_to_1	0,2064
declividade/estradas	0,2294	drenagem/distance_to_2	0,1474
declividade/distance_to_1	0,1089	estradas/distance_to_1	0,1700
declividade/distance_to_2	0,0788	estradas/distance_to_2	0,1785
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_2	0,1545

Tabela A.3 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T6\_inf

<b>Área urbanizada para Campo e solo exposto</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2444	drenagem/distance_to_2	0,2654
declividade/estradas	0,2575	drenagem/distance_to_3	0,1663
declividade/distance_to_2	0,2278	estradas/distance_to_2	0,1894
declividade/distance_to_3	0,0956	estradas/distance_to_3	0,1250
drenagem/estradas	0,2119	distance_to_2/distance_to_3	0,3888
<b>Área urbanizada para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2444	drenagem/distance_to_2	0,2083

declividade/estradas	0,2575	drenagem/distance_to_3	0,1701
declividade/distance_to_2	0,1235	estradas/distance_to_2	0,1523
declividade/distance_to_3	0,1945	estradas/distance_to_3	0,1249
drenagem/estradas	0,2119	distance_to_2/distance_to_3	0,3174

**Campo e solo exposto para Área urbanizada**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2444	drenagem/distance_to_1	0,1965
declividade/estradas	0,2575	drenagem/distance_to_3	0,1587
declividade/distance_to_1	0,1377	estradas/distance_to_1	0,1212
declividade/distance_to_3	0,1324	estradas/distance_to_3	0,1159
drenagem/estradas	0,2119	distance_to_1/distance_to_3	0,1338

**Campo e solo exposto para Vegetação**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2444	drenagem/distance_to_1	0,2779
declividade/estradas	0,2575	drenagem/distance_to_3	0,1850
declividade/distance_to_1	0,1319	estradas/distance_to_1	0,1669
declividade/distance_to_3	0,2156	estradas/distance_to_3	0,1318
drenagem/estradas	0,2119	distance_to_1/distance_to_3	0,2520

**Vegetação para Área urbanizada**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2444	drenagem/distance_to_1	0,2602
declividade/estradas	0,2575	drenagem/distance_to_2	0,2264
declividade/distance_to_1	0,1540	estradas/distance_to_1	0,1230
declividade/distance_to_2	0,1287	estradas/distance_to_2	0,1614
drenagem/estradas	0,2119	distance_to_1/distance_to_2	0,1470

**Vegetação para Campo e solo exposto**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2444	drenagem/distance_to_1	0,2868
declividade/estradas	0,2575	drenagem/distance_to_2	0,2228
declividade/distance_to_1	0,1505	estradas/distance_to_1	0,1642
declividade/distance_to_2	0,1307	estradas/distance_to_2	0,1609
drenagem/estradas	0,2119	distance_to_1/distance_to_2	0,1634

Tabela A.4 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer – T6\_sup

<b>Área urbanizada para Campo e solo exposto</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1907	drenagem/distance_to_2	0,1851
declividade/estradas	0,8578	drenagem/distance_to_3	0,1617
declividade/distance_to_2	0,0904	estradas/distance_to_2	0,2256
declividade/distance_to_3	0,1486	estradas/distance_to_3	0,1971
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_2/distance_to_3	0,3169
<b>Área urbanizada para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1907	drenagem/distance_to_2	0,1584
declividade/estradas	0,1858	drenagem/distance_to_3	0,1192
declividade/distance_to_2	0,0628	estradas/distance_to_2	0,2272
declividade/distance_to_3	0,0937	estradas/distance_to_3	0,1444
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_2/distance_to_3	0,2225
<b>Campo e solo exposto para Área urbanizada</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1907	drenagem/distance_to_1	0,2059
declividade/estradas	0,1858	drenagem/distance_to_3	0,1558
declividade/distance_to_1	0,0911	estradas/distance_to_1	0,1448
declividade/distance_to_3	0,1422	estradas/distance_to_3	0,1826
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_3	0,2290
<b>Campo e solo exposto para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1907	drenagem/distance_to_1	0,2618
declividade/estradas	0,1858	drenagem/distance_to_3	0,1383
declividade/distance_to_1	0,1241	estradas/distance_to_1	0,2962
declividade/distance_to_3	0,1786	estradas/distance_to_3	0,1180
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_3	0,2650
<b>Vegetação para Área urbanizada</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1907	drenagem/distance_to_1	0,2580
declividade/estradas	0,1858	drenagem/distance_to_2	0,1656
declividade/distance_to_1	0,1141	estradas/distance_to_1	0,2802
declividade/distance_to_2	0,0797	estradas/distance_to_2	0,5706
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_2	0,1566

<b>Vegetação para Campo e solo exposto</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,1907	drenagem/distance_to_1	0,2395
declividade/estradas	0,1858	drenagem/distance_to_2	0,2179
declividade/distance_to_1	0,1021	estradas/distance_to_1	0,2429
declividade/distance_to_2	0,1244	estradas/distance_to_2	0,4226
drenagem/estradas	0,1948	distance_to_1/distance_to_2	0,2769

## APÊNDICE B - CORRELAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA SIMULAÇÃO AMBIENTAL PARA BACIA DO CÓRREGO TAQUARI

Tabela B.5 – Correlação de variáveis pelo Índice de Cramer

<b>Área urbanizada para Campo e solo exposto</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2228	drenagem/distance_to_2	0,1039
declividade/estradas	0,1212	drenagem/distance_to_4	0,2799
declividade/distance_to_2	0,1998	estradas/distance_to_2	0,0875
declividade/distance_to_4	0,1241	estradas/distance_to_4	0,1046
drenagem/estradas	0,2032	distance_to_2/distance_to_4	0,3029
<b>Área urbanizada para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2228	drenagem/distance_to_2	0,1022
declividade/estradas	0,1212	drenagem/distance_to_4	0,2605
declividade/distance_to_2	0,2169	estradas/distance_to_2	0,0973
declividade/distance_to_4	0,2402	estradas/distance_to_4	0,1226
drenagem/estradas	0,2032	distance_to_2/distance_to_4	0,3419
<b>Campo e solo exposto para Área urbanizada</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2228	drenagem/distance_to_1	0,3723
declividade/estradas	0,1212	drenagem/distance_to_4	0,3870
declividade/distance_to_1	0,1192	estradas/distance_to_1	0,1701
declividade/distance_to_4	0,1151	estradas/distance_to_4	0,1479
drenagem/estradas	0,2032	distance_to_1/distance_to_4	0,2572
<b>Campo e solo exposto para Vegetação</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2228	drenagem/distance_to_1	0,3863
declividade/estradas	0,1212	drenagem/distance_to_4	0,4147
declividade/distance_to_1	0,0811	estradas/distance_to_1	0,1765
declividade/distance_to_4	0,1307	estradas/distance_to_4	0,1485
drenagem/estradas	0,2032	distance_to_1/distance_to_4	0,2711
<b>Vegetação para Área urbanizada</b>			
<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2228	drenagem/distance_to_1	0,2348

declividade/estradas	0,1212	drenagem/distance_to_2	0,1086
declividade/distance_to_1	0,1034	estradas/distance_to_1	0,1337
declividade/distance_to_2	0,1507	estradas/distance_to_2	0,1090
drenagem/estradas	0,2032	distance_to_1/distance_to_2	0,1561

**Vegetação para Campo e solo exposto**

<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>	<b>Comparação</b>	<b>Índice de Cramer</b>
declividade/drenagem	0,2228	drenagem/distance_to_1	0,2379
declividade/estradas	0,1212	drenagem/distance_to_2	0,1061
declividade/distance_to_1	0,0723	estradas/distance_to_1	0,1356
declividade/distance_to_2	0,1764	estradas/distance_to_2	0,1045
drenagem/estradas	0,2032	distance_to_1/distance_to_2	0,1834