

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

Juliana Tramontina

**MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA NA
ÁREA DE INFLUÊNCIA DA USINA HIDRELÉTRICA DONA
FRANCISCA - RS**

Santa Maria, RS, Brasil

2016

Juliana Tramontina

**MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA NA ÁREA DE
INFLUÊNCIA DA USINA HIDRELÉTRICA DONA FRANCISCA - RS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira

Santa Maria, RS, Brasil

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo (a) autor (a).

Tramontina, Juliana
Modelagem Dinâmica do Uso e Cobertura da Terra na Área de
Influência da Usina Hidrelétrica Dona Francisca - RS
/ Juliana Tramontina.-2016.
148 p.; 30cm

Orientador: Rudiney Soares Pereira
Coorientador: Frederico Dimas Fleig
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2016

1. Landsat 2. Pesos de Evidência 3. Sensoriamento
Remoto 4. Dinamica EGO I. Soares Pereira, Rudiney II.
Dimas Fleig, Frederico III. Título.

© 2016

Todos os direitos reservados a Juliana Tramontina. A reprodução de parte ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço eletrônico: ju_tramontina@hotmail.com; tramontina.ju@gmail.com

Juliana Tramontina

**MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO TERRA NA ÁREA DE
INFLUÊNCIA DA USINA HIDRELÉTRICA DONA FRANCISCA - RS**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Aprovada em 29 de fevereiro de 2016:

Rudiney Soares Pereira, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ana Caroline Paim Benedetti, Dra. (UFSM)

Dejanira Luderitz Saldanha, Dra. (UFRGS)

Santa Maria, RS

2016

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me guiou nos momentos de maior dificuldade, clareando meus pensamentos e iluminando meu caminho.

À Universidade Federal de Santa Maria, que através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, possibilitou que esse sonho se concretizasse, disponibilizando toda estrutura física e docente necessária.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, através da concessão de bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Rudiney Soares Pereira pela confiança e orientação deste trabalho.

À toda minha família, agradeço pelo amor incondicional, por não me deixarem desistir nem fraquejar, e por compreenderem minha ausência, apesar da saudade. Aos meus irmãos Ricardo e Jean, por compartilharem comigo as melhores lembranças, estarem sempre ao meu lado, pelo amor e carinho. À minha vó Julia, que mesmo sem entender o porquê de “estudar tanto”, como ela mesma diz, por me apoiar e acreditar nos meus objetivos e sonhos. Os meus maiores e mais profundos agradecimentos são destinados a meus pais, pelo constante apoio dispensados ao longo da minha vida acadêmica, pelos sacrifícios que fizeram para que eu chegasse até aqui, saibam que o esforço de vocês não foi em vão. Amo vocês.

Ao Fabrício Herpich, pelo carinho e amizade, por toda a paciência e compreensão, e principalmente por todo o amor.

Aos queridos colegas e amigos do Labsere, Elisiane Alba, Eliziane Mello, Juliana Marchesan, Letícia Pedrali, Cristina Tabarelli e Tiago Luís Badin pelo convívio, amizade e ajuda mútua! Ao amigo e colega Emanuel Araújo Silva especialmente, pelos ensinamentos e auxílio com o Dinamica EGO.

Aos amigos que trouxe da vida e da graduação, e que levarei para sempre em meu coração, Fernanda Martins, Jéssica Tomasi, Jaqueline Valérius, Letícia Chechi, Jesica Tres, Michele Tibolla, Melissa Coinaski, Marília Marcolin e Bruna Raimondi. Aos que conquistei durante a pós-graduação, PEG e Técnico... a todos, muito obrigada pelo apoio e carinho, pelas palavras de incentivo e parceria. Vocês foram essenciais.

Finalmente, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

*Os que ignoram as condições geográficas –
montanhas e florestas – desfiladeiros perigosos,
pântanos e lamaçais – não podem conduzir a
marcha de um exército.*

(Sun Tzu)

RESUMO

MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DO TERRA NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA USINA HIDRELÉTRICA DONA FRANCISCA - RS

AUTORA: Juliana Tramontina
ORIENTADOR: Rudiney Soares Pereira

O entendimento das alterações do uso e cobertura da terra, na área de influência da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, requer aplicações metodológicas que permitam não apenas mapear, mas também analisar os padrões espaciais gerados por essas mudanças e simular cenários futuros confiáveis que possam ser aplicáveis em nível local, para o planejamento e análises decisórias. A partir dessa perspectiva, este trabalho teve por objetivo efetuar a modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra, da área de influência da Usina Hidrelétrica Dona Francisca e, com base nesse modelo, efetuar projeção de cenários futuros. A metodologia consistiu no mapeamento temático de variáveis estáticas representadas por atributos econômicos, sociais e da paisagem e, mapeamento do uso e cobertura da terra para os anos 1992, 2003 e 2013, a partir de imagens Landsat 5 e 8, sensores TM e OLI. Os mapas elaborados foram utilizados como dados de entrada de um modelo dinâmico de simulação baseado em Autômatos Celulares, o qual foi executado na plataforma modeladora Dinamica EGO. Simulações de cenários anuais até 2023 foram gerados, concebidos pelo método probabilístico de Pesos de Evidência. Os resultados demonstraram a predominância das classes floresta e agropecuária, revelando aumento gradativo das mesmas ao longo do período considerado. Nos processos de transições, a agropecuária influenciou, tanto na redução quanto na expansão florestal. A classe solo exposto influenciou o aumento da agropecuária. Enquanto que, a redução da agropecuária foi influenciada pelo solo exposto e floresta. A U.H.E Dona Francisca contribuiu para a manutenção das áreas florestais e agropecuárias, visto que essas apresentaram taxas de redução inferiores após sua instalação. A construção e execução do modelo dinâmico de uso e cobertura da terra para o período de 2003 a 2013, permitiu obtenção de mapa simulado para o ano 2013, com similaridade *fuzzy* entre 0,55 a 0,88. Os cenários simulados obedeceram a tendência observada no período considerado para a modelagem. Logo, se mantidas as mesmas condições, as classes floresta e agropecuária serão continuamente expandidas até o ano 2023. As classes solo exposto e água, diferentemente, apresentarão gradativa redução, porém, em menores proporções.

Palavras-chave: Landsat. Pesos de Evidência. Sensoriamento Remoto. Dinamica EGO.

ABSTRACT

MODELING DYNAMICS OF LAND COVER AND USE IN INFLUENCE AREA OF DONA FRANCISCA HYDROELECTRIC POWER PLANT

AUTHOR: Juliana Tramontina
ADVISOR: Rudiney Soares Pereira

The understanding of changes in land cover and use in influence area of Dona Francisca Hydroelectric Power Plant requires methodological applications that allow not just to map, but also to analyze the spatial patterns generated by these changes and simulate reliable future scenarios that can be applied at local level, for planning and decision analysis. From this perspective, this study aimed to make the modeling of the dynamics of land cover and use in influence area of Dona Francisca Hydroelectric Power Plant and, based on that model, make projections for future scenarios. The methodology consists in thematic mapping static variables represented by economic, social and landscape attributes, mapping land cover and use for the years 1992, 2003 and 2013 from Landsat images 5 and 8, TM and OLI sensors. The developed maps were used as input data of a dynamic simulation model based on cellular automata, which was performed in the Dinamica EGO modeling platform. Annual scenarios simulations until 2023 were generated, designed by probabilistic method of Evidence weights. The results demonstrated the predominance of forest and farming classes, showing a gradual increase of these over the considered period. In the transition process, farming influenced both reduction and forestry expansion. The U.H.E Dona Francisca contributed to the maintenance of forest and farming areas, as these had lower reduction rates after installation. Just the same, forestry and farming reductions were lower after the installation of the plant. The construction and implementation of the dynamic model of land cover and use for the period of 2003-2013 allowed to obtain a simulated map for year 2013, with *fuzzy* similarity between 0,55 to 0,88. The simulated scenarios obeyed the observed tendency during the considered period for modeling. Therefore, if conditions are maintained, forest and farming classes will be continually expanded until the year 2023. The exposed soil and water classes, in contrast, will present gradual reduction, however, in smaller proportions.

Keywords: Landsat. Evidence Weights. Remote Sensing. Dinamica EGO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil topográfico do alto curso Jacuí	19
Figura 2 – Espaços geográficos	39
Figura 3 – Método de similaridade fuzzy usando mapa de diferenças e função de decaimento exponencial	58
Figura 4 – Mapa de localização da área de influência da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, Rio Grande do Sul, Brasil.....	61
Figura 5 – Evolução populacional dos municípios de influência da U.H.E Dona Francisca	63
Figura 6 – Usina Hidrelétrica Dona Francisca - RS, Brasil.....	65
Figura 7 – Procedimentos metodológicos	68
Figura 8 – Representação das variáveis estáticas selecionadas para elaboração dos mapas temáticos, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS.....	74
Figura 9 – Estrutura para o cálculo das matrizes de transição no <i>software</i> Dinamica EGO.....	79
Figura 10 – Estrutura para discretização das faixas de distâncias das variáveis contínuas no <i>software</i> Dinamica EGO.....	80
Figura 11 – Estrutura para a determinação de Pesos de Evidência no <i>software</i> Dinamica EGO	81
Figura 12 – Estrutura para o cálculo dos índices de correlação Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) no <i>software</i> Dinamica EGO ...	82
Figura 13 – Estrutura do modelo de simulação dos mapas de uso e cobertura da terra no <i>software</i> Dinamica EGO	84
Figura 14 – Estrutura para obtenção dos mapas de diferença e índices de similaridade <i>Fuzzy</i> no <i>software</i> Dinamica EGO.....	85
Figura 15 – Mapa de uso e cobertura da terra no ano 1992, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil	90
Figura 16 – Mapa de uso e cobertura da terra no ano 2003, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil	91
Figura 17 – Mapa de uso e cobertura da terra no ano 2013, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil	92
Figura 18 – Mapa da evolução da cobertura florestal ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 1992 a 2003.....	99
Figura 19 – Mapa da evolução da cobertura florestal ocorrida na área de influência da U. H. E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 2003 a 2013 ..	100
Figura 20 – Mapa da evolução agropecuária ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 1992 a 2003	102
Figura 21 – Mapa da evolução agropecuária ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 2003 a 2013	103
Figura 22 – Mapa simulado do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, para o ano 2013	113
Figura 23 – Comparação entre o mapa simulado e real do ano 2013.....	116
Figura 24 – Mapa de similaridade <i>fuzzy</i> , baseado na função de decaimento constante, janela 11x11	117
Figura 25 – Mapas de uso e cobertura da terra simulados para o período de 2014 a 2023, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil	119
Figura 26 – Variação de área por classe de uso e cobertura para o período simulado (2014-2023)	120

Figura 27 – Mapa de uso e cobertura da terra simulado para o ano 2023, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil.....	121
Figura 28 – Variação de área por classe de uso e cobertura entre os anos 1992 a 2023	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5.....	28
Tabela 2 – Características dos sensores OLI e TIRS a bordo do satélite Landsat 8	29
Tabela 3 – Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente <i>Kappa</i>	33
Tabela 4 – Principais características dos modelos.....	41
Tabela 5 – Dados socioeconômicos dos municípios da área de estudo	62
Tabela 6 – Especificações das cenas obtidas e que recobrem a área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil.....	70
Tabela 7 – Padrões das classes de uso e cobertura e suas representações temáticas.....	72
Tabela 8 – Classes de declividade segundo classificação da EMBRAPA	76
Tabela 9 – Parâmetros que constituíram o modelo de simulação de uso e cobertura da terra para o período de 2003 a 2013	84
Tabela 10 – Matriz de confusão e índice <i>Kappa</i> obtidos para a classificação do ano 1992, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil	87
Tabela 11 – Matriz de confusão e índice <i>Kappa</i> obtidos para a classificação do ano 2003, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil	88
Tabela 12 – Matriz de confusão e índice <i>Kappa</i> obtidos para a classificação do ano 2013, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil	88
Tabela 13 – Quantificação das classes de uso e cobertura da terra mapeadas na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, em hectares e porcentagem, nos anos de 1992, 2003 e 2013	94
Tabela 14 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 1992 e 2003, valores em hectare (ha).....	96
Tabela 15 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 1992 e 2003, em valores percentuais (%)	96
Tabela 16 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2003 a 2013, valores em hectare (ha)	97
Tabela 17 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra na área de influência da U.H.E. Dona Francisca para os anos 2003 a 2013, em valores percentuais (%)	97
Tabela 18 – Evolução da cobertura florestal ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, nos períodos de 1992 a 2003 e 2003 a 2013.....	101
Tabela 19 – Evolução agropecuária ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, nos períodos de 1992 a 2003 e 2003 a 2013	104
Tabela 20 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2003 e 2013	105
Tabela 21 – Matriz de transição múltipla do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2003 e 2013	105
Tabela 22– Valores dos índices de Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) obtidos para as variáveis consideradas na modelagem	106
Tabela 23 – Variáveis com Pesos de Evidência mais favoráveis para cada transição	

.....	108
Tabela 24 – Índices de similaridade <i>fuzzy</i> calculados através das funções de decaimento exponencial e constante para diferentes janelas de resoluções.....	114
Tabela 25 – Matriz de transição do uso e cobertura da terra na área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2013 e 2023, valores em percentagem (%).....	122
Tabela 26 – Expansão e redução de área, em hectare, por classe de uso e cobertura entre os anos 1992 a 2023.....	123

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	33
Equação 2	45
Equação 3	45
Equação 4	45
Equação 5	45
Equação 6	46
Equação 7	46
Equação 8	46
Equação 9	46
Equação 10	46
Equação 11	47
Equação 12	47
Equação 13	47
Equação 14	48
Equação 15	48
Equação 16	48
Equação 17	48
Equação 18	48
Equação 19	48
Equação 20	49
Equação 21	49
Equação 22	49
Equação 23	50
Equação 24	55
Equação 25	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Geral	17
1.1.2	Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	A USINA HIDRELÉTRICA DONA FRANCISCA	19
2.2	ANÁLISE ESPACIAL DO USO E COBERTURA DA TERRA	21
2.3	SENSORIAMENTO REMOTO	23
2.3.1	Aquisição de dados de sensoriamento remoto	25
2.3.1.1	<i>O Satélite Landsat</i>	27
2.3.2	Processamento digital de imagens	30
2.4	GEOPROCESSAMENTO E SIG	34
2.5	MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL	37
2.5.1	Espaço	38
2.5.2	Tempo	39
2.5.3	Modelos	40
2.5.4	Modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra	42
2.5.4.1	<i>Autômatos Celulares</i>	43
2.5.4.2	<i>Pesos de Evidência</i>	44
2.5.4.3	<i>Cadeia de Markov</i>	49
2.5.5	Plataforma Modeladora Dinamica EGO	51
2.5.5.1	<i>Parametrização</i>	52
2.5.5.2	<i>Calibração</i>	54
2.5.5.3	<i>Simulação</i>	56
2.5.5.4	<i>Validação do modelo</i>	56
2.5.5.5	<i>Simulação de cenários</i>	59
2.5.5.6	<i>Aplicações</i>	59
3	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	61
3.1.1	Localização	61
3.1.2	Aspectos físicos e socioeconômicos	62
3.1.3	Clima	63
3.1.4	Hidrografia	64
3.1.5	Geomorfologia e Geologia	64
3.1.6	Solos	65
3.1.7	Vegetação	66
3.2	MATERIAIS	66
3.3	MÉTODOS	67
3.3.1	Elaboração do banco de dados espacial	68
3.3.2	Processamento das imagens	69
3.3.3	Mapeamento temático de uso e cobertura da terra	71
3.3.4	Mapeamento temático da evolução florestal e da evolução agropecuária	72
3.3.5	Mapeamento temático das variáveis estáticas	73
3.3.5.1	<i>Hidrografia e sistema viário</i>	74
3.3.5.2	<i>Localização dos centros Urbanos</i>	74
3.3.5.3	<i>Bacias hidrográficas</i>	75

3.3.5.4	<i>Declividade e Hipsometria</i>	75
3.3.5.5	<i>Geologia e solos</i>	76
3.3.5.6	<i>Mapas demográficos, socioeconômicos e agropecuários</i>	76
3.3.6	Modelagem do uso e cobertura da terra	77
3.3.6.1	<i>Parametrização do modelo</i>	78
3.3.6.2	<i>Calibração do modelo</i>	81
3.3.6.3	<i>Simulação do modelo</i>	83
3.3.6.4	<i>Validação do modelo</i>	85
3.3.6.5	<i>Simulação dos cenários futuros</i>	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1	MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA	87
4.2	ANÁLISE DA EVOLUÇÃO FLORESTAL E DA EVOLUÇÃO AGROPECUÁRIA	98
4.3	MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA	104
4.3.1	Parametrização e Calibração do modelo	105
4.3.2	Simulação do modelo	112
4.3.3	Validação do modelo de simulação	114
4.3.4	Simulações de cenários futuros	118
5	CONCLUSÃO	125
	REFERÊNCIAS	129
	APÊNDICE A – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE HIDROGRAFIA E SISTEMA VIÁRIO	141
	APÊNDICE B – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE LOCALIZAÇÃO DOS CENTROS URBANOS E DECLIVIDADE	142
	APÊNDICE C – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE HIPSOMETRIA E BACIAS HIDROGRÁFICAS	143
	APÊNDICE D – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE GEOLOGIA E SOLOS	144
	APÊNDICE E – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE DENSIDADE DEMOGRÁFICA E POPULAÇÃO URBANA	145
	APÊNDICE F – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE POPULAÇÃO RURAL E PRODUÇÃO AGRÍCOLA	146
	APÊNDICE G – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE PIB E IDH	147
	APÊNDICE H – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE BOVINOCULTURA E OVINOCULTURA	148

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir de recursos hídricos é privilégio de poucos países. As condições geográficas, extensão de territórios e principalmente disponibilidade de mananciais, colocam o Brasil em destaque como o segundo país em capacidade instalada e em geração hidrelétrica no mundo, perdendo apenas para a China, é o que demonstra o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2014).

No Brasil, as instalações de usinas hidrelétricas tiveram início a partir do século XIX, após a Segunda Guerra Mundial, alcançando grande desenvolvimento já no século XX (CORAZZA, 2010; SOARES et al., 2007). A demanda por energia mediante ao desenvolvimento industrial e socioeconômico, impulsionou a produção de energia hidrelétrica, sendo esta na atualidade a principal fonte, responsável por 70% do total da energia produzida no país (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2014).

A região Sul, representado pelos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, é a segunda maior região em produção de energia elétrica. Nesse contexto, o Rio Grande do Sul ganha destaque devido ao elevado número de usinas hidrelétricas em funcionamento. Tal representatividade se dá por ser um dos estados brasileiros com maior disponibilidade de águas superficiais, drenado por uma densa malha hidrográfica superficial (SEPLAN, 2013).

No Rio Grande do Sul, os principais rios responsáveis pela energia hidrelétrica produzida no estado são os rios Uruguai e Jacuí (CAPELETTO e MOURA, 2014). Sendo que, o principal potencial hidrelétrico se encontra no Rio Jacuí, onde está instalado o complexo hidrelétrico composto por cinco principais usinas. O complexo teve início com a inauguração do Usina de Ernestina, em 1957, e a mais recente Dona Francisca, inaugurada em 2001 (MAGNOLI et al., 2001).

Para Sánchez (2006), os empreendimentos hidrelétricos são viáveis mediante a algumas vantagens em relação a outras fontes de energia, destacando: a energia hidrelétrica combina rentabilidade e durabilidade; usa o mesmo recurso natural que pode ser reutilizado sem gerar poluição, e emitem menos gases poluentes, se comparada com a emissão gerada por outras matrizes energéticas, como o carvão ou energia nuclear.

Entretanto, as usinas hidrelétricas, dentre os usos múltiplos das águas, constituem importantes impactos ambientais quantitativos e qualitativos, tanto no

ecossistema aquático, quanto terrestre (TUNDISI, 2006). Para Prates e Lima (2011), um empreendimento não basta ser viável economicamente, ele deve equilibrar o uso de recursos naturais e aspectos sociais.

Implantadas com a proposta de realizar o manejo de recurso hídricos para benefício da população e desenvolvimento regional, muitas usinas hidrelétricas são implantadas sem um diagnóstico adequado acerca da organização espacial e planejamento de estados futuros. Ou seja, sem conhecimento das condições regionais, magnitude das alterações e a capacidade de resiliência socioeconômica local (CHRISTOFOLETTI, 1999). Este é o caso da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, localizada na região central do Rio Grande do Sul, que carece de estudos voltados a compreender as alterações no uso e cobertura da terra, em especial aos estudos que utilizam o sensoriamento remoto como recurso.

Tendo em vista essa problemática, dentre as técnicas que dão suporte aos estudos sobre as reações que ocorrem no âmbito ambiental, econômico e social, destaca-se a modelagem. A modelagem dinâmica, permite alimentar modelos matemáticos, com informações obtidas em campo ou através do sensoriamento remoto, incorporados a sistemas de informações geográficas. Mostrando-se uma técnica de aplicação direta para avaliação e gerenciamento, mediante a utilização de modelos para estudos dos efeitos que se desenvolvem no domínio dos usos e coberturas da terra (CHRISTOFOLETTI, 1999).

A modelagem de cenários visando a análise dos impactos ligados a construção de usinas hidrelétrica é um desafio, considerando que em escala regional as transformações geradas pelas inundações decorrentes de grandes reservatórios de água trazem consequências importantes em termos de mudanças do uso e cobertura da terra.

Desse modo, é preciso reforçar os estudos que envolvem a influência de usinas hidrelétricas na dinâmica dos usos e coberturas da terra. Não apenas para indicar as vantagens ou desvantagens desses empreendimentos, não sendo este o objetivo deste trabalho, mas também para compreender quais variáveis ambientais, culturais e, econômicas contribuem para explicar as alterações? Como ocorrem essas alterações? Onde ocorrem? Influenciadas por quais fatores?

Para esclarecer e entender essas e outras questões, análises acerca de mudanças de uso e cobertura são fundamentais ao desenvolvimento de cenários que visem à sustentabilidade local e regional. Não há outra forma de medir as

mudanças a longo prazo, se não, a partir das mudanças ocorridas, extrapolar para outras escalas temporais.

Sendo assim, este estudo justifica-se em razão da necessidade de se obter essas informações e para subsidiar o planejamento socioeconômico e ambiental dessas áreas afetadas por esses empreendimentos, além de contribuir sobre o processo decisório de utilização dos recursos naturais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa constitui-se na modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra, da área de influência da Usina Hidrelétrica Dona Francisca e, com base nesse modelo, efetuar projeção de cenários futuros.

1.1.2 Específicos

- Avaliar o comportamento do uso e cobertura da terra na área de estudo e quantificá-los tendo como base imagens dos satélites Landsat, sensores TM e OLI dos anos 1992, 2003 e 2013, para comparar o uso e cobertura antes e após a construção da Usina Hidrelétrica Dona Francisca.
- Analisar e quantificar a evolução florestal e a evolução agropecuária através dos processos de manutenção, expansão e redução.
- Executar e validar um modelo dinâmico de uso e cobertura da terra para o período de 2003 a 2013.
- Avaliar de que forma, fatores como hidrografia, sistema viário, declividade, hipsometria, geologia, solos, bacia hidrográfica, índices demográficos, socioeconômicos e agropecuários, contribuem para a dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra na área de estudo.

- Com base no modelo dinâmico gerado, fazer a projeção de simulações futuras do uso e cobertura da terra para o ano 2023.

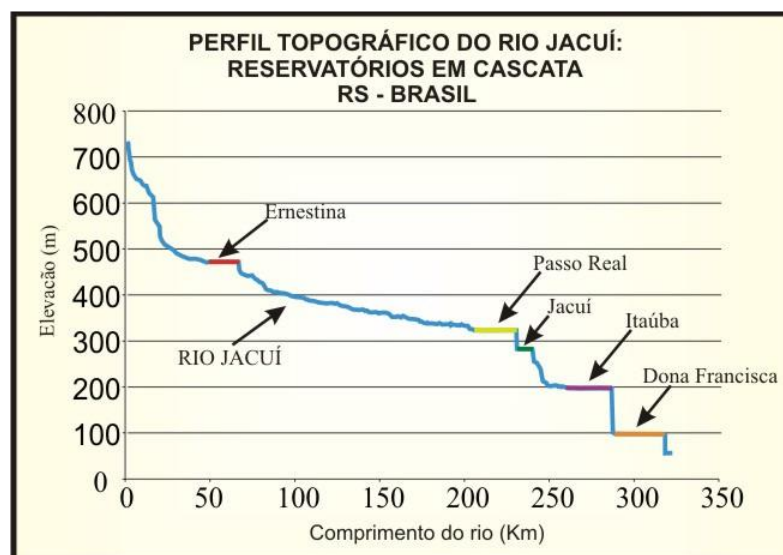
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão apresentados nesta seção, as principais informações e conceitos teóricos que fornecem sustentação ao desenvolvimento deste trabalho. Para tanto, a fundamentação teórica é direcionada inicialmente à contextualização acerca da U.H.E Dona Francisca; seguido do resgate de conceitos referentes à análise espacial do uso e cobertura da terra; fundamentos de sensoriamento remoto, geoprocessamento e SIG. Por fim, enfatizam-se aspectos concernentes a modelagem dinâmica espacial, dando ênfase a plataforma Dinamica EGO.

2.1 A USINA HIDRELÉTRICA DONA FRANCISCA

A U.H.E Dona Francisca faz parte do conjunto de empreendimentos que produzem energia elétrica para estado do Rio Grande do Sul. Está situada no rio Jacuí, entre os municípios de Agudo e Nova Palma, região central do estado do Rio Grande do Sul (ALVES et al., 2000; BLESSMANN e BIEDACHA, 2001) e, integra o conjunto de usinas da Bacia hidrográfica Rio Jacuí. No total são cinco usinas (Ernestina, Passo Real, Jacuí e Itaúba), sendo a Dona Francisca, a mais recente implantada e a última no sentido nascente-foz (ALVES et al., 2000; CORAZZA, 2010; KRAMER, 2009), como visto no perfil topográfico do curso Jacuí da Figura 1.

Figura 1 – Perfil topográfico do alto curso Jacuí



Fonte: KRAMER (2009, p. 20).

O início da concessão para a construção da U.H.E Dona Francisca ocorreu em 1970. Contudo, devido a problemas orçamentários, as obras de construção da U.H.E começaram apenas em 1998 (ALVES et al., 2000), após a aprovação do projeto Básico Ambiental, em 1992, sendo inaugurada oficialmente em maio de 2001 (BLESSMANN e BIEDACHA, 2001).

A usina foi construída pelo Consórcio formado pela CEEE e DFESA (Dona Francisca Energética S.A.) e atingiu seis municípios: Agudo, Ibarama, Arroio do Tigre, Estrela Velha, Pinhal Grande e Nova Palma (ALVES et al., 2000). Considerada como hidrelétrica de médio porte, possui potência instalada de 125 MW (BLESSMANN e BIEDACHA, 2001), com capacidade que permite abastecer uma cidade de 350 mil habitantes (CORAZZA, 2010).

O empreendimento em questão atingiu mais de 518 propriedades rurais e 540 famílias de pequenos produtores rurais, contabilizando um total de 2.709 pessoas diretamente atingidas (BLESSMANN e BIEDACHA, 2001; CORAZZA, 2014). Atualmente, atende uma população aproximada de 12 mil habitantes e gera 1.300 empregos diretos (INSTITUTO OBSERVATÓRIO SOCIAL, 2004).

A região na qual a U.H.E Dona Francisca está instalada foi colonizada inicialmente por imigrantes italianos e alemães, os quais desenvolveram a agricultura familiar em pequenas propriedades (ALVES et al., 2000). Essa região, até então era praticamente desabitada e desprezada pelos criadores de gado, por ser uma região de banhados, matas fechadas e montanhas. Sendo assim, a colonização destes imigrantes proporcionou alterações na paisagem, com implantação de novas culturas agrícolas, novas formas de manejo de solo e planta, além de novas formas de organizações sociais (FROËHLICH et al., 2007).

O rio Jacuí ocupava neste contexto, papel importante para acesso ao sul do estado pelos imigrantes, que por vezes, ao encontrar em suas margens, áreas planas e propícias ao desenvolvimento da agricultura, ali se instalavam (CORAZZA, 2010). Somente a partir da década de 60 o Rio Jacuí passou a ser aproveitado para a geração de energia elétrica, com a implantação da primeira usina, denominada U.H.E do Jacuí, conhecida atualmente por U.H.E Leonel Brizola.

Tais alterações, seja as ocasionadas pela colonização, seja devido a implantação de grandes empreendimentos, trouxeram mudanças na paisagem no que se refere ao uso e cobertura da terra. Entretanto, pouco se sabe acerca desta dinâmica, como é o caso da instalação da U.H.E Dona Francisca.

Dentre os trabalhos realizados na U.H.E. Dona Francisca envolvendo estudos de uso e cobertura da terra pode-se citar: Mapeamento do uso da terra por compartimento geomorfológico da sub-bacia da barragem Dona Francisca - RS com imagens multiespectrais TM do Landsat 5 (FRIEDRICH, 1993); Organização do espaço e conflitos ambientais no entorno do reservatório da UHE Dona Francisca – RS (FARENZENA e PEREIRA FILHO, 2006); Caracterização física da área de captação do reservatório Dona Francisca – RS (PRADO et al., 2013); Comparação do uso da terra no entorno dos reservatórios das U.H.Es Passo Real e Dona Francisca – RS (SILVEIRA e PEREIRA FILHO, 2014).

Outros estudos envolvendo limnologia e qualidade da água do lago da U.H.E Dona Francisca, não são raros e podem ser vistos em Corazza (2010), Pereira Filho et al. (2009), Prates e Luca (2000), Rodrigues (2002), Rodrigues et al. (2012), Strassburguer e Pereira Filho (2003). Da mesma forma, estudos voltados aos impactos ambientais à fauna aquática e terrestre, foram desenvolvidos por Neri et al. (2005) e Neri (2009).

No âmbito social, Leão et al. (2001), Prates (2011), Prates e Lima (2011) e Soares et al. (2007) dedicaram-se a avaliar os impactos socioambientais e apresentar experiências com a implantação de programas socioambientais na área da implantação da U.H.E Dona Francisca.

Contudo, os trabalhos voltados a compreender as alterações dos usos e coberturas da terra a partir da análise espacial são restritos e, inexistem estudos envolvendo a modelagem dinâmica, em especial aos que utilizam o sensoriamento remoto como recurso.

2.2 ANÁLISE ESPACIAL DO USO E COBERTURA DA TERRA

Análise espacial denota “mensuração de propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo” (DRUCK et al., 2004). O termo uso e cobertura da terra refere-se ao modo como a terra é usada e quais os materiais encontrados sobre a superfície terrestre (JENSEN, 2009).

Briassoulis (2000) chama a atenção para a distinção dos termos uso da terra e cobertura da terra. Muitas vezes usados como sinônimo, referem-se a condições distintas. Sendo a terra, local onde toda a atividade humana é conduzida, o termo uso da terra, refere-se ao uso humano dos recursos, e a finalidade a que serve. Seja

para produção de alimentos, abrigo, recreação, extração ou processamento de materiais. Já cobertura da terra, indica o estado físico da superfície da terra, se há florestas, cultivos, ocupação humana, água, etc. (BRIASSOULIS, 2000; LAMBIN et al., 2001).

Para Araújo Filho et al. (2007), cobertura da terra está associada aos tipos de coberturas (natural ou artificial), sendo o que de fato as imagens de sensoriamento remoto são capazes de registrar. Enquanto o uso da terra refere-se as associações de usos realizadas pelo interprete ao analisar informações como textura, forma, reflectância, estruturas e padrões da cobertura da terra.

O que é consenso em relação a esses conceitos é de que o conhecimento dos padrões de uso e cobertura da terra permitem a compreensão do processo de mudança da superfície terrestre, proporcionando melhor gestão dos recursos naturais (BRIASSOULIS, 2000; LAMBIN et al. 2001).

As mudanças dos usos e coberturas da terra são consideradas respostas mensuráveis a ampla gama de fatores espacialmente variáveis (LONGLEY et al., 2013). Segundo Briassoulis (2000), os usos e coberturas da terra são moldados sob a influência de dois grandes conjuntos de forças - as necessidades humanas e as características ambientais e processos. Essas mudanças, quando agregadas em nível mundial, afetam significativamente os aspectos-chave do funcionamento do sistema terrestre (LAMBIN et al., 2001).

Briassoulis (2000) destaca, que embora sejam principalmente os impactos negativos que motivam o interesse pelo entendimento dos processos de mudança no uso e cobertura da terra, nem sempre as mudanças são negativas, especialmente se consideradas a escala temporal e espacial de observação do evento e suas consequências, e a possibilidade de adoção de medidas mitigadoras.

Tais medidas mitigadoras podem ser desenvolvidas a partir de estudos da dinâmica de uso e cobertura da terra, as quais destinam-se a analisar os padrões espaço temporais, relacionando-os com processos socioeconômicos e ambientais, ao longo do tempo (INPE, 2011). Para tanto, são empregados mapas que representam a espacialização dos usos e coberturas da terra.

Os mapas referentes ao uso e cobertura da terra são instrumentos que auxiliam na obtenção de informações detalhadas e precisas sobre o espaço geográfico, constituindo-se em mecanismos adequados para promover o desenvolvimento sustentável do ponto de vista ambiental, e imprescindíveis para o

planejamento regional ou local do terreno (ARAÚJO FILHO et al., 2007).

A geração dos mapas podem ser através de dados obtidos em campo ou a partir da interpretação e processamento de dados do sensoriamento remoto. Atualmente, existem modos eficientes de monitoramento de mudanças de uso e cobertura da terra através do sensoriamento remoto orbital, permitindo realizar atualizações frequentes das alterações, incluindo áreas críticas e de grandes extensões (LONGLEY et al., 2013). As análises espaço-temporal de imagens de satélites, como exemplo da aplicação do sensoriamento orbital, possibilitam ainda, a comparação do imageamento histórico com um mais atual e, desta forma, viabilizam a identificação das mudanças no período.

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO

Em uma escala evolutiva intensa, e ao mesmo tempo em um período de tempo curto, o planeta Terra passou a ser olhado e analisado por milhares de sensores imageadores, que capturam tudo que está sobre a superfície terrestre bem como suas modificações. Os principais objetivos dessa ferramenta, Sensoriamento Remoto, é a obtenção de sucessivas imagens bem como a extração das informações contidas nestas, a fim de permitir o monitoramento em uma escala global do meio ambiente e seus recursos naturais e não naturais (MENESES, 2012). Permitindo ainda, medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas na Terra (JENSEN, 2009).

A definição de sensoriamento remoto apresenta divergências e convergências sob o ponto de vista de diferentes autores (NOVO, 2010). Os conceitos foram sendo aprimorados e atualizados à medida que o sensoriamento remoto passou a ser melhor compreendido e aplicado. De forma bastante ampla, Elachi (1987) definiu o sensoriamento remoto como aquisição de informação sobre um objeto sem que se entre em contato com ele. Florenzano (2002) complementa afirmando que o sensoriamento remoto é a tecnologia para obtenção de imagens e outros dados da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície, sem o contato físico entre sensor e a superfície terrestre.

Jensen (2009) conceitua o Sensoriamento Remoto como uma tecnologia capaz de registrar informações entre a radiação eletromagnética e as substâncias constituintes da Terra, através de instrumentos sensores localizados em plataformas

localizadas em satélites ou aeronaves. Mais recentemente, e com um conceito mais completo, Novo (2010) define sensoriamento remoto como:

Utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que compõem em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2010, p. 28).

O início do sensoriamento remoto está cientificamente ligado ao desenvolvimento da fotografia e à pesquisa espacial. O primeiro grande impulso aconteceu durante a primeira guerra mundial, com o desenvolvimento da aviação e aperfeiçoamento dos sistemas fotográficos (NOVO, 2010). No entanto, esse aperfeiçoamento permitiu o conhecimento e estudo de áreas restritas, aerofotografadas para fins específicos (MOREIRA, 2005).

O segundo grande impulso, e até hoje explorado, ocorreu com o progresso da pesquisa espacial e aos avanços tecnológicos resultantes da mesma, como a criação de novos sensores e a possibilidade de utilização de satélites para a aquisição de dados espaciais (NOVO, 2010). A partir da década 70, a tecnologia de satélite passou a ser utilizada no estudo de recursos naturais da Terra, fato esse marcado pelo primeiro engenho posto em órbita com capacidade de registrar informações da superfície do planeta (MOREIRA, 2005).

Nesse sentido, os primeiros dados obtidos por satélites no Brasil foram oriundos do primeiro satélite a entrar em órbita no ano 1972, o Earth-1, que mais tarde passou a ser chamado de Landsat. Começava aqui uma nova era de conhecimento acerca de seus recursos naturais, renováveis e não renováveis (MOREIRA, 2005).

As aplicações do sensoriamento remoto passaram por evoluções, acompanhando o desenvolvimento dos satélites e sensores, que inicialmente apresentavam, por exemplo, resoluções espaciais pobres (MOREIRA, 2005), as quais limitavam a utilização dos mesmos. Prova disso, enquanto que os primeiros sensores apresentavam resolução espacial de 80m, recentemente, em agosto de 2014, foi lançado o satélite WorldView-3, o mais avançado tecnologicamente, com

29 bandas de dados espectrais e com resolução espacial de até 30cm (DIGITAL GLOBE, 2014). O objetivo do novo mecanismo de observação é possibilitar o monitoramento detalhado de grandes instalações, tais como área de extração de minerais, gás, extração de petróleo e reservas ambientais (MARCHISIO, 2014).

Nesse sentido, atualmente os sistemas de sensoriamento remoto apresentam inúmeras opções de utilização e aplicação, algumas delas citadas por Novo (2010): urbanas; agrícolas; geológicas; ecológicas; florestais; cartográficas; oceanográficas; hidrológicas; limnológicas; e militares. Lorenzetti (2015) destaca aplicação do SR no âmbito ambiental, sendo útil no monitoramento atmosférico, da superfície da terra, oceanos e criosfera terrestre.

Para Jensen (2009) o sensoriamento remoto é especialmente útil no monitoramento do uso e cobertura da terra através do tempo. As principais vantagens do sensoriamento remoto para estudos de uso e cobertura da terra é que as informações são obtidas periodicamente, possibilitando o monitoramento. Além da amplitude espacial que as informações são obtidas, permitindo mapear grandes áreas, inclusive as de difícil acesso (MOREIRA, 2005).

Além disso, a natureza digital dos dados de sensoriamento orbital, possibilita o emprego de algoritmos computacionais para realce e classificação de padrões, potencializando o mapeamento de grandes extensões, em um período de tempo reduzido (SOARES FILHO, 1998).

Essas e outras vantagens fazem com que sensoriamento remoto seja uma importante fonte de dados, organizado em dois grandes subsistemas (NOVO, 2010): a) Subsistema de Aquisição de Dados de Sensoriamento Remoto, e; b) Subsistema de Produção de Informação. Em que, o primeiro é formado por componentes como, fonte de radiação, plataforma (satélites, aeronaves), sensor, centro de dados (estação de recepção e processamento de dados de satélites e aeronaves). E, o segundo, é composto entre outros sistemas: de processamento de imagens e de geoprocessamento.

Conceitos acerca destas subdivisões, técnicas e conhecimentos que foram utilizados neste trabalho, são apresentados nas seções a seguir.

2.3.1 Aquisição de dados de sensoriamento remoto

Em relação a aquisição de dados de sensoriamento remoto, os sistemas de

sensoriamento podem ser ativos ou passivos (FLORENZANO, 2008; JENSEN, 2009; LORENZZETTI, 2015; NOVO, 2010). Os sistemas ativos emitem energia eletromagnética, a qual interage com os objetos e superfície do terreno e retorna aos sensores, sendo quantificada. Enquanto que, os sistemas passivos não emitem energia eletromagnética, registrando e quantificando a energia radiante refletida ou emitida pelo terreno. O sol é a principal fonte de energia eletromagnética (MOREIRA, 2005).

Em ambos os sistemas, a energia refletida ou emitida pelos objetos na superfície terrestre é registrada pelos sensores a bordo dos satélites (JENSEN, 2009). Essa energia é transmitida para estações de recepção na forma de sinais elétricos, que por sua vez, são processados e transformados em imagens (FLORENZANO, 2008).

As imagens de satélites são utilizadas no estudo e no monitoramento de objetos e fenômenos da superfície terrestre. A interpretação das imagens permite, dentre outras aplicações detectar e monitorar furacões, inundações, queimadas, desflorestamentos e estimar safras agrícolas (FLORENZANO, 2008).

Paralelamente ao grande potencial de utilização, há uma ampla oferta de imagens adquiridas por diversos satélites que orbitam o planeta. Nesse sentido, cabe ao técnico decidir e optar pelo produto que satisfaça sua necessidade, custo e benefício. Uma vez que as informações coletadas pelos sensores são expressas e representadas por domínios de resoluções (espectral, temporal, radiométrica e espacial) (MOREIRA, 2005), o conhecimento acerca destas características são subsídios que auxiliam na seleção do produto que melhor atenda aos interesses do usuário.

A resolução espectral está relacionada ao número de bandas e dimensão de intervalos de comprimentos de ondas do espectro eletromagnético que o sensor é sensível (MOREIRA, 2005). A escolha de bandas específicas segundo sua finalidade, aumenta a probabilidade de obtenção da informação desejada (JENSEN, 2009). Sensores que operam em mais de uma faixa espectral são denominados multiespectrais.

A resolução temporal refere-se à frequência do recobrimento de uma dada área, e está relacionada à repetitividade da informação estudada e a largura da faixa de imageamento (MOREIRA, 2005). De modo geral, segundo Jensen (2009), quanto maior a resolução temporal menor a necessidade de resolução espacial alta, a

exemplo dos satélites meteorológicos.

A resolução espacial está relacionada com a capacidade de identificação de objetos pelo sensor. É a medida da menor separação angular ou linear entre dois objetos que o sensor é capaz de determinar (JENSEN, 2009) e por isso deve-se selecionar a resolução espacial de acordo com o menor objeto que se deseja identificar no terreno. Pode-se dizer também, que a resolução espacial está relacionada ao tamanho do pixel da imagem, que por sua vez, representa a média de energias refletidas pelos alvos em um determinado espaço, não sendo possível separá-las (MOREIRA, 2005).

A resolução radiométrica é definida como o número de níveis de cinza distinguíveis pelo sensor (JENSEN, 2009), ou, a capacidade de distinção de alvos que apresentam pequenas diferenças de radiação refletida/emitida em certas regiões do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2005).

Diante disso, a seção a seguir traz as características e informações acerca da série Landsat, representada por 8 satélites, dando destaque aos satélites 5 e 8, dos quais obteve-se as imagens que compõem as investigações da presente pesquisa.

2.3.1.1 O Satélite Landsat

O programa Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) teve início em 1972 com o lançamento do satélite Earth-1 (*Earth Resources Technological Satellite-1*), o qual mais tarde (1975) passou a ser chamado de Landsat, dando nome a série (MOREIRA, 2005; ROCHA, 2000). A iniciativa surgiu a partir do projeto desenvolvido pela Agência Espacial Americana dedicado a observação dos recursos naturais terrestre, através do monitoramento multiespectral da superfície da Terra (NOVO, 2010).

Também conhecido como satélite para estudos dos usos da terra, suas bandas foram desenvolvidas para maximizar o uso dos fatores que controlam a reflectância da vegetação, fatores dominantes na identificação de alteração hidrotermal de rochas e na discriminação de alvos da superfície terrestre (JENSEN, 2009).

O programa teve sequência com os Landsat 2, 3, 4, 5, 6 e 7, tornando-se, com mais de 40 anos, a maior série temporal de registro de observações espaciais (ROY et al., 2014). Período esse, em que pelo menos uma imagem por ano foi

obtida para todos os locais da Terra, oferecendo um registro único da superfície terrestre e a sua alteração ao longo do tempo (MARKHAM e HELDER, 2012).

A última atualização da série, demonstrando sua importância, ocorreu em 2013, com o lançamento do satélite Landsat 8 (ROY et al., 2014). Dessa forma, o programa Landsat é constituído por uma série de 8 satélites, os quais foram desenvolvidos e lançados pela NASA - *National Aeronautics and Space Administration*, com apoio da USGS - *United States Geological Survey*.

O satélite Landsat 5, lançado em 1984, foi projetado com vida útil de 5 anos, entretanto atuou por 27 anos, sendo desativado em novembro 2011. Esse fato contribuiu e contribui, com inúmeros estudos que envolvem a utilização de dados multitemporais, inclusive para a presente pesquisa.

O Landsat 5 levou a bordo o sensor TM (*Thematic Mapper*), sensor que segundo Moreira (2005), trouxe melhorias no que se refere a resolução espectral, espacial, temporal e radiométrica. Possui sete bandas nas regiões do visível, infravermelho próximo, médio e termal, com resolução espacial das bandas espectrais e termal de 30 e 120 metros, respectivamente; resolução temporal de 16 dias, e; resolução radiométrica de 8 *bits* (EMBRAPA, 2013). Suas principais características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5

Satélite Landsat 5				
Sensor	Bandas	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Faixa imageada (km)
TM - <i>Thematic Mapper</i>	1 – Azul	0,45 – 0,52	30	185
	2 – Verde	0,52 – 0,60		
	3 – Vermelho	0,63 – 0,69		
	4 – Infravermelho próximo (NIR)	0,76 – 0,90		
	5 – Infravermelho médio (SWIR)	1,55 – 1,75	120	
	6 – Infravermelho termal (LWIR)	10,4 – 12,5		
	7 – Infravermelho distante	2,08 – 2,35	30	

Fonte: INPE: Divisão de geração de imagens/ Adaptada pelo autor.

O último satélite da série é o Landsat 8. Lançado em 2013, o Landsat 8 ampliou as possibilidades de uso, proporcionando aos usuários, cobertura repetitiva de forma contínua e em escala onde as mudanças naturais, ou induzidas pelo homem, possam ser detectadas, caracterizadas e monitoradas ao longo do tempo (USGS, 2013).

Essas vantagens ocorrem devido a inclusão de novos sensores, OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), os quais apresentam maior capacidade de resolução espectral e radiométrica em relação aos demais sensores da série Landsat. Os sensores a bordo do satélite Landsat 8, adquirem imagens na região do visível, infravermelho próximo, em onda curta e infravermelho térmico, como especificado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características dos sensores OLI e TIRS a bordo do satélite Landsat 8

Satélite Landsat 8				
Sensor	Bandas	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Faixa imageada (km)
OLI- <i>Operational Land Imager</i>	1 – Costal aerosol	0,43 – 0,45	30	185
	2 – Azul	0,45 – 0,51		
	3 – Verde	0,53 – 0,59		
	4 – Vermelho	0,64 – 0,67		
	5 – Infravermelho próximo (NIR)	0,85 – 0,88		
	6 – Infravermelho médio (SWIR)	1,57 – 1,65		
	7 – Infravermelho médio (SWIR)	2,11 – 2,29		
	8 – Pancromático	0,50 – 0,68	15	
	9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30	
TIRS- <i>Thermal Infrared Sensor</i>	10 – Infravermelho termal (LWIR)	10,60 – 11,19	100	
	11 – Infravermelho termal (LWIR)	11,50 – 12,51	100	

Fonte: EMBRAPA, 2013. Adaptada pelo autor.

As novidades em relação a resolução espectral são: a inclusão de uma nova banda na região do azul, a banda ultra-azul, com aplicação em estudos costeiros e

aerossol; outra banda na região de detecção de nuvens, denominada cirrus; além de bandas termais. A resolução radiométrica, por sua vez, passou a ser de 12 *bits*.

2.3.2 Processamento digital de imagens

Independente da fonte de dados de sensoriamento remoto, os mesmos precisam passar pela etapa de processamento, que pode ser através do processamento analógico ou digital de imagens (JENSEN, 2009).

O Processamento Digital de Imagens, é atualmente, o processamento mais utilizado no âmbito de dados de sensores remotos, uma vez o processamento analógico depende da interpretação visual do usuário, o qual apresenta capacidade de identificação limitada (JENSEN, 2009). Sendo assim, o processamento digital de imagens surgiu mediante a necessidade de obter técnicas alternativas para o tratamento dos dados orbitais, os quais, a cada dia tornava-se mais difícil de fazê-lo utilizando-se métodos convencionais de interpretação visual, devido ao crescente volume de dados (MOREIRA, 2005).

Entende-se por processamento digital de imagens, o conjunto de técnicas para manipulação de imagens digitais, que visam facilitar a extração de informações da mesma. O principal objetivo do processamento digital de imagens é, através da manipulação por computador, promover melhorias no aspecto visual da imagem, tornando-as mais apropriadas para uma determinada aplicação (MENESES e ALMEIDA, 2012; MOREIRA, 2005).

O processamento de imagens corresponde a funções como correções radiométrica e geométricas (pré-processamento), realce, filtragem, estatísticas, segmentação e classificação (CÂMARA et al., 1996; JENSEN, 2009; MENESES e ALMEIDA, 2012). Sendo que, as correções radiométrica e geométricas visam a remoção ou correção de erros e distorções introduzidas nas imagens pelos sistemas sensores devido a erros instrumentais, às interferências da atmosfera e à geometria de imageamento (JENSEN, 2009; MENESES e ALMEIDA, 2012).

As demais funções, e que sucedem o pré-processamento, são basicamente técnicas de realce (transformações espaciais e espectrais) e classificação. As transformações espectrais e espaciais possuem a função de preparar a imagem, a fim de facilitar a interpretação e extração das informações de interesse, num processo que objetiva otimizar ao máximo a análise dos dados. Com a mesma

finalidade, e precedendo a etapa de classificação, as composições coloridas também são empregadas devido a facilidade do olho humano em identificar mais facilmente cores, do que níveis de cinza (MOREIRA, 2005).

A classificação, através de complexos modelos estatísticos e probabilísticos, conduz a geração de mapas temáticos de modo automatizado, a partir da extração das informações das imagens (MENESES e ALMEIDA, 2012). Para Jensen (1996), classificação é a criação de mapas temáticos a partir da interpretação de informações oriundas de sensores remotos, onde os temas representados nos mapas são escolhidos segundo a necessidade e a área de estudo.

Segundo Meneses e Sano (2012), os métodos de classificação podem ser divididos seguindo diversos critérios: classificação paramétrica e não-paramétrica, classificação espectral e espacial, classificação não-supervisionada ou supervisionada, e classificação por pixel ou por regiões. Sendo que, a forma mais comum e adotada pelos *softwares* considera os classificadores como supervisionados e não-supervisionados.

Na classificação não-supervisionada a participação do analista é quase nula, não sendo necessário definir previamente um número de classes e amostras de treinamento. Após a classificação, o analista apenas atribui significado às classes resultantes, identificadas automaticamente pelo algoritmo classificador. Os algoritmos de classificação não-supervisionada mais utilizados são o ISODATA e o *K-médias*. A aplicação deste tipo de classificação pode ocorrer mediante duas situações: quando não se tem conhecimentos acerca das classes representadas pelos alvos numa dada área, ou quando, deseja-se realizar uma análise exploratória rápida para identificar as classes que podem haver na imagem (MENESES e SANO, 2012).

Ainda segundo os mesmos autores, na classificação supervisionada, em contrapartida, o analista atua efetivamente no processo de classificação, identificando previamente amostras de treinamento referente às classes existentes na imagem. Sendo assim, o conhecimento prévio da área de estudo, quanto às classes potenciais, faz-se necessário. Não há restrição quanto ao número de classes, desde que as amostras de treinamento sejam representativas da imagem, de modo que não ocorra confusão entre classes. A partir das amostras de treinamento os algoritmos classificadores classificam os pixels ou regiões para cada classe de acordo com atributos específicos, que variam de acordo com o método

(paralelepípedo, distância mínima, distância de Mahalanobis e máxima verossimilhança).

O classificador *Bhattacharyya*, disponível no *software* SPRING, é um classificador por região supervisionado e utiliza a distância média, ou euclidiana, entre as distribuições de probabilidade de classes espectrais para medir a separabilidade de um par de classes espectrais. Neste caso, o classificador de *Bhattacharyya* requer a seleção de áreas de treinamento, podendo utilizar polígonos representativos das regiões a serem classificadas ou regiões obtidas pela segmentação. Segundo Brites et al. (2012), a segmentação é um processo que pode ser manual ou automático, sendo mais utilizado o método automático, e corresponde ao agrupamento de pixel com características semelhantes, ou como define Gao (2009), em regiões discretas, contíguas e que não se interceptam.

Para tal processo, utiliza-se algoritmos segmentadores que a partir de parâmetros de similaridade e área mínima dos polígonos, efetuam a segmentação. Para Brites et al. (2012), o limiar de similaridade corresponde ao grau de similaridade que define se o pixel será incluso em determinado segmento, quando comparado aos parâmetros estatísticos do pixel já inclusos neste segmento, enquanto que, a área é definida pelo número mínimo de pixel admitidos em cada segmento.

Uma das últimas etapas da classificação é a validação (MENESES e SANO, 2012). Para a validação das classificações digitais de imagens, emprega-se estatísticas que tendem avaliar a acurácia da classificação, tais como, análise da matriz de confusão ou de erros e coeficientes de concordância.

A matriz de erros, também conhecida como matriz confusão, tem por objetivo comparar a composição dos pixels amostras, também chamados de referência ou verdade terrestre, com a obtida pela classificação, através de medidas globais, tais como exatidão global e real (MENESES e SANO, 2012; MOREIRA, 2005).

Os índices de concordância utilizados para verificar a acurácia da classificação são representados pelo índice Tau (MA e REDMOND, 1995) e índice *Kappa* (LANDIS e KOCH, 1977). O índice Tau é uma medida de acurácia simples e independente da matriz de erro que considera o número de classes presentes na classificação, podendo ser obtida facilmente (BRITES et al., 1996).

O índice *Kappa* é definido como uma medida de associação para verificar o grau de concordância na classificação, mede a acurácia dos dados espaciais e pode

variar de 0 a 1, sendo que valores mais próximo de 1 indicam dados acurados (SILVA, 2003). De acordo com Brites et al. (1996), o índice *Kappa* é indicado como medida de acurácia por representar inteiramente a matriz de confusão, e não apenas a diagonal principal como é o caso da exatidão global.

A equação que fornece o valor de *Kappa* é apresentada a seguir (Equação 1):

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ij} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad (1)$$

Em que:

r = número de classes;

X_{ij} = número de elementos classificados corretamente;

X_{i+} = total de elementos classificados para uma categoria i ;

X_{+i} = total de elementos de referência amostrados para uma categoria i ;

N = número total de amostras.

Landis e Koch (1977) definem intervalos de índice *Kappa* para indicar a qualidade da classificação (Tabela 3).

Tabela 3 – Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente *Kappa*

Valor do <i>Kappa</i>	Qualidade da classificação
< 0,00	Péssima
0,0 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

Em relação as etapas de processamento das imagens, cabe destacar aqui, que as aplicações de tais funções de processamento são definidas segundo o objetivo final do usuário e, da mesma forma, a qualidade das aplicações depende primordialmente da capacidade do usuário de interpretação e domínio das

tecnologias empregadas para o processamento.

O avanço tecnológico na área da informática, foi um grande estímulo para o desenvolvimento de sistemas de processamento de imagens e de técnicas de geoprocessamento. Visto que, os computadores passaram a ter maior capacidade de processamento e de armazenamento de dados, aliados ainda, a sistemas operacionais acessíveis e de fácil manuseio. O desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), por sua vez, agregou ao contexto de classificações de imagens de satélites, informações cartográficas e cadastrais (MOREIRA, 2005).

2.4 GEOPROCESSAMENTO E SIG

É definido como Geoprocessamento, o conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltadas para um determinado fim (RODRIGUES, 1993).

O geoprocessamento pode ser entendido também, como a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para tratar dados geograficamente identificados obtidos de objetos ou fenômenos ou extrair informações desses objetos ou fenômenos, quando eles são observados por um sistema sensor (MOREIRA, 2005). Para Silva (2007), o geoprocessamento é o ramo da tecnologia de computação eletrônica de dados, uma vez que atua diretamente no processamento de dados, transformando dados em informação.

As aplicações do geoprocessamento são multidisciplinares, estando presentes nas mais diferentes áreas, das quais pode-se citar a Cartografia, Geografia, Agricultura, Floresta, Geologia, Planejamento urbano e rural, Transporte, Comunicação e Energia. Além disso, a partir do geoprocessamento, inúmeros procedimentos utilizados na investigação detalhada do ambiente tornaram-se possíveis no âmbito das análises ambientais (SILVA, 2007).

Para tanto, o geoprocessamento utiliza-se de ferramentas, as quais compõem um conjunto denominado de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Considerada por Silva (2003) como uma tecnologia relativamente nova e, que ao mesmo tempo, cresce em um ritmo acelerado.

De acordo com Queiroz e Ferreira (2006), o termo SIG é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos, distinguindo-se dos sistemas de informações convencionais pela sua capacidade de

armazenar tanto os atributos descritivos como as geometrias dos dados geográficos.

A composição de um SIG, segundo Moreira (2005), se dá pelo conjunto de cinco componentes independentes, sendo estes: interface, entrada e integração de dados, funções de consultas e análise espacial, visualização e plotagem e banco de dados geográficos. Ambos interligados por funções específicas. Já Longley et al. (2013), definem o SIG em seis componentes: pessoas, *hardware*, procedimentos, dados, *software* e rede.

Diante das adversidades de conceitos e SIGs disponíveis, Silva (2003) ressalta algumas funções que devem ser considerados para caracterizá-los de maneira apropriada: eles fazem uso do meio digital (informática); os dados são integrados, georreferenciados e com controle de erro; possuem funções para análise, desde funções lógicas, até operações cumulativas (soma, subtração, multiplicação, etc).

Para Moreira (2005), qualquer SIG deve apresentar duas características principais: a) permitir inserir e integrar, em uma única base de dados (banco de dados) informações espaciais das mais diversas fontes; b) oferecer mecanismos para combinar informações através de algoritmos de manipulação e análise, assim como consultas, recuperação, visualização e plotagem do conteúdo dessa base de dados georreferenciados.

A capacidade para efetuar tais funções se dá devido ao Sistema Gerenciador de Base de Dados (SGBD), capazes de gerir dados geográficos, também chamados de SGBD espacial - SGBDE (GÜTING, 1994). Os quais, além de permitirem o armazenamento de dados espaciais e seus inter-relacionamentos, implementa meios apropriados, eficientes e seguros para a consulta e recuperação de dados (RAMIRES e SOUZA, 2007).

Os dados que alimentam os SGBDE podem ser do tipo texto, numérico, vetorial, matricial ou raster. O dado do tipo texto refere-se a fatos descritivos sem caráter interpretativo, é uma informação pontual. O dado numérico corresponde a um atributo de um determinado evento do meio físico. O dado vetorial é uma representação gráfica de um determinado fenômeno sob um sistema de coordenadas, enquanto que, o dado matricial ou raster é a representação gráfica de um fenômeno do mundo real por meio de pixels (SILVA, 2003).

Os dados espaciais são os elementos fundamentais dos SIGs e representam os fenômenos do mundo real, que podem ser descritos de três maneiras: espacial,

temporal e tematicamente. Fenômenos que variam de lugar para lugar são representados espacialmente, temporalmente quando variam com o tempo, e, tematicamente quando se observa mudanças nas características (SILVA, 2003).

Nesse sentido, Silva (2007) destaca a crescente aplicação de SIG na utilização de representação de ambientes, visto que, permitem de forma integrada, considerar a expressão territorial e as alterações ao longo do tempo em um banco de dados georreferenciados. Os dados ambientais, quando associados aos dados sociais através dos SIG, da mesma forma, corroboram com o interesse de planejamento ambiental integrado (LONGLEY et al., 2013).

Além disso, os SIG possuem outras aplicações, das quais podem ser citadas o planejamento do uso do solo e expansão urbana, monitoramento ambiental, de safras agrícolas e erosão do solo, e modelagem de sistemas ambientais. Nesses e em outros casos, os SIGs podem conter bancos de dados bastante volumosos e complexos, devido a uma gama de mapas temáticos relacionados entre si espacialmente, com mesma localização geográfica, forma e geometria (RAMIREZ e SOUZA, 2007).

No âmbito da modelagem de sistemas ambientais, a interação com os SIG torna-se fundamental, visto que, a modelagem requer a coleta de dados que expressam a superfície terrestre, representados em séries temporais e espaciais, as quais demandam um conjunto de técnicas para análise espacial e temporal, ambas disponíveis nos SIGs (CHRISTOFOLETTI, 1999). Um dos grandes desafios dos SIGs, entretanto, é a representação de fenômenos espaço-temporais de forma dinâmica e não apenas estática, como se vê na maioria das vezes (PEDROSA e CAMARA, 2003; 2007).

Nesse sentido, inúmeros pesquisadores têm usado os SIGs, por exemplo, para investigar as mudanças provocadas pelo crescimento urbano e alterações de uso e cobertura da terra, visando entender e prever suas consequências futuras. Tal entendimento pode ser realizado a partir de informações históricas, localização de estradas, relevo, áreas de proteção, entre muitas outras variáveis. Cada uma representada na forma de um mapa, correspondendo no SIG, a uma camada. E a partir de *softwares* especializados, efetuar simulações de padrões futuros, como produto da modelagem dinâmica espacial (LONGLEY, 2013).

2.5 MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL

A modelagem de sistemas ambientais, teve início com trabalhos de aplicações com objetivo de conhecer a evolução dos sistemas e planejar o gerenciamento das organizações espaciais e uso dos recursos naturais, em nível local, regional e nacional (CHRISTOFOLETTI, 1999). A partir de então, as aplicações e análises da modelagem espacial de fenômenos geográficos tornaram-se técnicas atuais e amplas no âmbito do gerenciamento, tomadas de decisões e estabelecimento de políticas públicas relacionadas a questões socioambientais e ao uso e cobertura da terra (MEIRELLES et al., 2007a).

A modelagem, conhecida como a arte de construir modelos, refere-se ao processo que leva a geração de um modelo, ou representação de um sistema. E que, portanto, baseia-se em um conjunto de hipóteses ou previsões reais, permitindo ser comparado com medidas do mundo real (SOARES FILHO, 1998).

Nesse contexto, os modelos dinâmicos espaciais, são representações numéricas de processos do mundo real em que o estado de uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionais (BURROUGH, 1998).

Segundo Silva (2007), devido à complexidade no ambiente, este deve ser tratado como uma entidade com expressão espacial, que deve ser modelada de acordo com a sua variabilidade e a distribuição territorial de classes de fenômenos considerados relevantes.

Entretanto, ao passo que um modelo deve ser uma boa aproximação de um sistema real e incorporar a maioria de suas principais características, o mesmo, não deve ser tão complexo que se torne impossível compreendê-lo e executá-lo. Um bom modelo é um compromisso criterioso entre o realismo e a simplicidade (MARIA, 1997; VELDKAMP e LAMBIN, 2001).

Como já mencionado, a modelagem dinâmica espacial visa transpor as limitações do geoprocessamento, passando de uma visão estática das condições do mundo real, para uma visão dinâmica, permitindo assim, a simulação de processos dependentes do tempo. Todavia, a tarefa de modelar processos ambientais reais é complexa, uma vez que, considera e integra um conjunto de fatores físicos, bióticos e socioeconômicos, os quais são responsáveis pela realidade ambiental (MEIRELLES et al., 2007a).

Couclelis (1997) destaca os esforços para integrar modelos dinâmicos aos SIGs de modo a cumprir com as exigências das representações realistas, e para tanto, define alguns princípios que devem ser seguidos pelos SIGs: devem tratar o espaço como entidades não homogêneas; as vizinhanças como relações não estacionárias; regras de transição como regras não universais; tempo como um processo regular ou irregular, e; sistema como um ambiente aberto às influências exógenas.

Para que esses princípios sejam implementados nos SIGs faz-se necessário uma abordagem conceitual de elementos como o espaço, tempo e modelos dinâmicos, como destaca Pedrosa e Camara (2003, 2007).

2.5.1 Espaço

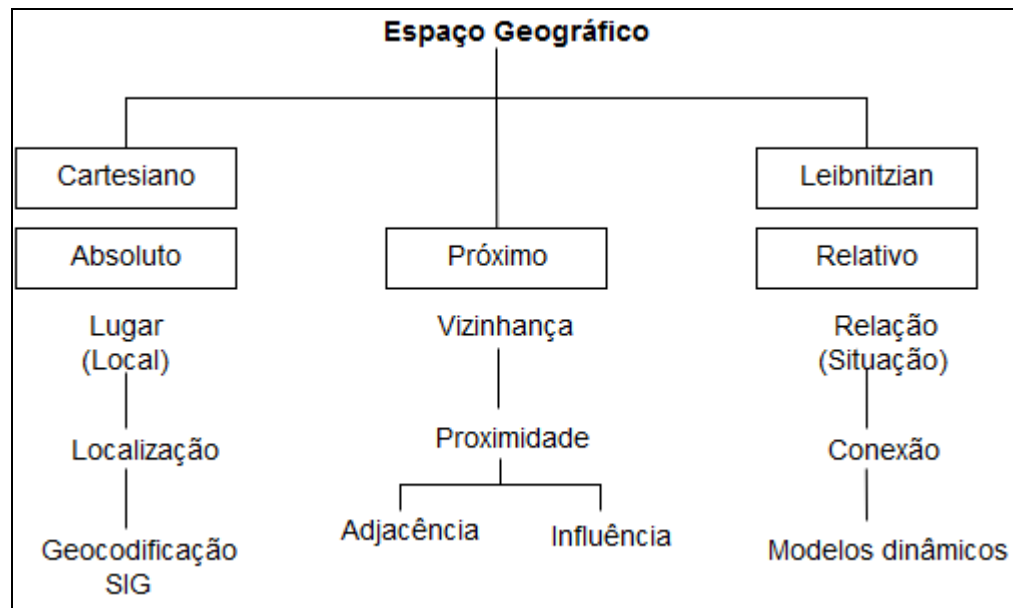
O conceito de espaço é um ponto de partida e fonte de complexidade para os processos de simulação de alterações, e por isso, merece reflexão por parte do modelador, destaca Lima (2014).

Segundo Pedrosa e Camara (2003, 2007), o conceito de espaço relacionado a abstração fundamental dos SIGs (mapas), é o de espaço absoluto. Já os espaços relativos e próximos, são fundamentais para estabelecer fluxos e conexões entre entidades de sistema, em processos dinâmicos.

Para Couclelis (1997), a distinção entre o espaço absoluto e relativo é importante para a modelagem, porque corresponde à distinção geográfica básica entre as propriedades do local. Sendo assim, define o espaço absoluto, ou cartesiano, ou newtoniano, como um recipiente neutro de coisas e eventos, onde as expressões características do espaço são as coordenadas cartesianas. Um espaço de referência para localização de pontos, trajetórias e objetos, podendo ser representado por uma estrutura em grade retangular, bidimensional, consistindo de unidades quadriculares homogêneas, as células (ALMEIDA, 2003).

Enquanto o espaço relativo, ou Leibniz, é o espaço das relações espaciais que surgem entre as coisas e eventos. Assim, enquanto a primícia de espaço absoluto é o ponto ou local (referenciado), a primícia de espaço relativo é a relação (espacial). Nesse contexto, o espaço próximo, ou proximal, atua como ponte entre o espaço absoluto e relativo, sendo a vizinhança o conceito chave, associado a ideia de proximidade (Figura 2).

Figura 2 – Espaços geográficos



Fonte: Adaptado de Couclelis (1997).

Considerando esses conceitos e relacionando-os com as representações computacionais, Pedrosa e Camara (2003, 2007), traduzem essas distinções associando o espaço relativo a representações planas (mapas vetoriais e matriciais) e, o espaço absoluto, às representações de conectividade espacial (matriz de proximidade espacial).

O conceito de vizinhança, por sua vez, associado ao espaço próximo, pode ser observado em representações espaciais matriciais. Nos SIGs essas representações são disponibilizadas na forma de filtros, onde, o estado de uma célula é modificado com base nos estados das demais células em sua vizinhança, definidas através de uma máscara (PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007).

2.5.2 Tempo

O tempo pode ser representado através de diferentes estruturas, tendo como base aspectos da representação temporal: ordem no tempo, variação temporal e granularidade (PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007).

A ordem no tempo refere-se a forma como o tempo flui, se linear, ramificado ou cíclico. Quando o tempo flui linearmente, significa dizer que há uma ordem de precedência entre os pontos no tempo. No tempo ramificado, múltiplos pontos

podem ser os sucessores ou antecessores de um mesmo ponto. Já o tempo cíclico, indicam eventos e processos recorrentes.

Em relação a variação temporal, esta pode ser discreta ou contínua. A variação contínua indica a variação ao longo do tempo, considerando as variações ocorridas entre os instantes inicial e final. Enquanto na variação discreta, o tempo é medido em pontos ou até intervalos específicos (*chronon*) e a variação entre os pontos é descontínua. Um *chronon* corresponde a menor duração de tempo considerado por um sistema, podendo este variar em diferentes aplicações (EDELWEISS e OLIVEIRA, 1994 apud. PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007).

Por fim, a granularidade está relacionada a duração de um *chronon*, que pode ser um instante, intervalo ou período. Em que, um instante no tempo corresponde a um tempo particular; intervalo é o tempo decorrido entre dois instantes; e, período é a sequência de intervalos no tempo (PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007).

2.5.3 Modelos

Os modelos espaciais são denominados como 'arcabouços teóricos que consideram o espaço como uma superfície em evolução', onde a caracterização de fenômenos espaço-temporais é realizada a partir de variáveis cuja evolução dinâmica pode ser descrita de forma contínua (MEIRELLES et al., 2007a). Pode se dizer ainda, que os modelos são formas simplificadas de se representar a realidade, a partir dos quais busca-se imitar ou reproduzir os eventos do mundo real.

Os modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo, e, portanto, devem ser capazes de responder três questões básicas: 'Por quê?' 'Quando?' e, 'Onde?'. Ao responder a essas questões um modelo é apropriado para prever evolução, integrando suas escalas temporal e espacial (PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007).

Os elementos que constituem um modelo são: variáveis, relacionamento e processos. A partir disso, os modelos podem ser divididos em modelos empíricos e de sistemas. Os modelos empíricos dão ênfase aos relacionamentos entre as variáveis do modelo e a suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro (ex: Cadeias de Markov, logísticos de difusão, e regressão). Já os modelos de sistemas, descrevem matematicamente processos complexos que interagem entre si, enfatizando as interações dos componentes de

um sistema (ex: simulação de ecossistema e dinâmico espacial) (PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007). As principais características dos modelos apresentados, segundo seus potenciais para responder as perguntas “Por quê?” “Quando?” e “Onde?”, são indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais características dos modelos

Modelo	Por que?	Quando?	Onde?
Cadeias de Markov	Não pode explicar a razão de um fenômeno por ser processo estocástico e não suportar a inclusão de variáveis exógenas	Pode prever a evolução de processos estacionários	Pode prever distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com SIG
Logístico de difusão	Permite a inclusão de poucas variáveis exógenas, entretanto, é um modelo descritivo, não suportando investigações exploratórias.	Suporta a dimensão temporal, podendo prever a evolução de processos estacionários	Pode prever distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com SIG
Regressão	Contribui para identificar forças direcionadoras, entretanto são modelos descritivos, não sendo capaz de estabelecer relações causais entre as variáveis	Pode prever a evolução de processos estacionários	Não são modelos espaciais, entretanto podem ser combinados com SIG
Simulação de ecossistemas	Modelo exploratório que requer descrições funcionais dos sistemas ecológicos	Podem formular cenários de mudanças futuras no uso do solo, baseados nos parâmetros do modelo	Apresenta dificuldades na apresentação espacial
Simulação espacial dinâmica	Requer modelos funcionais espacialmente definidos	Podem prever mudanças temporais no uso do solo, baseado nos parâmetros do modelo	Pode prever evolução de padrões espaciais em processos determinísticos

Fonte: Pedrosa e Camara (2003, 2007).

Mediante a diversidade dos modelos, não há uma única solução para modelar determinado evento ou fenômeno espacial dinâmico. Deve-se investigar de antemão, o evento a ser estudado, e em busca das respostas dos porquês, onde e quando, selecionar um ou mais métodos, para representá-lo. Sabendo que, cada modelo é destinado a um propósito, ainda assim, não são excludentes, e sim complementares (PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007).

Os modelos podem ser classificados ainda, segundo Steyaert (1993) apud Soares Filho (1998), em três grupos: escala (réplica), conceitual e matemático. Sendo que, um modelo em escala consiste em uma redução análoga ao original. Um modelo conceitual representa processos através da construção de blocos e diagramas, demonstrando também suas inter-relações. Já os modelos matemáticos, utilizam-se de sistemas de equações na construção do modelo e podem ser classificados em modelos matemáticos determinísticos e estocástico-probabilísticos. (SOARES FILHO, 1998).

Os modelos matemáticos determinísticos, são descritos por causas verificadas e identificadas, sem recorrer a elementos probabilísticos, determinando os resultados, exatamente a partir das condições iniciais. São modelos determinísticos os que em suas formulações não fazem uso de variáveis aleatórias (MARIA, 1997; SOARES FILHO, 1998).

Os modelos estocástico-probabilísticos incorporam o risco, ou a probabilidade, apresentando soluções sempre associadas a uma probabilidade de ocorrência de determinado fenômeno. Isto é, é um tipo particular de modelo que representa a incerteza num sistema dinâmico utilizando a linguagem de probabilidade (MARIA, 1997; NELSON, 1995).

Como exemplo de aplicação dos modelos estocástico-probabilísticos, destaca-se os processos de mudanças de uso e cobertura da terra, constituindo o método de simulação utilizado neste trabalho.

2.5.4 Modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra

Segundo Veldkamp e Lambin (2001), os modelos de mudanças de uso e cobertura da terra foram desenvolvidos para atender as necessidades de gestão da terra, para melhor avaliar e prever as condições futuras dos usos e mudanças de cobertura da terra. As regras constituintes desses processos relacionam-se a

probabilidade de ocorrência de determinado fenômeno, e são explicadas por elementos probabilísticos incorporados ao modelo (BENEDETTI, 2010). Dos quais pode-se citar: Autômatos celulares, Pesos de Evidência, Cadeia de Markov.

2.5.4.1 Autômatos Celulares

A plataforma modeladora utilizada neste trabalho é estruturada em modelos baseados em Autômatos Celulares, e, portanto, uma descrição detalhada acerca deste, será apresentada nesta seção.

Autômatos celulares (AC) são considerados como modelos dinâmicos espaciais, empregados para descrever e prever a evolução de atributos ambientais em áreas com localizações e configurações distintas (ALMEIDA, 2003).

O conceito de AC ficou conhecido pelo conceito do jogo da vida (*Game of Life*), em que, o espaço celular é composto por uma grade retangular bidimensional, onde a vizinhança das células consiste de seus oito vizinhos imediatos (quatro vizinhos ortogonais e quatro vizinhos diagonais), onde qualquer célula pode estar viva ou morta e há duas regras determinantes que podem tornar uma célula viva ou morta. Uma célula morta torna-se viva se há exatamente três células vivas imediatamente adjacentes à mesma. Uma célula permanece viva se há duas ou três células vivas nas suas adjacências, caso contrário ela morre (ALMEIDA, 2003).

Segundo Batty et al. (1997), os AC são compostos por quatro elementos básicos: célula, estado, vizinhança e regra de transição. Em primeiro lugar, existem as células que são objetos que podem assumir as mais diferentes formas, em qualquer espaço tridimensional, desde que manifestem alguma adjacência ou proximidade entre si. Em segundo lugar, cada célula pode assumir apenas um estado em qualquer momento a partir de um conjunto de estados que definem os atributos do sistema. Em terceiro lugar, o estado de qualquer célula depende dos estados e configurações de outras células da vizinhança. Finalmente, existem regras de transição que impulsionam mudanças de estado em cada célula como uma função do que existe ou está acontecendo na vizinhança da célula.

Pedrosa e Camara (2003, 2007), nesse sentido, descrevem que os métodos de representação da dinâmica espaço-temporal por AC, consideram o espaço como um conjunto de células, onde cada célula pode assumir valores diferentes ao longo do tempo. Sendo que, o tempo varia em intervalos discretos, e as células variam

considerando além do seu estado atual, o estado atual das células vizinhas, a partir de regras de transições pré-determinadas.

Couclelis (1997) destaca dois requisitos básicos para modelos baseados em AC: interatividade e realismo. A interatividade é essencial para a exploração de opções e possibilidades, de forma que, as respostas para as perguntas sejam obtidas em um ritmo semelhante ao de uma conversação. O realismo por sua vez, visa a visualização dos resultados. Isto é especialmente verdadeiro quando se trata de previsões qualitativas, uma vez que os números não são os melhores meios para transmitir informações qualitativas. Sobre isso, Almeida (2003) destaca que os AC desempenharam grande avanço na representação espacial de modelos espaciais, que até então não operavam sobre dimensões espaciais.

Nesse sentido, os esforços para integrar modelos baseados em AC aos SIGs tiveram um longo caminho, no sentido de cumprir as exigências de interatividade e realismo de dados (COUCLELIS, 1997). Entretanto, no contexto atual, à medida que as limitações foram sendo superadas, os modelos baseados em AC tornam-se ferramentas eficientes para aplicação em processos geográficos reais .

De modo que, modelos de AC possuem aplicações nas mais diversas áreas, desde a física teórica e empírica, até mudanças de uso e cobertura do solo, engenharia e controle de tráfego, disseminação de epidemia, biologia comportamental, entre outras (ALMEIDA, 2003).

2.5.4.2 Pesos de Evidência

O cálculo das probabilidades de transição de uso e cobertura da terra, pelo método de Pesos de Evidência, baseia-se na probabilidade condicional (Teorema de Bayes), isto é, a probabilidade de um evento ocorrer, dado que outro evento, independente do primeiro, já ocorreu (ALMEIDA et al., 2007; BONHAM-CARTER, 1994; MEIRELLES et al., 2007b). Sendo assim, a probabilidade *bayesiana* define que a mudança de um estado *i* para *j*, ocorre em função de uma evidência *x* (ALMEIDA, 2003). A abordagem probabilística desse método possui como ideia principal a probabilidade *a priori* e a probabilidade *a posteriori* (BONHAM-CARTER, 1994).

Em termos de uso e cobertura da terra, Almeida (2003) define que a ocorrência de um uso com relação à presença de uma evidência (variável

explicativa) é dada pela Equação 2. A saber: R corresponde ao evento (mudança de um uso i para j); S refere-se à presença da evidência e, \bar{S} à ausência.

$$P\{R|S\} = \frac{P\{R \cap S\}}{P\{S\}} \quad (2)$$

Sendo $P\{R|S\}$ a probabilidade condicional de ocorrência do evento de transição R, dada a presença da evidência S e, $P\{R \cap S\}$ é igual à proporção da área total ocupada por R e S juntos.

Considerando N a contagem de células dos mapas (área de um evento ou uma evidência), a fórmula anterior pode ser reescrita pela Equação 3:

$$P\{R|S\} = \frac{N\{R \cap S\}}{N\{S\}} \quad (3)$$

Ao considerar que o método de Pesos de Evidência relaciona variáveis utilizando probabilidades de ocorrência, a probabilidade *a posteriori* de transição i para j (evento R) é definida pela relação da probabilidade *a priori* de transição já definida e relacionada à probabilidade condicional de estar ou não na área da evidência S, ou seja, pela Equação 4:

$$P\{R|S\} = \frac{P\{S \cap R\}}{P\{R\}} \quad (4)$$

Sendo $P\{S \cap R\}$, o mesmo que $P\{R \cap S\}$, as equações 3 e 4 podem ser combinadas e expressa pela Equação 5:

$$P\{R|S\} = \frac{P\{R\} \times P\{S|R\}}{P\{S\}} \quad (5)$$

Deve-se calcular também a probabilidade de ocorrência da transição dada a ausência da evidência \bar{S} (Equação 6):

$$P\{R|\bar{S}\} = \frac{P\{R\} \times P\{\bar{S}|R\}}{P\{\bar{S}\}} \quad (6)$$

Reescrevendo as equações acima sob a forma de *odds*, também denominados de *logits* (logaritmos naturais), os quais são definidos como a razão da probabilidade de que um evento irá ocorrer pela probabilidade de que ele não irá ocorrer, tem-se a Equação 7. Para converter para *odds*, basta dividirem-se os dois lados da equação por $P\{R|\bar{S}\}$, como pode ser visto:

$$\frac{P\{R|S\}}{P\{\bar{R}|S\}} = \frac{P\{R\} \times P\{S|R\}}{P\{\bar{R}|S\} \times P\{S\}} \quad (7)$$

A partir das definições de probabilidade condicional e as equações anteriores, tem-se que (Equação 8):

$$P\{\bar{R}|S\} = \frac{P\{\bar{R} \cap S\}}{P\{S\}} = \frac{P\{S|\bar{R}\} \times P\{\bar{R}\}}{P\{S\}} \quad (8)$$

Equação 8

Relacionando e substituindo as equações anteriores, chega-se a seguinte fórmula (Equação 9):

$$\frac{P\{R|S\}}{P\{\bar{R}|S\}} = \frac{P\{R\}}{P\{\bar{R}\}} \times \frac{P\{S\}}{P\{S\}} \times \frac{P\{S|R\}}{P\{S|\bar{R}\}} \quad (9)$$

Substituindo-se *odds* nas probabilidades de ocorrência pela presença e ausência de transição, tem-se (Equação 10):

$$O\{R|S\} = O\{R\} \times \frac{P\{S|R\}}{P\{S|\bar{R}\}} \quad (10)$$

Em que $O\{R|S\}$ é o *odds* condicional (*a posteriori*) de R dado S; $O\{R\}$ é o *odds* a *priori* de R; multiplicado pelo que se convencionou chamar modelos de modelagem como razão de suficiência (LS). No método de Pesos de Evidência, calcula-se o logaritmo natural de ambos os lados da equação anterior, e o *log* de LS é denominado peso positivo de evidência W_+ , estimado na presença da variável.

Assim, tem-se a fórmula (Equação 11) que postula o valor do peso para uma transição em decorrência de uma variável endógena que influencia, de certa forma, a mudança do uso e cobertura da terra:

$$\text{logit}\{R|S\} = \text{logit}\{R\} + W^+ \quad (11)$$

Tratamentos algébricos semelhantes levam à derivação de uma expressão de *odds* para a probabilidade condicional de R dada a ausência da evidência S, como sendo (Equação 12):

$$O\{R|\bar{S}\} = O\{R\} \times \frac{P\{\bar{S}|R\}}{P\{\bar{S}|\bar{R}\}} \quad (12)$$

O termo representado pela fração é chamado de razão de necessidade ou *necessity ratio* (LN). No método de Pesos de Evidência, o peso negativo de evidência W- é o logaritmo natural de LN. Portanto, na forma de logit, a equação se torna (Equação 13):

$$\text{logit}\{R|\bar{S}\} = \text{logit}\{R\} + W^- \quad (13)$$

Considerando que LS e LN podem ser também denominados de razões de probabilidade (*likelihood ratios*), quando evento e evidência são positivamente correlacionados, o valor de LS é maior do que 1, enquanto o LN situa-se no intervalo [0,1]. Se o contrário ocorrer, a evidência é negativamente correlacionada com o evento, LN será maior do que 1 e LS se encontrará no intervalo [0,1]. No caso da evidência ser descorrelacionada com o evento, então LS=LN=1, e a probabilidade *a posteriori* se iguala a *a priori*, além da probabilidade de um evento não se alterar pela presença ou ausência de uma dada evidência.

Quando a evidência de vários mapas é combinada, os pesos são calculados para cada mapa independentemente e, então, combinados em uma única equação. A probabilidade condicional de um evento ocorrer, dada a presença de duas evidências S₁ e S₂ é da pela Equação 14:

$$P\{R|S_1 \cap S_2\} = \frac{P\{R \cap S_1 \cap S_2\}}{P\{S_1 \cap S_2\}} \quad (14)$$

Podendo ser escrita como (Equação 15):

$$P\{R|S_1 \cap S_2\} = \frac{P\{S_1 \cap S_2 / R\} \times P\{R\}}{P\{S_1 \cap S_2\}} = \frac{P\{S_1 \cap S_2 / R\} \times P\{R\}}{P\{S_1 \cap S_2 / R\} \times P\{R\} + P\{S_1 \cap S_2 / \bar{R}\} \times P\{\bar{R}\}} \quad (15)$$

No teorema de *Bayes*, há apenas duas hipóteses mutuamente exclusivas, R e \bar{R} , expressa por meio de, R e \bar{R} , com $P\{R\} + P\{\bar{R}\} = 1$.

Os efeitos da interação entre S_1 e S_2 podem ser ignorados supondo-se a independência condicional entre eles. Isso fornece uma simplificação, pois permite que os efeitos de cada mapa de evidência sejam avaliados individualmente e, então, combinados pela multiplicação (ou adição no caso log-linear) dos fatores dos vários mapas juntos.

A suposição de independência condicional pode ser expressa na Equação 16:

$$P\{S_1 \cap S_2 / R\} = P\{S_1 | R\} \times P\{S_2 | R\} \quad (16)$$

Essa equação pode ser simplificada da seguinte forma (Equação 17):

$$P\{R|S_1 \cap S_2\} = P\{R\} \times \frac{P\{S_1 | R\}}{P\{S_1\}} \times \frac{P\{S_2 | R\}}{P\{S_2\}} \quad (17)$$

Usando-se a forma de *odds*, o *odds* condicional tem-se (Equação 18):

$$O\{R|S_1 \times S_2\} = O\{R\} \times LS_1 \times LS_2 \quad (18)$$

Utilizando-se a forma log-linear de Pesos de Evidência, tem-se (Equação 19):

$$\text{logit}\{R|S_1 \cap S_2\} = \text{logit}\{R\} + W_1^+ + W_2^+ \quad (19)$$

Qualquer que seja a formulação usada para o modelo, há quatro modos

diferentes de se combinar dois mapas de evidência: S1 e S2 presentes, S1 presente e S2 ausente, S1 ausente e S2 presente, e S1 e S2 ausentes. Na forma log-linear, essas combinações são escritas pelas Equações 20, 21 e 22 (ALMEIDA, 2003):

$$\text{logit}\{R|S_1\cap\bar{S}_2\}=\text{logit}\{R\}+W_1^++W_2^- \quad (20)$$

$$\text{logit}\{R|\bar{S}_1\cap S_2\}=\text{logit}\{R\}+W_1^-+W_2^+ \quad (21)$$

$$\text{logit}\{R|\bar{S}_1\cap\bar{S}_2\}=\text{logit}\{R\}+W_1^-+W_2^+ \quad (22)$$

As vantagens do modelo *Bayesiano*, segundo Boham-Carter (1994), são: a objetividade, que impede a escolha subjetiva de fatores de ponderação; a possibilidade de combinação de múltiplos mapas de evidências em um modelo de fácil adaptação a linguagens computacionais; a incorporação ao modelo de mapas de entrada com dados incompletos; a possibilidade de aplicação de mapas multiclasse, onde cada fatia é tratada como uma evidência presente (ou razão de probabilidade); a modelagem de incertezas devido a variações nos pesos e dados incompletos.

Em relação as desvantagens, ainda segundo mesmo autor, referem-se: a condição de independência entre os mapas de entrada; o teste para independência condicional só é possível quando o método for aplicado de maneira orientada aos dados, visto que requer a tabulação cruzada entre pares de mapas de evidência, e; a limitação da aplicação do modelo aos casos em que a variável resposta (evento) é bem conhecida.

2.5.4.3 Cadeia de Markov

O método de cadeia de Markov é um dos modelos estatísticos para parametrizar o modelo de simulação (ALMEIDA, 2003; SILVA, 2015). Tendo como base a matriz de transição definida a partir de datas passadas e vinculando-se critérios por Pesos de Evidência, é possível simular as áreas futuras.

Conceitualmente, são modelos matemáticos usados para descrever processos estocásticos, e podem ser denotados pela Equação 23:

$$\Pi_{(t+1)} = P^n \times \Pi_{(t)} \quad (23)$$

Onde:

$\Pi_{(t)}$ = estado do sistema no tempo t;

$\Pi_{(t+1)}$ = estado do sistema após o intervalo t+1;

P^n = estados passíveis de acontecer, representados em matrizes de probabilidade de transição.

Um processo estocástico é dito ser um processo Markoviano se o estado futuro depende apenas do estado presente e não dos estados passados (BACA et al., 2007). Não significando que o modelo desconsidera o passado, apenas passa a considerar que toda informação do passado está representada no presente estado do sistema.

O método estatístico por cadeia de Markov é empregado para determinar a quantidade total de mudanças do uso e cobertura nos cenários de prognóstico (ALMEIDA, 2003). A probabilidade de transição para métodos de cadeia de Markov é estacionária. Isso significa que as probabilidades de transição de estado são constantes em relação ao tempo (PEDROSA e CAMARA, 2007; SOARES FILHO, 1998).

Assim como os demais métodos, o método por cadeia de Markov, apresenta vantagens e desvantagens quando a sua aplicabilidade. Como vantagem tem-se a simplicidade operacional e matemática, permitindo a aplicação a dados de sensoriamento remoto e implementação em SIGs. Além de não exigir grandes quantidades de dados passados para prever o futuro. As probabilidades de transição podem ser estimadas estatisticamente a partir de uma amostra de transição ocorridas durante um intervalo de tempo (ALMEIDA, 2003).

As desvantagens, ou limitações, por assim dizer, referem-se ao método não explicar o 'porquê' dos fenômenos, apresentar limitações quanto a espacialização da resposta e fazer previsões somente considerando eventos estacionários no tempo. Sobretudo, não permite a inclusão de variáveis exógenas (PEDROSA e CAMARA, 2003, 2007).

Para solucionar a limitação do método quanto a espacialização das mudanças, indica-se a associação das cadeias de Markov acopladas a modelos que considerem as células vizinhas no espaço, como é o caso dos autômatos celulares

(CABRAL e ZAMYATIN, 2009). Este é o caso da plataforma modeladora, Dinamica EGO, a qual utilizada o modelo matemático estocástico, baseado em AC para efetuar simulações.

2.5.5 Plataforma Modeladora Dinamica EGO

Os modelos e métodos de simulação, a partir do desenvolvimento tecnológico da informática, passaram a ser executados em plataformas modeladoras, aos quais são denominados modelos computacionais. Os modelos computacionais, além de outras coisas, permitem considerar condições mais amplas das condições a serem simuladas, devido a automatização das etapas e repetitividade com que o modelo pode ser rodado e alterado (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Denominada inicialmente como Dinamica (SOARES FILHO, 1998), após reestruturações, a plataforma modeladora passou a se chamar Dinamica EGO, em que EGO significa *Environment for Geoprocessing Objects* (Ambientes para Objetos Geoprocessáveis) (SOARES FILHO et al., 2009). Trata-se de um *software* baseado no método de representação da dinâmica espaço-temporal por AC, criado e mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Os modelos criados pelo Dinamica EGO são gravados na forma de *scripts* textuais, no formato XML ou EGO *Script*. A interface gráfica é escrita em Java e seu núcleo, responsável pela criação e execução dos modelos, é escrito em C++ (DIAS e WALDE, 2013; SOARES FILHO et al., 2009).

O ambiente do *software* contém algoritmos denominados de *functores*. Onde cada um executa uma operação, desde funções de simples análises espaciais até simulações espaciais, incluindo funções de transição, métodos de calibração e validação de modelos. Os *functores* são ligados em sequência através de setas (portos), estabelecendo fluxos em forma de grafos, podendo ser agrupados em *containers*, tipo especial de *functor*. Assim, um modelo no Dinamica EGO é formado por *functores* executados da esquerda para direita, onde um *functor* carrega o dado, outro executa a função e um terceiro escreve o resultado em um arquivo de saída (SOARES FILHO et al., 2009).

Utiliza o método dos Pesos de Evidência para o cálculo das probabilidades de transição, método baseado no teorema da probabilidade de Bayes, além de regras

de transições estocásticas (Cadeia de Markov). Os parâmetros de entrada correspondem a mapas temáticos da paisagem, representados por matrizes. As variáveis espaciais do modelo são denominadas de dinâmicas e estáticas. As variáveis dinâmicas correspondem as variáveis de uso e cobertura da terra, e que variam ao longo do tempo. Enquanto as variáveis estáticas correspondem as variáveis consideradas inalteráveis ao longo do período analisado (solos, geologia, IDH, etc).

Trabalhos comparando a eficiência do Dinamica EGO com outros modeladores foram realizados, dos quais pode-se citar: Mas et al. (2011) compararam quatro modeladores, o CA_MARKOV (EASTMAN, 2009), CLUE-S (VERBURG e OVERMARS, 2009), Dinamica EGO (SOARES FILHO et al., 2002, 2009) e o Land Change Modeler (LCM) (EASTMAN, 2009), onde o Dinamica EGO apresentou maior flexibilidade para desenvolver modelos personalizados, interface amigável, além de programação acessível, intuitiva e bem documentada. Além dessas constatações referentes a interface e programação do Dinamica EGO, Yi et al. (2012), ao comparar os modeladores CLUE-S e Dinamica EGO, observaram que o CLUE-S foi melhor em precisão geral, prevendo com maior exatidão a quantidade de mudança no uso da terra. No entanto, o padrão espacial do mapa simulado no Dinâmica EGO foi mais consistente. O mesmo foi observado por Lima et al. (2013), em análise comparativa entre o Dinamica EGO e LCM, em que, os melhores resultados de validação foram obtidos para o modelo LCM, enquanto o Dinamica EGO apresentou métricas espaciais mais próximas às observadas.

As etapas de processamento no Dinamica EGO, como plataforma de simulação para modelos de mudanças no uso e cobertura da terra, correspondem a parametrização, calibração, simulação, validação e simulação de cenários futuros (CEMIN, 2014; SOARES FILHO et al., 2009), as quais serão descritas na sequência.

2.5.5.1 Parametrização

A parametrização do modelo corresponde a um conjunto de métodos que visam conferir pesos às variáveis de entrada do modelo (ALMEIDA et al., 2003a). Esses métodos constituem-se pela definição das matrizes de transições referentes as variações das classes de uso e cobertura no período analisado; discretização das

faixas de distâncias das variáveis, e; cálculo dos Pesos de Evidência.

A matriz de transição representa a quantidade total de mudanças para cada tipo de transição de uso e cobertura da terra em um período simulado (ALMEIDA, 2003). É uma representação matemática dos processos de Markov (cadeia de Markov) que descrevem um processo estocástico, expressa por uma matriz quadrada $n \times n$ (BACA et al., 2007).

No Dinamica EGO, o cálculo e definição das matrizes de transição, que segundo Soares Filho et al. (2009), descrevem um sistema que muda em intervalos discretos de tempo, utiliza-se a função “*determine transition matrix*”. Esta função permite obter as taxas líquidas de mudanças de uma classe de uso e cobertura da terra para outra classe. O resultado desta etapa é uma matriz de transição única (*single step*) e uma matriz de transição múltipla (*multiple step*). A primeira apresenta a taxa de transição de todo o período de tempo analisado, enquanto que segunda, apresenta taxas de transições decompostas ano a ano.

Vale destacar, que para o Dinamica EGO, o passo de tempo pode compreender qualquer extensão de tempo (ano, mês, dia, etc.), uma vez que as unidades de tempo são apenas referências externas (SOARES FILHO et al., 2009).

Tendo como base as transições obtidas, o cálculo das probabilidades locais de transição é definido a partir da discretização, ou fatiamento, dos mapas das variáveis estáticas e dinâmicas contínuas, que define as faixas de distâncias mais favoráveis para as transições (SOARES FILHO et al., 2002, 2009), seguido da atribuição de Pesos de Evidência às faixas. Esse processo se faz necessário uma vez que os Pesos de Evidência são aplicados somente a dados categóricos (SOARES FILHO et al., 2009).

O método utilizado pelo Dinamica EGO, calcula as faixas a partir da definição de um delta mínimo, que corresponde ao incremento (Dx) para uma variável x de grandeza contínua, utilizada para construção de n buffers (Nx) compreendendo intervalos X_{\min} para $X_{\min} + nDx$. (SOARES FILHO et al., 2009). A função é denominada “*determine_weights_of_evidence_ranges*”, e resulta em um arquivo esqueleto de Pesos de Evidência, com os intervalos (faixas) de categorização, porém com todos os pesos iguais a zero.

O cálculo dos pesos para cada buffer, através do método estatístico de Pesos de Evidência, utiliza a função “*determine_weights_of_evidence_coefficient*” e resulta no mesmo arquivo da etapa anterior, porém com pesos, calculados por meio das

equações apresentadas na seção 2.5.4.2.

O cálculo das probabilidades de transição de uso e cobertura da terra, pelo método de Pesos de Evidência, baseia-se na probabilidade de um evento ocorrer, dado que outro evento, independente do primeiro, já ocorreu (ALMEIDA et al., 2007). Sendo assim, por meio dos Pesos de Evidência, obtém-se as razões entre áreas de ocorrência de determinadas variáveis em relação a áreas de existência dos demais fenômenos considerados no estudo (BOHAM-CARTER, 1994). Estas razões podem ser favoráveis ($W+$) ou desfavoráveis ($W-$). São considerados como $W+$ pesos que favorecem uma transição em determinada faixa e em determinada variável, e; $W-$ pesos que desfavorecem uma transição em determinada faixa de distância e em determinada variável (CEMIN, 2014).

A avaliação dos Pesos de Evidência pode ser realizada a partir da análise de gráficos de dispersão das faixas de distâncias, para cada transição. Quando os gráficos de dispersão produzirem bom ajuste a linhas de tendência, indicam a alta possibilidade de inclusão destes padrões no modelo de dinâmica do uso e cobertura da terra (ALMEIDA, 2003; ALMEIDA et al., 2007). Benedetti (2010), destaca que a avaliação também pode se dar a partir da avaliação do arquivo de Pesos de Evidência por faixas de distância. Identificando as faixas ou classes, com maior peso de evidência positivo.

2.5.5.2 Calibração

A calibração do modelo consiste em avaliar a correlação das variáveis dinâmicas e estáticas, visando selecionar o conjunto de variáveis que melhor explicam as mudanças das classes de uso e cobertura da terra, no período de estudo considerado. A calibração tem por objetivo definir os parâmetros mais adequados ao ajuste do modelo (CHRISTOFOLLETTI, 1999).

O método estatístico de Pesos de Evidências, baseado no Teorema de Bayes, ou da probabilidade condicional, pressupõe a independência de eventos. Dessa forma, avaliar a dependência entre os mapas de variáveis explicativas corresponde a aplicação de métodos estatísticos de correlação (ALMEIDA et al., 2003b; 2007). Os métodos empregados pelo Dinamica EGO para testar a independência são o χ^2 , Cramer, Contingência, Entropia e *Join Information Uncertainty* (Incerteza de Informação Conjunta) (BOHAM-CARTER, 1994;

SOARES FILHO et al., 2009). Sendo que os métodos mais aplicados são Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) (ALMEIDA et al., 2003b; 2007).

Os índices V e U medem a associação entre pares de dados de mapas, operando em unidades reais e percentuais, respectivamente, de áreas de sobreposição dos mapas. Sendo assim, o U é julgado como mais preciso por considerar valores relativos de área de sobreposição (BONHAM-CARTER, 1994).

A expressão a seguir (Equação 24) demonstra o cálculo do índice Cramer (V):

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{T..M}} \quad (24)$$

Onde:

T.. = totais marginais da matriz de tabulação cruzada entre dois mapas A e B;

X^2 = estatística qui-quadrado;

M = mínimo de (n-1, m-1), em que n é igual ao número de linhas e m é o número de colunas da matriz de tabulação cruzada entre os mapas A e B.

O índice de Incerteza de Informação Conjunta (U), da mesma forma, baseia-se na matriz de tabulação T, podendo este ser utilizado como medida de associação, sendo definido pela Equação 25:

$$U(A,B) = 2 \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A,B)}{H(A) + H(B)} \right] \quad (25)$$

Sendo que, $H(A, B) = H(A) + H(B)$ e $U(A, B)$ é igual a 0 quando os mapas são independentes e, $H(A) = H(B) = H(A, B) = 1$ e $U(A, B)$ é equivalente a 1, quando os mapas são dependentes (ALMEIDA, 2003).

Para análise exploratória da seleção das variáveis, de acordo com Bonham-Carter (1994), valores inferiores a 0,5, para os índices de Cramer e Incerteza de Informação Conjunta, sugerem menor associação. Almeida et al. (2003b; 2007), destacam que a seleção das variáveis também pode ser realizada por métodos empíricos, baseado na visualização em tela dos mapas sobrepostos aos limites do mapa de uso do solo final.

2.5.5.3 Simulação

Após a calibração do modelo, o mesmo pode ser executado gerando-se simulações desejadas, de acordo com os objetivos especificados (CHRISTOFOLETTI, 1999). Entretanto, anterior a este processo efetua-se os ajustes das funções de transição para produzir os padrões espaciais de mudanças das transições do uso e cobertura da terra, as quais são realizadas através dos algoritmos *Expander* e *Patcher* (ALMEIDA et al., 2003b; 2007).

A função *Patcher* realiza transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado diferente de j , e a função *Expander* executa transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças adjacentes às células com estado j , ou seja, a função *Patcher* gera novas manchas, por meio de um mecanismo de constituição de sementes, enquanto que a função *Expander*, responde pela expansão de manchas previamente existentes de uma determinada classe de uso e cobertura da terra (ALMEIDA et al., 2007; SOARES FILHO et al., 2002).

Os parâmetros necessários para ajustar as funções de transições são: grau de isometria e tamanho médio e variância das áreas de mudanças das classes de uso e cobertura da terra, em unidade de área (hectare). O grau de isometria das manchas pode variar de 0 a 2, sendo que, valores mais próximos a 0 indicam manchas fragmentadas ou dentríticas, e, valores mais próximos a 2 indicam manchas mais compactas (SOARES FILHO et al., 2009). A média e variância da área de mudança das classes de uso e cobertura da terra podem ser definidas através da estatística de polígonos (BENEDETTI, 2010). Para Christofolletti (1999), a definição dos valores referentes aos parâmetros do modelo e identificá-los como parâmetros fisicamente mensuráveis no mundo real, é uma das principais dificuldades da modelagem.

Após o ajuste de todos os parâmetros, o modelo pode ser executado, efetuando-se simulações.

2.5.5.4 Validação do modelo

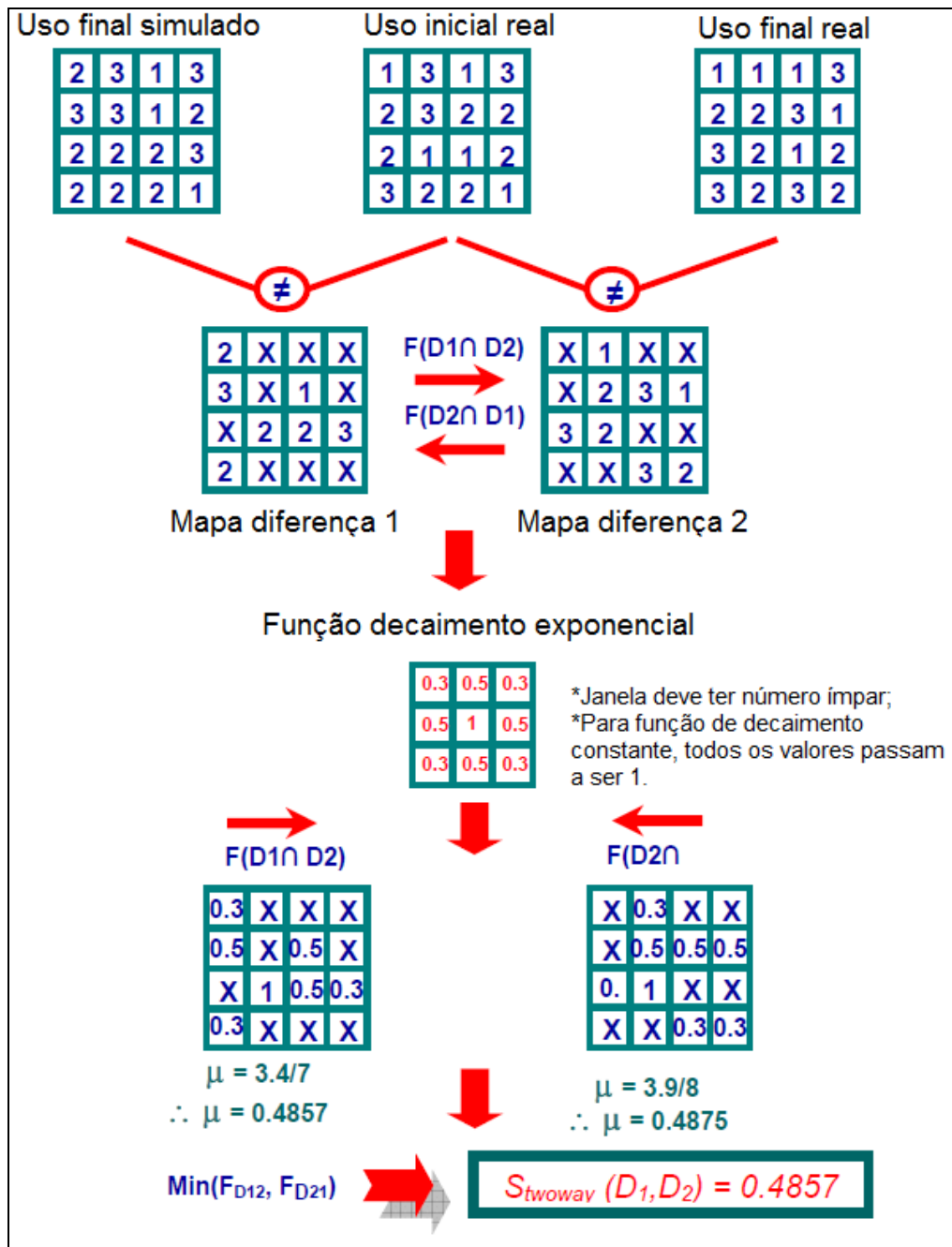
Uma questão importante na modelagem é a validade do modelo. Técnicas de validação incluem a simulação do modelo em condições de entrada conhecidas,

comparando os resultados simulados com saídas conhecidas (MARIA, 1997; VELDKAMP e LAMBIN, 2001).

O método de validação utilizado no Dinamica EGO denomina-se de teste de similaridade *fuzzy*. Trata-se de um teste de comparação de similaridade *fuzzy* entre o mapa simulado e o mapa-referência (MACEDO et al., 2013). O método é uma adaptação do índice de similaridade criado por Hagen (2003), elaborado pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR/UFMG), para aplicação no *software* Dinamica EGO. Esse método baseia-se no conceito de imprecisão da localização, no qual a representação de uma célula é influenciada pela própria célula e, menos, pelas células de sua vizinhança (CEMIN, 2014; LIPPERT, 2014).

No *software* Dinâmica EGO, esse método é denominado de “*Calc Reciprocal Similarity*” e emprega funções de decaimento exponencial e constante, com a distância (janelas) para ponderar a distribuição do estado da célula central. Essa função é realizada relacionando os mapas de diferenças entre o mapa de uso e cobertura da terra inicial e final reais, com o mapa de diferença de uso e cobertura da terra inicial real e final simulado (Figura 3) (SOARES FILHO et al., 2009).

Figura 3 – Método de similaridade fuzzy usando mapa de diferenças e função de decaimento exponencial



Fonte: Adaptado de Soares Filho et al. (2009).

Na lógica *fuzzy*, os pixels que pertencem a uma determinada classe recebem valor 1, à medida que os pixels das proximidades se distanciam do valor central, os mesmos passam a ter valores com tendência a 0 (SILVA, 2003). A partir disso, é gerado um valor global de similaridade que varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior a similaridade entre os mapas.

2.5.5.5 Simulação de cenários

O conceito de cenários, baseia-se em condições pré-determinadas (premissas), a partir das quais, estima-se as possíveis ocorrências. Os cenários podem ser prospectivos ou retrospectivos, sendo que, o primeiro refere-se a estimas futuras e o segundo refere-se a reconstituições de situações passadas (SILVA, 2007). No presente trabalho somente são abordados os cenários prospectivos, ou futuros, como chamados comumente.

As simulações de cenários futuros são realizadas a partir do modelo validado. Para Christofletti (1999), as simulações corroboram com a principal função da modelagem, que é servir como instrumento de planejamento, e dessa forma, o modelo não basta apenas gerar informações detalhadas, mas também deve compatibilizar uma gama de opções possíveis no âmbito de tomada de decisões.

Sendo assim, com base nos modelos, pode-se trabalhar com as informações existentes, fazer simulações e extrair novas informações, especialmente úteis na tomada de decisão (MEIRELLES et al., 2007b).

2.5.5.6 Aplicações

Investigações vêm sendo conduzidas no âmbito da modelagem dinâmica do uso e cobertura da terra, sobretudo com aplicação no *software* Dinamica EGO, dos quais pode-se citar: A primeira aplicação foi desenvolvida por Soares Filho (1998), com o objetivo de elaborar um modelo espacial de simulação de mudanças da paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica. Dentre os resultados obtidos pelo autor, comprovou que é possível desenvolver modelos baseados em ambientes SIG que simulam padrões espaciais gerados pela dinâmica de paisagem.

Almeida (2003) aplicou a modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento urbano, onde simulou as mudanças de uso da terra em áreas urbanas das cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. Ainda no âmbito do planejamento urbano, Godoy (2004), modelou a dinâmica de ocupação do solo no bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil. Em ambas aplicações os resultados foram satisfatórios no que tange ao planejamento e desenvolvimento urbano.

Dias e Walde (2013) efetuaram a modelagem da dinâmica espacial do uso e

ocupação do solo na bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF. Obtiveram simulações para o ano 2020, onde observaram tendência de saturação no espaço territorial caso mantenha-se a tendência de mudança no uso do solo avaliado nos períodos anteriores. Macedo et al. (2013), avaliaram a partir da modelagem dinâmica espacial, as alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira no município de Arealva, São Paulo.

Em escala regional, alguns trabalhos foram dedicados a modelagem de uso e cobertura da terra em regiões do estado do Rio Grande do Sul. Hendges (2007), a partir do *software* Dinamica, criou um modelo estocástico-probabilístico para simular o cenário florestal do Rio Grande do Sul para o ano 2020. Buscou avaliar a localização e quantificação de classes de uso e cobertura da terra em detrimento da localização de diversos fatores físicos e humano. Ferrari (2008), em seu estudo sobre modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra na Quarta Colônia (RS) simulou tendências de evolução de uso e cobertura da terra para o ano 2018, a partir de um modelo construído no período de 2002 a 2008.

Benedetti (2010), a partir da modelagem dinâmica buscou analisar a dinâmica dos padrões de uso e cobertura da terra nas Serras do Sudeste e Campanha Meridional, microrregiões pertencentes à Metade Sul do Estado (RS). Lippert (2014), buscou relacionar a distribuição espacial de fatores socioeconômicos com as áreas florestais em um modelo dinâmico para simular prognósticos de localização e quantificação de florestas em unidades de paisagem presentes no bioma Pampa (RS).

Lima (2014) utilizou um modelo de autômato celular para a modelagem da dinâmica da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos (RS) ao longo de 21 anos, simulando tendências de mudanças dos elementos desta paisagem para os anos 2016 e 2022. Cemin (2014), afim de avaliar a fragmentação florestal no município de Caxias do Sul (RS), simulou cenário futuro para o ano 2021, buscando verificar as mudanças e se estas influenciaram na qualidade ambiental destes fragmentos, considerando índices de ecologia de paisagem. Já, Silva (2015), aplicou a modelagem dinâmica para simular o processo de arenização e cobertura florestal no Sudoeste do Rio Grande do Sul.

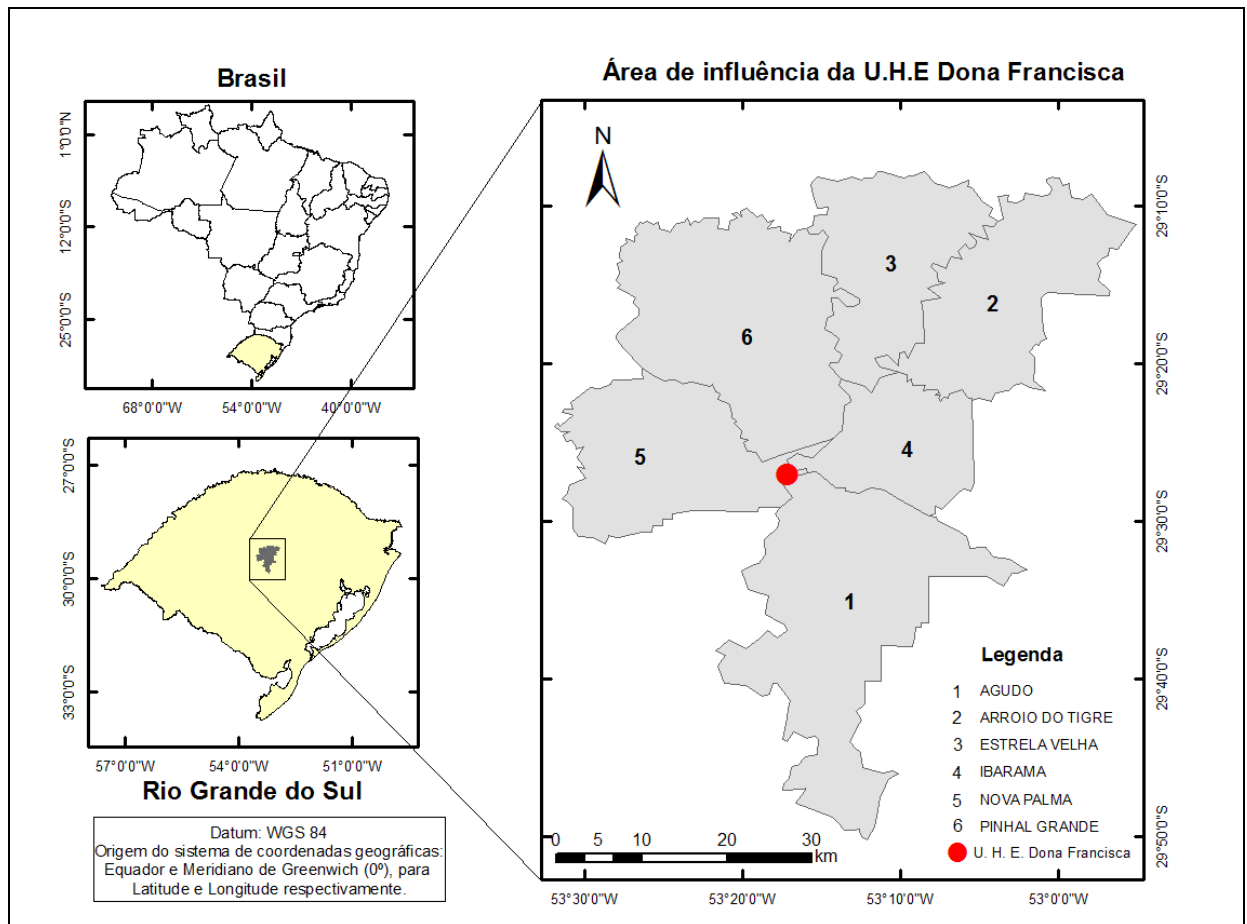
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Localização

A área de estudo é composta pelo limite político de seis municípios da região central do Rio Grande do Sul, os quais correspondem a área de influência da Usina Hidrelétrica Dona Francisca (U.H.E Dona Francisca) (OBSERVATÓRIO SÓCIO-AMBIENTAL DE BARRAGENS, 2014). Geograficamente localiza-se entre as coordenadas 53° 32' 34" longitude Oeste; 29° 52' 37" latitude Sul e 52° 54' 43" longitude Oeste; 29° 03' 25" latitude Sul (Figura 4).

Figura 4 – Mapa de localização da área de influência da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, Rio Grande do Sul, Brasil



Fonte: Autora.

A U.H.E Dona Francisca, inaugurada no ano de 2001, está instalada no curso médio do rio Jacuí (29° 15' e 29° 27' de latitude sul e 53° 14' e 53° 17' de longitude oeste). Seu reservatório ocupa uma área de 15,79 km², com abrangência na margem direita do rio, municípios como Nova Palma e Pinhal Grande, e na margem esquerda, terras dos municípios de Agudo, Ibarama, Estrela Velha e Arroio do Tigre (ALVES et al., 2000). Em extensão territorial, os seis municípios atingidos representam juntos 2.120,05 km², correspondendo a área de estudo total.

3.1.2 Aspectos físicos e socioeconômicos

Os municípios da área de influência da U.H.E Dona Francisca caracterizam-se por apresentar baixa densidade demográfica. Considerando a população total, observa-se maior concentração desta, em área rural, ocasionando maior concentração de população rural em comparação a população urbana. O IDH médio dos municípios corresponde a 0,692 e o PIB médio é de R\$ 145.827,33, conforme pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados socioeconômicos dos municípios da área de estudo

Municípios	População Total (hab.) ¹	População Urbana (hab.)	População Rural (hab.)	Densidade Demográfica (hab/km ²) ²	IDH³	PIB⁴ (\$)
Agudo	16.722	6.889	9.833	31,19	0,694	274.206,00
Arroio do Tigre	12.648	5.962	6.686	39,74	0,707	202.406,00
Estrela Velha	3.628	1.167	2.461	12,88	0,679	73.127,00
Ibarama	4.371	1.053	3.318	22,63	0,652	56.294,00
Nova Palma	6.342	3.083	3.259	20,23	0,744	143.900,00
Pinhal Grande	4.471	1.895	2.576	9,37	0,678	125.031,00
	Total 48.182	Total 20.049	Total 28.133	Média 22,67	Média 0,692	Média 145.827,33

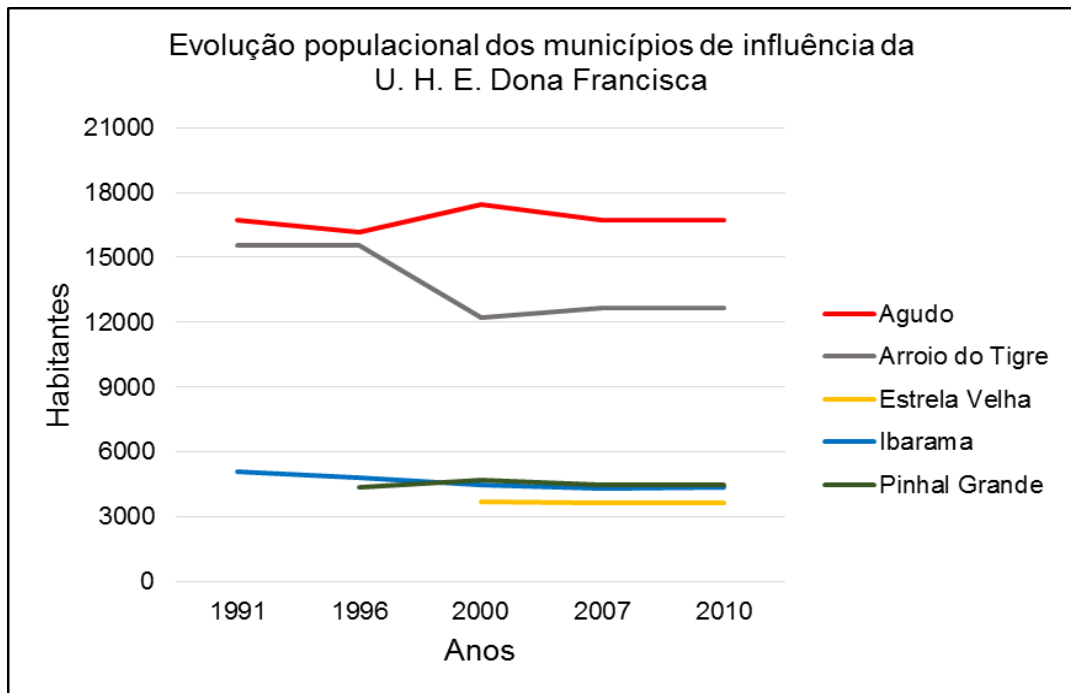
Fonte: IBGE, 2010.

¹ Habitantes; ² Habitantes por km; ³ Índice de Desenvolvimento Humano; ⁴ Produto Interno Bruto.

A evolução populacional dos municípios ao longo do tempo, como ilustrado na Figura 5, demonstrou poucas variações a partir do ano 2000. A redução populacional observada entre os anos 1996 a 2000 em Arroio do Tigre, ocorreu devido ao desmembramento dos distritos de Estrela Velha e Itaúba do município de

Arroio do Tigre, para formar o novo município de Estrela Velha, em 1995. O município de Agudo apresentou maior acréscimo populacional entre os anos 1996 a 2000, com uma pequena redução em 2007.

Figura 5 – Evolução populacional dos municípios de influência da U.H.E Dona Francisca



Fonte: IBGE (1991, 1996, 2000, 2007, 2010). Organizado pela autora.

Os municípios são organizados, basicamente, em pequenas e médias propriedades rurais e possuem sua base econômica no setor primário, cujos proprietários, principalmente de origem alemã e italiana, dedicam-se a agricultura e/ou pecuária, tanto para fins comerciais quanto para subsistência (ALVES et al., 2000). Os cultivos agrícolas que se destacam são: soja, em áreas de planalto; arroz, nas planícies aluviais; fumo, milho, trigo e feijão, nas áreas de encostas (FARENZENA e PEREIRA FILHO, 2006).

3.1.3 Clima

Segundo o sistema de Köppen, o Rio Grande do Sul se enquadra na zona fundamental temperada úmida (Cf), o qual subdivide-se em duas variedades específicas, "Cfa" e "Cfb" (MORENO, 1961). A área de estudo por sua vez,

enquadra-se na variedade "Cfa" (MARCHIORI et al., 1982), a qual é caracterizada por apresentar chuvas durante todos os meses do ano, com precipitação média anual de 2000 mm e, verões quentes com temperatura do mês mais quente superior a 22°C, e do mês mais frio superior a 3°C.

3.1.4 Hidrografia

Localizada na região hidrográfica do Guaíba, a área de estudo situa-se entre duas bacias hidrográficas, Baixo Jacuí e Alto Jacuí, ambas localizadas no centro-norte do estado. Os municípios de Agudo e Nova Palma, onde a usina está instalada, localizam-se na bacia Baixo Jacuí. Os municípios de Estrela Velha e Arroio do Tigre, Ibarama e Pinhal Grande encontram-se na Bacia Hidrográfica Alto Jacuí.

A bacia hidrográfica do Alto Jacuí abrange uma área de 12.985,44 km² (COAJU, 2009) e os seus principais cursos de água são os rios Jacuí, Jacuí-mirim, Jacuízinho, dos Caixões e Soturno. Os usos da água se destinam a irrigação, dessedentação animal e consumo humano (SEMA, 2010a). Coaju (2009) indica além de outros conflitos de uso na bacia, o alagamento de terras para geração de energia com perda de área para os agricultores e o uso de sistemas de irrigação diminuindo a disponibilidade de água para abastecimento público.

A bacia hidrográfica Baixo Jacuí possui uma área de 17.345,15 km² e seus principais cursos de água são os arroios Irapuã, Capané, Botucacaí, Capivari, do Conde, dos Ratos, dos Cachorros, Ibacurú e o rio Jacuí. Os usos da água se destinam a irrigação, uso industrial e abastecimento humano (SEMA, 2010a).

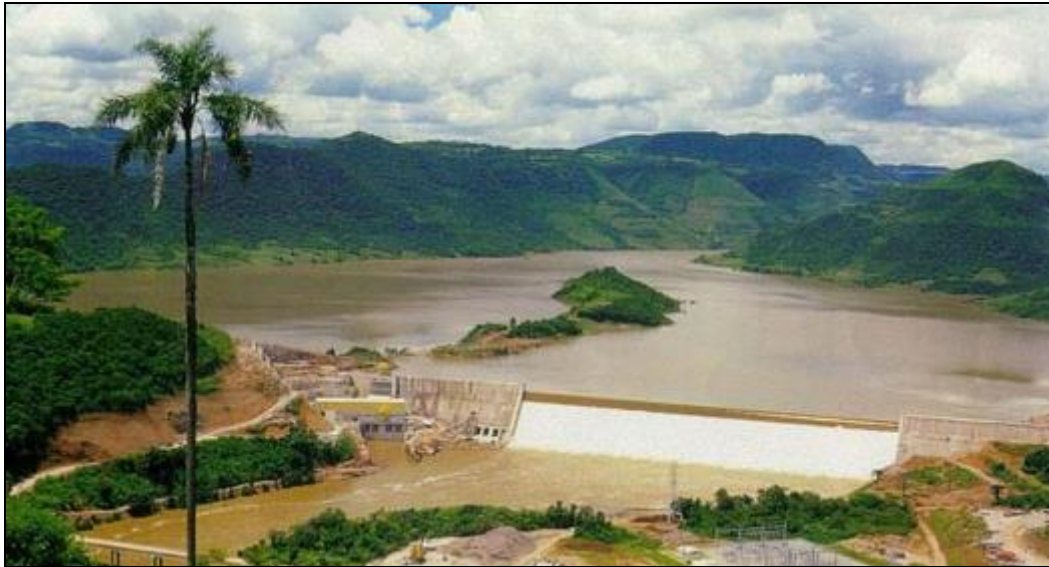
O rio Jacuí onde a usina está instalada caracteriza-se por apresentar áreas de encostas íngremes até áreas de várzea (ALVES et al., 2000).

3.1.5 Geomorfologia e Geologia

A U.H.E Dona Francisca está localizada na faixa de transição entre duas regiões fisiográficas, denominadas como Depressão Central e Planalto Sul-Rio-Grandense (FARENZENA e PEREIRA FILHO, 2006). Sendo assim, a área de estudo apresenta relevo com variações, desde acidentado, passando de forte ondulado e montanhoso, para suave ondulado e plano (PEREIRA et al., 1989). A

área do reservatório, segundo Friedrich (1993), caracteriza-se por um vale profundo em forma de 'v' (Figura 6).

Figura 6 – Usina Hidrelétrica Dona Francisca - RS, Brasil



Fonte: Folheto CEEE & DFESA (2001).

Localizada na fronteira sul da bacia sedimentar do Paraná, que por sua vez foi formada por uma sequência de derrames basálticos, a área apresenta aspectos litológicos especiais, com as seguintes formações geológicas: aluviões quaternários; basaltos da Formação Serra Geral; arenitos a partir da formação de Botucatu, e; arenitos e siltstone argilosos da Formação Caturrita (ALVES et al., 2000).

3.1.6 Solos

Os solos são definidos principalmente por: Podzólico Vermelho Amarelo, caracterizado por textura argilosa, cor vermelha, boa capacidade de drenagem e profundidade média de cerca de 150 cm; Bruno Avermelhado Distrófico, caracterizado por solo argiloso úmido, cor acastanhada, alto teor de silte e capacidade de drenagem moderada; Planossolos (solos hidromórficos) caracterizados por coloração acinzentada, de textura média e baixa capacidade de drenagem; Brunizem avermelhado, caracterizados como solos rasos e com textura argilosa, encontrados em relevo forte ondulado e com substrato basáltico (ALVES et

al., 2000).

3.1.7 Vegetação

Sobre domínio do bioma Mata Atlântica, a vegetação predominante pertence à Floresta Estacional Decidual, a qual ocorre na porção noroeste (Alto Uruguai) e central (Serra Geral) do estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2004).

A Floresta Estacional Decidual que ocorre na Serra Geral, segundo RAMBO (1956), limita as pastagens da campanha sul e o planalto ao norte, e, caracteriza-se pela presença de arbustos e ervas em orlas de mata; árvores pequenas e arbustos nas faixas marginais, e; mata alta. São típicas da mata alta, espécies como *Phytolacca dioica* (umbú), *Zanthoxylum* spp. (mamica-de-cadela), *Cedrela fissilis* (cedro), *Cabralea canjerana* (cangerana), *Cordia trichotoma* (louro), entre outras.

Durlo et al. (1982), Longhi et al. (1982) e Marchiori et al. (1982) relataram a intensa degradação das florestas ao longo do Rio Jacuí, e os diferentes estágios sucessionais em que as florestas se encontravam, reflexos da colonização e práticas exploratórias dos imigrantes.

3.2 MATERIAIS

Os materiais necessários para a execução deste trabalho corresponderam a imagens digitais, dados vetoriais, material de processamento e cálculo, e *software* para processamento.

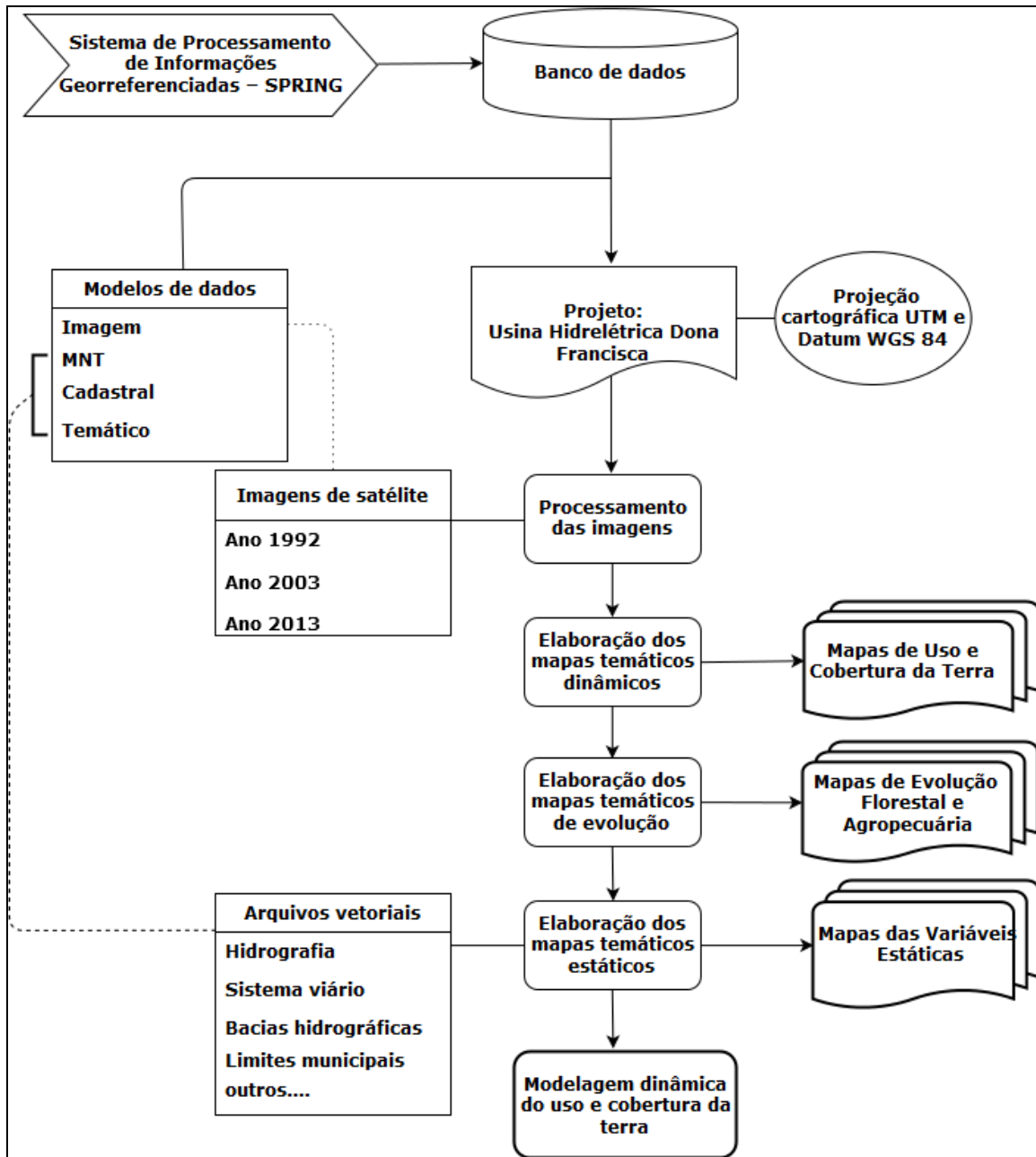
- Imagens Digitais: Imagens orbitais dos satélites LANDSAT 5 e 8 – sensores TM e OLI, com resolução espacial 30 m, dos anos 1992, 2003 e 2013. Além de uma imagem Topodata, com resolução de 30 m, folha 29S54_ZN (VALERIANO, 2005; VALERIANO, 2008).
- Dados Vetoriais: *Shapefiles* com delimitação da hidrografia, sistema viário do estado do Rio Grande do Sul, na escala 1:50.000 (HASENACK e WEBER, 2010). *Shapefiles* de solo e geologia do estado do Rio Grande do Sul, na escala 1:750.000 (CPRM) e, dos limites políticos municipais, na escala 1:250.000 (IBGE, 2013). Arquivos no formato *shapefile* da delimitação das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul, na escala 1:50.000 (SEMA, 2010b).

- Material para processamento e cálculo: Computador com processador Intel Core i7, com 1 TB de disco rígido e 16 GB de memória RAM e, Sistema Operacional Windows 7. Além de ferramentas do pacote Microsoft Office 2010.
- *Software* para processamento: SPRING 5.2.7 (CÂMARA et al., 1996), Google Earth (Google Inc., 2016), Dinamica EGO, versão 3.0.5 (SOARES FILHO et al., 2009) e Idrisi (EASTMAN, 2009).

3.3 MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos utilizados para alcançar os objetivos propostos são sumarizados no fluxograma apresentado na Figura 7. Na sequência, cada um dos procedimentos metodológicos é detalhado afim de facilitar a compreensão e reprodução dos mesmos.

Figura 7 – Procedimentos metodológicos



Fonte: Autora.

3.3.1 Elaboração do banco de dados espacial

O banco de dados espacial foi construído no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING, *software* desenvolvido e disponibilizado gratuitamente pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial) (CÂMARA et al., 1996), onde foi criado o projeto com projeção cartográfica UTM (Sistema Universal

de Projeção Transversa de Mercator) e Datum WGS 84 - *World Geodetic System* 1984, fuso 22 sul.

Os primeiros arquivos importados ao banco de dados foram: o limite do estado do Rio Grande do Sul e seus respectivos limites físicos municipais, a partir dos quais foi selecionada a área de interesse. Na sequência, foram importadas as imagens do Landsat 5 e 8 (sensores TM e OLI, respectivamente), bem como os demais arquivos vetoriais utilizados para a confecção dos mapas temáticos estáticos, os quais serão descritos na sequência.

3.3.2 Processamento das imagens

As imagens foram selecionadas em três datas distintas: 1992, 2003 e 2013. Foram empregadas para acompanhar a evolução temporal do uso e cobertura da terra na área de estudo e para gerar o modelo dinâmico espacial.

A imagem do ano 1992 foi selecionada para retratar a situação do uso e cobertura da terra na área de estudo, antes da construção da U.H.E Dona Francisca; a imagem de 2003, para retratar as condições dois anos após o início do funcionamento da mesma, e; a imagem do ano 2013, data mais atual, foi selecionada para identificar e quantificar as mudanças provocadas no uso e cobertura da terra da área, após a construção da U.H.E Dona Francisca e na formação do seu lago de contenção.

A área de influência da U.H.E Dona Francisca é recoberta por duas cenas do satélite Landsat, sendo estas da órbita 222, ponto 80 e 81. Para os anos 1992 e 2003 as imagens obtidas correspondem ao satélite Landsat 5, sensor TM. Já a imagem do ano 2013 refere-se ao produto do satélite Landsat 8, sensor OLI, conforme mostrado na Tabela 6.

A época de aquisição da imagem é um fator importante e que contribui para o êxito da análise de dados de satélites (MOREIRA, 2005), desta forma, todas as imagens selecionadas correspondem ao mesmo período, mês de outubro, entre os dias 08 e 14.

Tabela 6 – Especificações das cenas obtidas e que recobrem a área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil

Ano	Cena	Ponto	Orbita	Data de aquisição	Satélite	Sensor
1992	1	80	222	14/10	Landsat 5	TM
	2	81				
2003	1	80	222	13/10		
	2	81				
2013	1	80	222	08/10	Landsat 8	OLI
	2	81				

Fonte: Autora.

As imagens Landsat no formato *GeoTiff* foram obtidas georreferenciadas do catálogo de imagens do *United States Geological Survey* (USGS), e na sequência importadas para o *software* SPRING, onde efetuou-se o processamento das mesmas.

Os procedimentos metodológicos relacionados com o processamento das imagens de satélite, incluíram, contraste, recorte e classificação. Nesse sentido, inicialmente foram elaboradas composições coloridas pela associação de bandas, sendo selecionada a que melhor permitiu a identificação dos alvos. À estas composições, foi aplicada a técnica de contraste linear, afim de facilitar a identificação das classes de uso e cobertura da terra na etapa de classificação.

O recorte, visando isolar a área de estudo, foi efetuado sobre as imagens. Utilizou-se para tanto, o arquivo vetorial no formato *shp*. contendo o limite da área de estudo.

A classificação das imagens foi realizada de forma supervisionada, utilizando o algoritmo classificador por regiões *Bhattacharyya*, que utiliza a distância *Bhattacharyya* para medir a separabilidade estatística entre cada par de classes espectrais, em que, a separabilidade é calculada através da distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais (BRITES et al., 2012).

Foram elencadas e identificadas quatro classes de uso e cobertura da terra para área de influência U.H.E Dona Francisca, a saber: floresta, agropecuária, solo exposto e água. Optou-se pelo reduzido número de classes, visando reduzir a complexidade do modelo utilizado no *software* Dinamica EGO, que tende a aumentar quanto maior for o número de classes (LIMA, 2014).

Na classe floresta estão inseridas as formações vegetais nativas em estágio inicial, médio e/ou avançado de regeneração, encontradas sob a forma de mata ciliar ao longo da rede hidrográfica e dispersas em forma de fragmentos. Foram consideradas ainda, as florestas plantadas, representadas principalmente por plantios florestais de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. A classe água compreende os rios, reservatórios naturais e/ou artificiais, bem como a área alagada da U.H.E Dona Francisca. Na classe agropecuária incluem áreas destinadas ao cultivo de culturas agrícolas anuais, bem como áreas de campo destinadas a pecuária. Por fim, a classe solo exposto constitui área sem vegetação, representadas por áreas de agricultura em pousio e/ou em fase de preparação do solo.

A qualidade da classificação digital foi avaliada pelo índice *Kappa*, calculado a partir da matriz de confusão, obtida durante a fase de coleta das amostras de treinamento no SPRING.

3.3.3 Mapeamento temático de uso e cobertura da terra

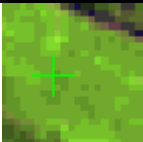


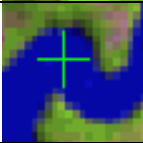
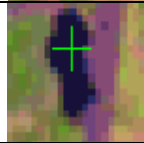


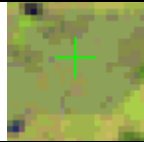
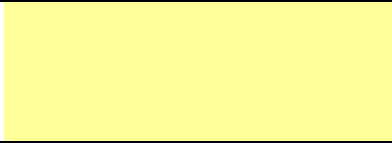
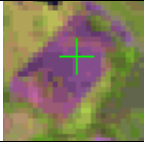
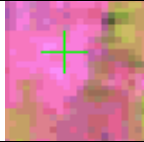
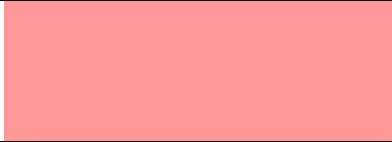
Foram gerados mapas temáticos de uso e cobertura da terra da área de estudo para os anos, 1992 e 2003, 2013, estes mapas constituem variáveis dinâmicas pois apresentam variações ao longo do período.

A Tabela 7 apresenta amostras dos padrões das classes identificadas nas imagens, bem como a representação temática empregada no mapeamento temático.

A partir dos mapas temáticos, efetuou-se a quantificação das diferentes classes de usos e cobertura da terra mapeadas, bem como a análise das transições entre as classes, obtidas no software Dinamica EGO, onde utilizou-se a função “*determine transition matrix*”, correspondente a primeira etapa do processo de modelagem. Nesta etapa obtém-se taxas líquidas das transições ocorridas entre as classes de uso e cobertura da terra, sendo necessário conversão para medida de área (hectare). As análises das transições foram efetuadas para os períodos de 1992 a 2003 e 2003 a 2013, tomando como base a matriz única.

Ao fim desse processo, os mapas temáticos de uso e cobertura da terra foram exportados no formato *.tiff*, com o mesmo número de linhas e colunas (2617 linhas x 1978 colunas), sistema de referência e Datum, como preconiza a utilização dos mesmos no *software* Dinamica EGO para execução do processo de modelagem.

Tabela 7 – Padrões das classes de uso e cobertura e suas representações temáticas

Classes	Amostras ¹		Representação temática
Floresta			
Água			
Agropecuária			
Solo exposto			

Fonte: Autora.

¹Padrões obtidos sobre imagem falsa cor (RGB-543), Landsat 5 TM.

3.3.4 Mapeamento temático da evolução florestal e da evolução agropecuária

A partir dos mapas de uso e cobertura da terra, foram gerados mapas da evolução florestal e da evolução agropecuária, os quais foram elaborados a partir da integração dos dados dos mapas do ano 1992 e 2003 e do ano 2003 e 2013. Permitindo assim, a visualização e quantificação das mudanças nas classes de usos nos dois períodos, antes e após a instalação da U.H.E Dona Francisca, tendo como referência as classes floresta e agropecuária.

Utilizou-se para cruzamento dos dados e confecção dos mapas de evolução, a ferramenta Análise – LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) do *software* SPRING, a qual permite que permite a implementação de operadores sobre campos; pontuais e de vizinhança, sob a forma de expressões matemáticas, condicionais e booleanos, e transformações entre diferentes modelos de categoria (CÂMARA et al., 2001).

As classes temáticas utilizadas nos mapas da evolução florestal foram: manutenção, expansão, redução e outros usos. Sendo que, manutenção constitui as áreas onde não houve alteração da classe floresta, mantendo-se inalterada no

período avaliado. A expansão refere-se às áreas onde houve avanço das florestas sobre os demais usos. A classe redução considera as áreas de floresta que foram subtraídas e convertidas para outro uso entre o período estudado. Já a classe outros usos, representam as áreas que eram ocupadas pelas classes agropecuária, água e solo exposto, e mantiveram-se inalteradas ou evoluíram para outras classes que não floresta.

Da mesma forma, as classes temáticas utilizadas nos mapas da evolução agropecuária foram: manutenção, expansão, redução e outros usos. Sendo que, manutenção constitui as áreas onde não houve alteração das classes agropecuária e solo exposto; expansão refere-se às áreas onde houve avanço das classes agropecuária e solo exposto sobre os demais usos; redução corresponde às áreas de agropecuária e solo exposto que foram subtraídas e convertidas para outro uso; outros usos representam as áreas que eram ocupadas pelas classes floresta e água, e mantiveram-se inalteradas ou evoluíram para outras classes que não agropecuária e solo exposto.

3.3.5 Mapeamento temático das variáveis estáticas

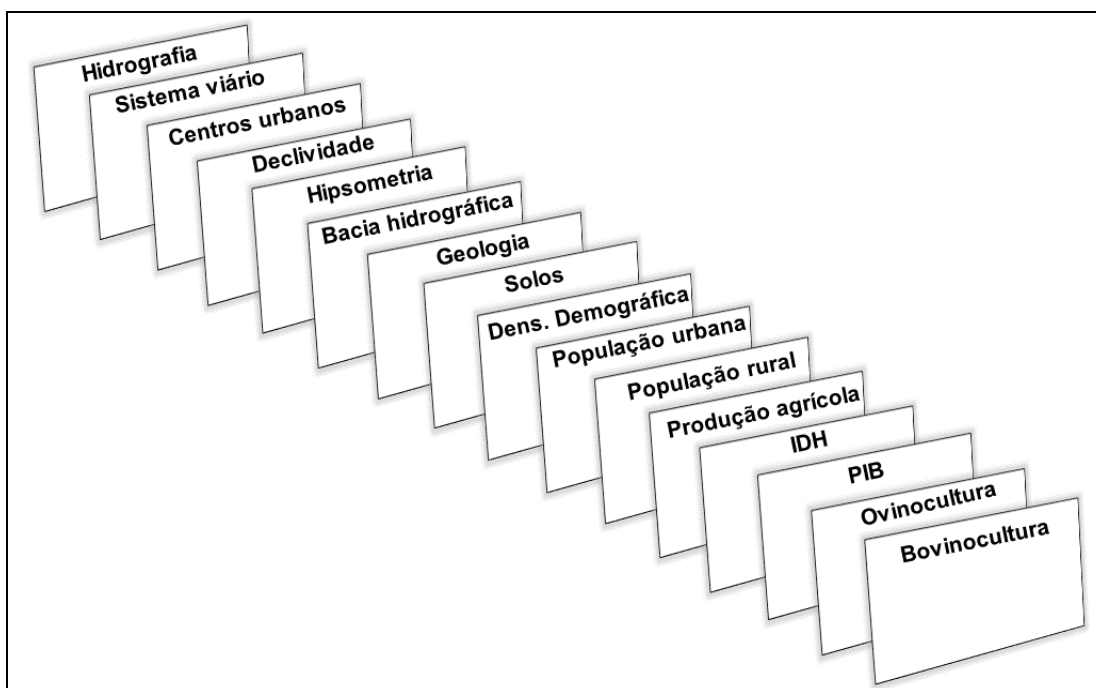
Foram definidos mapas temáticos, a partir de variáveis estáticas, categóricas e contínuas, consideradas invariantes e permanentes durante o período analisado. Os mapas foram elaborados no *software* SPRING e, posteriormente, exportado na forma matricial, respeitando os mesmos parâmetros da imagem quanto à dimensão apresentada pelos mapas de uso e cobertura da terra (2617 linhas x 1978 colunas), bem como parâmetros de referência e Datum.

As variáveis selecionadas para elaboração dos mapas, considerando a área de estudo são apresentadas na Figura 8. Cabe ressaltar, em relação às escolhas das variáveis estáticas, que não é possível selecionar um conjunto de variáveis válidas para todas as regiões. No processo de modelagem, cabe ao modelador identificar quais fatores são relevantes, considerando o objetivo do trabalho, bem como a escala do mesmo.

A partir das variáveis estáticas, foram elaborados dezesseis mapas temáticos estáticos, entre eles mapa de hidrografia, sistema viário, localização dos centros urbanos, bacia hidrográfica, geologia, solos, declividade, hipsometria, mapas demográficos, socioeconômicos e agropecuários. Sendo que, os mapas estáticos de

hidrografia, sistema viário e centros urbanos correspondem ao grupo dos mapas estáticos contínuos (de distância em metros) e, os demais mapas correspondem a mapas estáticos categóricos. Os mesmos são descritos metodologicamente a seguir.

Figura 8 – Representação das variáveis estáticas selecionadas para elaboração dos mapas temáticos, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS



Fonte: Autora.

3.3.5.1 Hidrografia e sistema viário

Os mapas de hidrografia e sistema viário, foram elaborados a partir da base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul, na escala 1:50.000 (HASENACK e WEBER, 2010), considerando-se o limite da área de estudo. Os dados obtidos são originalmente georreferenciados ao Datum SIRGAS 2000, sistema de projeção UTM-fuso 22, e foram convertidos ao Datum WGS 84 para obter compatibilidade com o banco de dados criado.

3.3.5.2 Localização dos centros Urbanos

A localização dos centros urbanos dos municípios compreendidos na área de estudo, foi definida por meio da interpretação visual e vetorização manual, para a

definição da dimensão das zonas urbanas, tendo como base as imagens Landsat 8, sensor OLI.

3.3.5.3 *Bacias hidrográficas*

Para confecção do mapa representando as bacias hidrográficas, foi obtido um arquivo vetorial contendo os limites das bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul em formato *shapefile*, disponível na área de acesso a *downloads* no site da Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul (SEMA). O arquivo foi gerado e disponibilizado na escala 1:50.000 no sistema de coordenadas Lat/Long, Datum WGS 84 (SEMA, 2010b). Sendo assim, antes da importação do arquivo para o banco de dados, foi necessário converter o sistema de coordenadas para UTM, fuso 22. Após a conversão o arquivo foi importado para a base de dados onde efetuou-se o recorte para a área de estudo.

3.3.5.4 *Declividade e Hipsometria*

Os mapas de declividade e hipsometria, foram gerados a partir de dados altimétricos da base reamostrada *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) do projeto TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (VALERIANO, 2005; VALERIANO, 2008) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), folha 29S54_ZN. Os dados são disponibilizados no formato de imagem GeoTiff (.tif), com tamanho de *pixel* de aproximadamente 30m.

A imagem foi importada à base de dados, e a partir dela gerou-se um Modelo Numérico do Terreno (MNT), o qual foi tomado para gerar os mapas de declividade e hipsométrico.

Para o mapa hipsométrico, considerando a variação altimétrica presente na área de estudo, a qual varia de 0 a 600m aproximadamente, definiu-se classes hipsométricas com intervalo fixo de 100m, totalizando a representação de seis classes.

As classes de declividade adotadas neste trabalho seguiram as proposições da EMBRAPA (2006), as quais são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Classes de declividade segundo classificação da EMBRAPA

Classe de relevo	Declividade (%)
Plano ¹	0-3
Suave ondulado ²	3-8
Ondulado ³	8-20
Forte ondulado ⁴	20-45
Montanhoso ⁵	45-75
Escarpado ⁶	> 75

Fonte: EMBRAPA, 2006.

¹ superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos; ² superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros apresentando declives suaves; ³ superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando declives moderados; ⁴ superfície de topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros e raramente colinas, com declives fortes; ⁵ superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes; ⁶ áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos, tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias, vertentes de declives muito fortes.

3.3.5.5 Geologia e solos

Os mapas de geologia e solos, foram definidos com base no mapa geológico e de solos do estado do Rio Grande do Sul, na escala 1: 750.000, os quais foram obtidos do banco de dados GEOBANK da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Estes mapas são disponibilizados com o sistema de coordenadas SIRGAS 2000, sendo necessário a conversão dos mesmos.

3.3.5.6 Mapas demográficos, socioeconômicos e agropecuários

Os mapas temáticos demográficos para a área de influência da U.H.E Dona Francisca, correspondem as seguintes variáveis: densidade demográfica, população rural e população urbana. Os mapas foram confeccionados a partir dos dados municipais do Censo Demográfico de 2010, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE, 2010). Considerando a mesma fonte de dados, obteve-se também, os mapas socioeconômicos a partir das variáveis IDH

(Índice de Desenvolvimento Humano) e PIB (Produto Interno Bruto), referentes a área de estudo.

Os mapas agropecuários da área de estudo, representando a produtividade agrícola, bovinocultura e ovinocultura, foram elaborados a partir de dados de produção agrícola e pecuária municipal, disponibilizados pelo IBGE (IBGE, 2011a; IBGE, 2011b). Para produção agrícola, considerou-se a soma das áreas correspondentes a produção agrícola temporária e permanente.

De posse dos dados referentes à todas estas variáveis, os mesmos foram tabulados no *software* SPRING sob modelo Objeto, associando-o ao *shapefile* dos limites municipais da área de estudo (modelo cadastral).

Na sequência, efetuou-se a representação espacial destas informações através da análise espacial pontual utilizando o estimador de densidade *Kernel*, com o objetivo de verificar de que forma a intensidade destes dados variam em toda área de estudo. O estimador de densidade *Kernel*, permite ponderar a ocorrência de determinado evento sob determinada área, a partir de uma função bidimensional (DRUCK et al., 2004). Para tanto, é verificado, para cada localidade da área de estudo, o número e disposição dos dados ou eventos que ocorrem em um raio previamente estabelecido pelo pesquisador (MAYER et al., 2015).

Assim, estabeleceu-se um raio de 12 km para a estimação das variáveis. Esse valor corresponde à média das distâncias em linha reta entre os municípios da área de estudo, dividido por dois. A divisão por dois indica a metade da distância, utilizada para evitar sobreposição do raio, que é projetado para cada município. Após a estimação de *Kernel*, uma imagem foi criada, sob a qual aplicou-se a técnica de fatiamento, gerando mapas temáticos com 5 classes, variando-se o intervalo de classe conforme a menor e a maior densidade encontrada.

3.3.6 Modelagem do uso e cobertura da terra

A modelagem da dinâmica espacial de uso e cobertura da terra, foi realizada no *software* Dinamica EGO, sendo dividida em cinco principais etapas: Parametrização do modelo; Calibração do modelo; Simulação do modelo; Validação do modelo; Simulação dos cenários futuros.

Para compor o modelo, foram utilizados os mapas de uso e cobertura da terra dos anos 2003 e 2013 (variáveis contínuas). Além disso, foram utilizados os mapas

das variáveis estáticas, as quais foram empregadas para determinar, por meio dos seus Pesos de Evidência, as probabilidades de transição das classes de uso e cobertura da terra (CEMIN, 2014). No decorrer do processamento dos dados, outros arquivos foram sendo gerados e utilizados nas etapas seguintes.

Antecedendo o processo de modelagem, fez-se necessário a adequação dos dados de entrada do modelo. A adequação foi realizada no aplicativo Idrisi e constituiu-se de duas etapas: 1) correção dos atributos numéricos referentes as classes temáticas dos mapas, onde valores equivalentes a 0 foram substituídos. Sendo esse procedimento realizado para todos os mapas citados acima e que compõem os processos de modelagem, e; 2) detecção de transições entre os mapas inicial e final de uso e cobertura da terra, corrigindo as não passíveis de ocorrência, por meio da análise *crosstab*. Por fim, os mapas corrigidos foram exportados no formato matricial.rst (*Idrisi Raster Format*) e utilizados nas etapas referentes a modelagem. Os procedimentos detalhados no aplicativo Idrisi são descritos por Benedetti (2010).

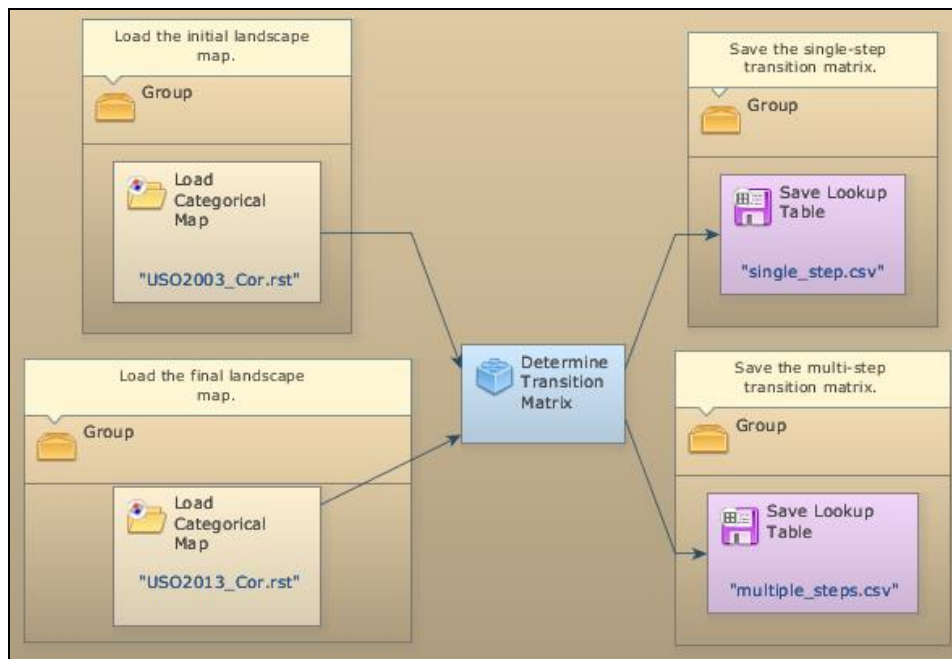
3.3.6.1 Parametrização do modelo

A parametrização correspondeu a um conjunto de métodos que visam conferir pesos às variáveis de entrada do modelo (ALMEIDA et al., 2003a), sendo estes: definição das matrizes de transições referentes as variações das classes de uso e cobertura no período analisado; discretização das faixas de distâncias das variáveis contínuas, e; cálculo dos Pesos de Evidência.

Obteve-se duas matrizes de transições, uma matriz de transição única (*single step*) e uma matriz de transição múltipla (*multiple step*). A primeira apresenta a taxa de transição de todo o período de tempo analisado, enquanto que segunda apresenta taxa de transição decomposta ano a ano.

A Figura 9 demonstra a estrutura utilizada para a determinação das matrizes de transição no *software* Dinamica EGO. Os dados de entrada, corresponderam aos mapas de uso e cobertura da terra do ano 2003 e 2013 no formato *.rst., a função executora foi a *Determine Transition Matrix*, e, os arquivos de saída, corresponderam as matrizes de transição no formato *.csv.

Figura 9 – Estrutura para o cálculo das matrizes de transição no *software* Dinamica EGO

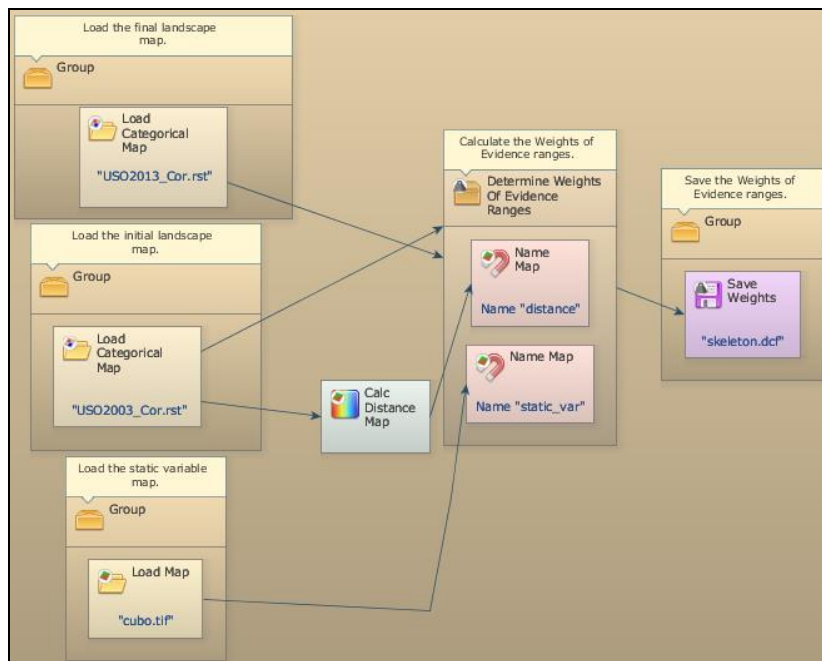


Fonte: Captura de tela do *software* Dinamica EGO, versão 3.0.5.

Para a discretização das faixas de distâncias, foi necessário previamente, a criação de um “cubo” contendo as variáveis estáticas (APÊNDICES A, B, C, D, E, F, G e H). Esse processo corresponde a criação de um arquivo *raster* multicamada no formato **tiff.*, a partir do agrupamento em um único arquivo, dos mapas das variáveis estáticas. Com base no cubo das variáveis estáticas e as transições previamente definidas, gerou-se um arquivo de distâncias, as quais foram determinadas com intervalo (incremento) correspondente ao tamanho do pixel das imagens utilizadas (30 m).

Como pode ser observado na Figura 10, a estrutura utilizada recebeu como dados de entrada o cubo de variáveis estáticas, juntamente com os mapas de uso e cobertura da terra do ano 2003 e 2013. O arquivo de saída, denominado *skeleton*, é o resultado do cruzamento das transições das classes de uso e cobertura da terra com as variáveis estáticas, o qual define as faixas de distâncias mais favoráveis para as transições, conforme Cemin (2014), obtidas na etapa da geração das matrizes, as quais serão atribuídos Pesos de Evidência.

Figura 10 – Estrutura para discretização das faixas de distâncias das variáveis contínuas no *software* Dinamica EGO

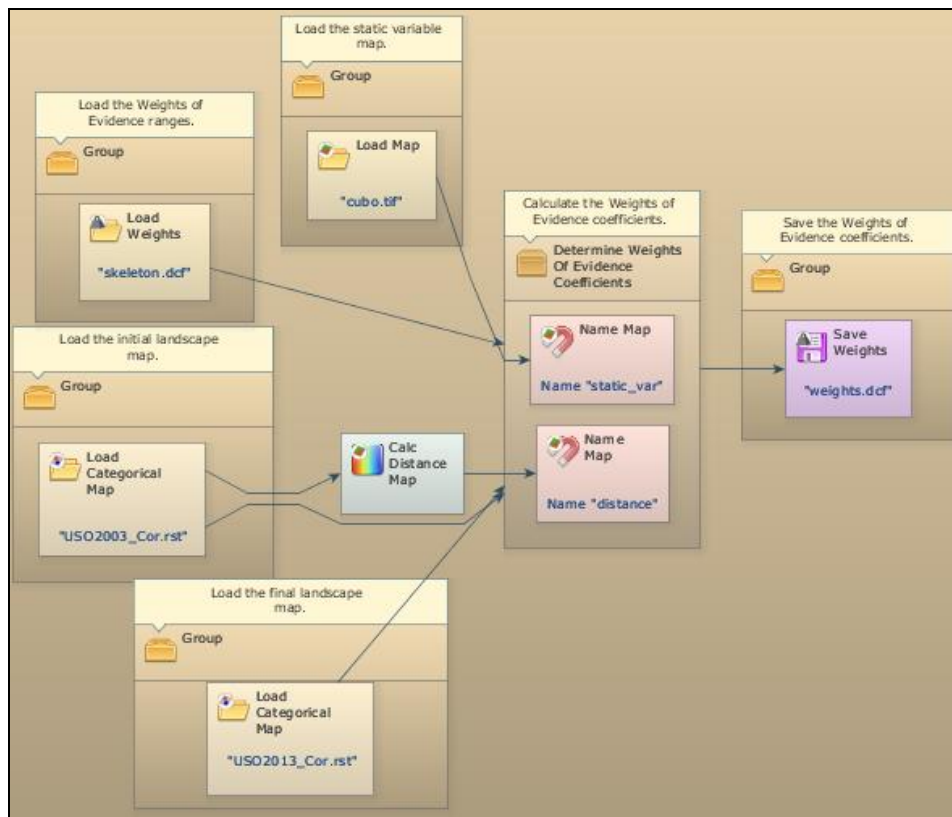


Fonte: Captura de tela do *software* Dinamica EGO, versão 3.0.5.

Para produzir os mapas de probabilidades de transição, que representam as áreas mais favoráveis para possíveis mudanças, foi utilizado o método de Pesos de Evidência baseado no teorema da probabilidade condicional de *Bayes*, adotado pelo Dinamica EGO.

Para o cálculo dos Pesos de Evidência propriamente dito, utilizou-se a estrutura apresentada na Figura 11, onde indicou-se como os dados de entrada, o cubo com as variáveis estáticas, as faixas de distâncias definidas na etapa anterior (arquivo *skeleton*), além dos mapas de uso e cobertura inicial (2003) e final (2013).

Figura 11 – Estrutura para a determinação de Pesos de Evidência no *software* Dinamica EGO



Fonte: Captura de tela do *software* Dinamica EGO, versão 3.0.5.

Como resultado desta etapa, tem-se um arquivo denominado *Weights*, o qual representa através dos Pesos de Evidência, as razões entre áreas de ocorrência de determinadas variáveis em relação a áreas de existência dos demais fenômenos considerados no estudo (BOHAM-CARTER, 1994). Estas razões podem ser favoráveis ($W+$) ou desfavoráveis ($W-$). São considerados como $W+$, os pesos que favorecem uma transição em determinada faixa e em determinada variável, e; $W-$, os pesos que desfavorecem uma transição em determinada faixa de distância e em determinada variável (CEMIN, 2014).

3.3.6.2 Calibração do modelo

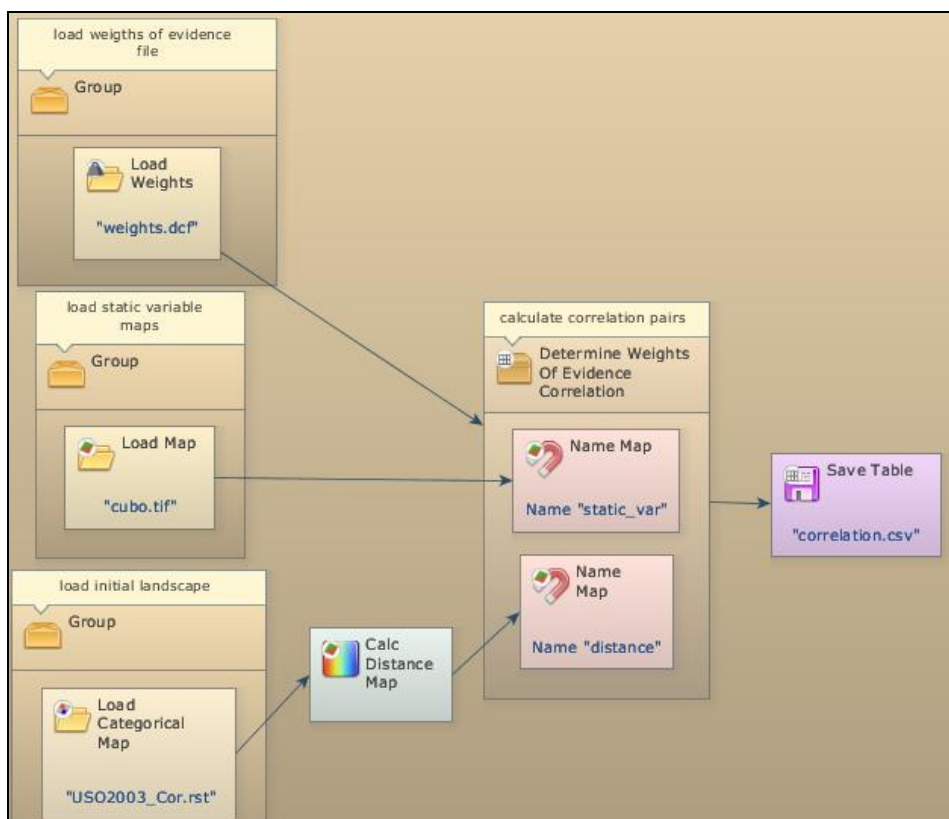
Para calibração do modelo, que consiste em avaliar a correlação das variáveis dinâmicas e estáticas, visando selecionar o conjunto de variáveis que melhor explicam as mudanças das classes de uso e cobertura da terra no período de estudo considerado, utilizou-se dois índices, o *índice de Cramer (V)* e de

Incerteza de Informação Conjunta (U).

O método dos Pesos de Evidência prevê que os mapas de variáveis devem ser independentes entre si, desta forma, num intervalo de zero a um, onde as variáveis são independentes quando seu valor é igual a zero, e completamente dependentes quando for igual a um, as variáveis correlacionadas foram desprezadas do modelo. O limiar de corte considerado neste estudo, foi fixado em 0,5 (SOARES FILHO et al., 2009), ao considerar que valores inferiores a 0,5 para os dois índices, indicam menor dependência espacial (BONHAM-CARTER, 1994).

Como expresso na Figura 12, utilizou-se nesta etapa o cubo das variáveis estáticas, o arquivo de peso de evidências (*weights.dcf*) e o mapa inicial de uso e cobertura da terra (2003).

Figura 12 – Estrutura para o cálculo dos índices de correlação Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) no *software* Dinamica EGO



Fonte: Captura de tela do *software* Dinamica EGO, versão 3.0.5.

O arquivo de saída, no formato **csv.*, foi utilizado para a análise dos índices de U e V. Assim, foi selecionado o melhor conjunto de variáveis, referentes a cada

transição, para construção do modelo de simulação.

3.3.6.3 Simulação do modelo

Após selecionar na etapa anterior as variáveis do modelo, efetuou-se o ajuste das funções de transição para produzir os padrões espaciais de mudanças na transição do uso e cobertura da terra. Utilizou-se para tanto, os algoritmos *Patcher* e o *Expander*, incorporados ao Dinamica EGO.

Os parâmetros necessários para ajustar as funções de transições são: grau de isometria e tamanho médio e variância das áreas de mudanças das classes de uso e cobertura da terra, em unidade de área (ha). Dessa forma, variando os parâmetros de entrada, estas funções possibilitaram a formação de uma variedade de tamanhos e formas de manchas representativas das transições para a construção do modelo.

Considerando que o grau de isometria pode variar de 0 a 2, onde que valores mais próximos a 0 indicam manchas fragmentadas ou dentríticas, e valores mais próximos a 2 indicam manchas mais compactas (SOARES FILHO et al., 2009), o grau de isometria foi definido observando-se a formação das manchas da área de estudo e através de testes com diferentes valores. Já a média e variância da área de mudança das classes de uso e cobertura da terra, foram definidos através da estatística de polígonos.

Para obter os parâmetros que melhor prediziam o modelo, alguns testes foram realizados, alternando-se os valores de média, variância e isometria. Para avaliar os valores que melhor se ajustaram e que constituíram o modelo, observou-se os resultados obtidos na validação. Sendo esse processo repetido tantas vezes necessário, até a obtenção do melhor resultado.

Realizou-se algumas simulações com diferentes parâmetros, e os melhores resultados foram obtidos a partir dos valores apresentados na Tabela 9. Os mesmos parâmetros foram utilizados para os algoritmos *Patcher* e *Expander*. Os valores de média e variância são resultados da estatística de polígonos. Entretanto, algumas alterações foram necessárias, visando chegar aos melhores resultados.

A partir destes parâmetros e demais arquivos gerados nas etapas anteriores, o modelo foi executado.

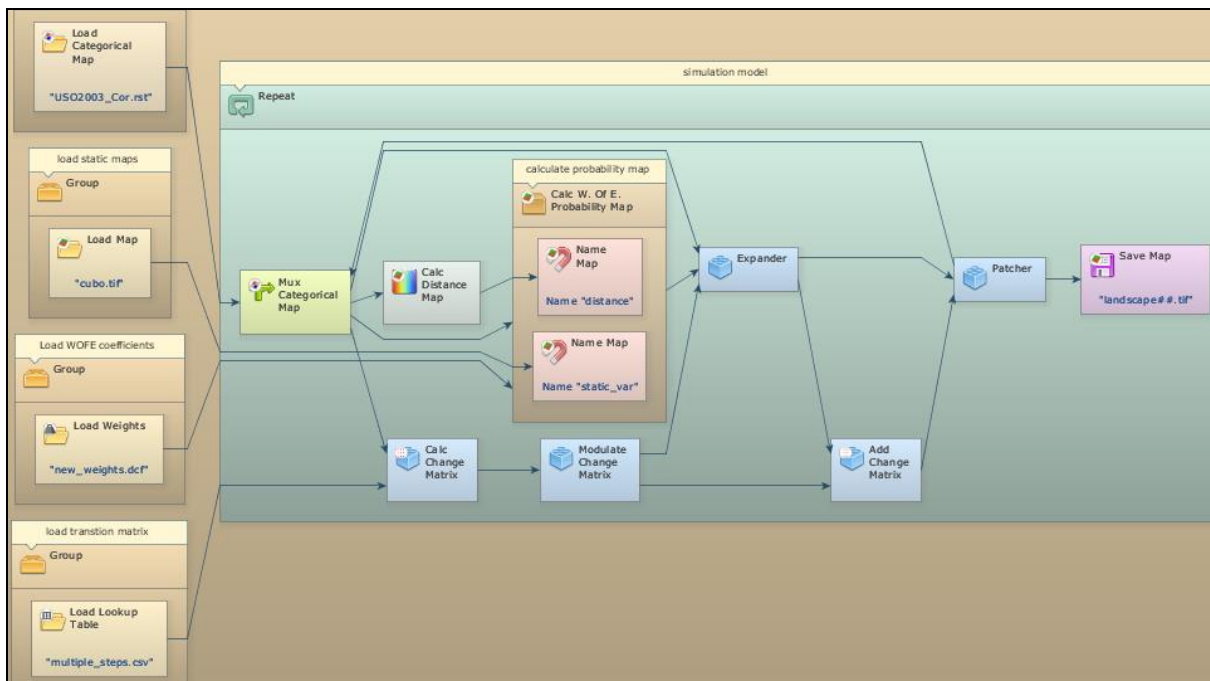
Tabela 9 – Parâmetros que constituíram o modelo de simulação de uso e cobertura da terra para o período de 2003 a 2013

	Média (ha)	Variância (ha)	Isometria
Água	5	50	1,0
Floresta	6	100	1,0
Agropecuária	25	100	1,0
Solo Exposto	10	75	1.0

Fonte: Autora.

Os dados de entrada nesta etapa, correspondem ao mapa de uso e cobertura da terra inicial (ano 2003), cubo das variáveis estáticas, a matriz de transição múltipla e o arquivo de Pesos de Evidência (Figura 13).

Figura 13 – Estrutura do modelo de simulação dos mapas de uso e cobertura da terra no *software* Dinamica EGO



Fonte: Captura de tela do *software* Dinamica EGO, versão 3.0.5.

Ao final desta etapa, obteve-se um mapa simulado de uso e cobertura da terra para o ano 2013, o qual foi validado a partir da comparação de similaridade com o mapa de uso e cobertura real de 2013.

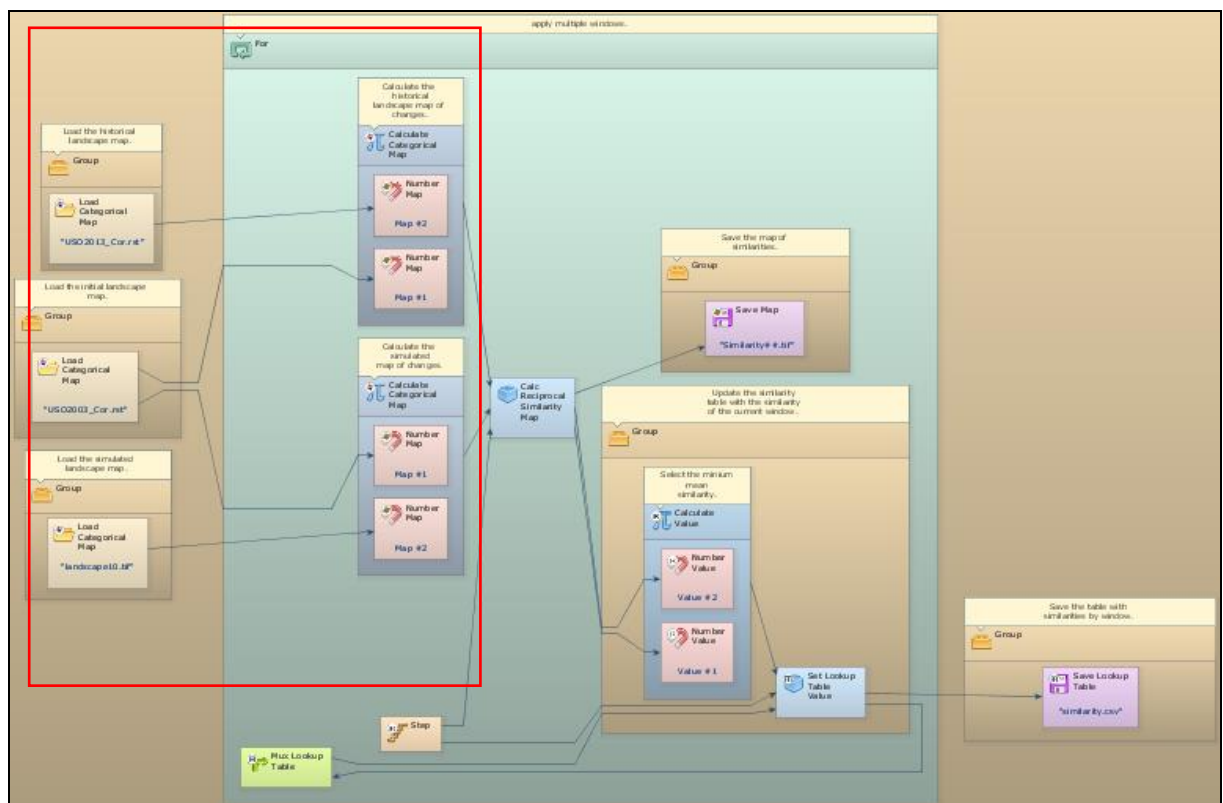
3.3.6.4 Validação do modelo

A validação do modelo correspondeu a elaboração de mapas de diferença e índices de similaridade. O método utilizado é uma adaptação do índice de similaridade criado por Hagen (2003), para aplicação no *software* Dinamica EGO.

Os mapas de diferenças foram obtidos a partir das diferenças entre o mapa inicial de 2003 e o final real de 2013, e, o mapa inicial real de 2003 e o final simulado para 2013, por meio da primeira função da estrutura (em destaque) na Figura 14.

A partir desses mapas, efetuou-se a determinação dos índices de similaridade *fuzzy*, através das funções de decaimento constante e exponencial, disponíveis no *software* Dinamica EGO (Figura 14). Os quais foram obtidos para janelas de varreduras com 3, 5, 7, 9 e 11 células. A função utilizada para validação foi a “*Calc Reciprocal Similarity*”. Além disso, foram gerados mapas de similaridade, onde pode ser observado a espacialização das áreas de similaridade.

Figura 14 – Estrutura para obtenção dos mapas de diferença e índices de similaridade *Fuzzy* no *software* Dinamica EGO



Fonte: Captura de tela do *software* Dinamica EGO, versão 3.0.5.

A etapa de validação foi utilizada para verificar a qualidade do modelo calibrado na etapa subsequente, e, portanto, foi repetida diversas vezes até que se chegasse a parâmetros (etapa de simulação) satisfatórios, os quais foram analisados através dos índices de similaridade e análise visual dos mapas simulados. Sendo que, quanto mais próximo de 1, maior a similaridade entre os mapas. Ao alcançar o maior índice, o modelo foi de fato validado estando apto para efetuar as simulações de cenários futuros.

3.3.6.5 Simulação dos cenários futuros

Tendo como base o modelo validado, efetuou-se a simulação de cenários futuros com horizonte de 10 anos, obtendo-se mapas de uso e cobertura da terra anuais a partir do ano 2013, até o ano 2023. A partir dos quais, foi possível analisar a tendência das alterações para o período de estudo. A estrutura utilizada nesta etapa foi a mesma ilustrada na Figura 13.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de atender aos objetivos elencados neste trabalho, ao longo desta seção serão apresentados os resultados obtidos inerentes ao mapeamento temático e quantificação do uso e cobertura da terra para a área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, nos anos de 1992, 2003 e 2013, assim como, a análise da evolução florestal e agropecuária nos períodos de 1992 a 2003 e de 2003 a 2013. Por fim, é apresentado o modelo dinâmico de uso e cobertura da terra definido para o período de 2003 a 2013 e, os cenários anuais simulados até o ano 2023.

4.1 MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA

A confiabilidade da classificação, medida através da matriz de confusão e índice *Kappa*, para os mapas de uso e cobertura da terra nos anos 1992, 2003 e 2013, da área de influência da U.H.E Dona Francisca, são apresentados nas Tabelas 10, 11, e 12.

Tabela 10 – Matriz de confusão e índice *Kappa* obtidos para a classificação do ano 1992, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil

Matriz de Erros de Classificação - 1992						
Referência Classificação	Floresta	Água	Agropecuária	Solo exposto	Abstenção	Σ Linha
Floresta	34998	0	1133	0	0	36131
Água	0	10697	0	0	0	10697
Agropecuária	0	0	35080	1790	0	36870
Solo exposto	0	0	0	10060	0	10060
Σ Coluna	34998	10697	36213	11850	0	93758
Cálculo do índice de <i>Kappa</i> das amostras adquiridas						
Σ Linha x Σ Coluna	2833322857					
Σ Linha ²	8,79E+09					
Σ Diagonal	90835					
Índice <i>Kappa</i>	0,953996373					

Fonte: Autora.

Tabela 11 – Matriz de confusão e índice *Kappa* obtidos para a classificação do ano 2003, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil

Matriz de Erros de Classificação - 2003						
Referência Classificação	Floresta	Água	Agropecuária	Solo exposto	Abstenção	Σ Linha
Floresta	37925	0	797	84	0	38806
Água	0	31826	0	0	0	31826
Agropecuária	1149	0	35419	1157	0	37725
Solo exposto	0	0	2175	68999	0	71174
Σ Coluna	39074	31826	38391	70240		179531
Cálculo do índice de <i>Kappa</i> das amostras adquiridas						
Σ Linha x Σ Coluna	8976762155					
Σ Linha ²	3,22E+10					
Σ Diagonal	174169					
Índice <i>Kappa</i>	0,958604126					

Fonte: Autora.

Tabela 12 – Matriz de confusão e índice *Kappa* obtidos para a classificação do ano 2013, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil

Matriz de Erros de Classificação - 2013						
Referência Classificação	Floresta	Água	Agropecuária	Solo exposto	Abstenção	Σ Linha
Floresta	14790	0	336	94	0	15220
Água	0	4138	0	0	0	4138
Agropecuária	150	0	13262	401	0	13813
Solo exposto	0	0	81	8218	0	8299
Σ Coluna	14940	4138	13679	8713	0	41470
Cálculo do índice de <i>Kappa</i> das amostras adquiridas						
Σ Linha x Σ Coluna	505767058					
Σ Linha ²	1,72E+09					
Σ Diagonal	40408					
Índice <i>Kappa</i>	0,963722106					

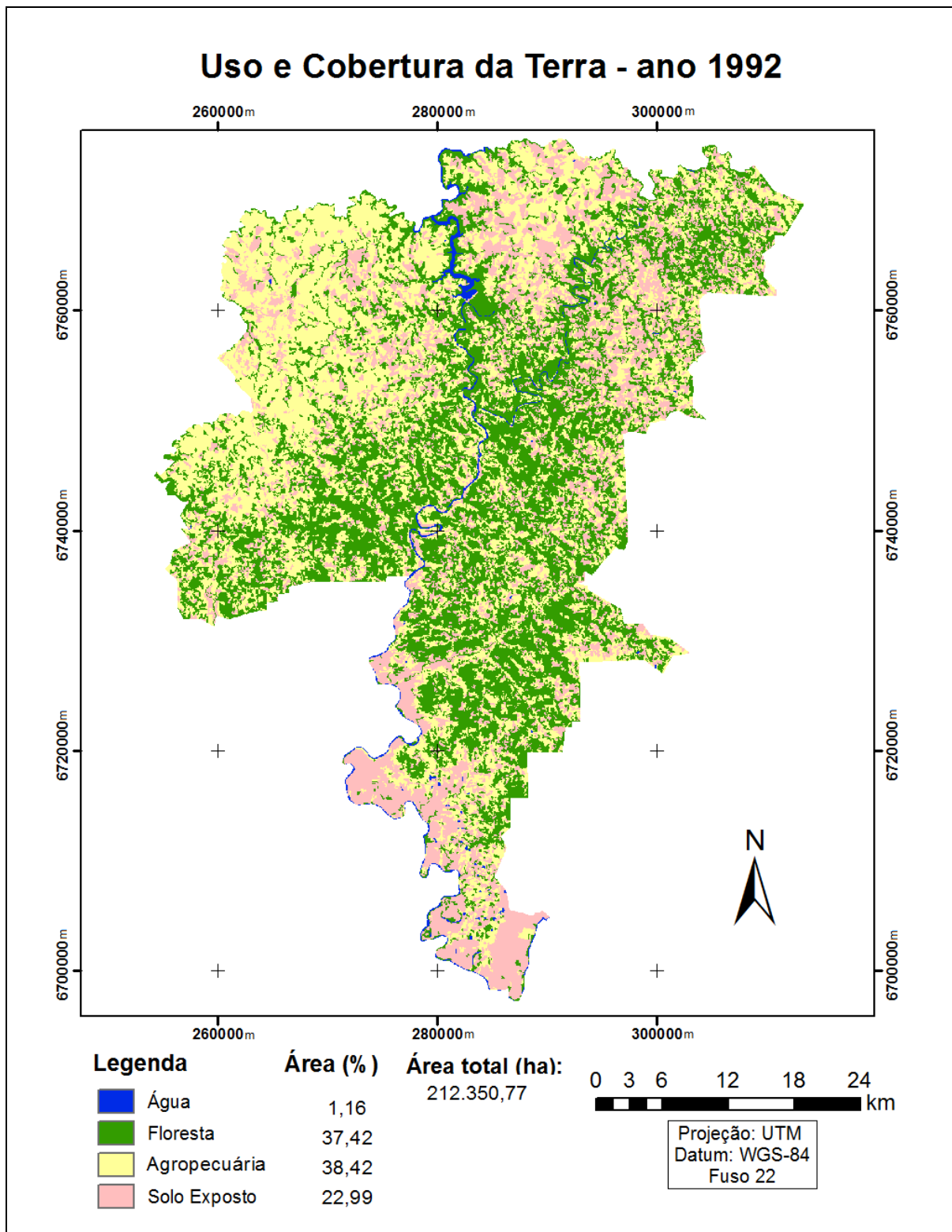
Fonte: Autora.

Como observados nas tabelas, os índices de *Kappa* para os mapas classificados dos anos 1992, 2003 e 2013, apresentaram valores de 0,9540, 0,9586 e 0,9637, respectivamente. Segundo a escala proposta por Landis e Koch (1977), tais resultados indicam a excelência na qualidade de classificação, ao definir que os

valores de *Kappa* entre 0,8 e 1,0 sugerem a qualidade de classificação como excelente.

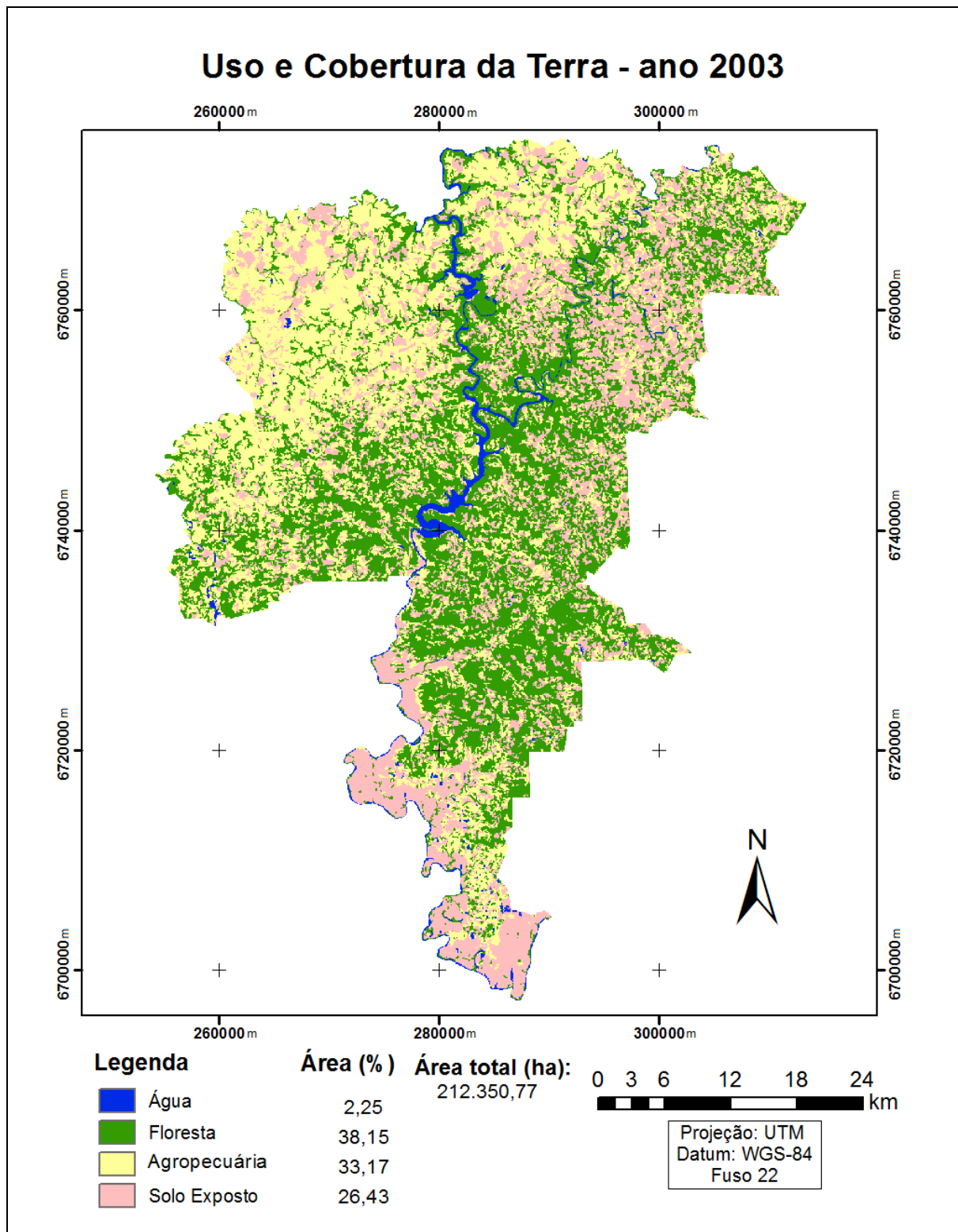
Os mapas de uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca, para os anos 1992, 2003 e 2013, são apresentados nas Figuras 15, 16 e 17. Além de permitir analisar a estrutura e distribuição das classes de uso e cobertura da terra na área de estudo, estes mapas permitiram quantificar as classes para cada ano estudado, bem como as transições ocorridas entre elas.

Figura 15 – Mapa de uso e cobertura da terra no ano 1992, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil



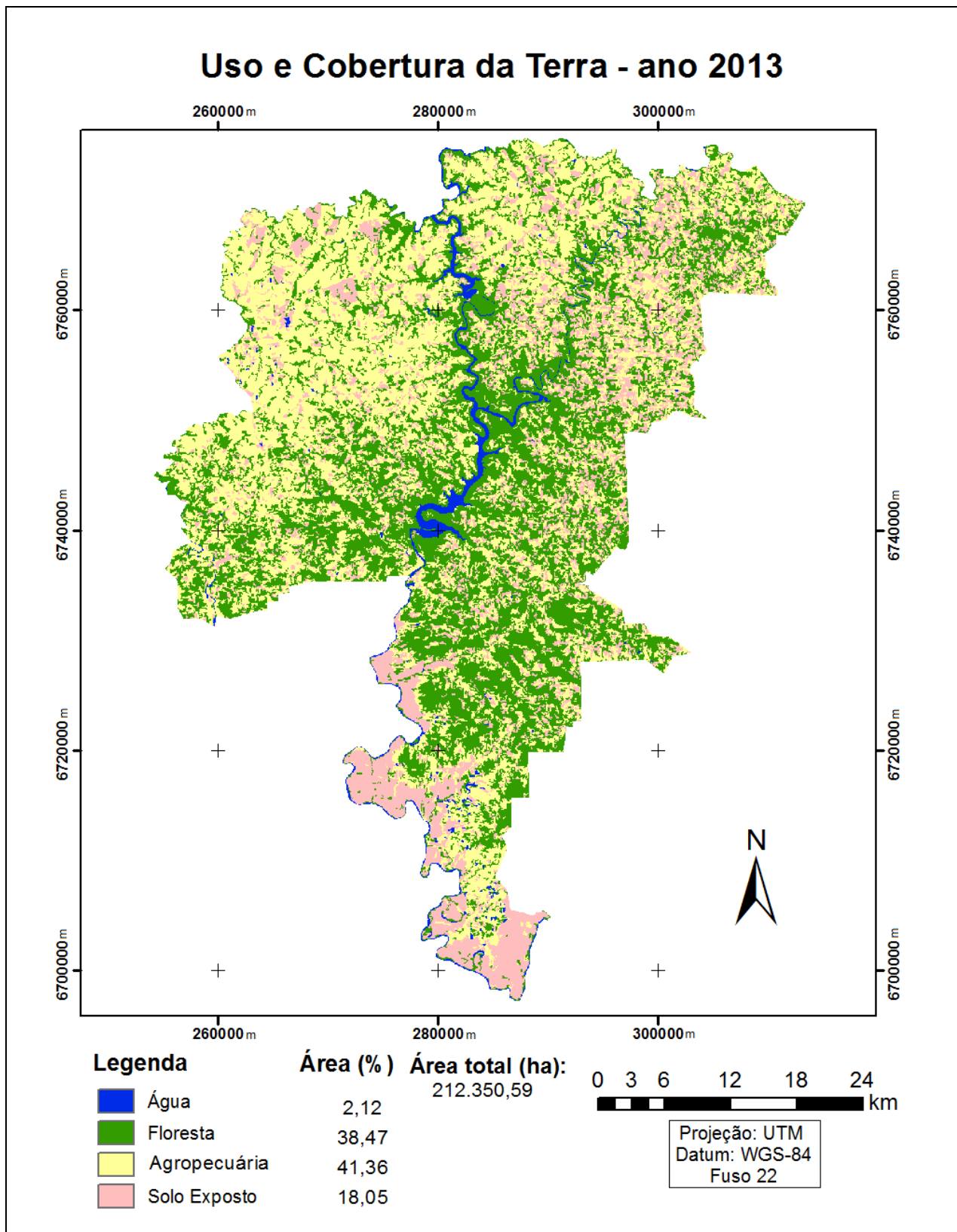
Fonte: Autora.

Figura 16 – Mapa de uso e cobertura da terra no ano 2003, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil



Fonte: Autora.

Figura 17 – Mapa de uso e cobertura da terra no ano 2013, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil



Fonte: Autora.

A análise espacial das classes de uso e cobertura da terra, permitiu inferir sobre as características observadas na área de estudo, no intervalo de tempo avaliado. Em uma primeira análise visual, observa-se que a área manteve a tendência de distribuição e predominâncias das classes de uso e cobertura da terra, as quais são condicionadas principalmente pelo relevo da área. Na porção superior, região mais plana, tem-se a predominância de áreas destinadas a agricultura e pecuária; na região central, onde o relevo é acidentado, predominam as florestas, e; na porção sul, região de várzea, a predominância é de solo exposto.

A classe floresta, ocorre principalmente associada a rede de drenagem e a áreas acidentadas. Em relação a rede de drenagem, a maior concentração florestal ocorre ao longo do rio Jacuí e seus principais tributários. Essa tendência apenas não ocorre na porção sul da área de estudo (município de Agudo), onde as áreas de várzeas do rio Jacuí são destinadas ao cultivo de arroz irrigado, representado neste estudo pela classe solo exposto. Nessa região, as áreas de preservação permanente não são respeitadas, apresentando ao rio, grandes riscos de assoreamento e arenização.

As regiões acidentadas, onde as florestas também predominam, encontram-se na porção central da área de estudo (municípios de Ibarama, Nova Palma, norte do município de Agudo) e ao longo dos cursos dos principais rios, que segundo Friedrich (1993), constituem-se por vales profundos em forma de 'v'.

De acordo com Farenzena e Pereira Filho (2006), a geomorfologia da área, caracterizada por vales profundos e de grandes declividades, próprias da faixa de transição entre a Depressão Central e o Planalto Meridional do Sul do Brasil, dificultou e continua dificultando a ocupação humana, contribuindo assim para predominância das florestas. Aliado a isso, as restrições de uso, impostas pela legislação brasileira, contribuem para a predominância florestal nessas áreas.

Observa-se, na região Noroeste dos mapas de uso e cobertura da terra dos anos 1992, 2003 e 2013, a intensa fragmentação florestal e o predomínio de áreas destinadas a agricultura e pecuária. Essa região, representada pelos municípios de Arroio do Tigre e Pinhal Grande, tem sua econômica baseada no setor agropecuário (IBGE, 2011b), que é favorecida pelas condições do relevo.

Em relação a classe água, é possível visualizar no mapa do ano 1992, o lago da U.H.E. Itaúba. Já em 2003, observa-se também, o lago da U.H.E. Dona Francisca na porção central da área de estudo, onde verifica-se o incremento da classe água.

O represamento ocasionado por essa segunda usina elevou consideravelmente o nível das águas a montante do dique de contenção. Uma das consequências dos represamentos é a perda de áreas cultiváveis ou de proteção ambiental. De acordo com Alves et al. (2000), a área inundada era composta 60% por atividades agrícolas, principalmente fumo, milho e feijão; 30% por vegetação natural, representada por capoeira, capoeirão, mata secundária e mata ribeirinha, e; 10% por pastagem.

A quantificação das classes de uso e cobertura mapeadas nos anos 1992, 2003 e 2013, em unidade de área (hectare) e porcentagem, definidos a partir do mapeamento temático para a área de estudo é apresentado na Tabela 13, e permitiram inferir sobre outras características da área de estudo.

Tabela 13 – Quantificação das classes de uso e cobertura da terra mapeadas na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, em hectares e porcentagem, nos anos de 1992, 2003 e 2013

Classes de uso e Cobertura	1992		2003		2013	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Floresta	79.470,27	37,42	81.006,03	38,15	81.686,16	38,47
Água	2.468,61	1,16	4.770,18	2,25	4.508,82	2,12
Agropecuária	81.589,5	38,42	70.444,35	33,17	87.824,16	41,36
Solo exposto	48.822,39	22,99	56.130,21	26,43	38.331,45	18,05
Total	212.350,77	100	212.350,77	100	212.350,59	100

Fonte: Autora.

A área de influência da U.H.E Dona Francisca demonstrou predominância, em todos os anos avaliados, das classes floresta e agropecuária. Juntas, essas classes de uso e cobertura da terra determinam a dinâmica espacial da área de estudo, não apenas pela predominância, mas também pela importância ambiental e socioeconômica. Onde, as áreas florestais são destinadas principalmente ao desenvolvimento do turismo e a proteção da fauna e flora, e, a agricultura e a pecuária destacam-se como as principais economias dos municípios da área de estudo, sendo estes caracterizados economicamente por pequenas propriedades rurais.

Em 1992 as florestas recobriam 37,4%, 38,2% em 2003 e 38,5% em 2013, da área total de estudo, apresentando um gradativo aumento ao longo deste período, o

equivalente a 2.215,89 ha. Já a classe agropecuária recobria 38,4%, 33,2% e 41,4% nos anos 1992, 2003 e 2013, respectivamente. Demonstrando variações ao longo dos anos.

O aumento de áreas com florestas também foi identificado por Silveira e Pereira Filho (2014), ao avaliarem as alterações dos usos e cobertura no entorno do reservatório Dona Francisca para o período de 2001 a 2009. Esse fato pode ser justificado devido a criação do Parque Estadual da Quarta Colônia, resultado da compensação ambiental proveniente da instalação da U.H.E Dona Francisca, localizado na margem esquerda do reservatório, municípios de Agudo e Ibarama (SEMA, 2005), e, que abriga remanescentes de Floresta Estacional Decidual (BACKES, 2012). Outros fatores que podem ter favorecido o aumento de florestas, referem-se as desapropriações das propriedades, indenizações e deslocamento da população, favorecendo a regeneração florestal em áreas abandonadas, bem como em áreas definidas por lei como área de preservação permanente (BRASIL, 2012).

A classe solo exposto em 1992 recobria 22,99%, 26,43% em 2003 e 18,05% em 2013, da área total. As reduções e expansões se deram principalmente em detrimento da classe agropecuária, uma vez que, a classe solo exposto, que corresponde a áreas agricultáveis em período de preparo ou pousio, após a implantação de culturas, passam a ser contabilizadas como agricultura. Sendo assim, as inversões de predomínio podem estar associadas a incorporação de diferentes culturas, período de plantio, atrasos na colheita e até mesmo questões climáticas.

Em relação a classe água, esta representou 1,2% em 1992, 2,3% em 2003 e 2,1% em 2013, da área total. O aumento observado nesta classe no ano 2003, em relação ao ano 1992, foi equivalente a 2.301,57 ha, e deve-se principalmente represamento da água, provocado pela formação do lago da U.H.E Dona Francisca e ao alagamento das áreas a montante deste. Na classe água, também estão inclusas as manchas de corpos de d'água, representadas por áreas alagadas destinadas a rizicultura e açudes.

As matrizes de transições únicas, obtidas no *software* Dinamica EGO para os períodos analisados (1992-2003 e 2003-2013), e que demonstram as transições ocorridas entre as classes de uso e cobertura da terra, em valores percentuais e hectares, são apresentadas nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 1992 e 2003, valores em hectare (ha)

De/Para		2003			
		Água	Floresta	Agropecuária	Solo exposto
1992	Água	-	235,89	64,71	56,07
	Floresta	1.091,61	-	10.111,68	8.229,42
	Agropecuária	896,76	15.452,1	-	19.753,47
	Solo exposto	669,87	5.280,48	14.780,79	-

Fonte: Autora.

Tabela 15 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 1992 e 2003, em valores percentuais (%)

De/Para		2003			
		Água	Floresta	Agropecuária	Solo exposto
1992	Água	-	9,56	2,62	2,27
	Floresta	1,37	-	12,72	10,36
	Agropecuária	0,11	18,94	-	24,21
	Solo exposto	1,37	10,82	30,27	-

Fonte: Autora.

As principais transições observadas na área de estudo no primeiro período avaliado (1992-2003), ocorreram entre as classes agropecuária e solo exposto. As conversões foram superiores a 30% para a transições de solo exposto para agropecuária, e equivalente a 24,21% para a transição de agropecuária para solo exposto. Sendo estas, as classes com maior percentual de alteração.

Tal dinâmica demonstra a constante alternância quanto ao uso do solo, onde hora o solo está em pousio ou sendo preparado para receber as culturas agrícolas, hora nele estão estabelecidas culturas em pleno vigor vegetativo. Outro fato a se destacar é o período que as imagens foram obtidas, mês de outubro, período de início do plantio das culturas de verão, favorecendo a exposição do solo. Sobre isso, e considerando que a classe agropecuária contabiliza além das classes agricultáveis, as áreas de campo, pode-se inferir que esta última possui menor influência nas conversões de/para solo exposto, ficando atribuído a agricultura o

principal papel no processo de transição.

As conversões da classe agropecuária para a classe floresta representaram 18,94% das alterações, ao passo que, a conversão de floresta para agricultura pecuária representou 12,72%. Desconsiderando a espacialização destas alterações e avaliando-as isoladamente, pode-se dizer que o saldo é positivo para a classe floresta. As áreas de florestas convertidas para a agropecuária, foram menores que a expansão florestal sobre esta mesma classe.

No período de 2003 a 2013 (Tabelas 16 e 17), as principais transições ocorreram entre as classes de agropecuária e solo exposto, assim como no período anterior. Entretanto, as conversões de solo exposto para agricultura aumentaram aproximadamente 12%, em relação ao primeiro período, passando a representar 42,19% da área, o equivalente 23.682,51 ha.

Tabela 16 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2003 a 2013, valores em hectare (ha)

De/Para		2013			
		Água	Floresta	Agropecuária	Solo exposto
2003	Água	-	560,43	206,91	192,96
	Floresta	269,91	-	13.139,28	3.714,12
	Agropecuária	177,21	10.556,01	-	8.915,67
	Solo exposto	252,27	6.686,64	23.682,51	-

Fonte: Autora.

Tabela 17 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra na área de influência da U.H.E. Dona Francisca para os anos 2003 a 2013, em valores percentuais (%)

De/Para		2013			
		Água	Floresta	Agropecuária	Solo exposto
2003	Água	-	11,76	4,34	4,04
	Floresta	0,33	-	16,22	4,58
	Agropecuária	0,25	14,98	-	12,66
	Solo exposto	0,45	11,91	42,19	-

Fonte: Autora.

Em detrimento a esse aumento, houve redução das transições das áreas de agropecuária para solo exposto, que passaram a representar 12,66%. Tais resultados condizem com a quantificação observada anteriormente (Tabela 13), em que no ano 2013 foi observado o aumento das áreas ocupadas por agropecuária e redução das áreas de solo exposto, em relação ao ano 2003.

Da mesma forma, a classe floresta sofreu alterações neste período, sendo 16,22% desta, convertida para fins agropecuários. A conversão inversa também ocorreu, sobretudo em menores proporções. A transição de áreas de agropecuária para floresta equivaleu a 14,98%. Se no período anterior (1992-2003) o saldo foi positivo para a classe de floresta, ao considerar estas transições isoladamente (floresta \leftrightarrow agropecuária), neste período, 13.139,28 ha de florestas foram convertidos para agropecuária, enquanto que apenas 8.915,67 ha retornaram para florestas, apresentando um saldo negativo.

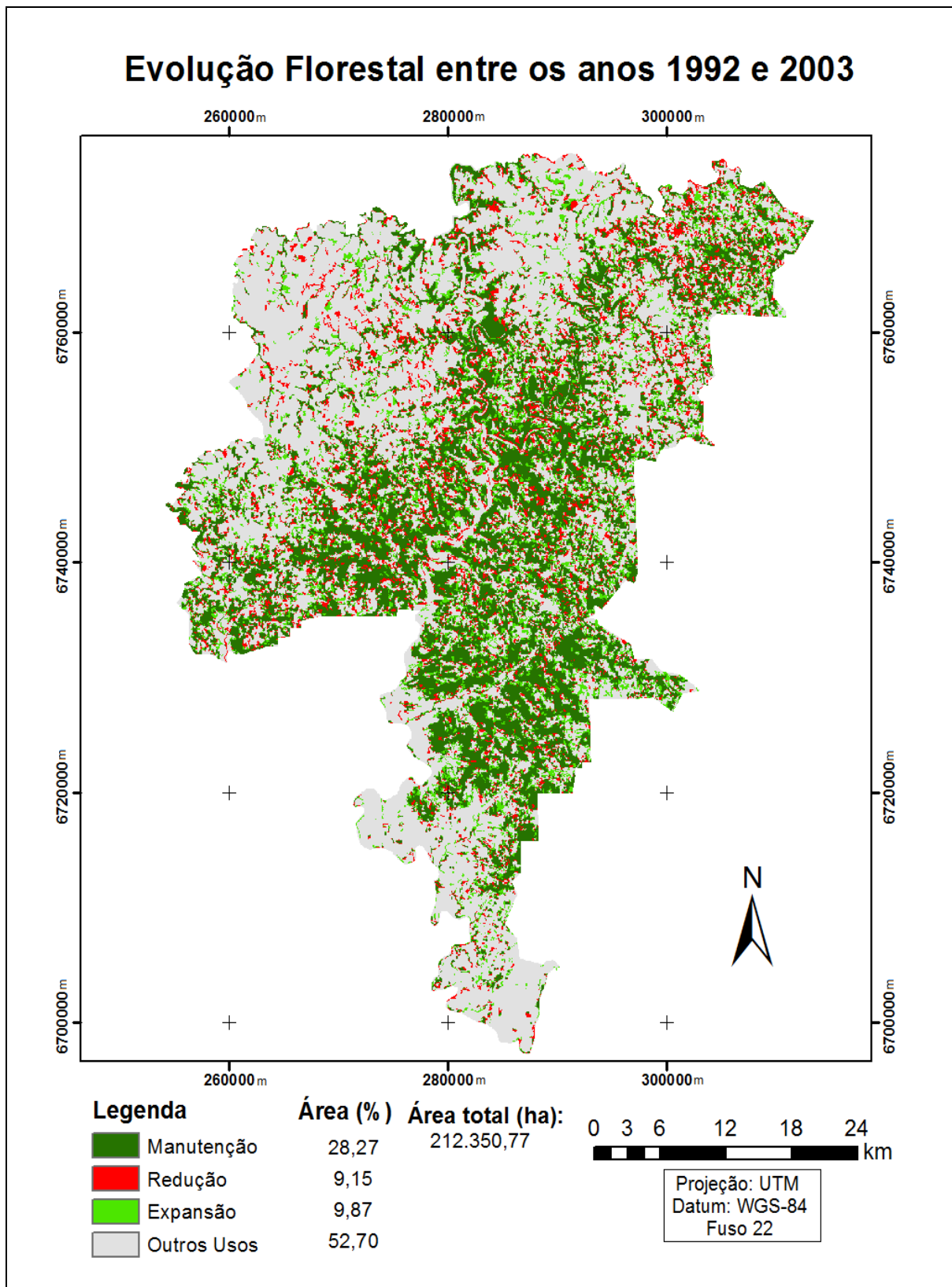
Após a análise de quantificação e transição dos usos e cobertura da terra, realizou-se a espacialização das mudanças, considerando a classe floresta, agropecuária e solo exposto. Possibilitando assim, a obtenção de resultados pontuais e comparativos entre os períodos avaliados, os quais são apresentados a seguir.

4.2 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO FLORESTAL E DA EVOLUÇÃO AGROPECUÁRIA

A análise e a quantificação da evolução florestal na área de influência da U.H.E Dona Francisca, para os dois períodos considerados, 1992 a 2003 e 2003 a 2013, podem ser observados nas Figuras 18 e 19 e Tabela 18.

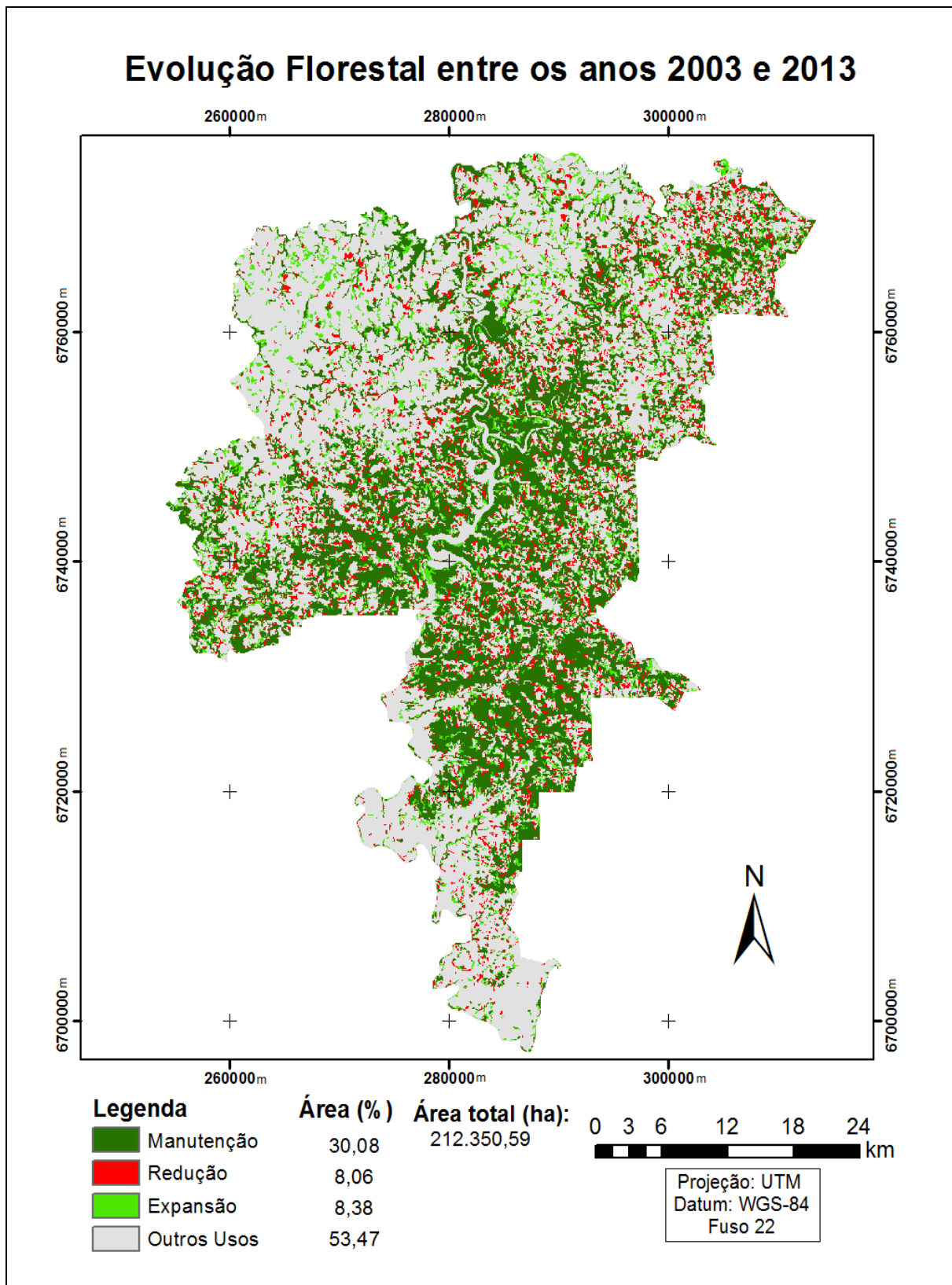
A análise visual permitiu constatar que: a classe outros usos, que considera as demais formas de uso e cobertura que não envolvem floresta, predominam na área de estudo, juntamente com a classe manutenção; sobretudo, as áreas de manutenção florestal formam uma consistente faixa ao longo da drenagem principal representada pelo rio Jacuí, em especial no segundo período; para ambos os períodos, os processos de expansão e redução não se limitaram a uma única área ou região, havendo ocorrência destas, em maior ou menor intensidade, em toda área de estudo.

Figura 18 – Mapa da evolução da cobertura florestal ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 1992 a 2003



Fonte: Autora.

Figura 19 – Mapa da evolução da cobertura florestal ocorrida na área de influência da U. H. E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 2003 a 2013



Fonte: Autora.

Tabela 18 – Evolução da cobertura florestal ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, nos períodos de 1992 a 2003 e 2003 a 2013

Evolução Florestal	Mudanças 1992 - 2003		Mudanças 2003 - 2013	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Manutenção	60.037,56	28,27	63.882,72	30,08
Redução	19.432,71	9,15	17.123,31	8,06
Expansão	20.968,47	9,87	17.803,44	8,38
Outros usos	111.912,03	52,70	113.541,12	53,47
Total	212.350,77	100	212.350,59	100

Fonte: Autora.

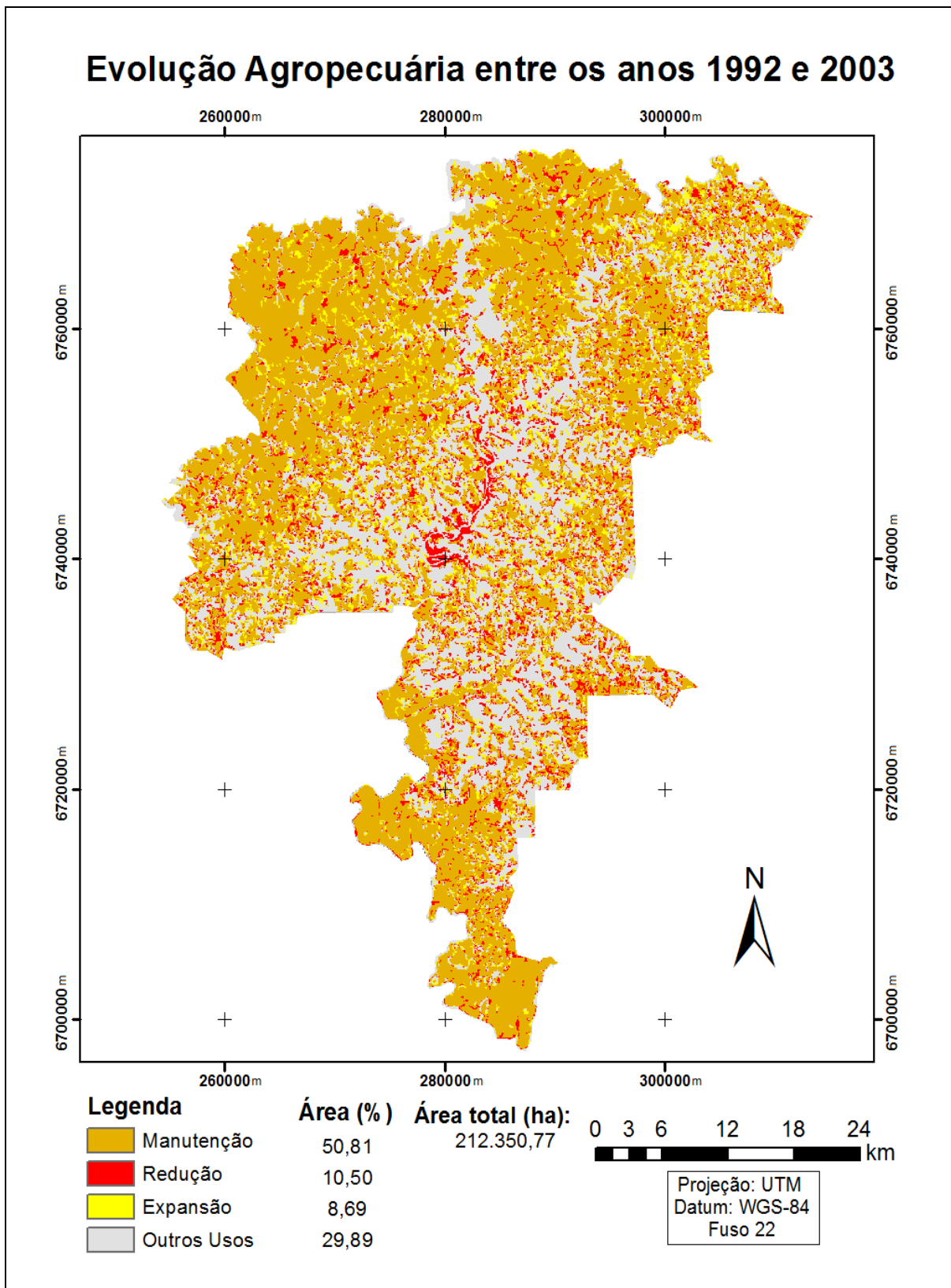
As áreas ocupadas por outros usos corresponderam a 52,7% e 53,47%, no primeiro e segundo período, respectivamente. Isso significa que, para ambos os períodos, em mais da metade da área de influência da U.H.E Dona Francisca não houve evolução envolvendo a classe florestal. As áreas que eram ocupadas pelas classes agropecuária, água e solo exposto, mantiveram-se inalteradas ou evoluíram para outras classes que não floresta.

Entre os anos 1992-2003 as áreas que se mantiveram com cobertura florestal inalterada corresponderam a 28,27%. Já a manutenção florestal entre os anos 2003 e 2013 foi de 30,08%. Esse aumento observado, deve-se ao aumento gradativo da classe floresta ao longo dos períodos avaliados, bem como de sua conservação.

A redução florestal, isto é, a conversão de áreas com florestas para outros usos, foi de 9,15% para o primeiro período e 8,06% para o segundo período. Em contrapartida, as taxas de expansão florestal foram similares e até superiores para a mesma época, representando 9,87 e 8,38%. Isso demonstra que quantitativamente a área se encontra em equilíbrio quanto aos índices de redução e expansão florestal. Entretanto, sabe-se, pela análise dos mapas, que em alguns casos as reduções florestais ocorrem em áreas imprópria, demonstrando desequilíbrio e até mesmo desacordo com a legislação vigente.

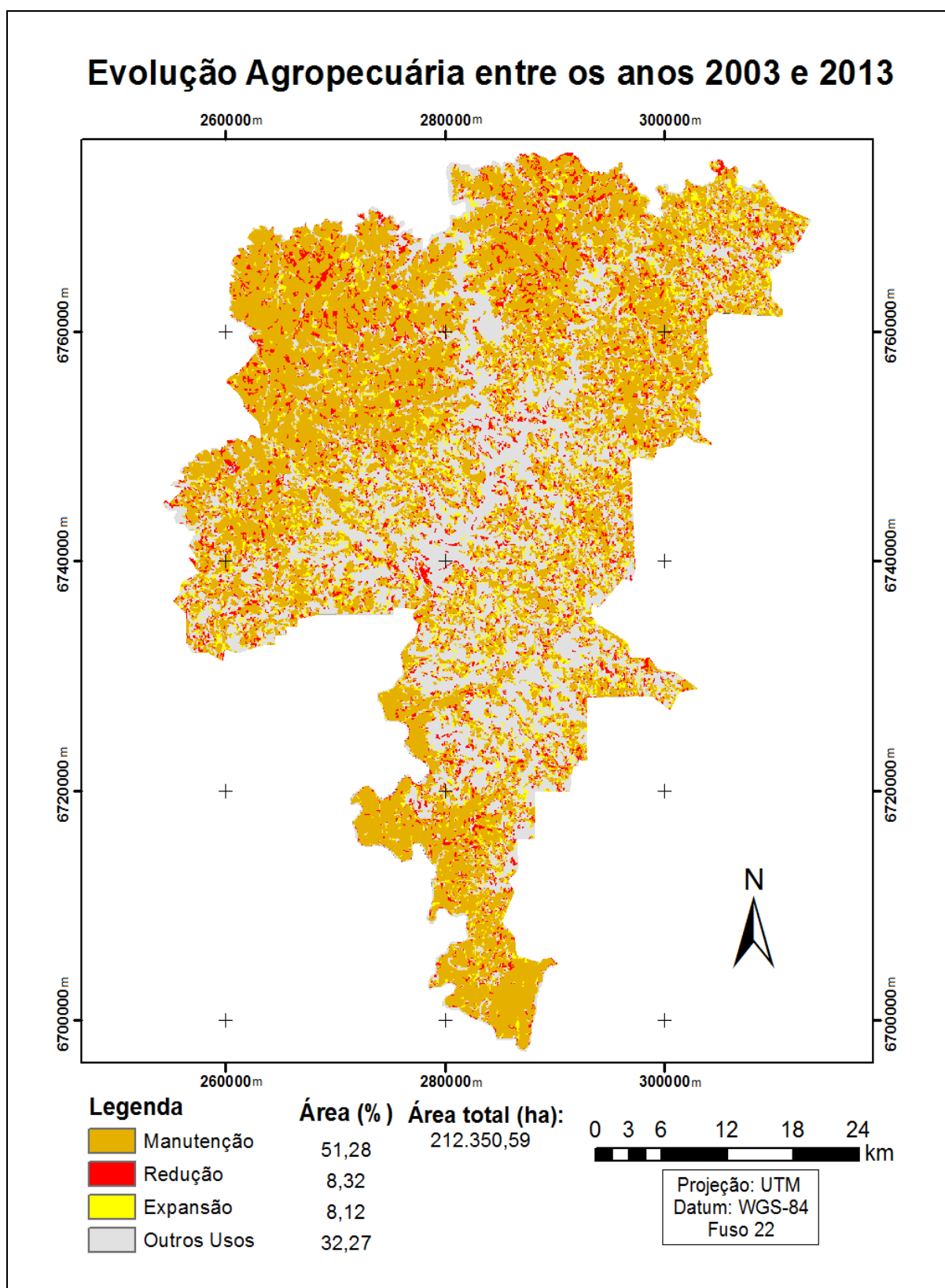
Em relação a análise e a quantificação da evolução agropecuária na área de influência da U.H.E Dona Francisca, para os dois períodos considerados, 1992 a 2003 e 2003 a 2013, os resultados são apresentados nas Figuras 20 e 21 e Tabela19.

Figura 20 – Mapa da evolução agropecuária ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 1992 a 2003



Fonte: Autora.

Figura 21 – Mapa da evolução agropecuária ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, entre os anos 2003 a 2013



Fonte: Autora.

A partir da espacialização da evolução agropecuária (Figuras 20 e 21), pode-se concluir que a classe predominante na área de influência da U.H.E Dona Francisca refere-se à manutenção, sendo esta constituída por áreas onde não houve alteração das classes agropecuária e solo exposto e/ou as transições ocorreram entre elas (agropecuária \leftrightarrow solo exposto). Entre os anos 1992 e 2003 a manutenção foi de 50,81% e 51,28% entre os anos 2003-2013 (Tabela 19). Mesmo que pequeno, esse aumento nas áreas de manutenção indica a estabilização das áreas de cultivos agrícola e pecuária.

Tabela 19 – Evolução agropecuária ocorrida na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, nos períodos de 1992 a 2003 e 2003 a 2013

Evolução Agropecuária	Mudanças 1992 - 2003		Mudanças 2003 - 2013	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Manutenção	108.112,68	50,81	108.902,34	51,28
Redução	22.299,21	10,50	17.672,13	8,32
Expansão	18.461,88	8,69	17.253,27	8,12
Outros usos	63.477	29,89	68.522,85	32,27
Total	212.350,77	100	212.350,59	100

Fonte: Autora.

No que se refere a redução e expansão agropecuária, as taxas de reduções passaram de 10,5% para 8,32%, para o primeiro e segundo período, respectivamente. Enquanto as taxas de expansão mantiveram-se constante, 8,69% (1992-2003) e 8,12% (2003-2013). A classe de outros usos, representada na área por 29,89% e 32,27%, no primeiro e no segundo período, respectivamente, está distribuída principalmente na região central da área de estudo e representa as classes floresta e água.

4.3 MODELAGEM DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA

Nessa seção são apresentados os principais resultados obtidos no processo de modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra, na área de influência da U.H.E Dona Francisca, RS. Esses resultados são expostos em cinco etapas, como descrito na metodologia, e correspondem a parametrização, calibração, simulação e validação de um modelo dinâmico de uso e cobertura da terra para o período de

2003 a 2013 e, a projeção de cenários anuais simulados, até o ano 2023.

4.3.1 Parametrização e Calibração do modelo

A primeira etapa da parametrização do modelo constitui a definição das matrizes de transições, de passo único e múltiplo (*single* e *multiple step*), para o período de 2003 a 2013. Os resultados, convertidos em unidade de área e porcentagem foram apresentados e discutidos na seção 4.1, sendo neste momento somente apresentado as matrizes em valores de taxas líquidas, tais como são originalmente geradas e empregadas nas demais etapas da modelagem.

A Tabela 20 apresenta as taxas líquidas referentes às transições das classes de uso e cobertura da terra ocorridas ao longo de todo o período de tempo analisado, e, a Tabela 21 apresenta as taxas de transições decompostas ano a ano.

Tabela 20 – Matriz de transição única do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2003 e 2013

Classes de uso e cobertura da terra		Para 2013 (Taxas líquidas)			
		Água	Floresta	Agropecuária	Solo exposto
De 2003	Água	-	0,1176	0,0434	0,0405
	Floresta	0,0033	-	0,1622	0,0458
	Agropecuária	0,0025	0,1498	-	0,1266
	Solo exposto	0,4005	0,1191	0,4219	-

Fonte: Autora.

Tabela 21 – Matriz de transição múltipla do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2003 e 2013

Classes de uso e cobertura da terra		Para 2013 (Taxas líquidas)			
		Água	Floresta	Agropecuária	Solo exposto
De 2003	Água	-	0,0139	0,0027	0,0057
	Floresta	0,0004	-	0,0199	0,0053
	Agropecuária	0,0002	0,0187	-	0,0213
	Solo exposto	0,0006	0,0126	0,0716	-

Fonte: Autora.

As etapas seguintes à parametrização, que configuram a discretização das faixas de distâncias e a atribuição de Pesos de Evidência a elas, permitiram avaliar quais as variáveis estudadas que mais influenciaram no processo de transição das classes do uso e cobertura da terra na área de influência da U.H.E. Dona Francisca, no período de 2003 a 2013. Pode-se identificar ainda, em quais classes (faixas) das variáveis a probabilidade de transição foi maior. Sabendo que, quanto mais alto o valor do peso de evidência para cada classe da variável, maior é a probabilidade de a transição ocorrer nestes locais (CEMIN, 2014).

Entretanto, esta avaliação foi realizada após o processo de calibração do modelo. O processo de calibração, que visa selecionar as variáveis que continuarão a compor o modelo através da avaliação da dependência espacial das variáveis, dadas pelos índices de correlação de Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U), permitiu a decisão das variáveis a serem desconsideradas no modelo a partir desta etapa.

A Tabela 22 apresenta as variáveis que apresentaram índices V e U superiores a 0,5, limite considerado neste estudo como limiar de aceitação.

Tabela 22– Valores dos índices de Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) obtidos para as variáveis consideradas na modelagem

Variáveis correlacionadas	Cramer (V)	I. I. Conjunta (U)
PIB \leftrightarrow População Rural	0,8116	0,6108
PIB \leftrightarrow População Urbana	0,7365	0,5357
Bovinocultura \leftrightarrow PIB	0,6095	0,5309
Dens. Demográfica \leftrightarrow População Rural	0,5648	0,5195
População Rural \leftrightarrow População Urbana	0,7152	0,5081
Bovinocultura \leftrightarrow Produção Agrícola	0,5862	0,5079

Fonte: Autora.

Como pode ser visto, as variáveis PIB, População rural, População urbana, Bovinocultura, Densidade Demográfica e Produção Agrícola, apresentaram valores de correlação superiores a 0,5 para ambos os índices (U e V), constituindo alta correlação espacial para todas as transições.

Inicialmente optou-se pela exclusão das variáveis com os maiores índices,

sendo estas PIB e População Rural. Essas variáveis foram excluídas do cubo e as etapas consecutivas foram repetidas visando identificar o comportamento das demais variáveis, verificando-se assim, os maiores índices de correlação para a Produção Agrícola.

Dessa forma, foram desconsideradas do modelo e excluídas do cubo de variáveis estáticas, as variáveis PIB, População Rural e Produção Agrícola. As demais, optou-se por mantê-las por demonstrarem valores de correlação superiores à 0,5 em pelo menos um dos índices avaliados.

Para Silva (2015), no processo de modelagem da arenização e cobertura florestal na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul, as variáveis que apresentaram maior correlação foram População Urbana, Ovinocultura e Estrada. Já para Lippert (2014) as variáveis que apresentaram maior valor quando correlacionadas foram Demografia e População Urbana. Lippert (2014) atribuiu a alta correlação observada ao fato de que em sua área de estudo, unidades de paisagem do Bioma Pampa - RS, a maior parte da população está concentrada em áreas urbanas, proporcionando semelhança na distribuição espacial das duas variáveis, quando estimadas pela função de Kernel.

Nesse sentido, considerando que os municípios que integram a área de influência da U.H.E Dona Francisca são predominantemente constituídos por população rural, justifica-se a alta correlação com variáveis também expressivas no âmbito rural, como é o caso da Produção Agrícola. Já em relação a variável PIB, pode-se atribuir a correlação desta à tendência vista na Tabela 5, onde os municípios com maior população total e também rural, apresentam os maiores PIB.

Cabe ressaltar que as correlações são determinadas pelas características inerentes a cada região de estudo, bem como, pela função de espacialização utilizadas para representá-las. Sendo assim, Lippert (2014) salienta que a decisão pela inclusão ou exclusão das variáveis deve ser tomada considerando-se além dos valores de correlação calculados, o conhecimento do modelador em relação a influência das mesmas nos processos de transições que ocorrem na área de estudo.

Após a exclusão das variáveis correlacionadas, as etapas consecutivas ao processo de definição das transições foram repetidas e um novo arquivo de Pesos de Evidência foi gerado, a partir do qual efetuou-se a interpretação dos dados. De acordo com Benedetti (2010), a interpretação dos Pesos de Evidência pode ser realizada de forma individual para cada transição.

Dessa forma, na Tabela 23 são elencadas as variáveis que apresentaram Pesos de Evidência mais favoráveis para cada transição, com indicação da faixa de distância/classe que se encontraram. São apresentadas as variáveis com Pesos de Evidência positivos (W+) acima 0,5, visando reduzir o número de informações apresentadas. Os valores negativos e nulos foram desconsiderados, sendo estes desfavoráveis para que as transições ocorram.

Tabela 23 – Variáveis com Pesos de Evidência mais favoráveis para cada transição
(Continua)

Transições	Variáveis	Faixas de Distâncias/Classes
Água para Floresta	Distância de floresta	0 - 60 m
	Distância de agropecuária	0 - 60 m
	Distância de solo exposto	1.350 - 1.380 m
	Bovinocultura	16.000 - 20.000 cabeças
	Declividade	> 75%
	Densidade Demográfica	32 - 40 hab/km ²
	Geologia	Fácies Caxias
	Hipsometria	500 - 650 m
	IDH	0,48 - 0,8
	Ovinocultura	2.700 - 3.600 cabeças
	População Urbana	4.200 - 5.600 habitantes
	Solos	Terra Bruna Estruturada
Água para Agropecuária	Distância de floresta	780 - 810 m
	Distância de agropecuária	0 - 60 m
	Distância de solo exposto	0 - 60 m
	Bovinocultura	16.000 - 20.000 cabeças
	Declividade	0 - 3%
	Densidade Demográfica	32 - 40 hab/km ²
	Geologia	Formação Caturrita
	Hipsometria	500 - 650 m
	IDH	0,48 - 0,8
	Ovinocultura	2.700 - 3.600 cabeças
	População Urbana	4.200 - 5.600 habitantes
	Solos	Podzólico Bruno-Acinzentado
Água para Solo exposto	Distância de floresta	1.110 - 1.140 m
	Distância de agropecuária	1260 - 1290 m
	Distância de solo exposto	0 - 60 m
	Bovinocultura	16.000 - 20.000 cabeças
	Declividade	0 - 3%
	Densidade Demográfica	32 - 40 hab/km ²
	Geologia	Formação Botucatu
Hipsometria	300 - 400 m	

Tabela 23 – Variáveis com Pesos de Evidência mais favoráveis para cada transição
(Continuação)

Transições	Variáveis	Faixas de Distâncias/Classes
Água para Solo exposto	IDH	0,48 - 0,8
	Ovinocultura	900 - 1.800 cabeças
	População Urbana	5.600 - 7.000 habitantes
	Solos	Podzólico Vermelho-Escuro
Floresta para Água	Distância de água	0 - 60 m
	Distância de agropecuária	1.230 - 2.040 m
	Declividade	0 - 3%
	Geologia	Depósitos Aluviais
	Hipsometria	0 - 100 m
	Solos	Planossolo Eutrófico
Floresta para Agropecuária	Distância de agropecuária	0 - 60 m
	Distância de solo exposto	0 - 60 m
	Declividade	3 - 8%
	Geologia	Formação Tupanciretã
	Hipsometria	0 - 100 m
	Ovinocultura	3.600 - 4.700 cabeças
	Solos	Latossolo Vermelho-Escuro
Floresta para Solo exposto	Distância de solo exposto	0 - 60 m
	Declividade	0 - 3%
	Densidade Demográfica	32 - 40 hab/km ²
	Geologia	Depósitos Aluviais
	Hipsometria	0 - 100 m
	População Urbana	4.200 - 5.600 habitantes
	Solos	Planossolo Eutrófico
Agropecuária para Água	Distância de água	0 - 60 m
	Distância de floresta	1.140 - 1.170 m
	Distância de solo exposto	0 - 60 m
	Declividade	0 - 3%
	Densidade Demográfica	24 - 32 hab/km ²
	Geologia	Formação Sanga do Cabral
	Hipsometria	0 - 100 m
	População Urbana	4.200 - 5.600 habitantes
Solos	Planossolo Eutrófico	
Agropecuária para Floresta	Distância de água	0 - 60 m
	Distância de floresta	0 - 60 m
	Declividade	> 75%
	Geologia	Formação Botucatu
	Hipsometria	100 - 200 m
	Solos	Terra Bruna Estruturada

Tabela 23 – Variáveis com Pesos de Evidência mais favoráveis para cada transição
(Conclusão)

Transições	Variáveis	Faixas de Distâncias/Classes
Agropecuária para Solo exposto	Distância de solo exposto	0 - 60 m
	Densidade Demográfica	32 - 40 hab/km ²
	Solos	Planossolo Eutrófico
	Distância de água	0 - 60 m
	Distância de floresta	1.290 – 1.320 m
Solo exposto para Água	Bovinocultura	12.000 - 16.000 cabeças
	Declividade	3 - 8%
	Densidade Demográfica	24 - 32 hab/km ²
	Geologia	Formação Sanga do Cabral
	Hipsometria	0 - 100 m
	IDH	0,48 - 0,8
	População Urbana	5.600 - 7.000 habitantes
	Solos	Latossolo Vermelho-Escuro
Solo exposto para Floresta	Distância da água	0 - 60 m
	Distância de floresta	0 - 60 m
	Declividade	> 75%
	Geologia	Formação Botucatu
	Hipsometria	100 - 200 m
	Ovinocultura	3.600 – 4.700 cabeças
	Solos	Latossolo Vermelho-Escuro
Solo exposto para Agropecuária	Distância de agropecuária	0 - 60 m
	Geologia	Formação Santa Maria
	Hipsometria	100 - 200 m
	Ovinocultura	3.600 - 4.700 cabeças
	Solos	Latossolo Vermelho-Escuro

Fonte: Autora.

Os resultados dos Pesos de Evidência para cada transição indicaram que as variáveis Distância dos centros urbanos, Distância da hidrografia, Distância da rede viária e Bacia hidrográfica, não contribuíram com as transições no período de 2003 a 2013. Por outro lado, as variáveis Distância das classes de uso e cobertura da terra (Distância de água, Floresta, Agropecuária e de Solo exposto), influenciaram as transições, principalmente nas faixas iniciais, com algumas exceções de faixas mais distantes. Indicando assim suas contribuições para as mudanças.

As variáveis agropecuárias, Bovinocultura e Ovinocultura, não apresentaram influência sob todas as transições. Entretanto, quando assim ocorreu, estas caracterizaram-se por faixas/classes de intensa criação bovina e ovina. Acima de

12.000 e de 900 cabeças, respectivamente. Demonstrando a contribuição da bovinocultura e ovinocultura em grande escala para as mudanças de uso e cobertura da terra, durante o período avaliado.

Com exceção das transições de solo exposto para agropecuária e agropecuária para solo exposto, as demais transições foram influenciadas pela variável Declividade, sobretudo em áreas com relevo plano (0-3%), suave ondulado (3-8%) e superfícies íngremes e escarpadas (>75%). Sendo que, as transições com maior probabilidade de ocorrer em terrenos acidentados foram as relacionadas à expansão da classe floresta. As demais transições ocorreram em terrenos planos a ondulado.

Em relação a Hipsometria, as classes hipsométricas em que as transições apresentaram maior probabilidade de ocorrência foram entre 0 - 100 m, 100 – 200 m, 300 – 400 m e 500 – 600 m, demonstrando que mesmo influenciando todas as transições, estas não ocorreram em uma classe altimétrica predominantemente.

O mesmo ocorreu com a variável Geologia, que com exceção da transição agropecuária para solo exposto, apresentou Pesos de Evidência positivos para todas as transições, em classes geológicas distintas.

O mesmo não foi observado para a variável Solos, onde as transições ocorreram predominantemente em solos do tipo Terra Bruna Estruturada (Argissolo), Latossolo Vermelho-Escuro (Latosolo), Planossolo Eutrófico (Planossolo) e solos Podzólicos (Argissolo). Este fato pode estar relacionado a localização dos solos na área de estudo, bem como a suas características intrínsecas.

Os Argissolos, assim como são denominados os solos do tipo Terra Bruna Estruturada, Podzólico Bruno-Acinzentado e Podzólico Vermelho-Escuro, de acordo com a nova classificação de solos (EMBRAPA, 2006), são solos de profundidade variável, bem drenados, ácidos e com alto teor de argila. Na área de estudo, estes solos não ocorrem predominantemente em uma única região, distribuindo-se em diferentes áreas e classes altimétricas.

Os Latossolos, predominam em áreas de relevo suave ondulado, são profundos, bem drenados e ácidos, caracterizando-se por boa aptidão agrícola. Na área de estudo, ocorrem no município de Pinhal Grande, região de intensa atividade agrícola e agropecuária. Já os Planossolos, são solos localizados em áreas de relevo suave, ondulados ou planos e, aparecem nas margens dos rios e lagoas. São solos mal drenados e por isso, aptos para o cultivo de arroz irrigado (STRECK et al.,

2008). Na área de estudo, ocorrem junto às margens do rio Jacuí, município de Agudo, onde o cultivo é principalmente de arroz irrigado.

As variáveis Densidade demográfica e População urbana não indicaram Pesos de Evidência favoráveis para todas as transições. Entretanto, observou-se a ocorrência destas para as mesmas transições, sobretudo em faixas caracterizadas por alta densidade demográfica (acima de 24 hab/km²) e alta concentração urbana (acima de 4.200 habitantes). Demonstrando a influência da densidade demográfica e concentração urbanas no processo de alterações das classes de uso e cobertura da terra.

Por fim, o Índice de desenvolvimento humano (IDH) apresentou Pesos de Evidência positivos apenas para as transições de água para floresta, água para agropecuária, água para solo exposto e solo exposto para água, em faixas onde o IDH era 0,48 a 0,8.

4.3.2 Simulação do modelo

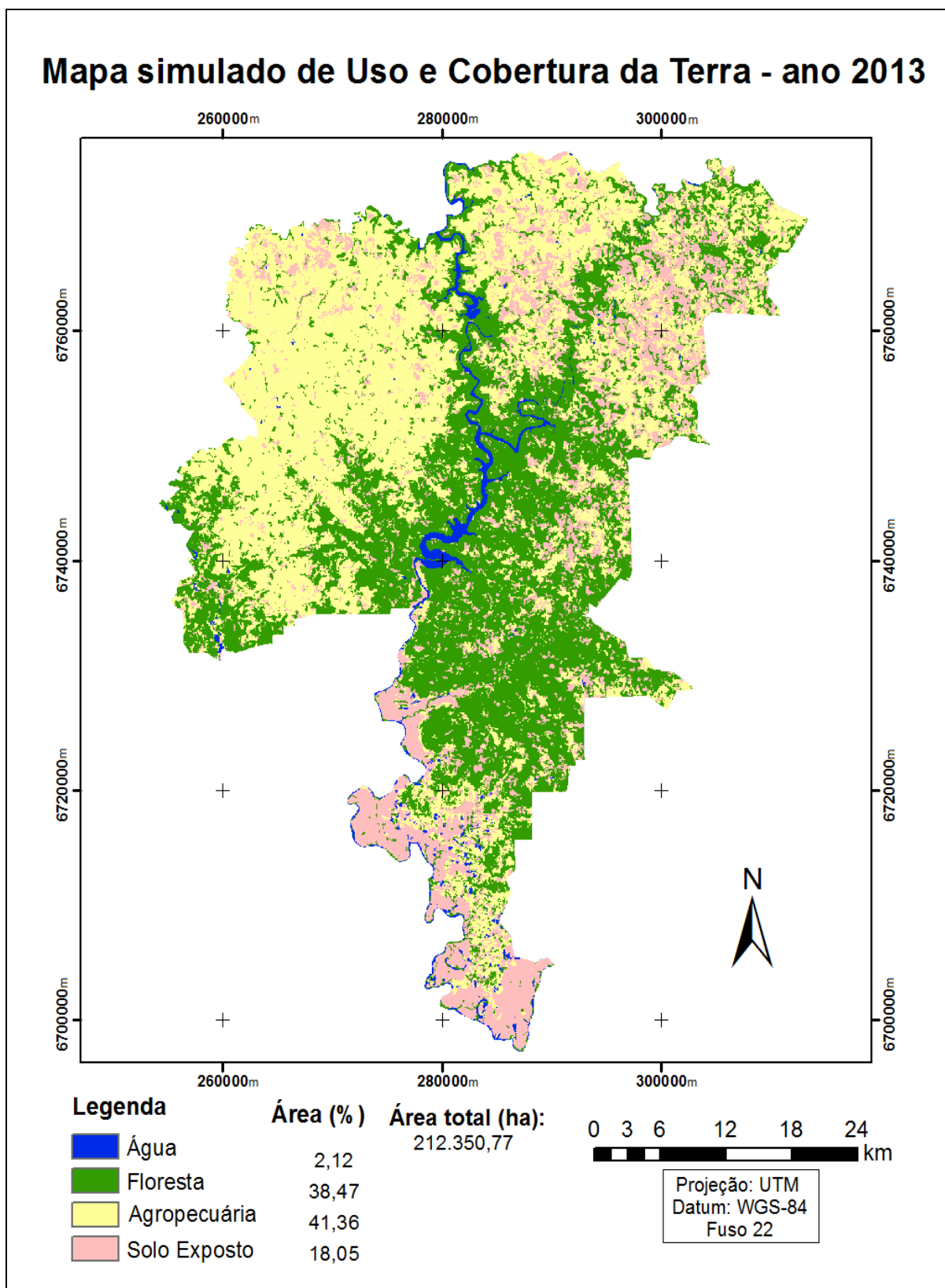
Com base nos processos anteriores, esta etapa de simulação teve por objetivo executar o modelo parametrizado e calibrado, visando gerar mapas simulados de uso e cobertura da terra.

Como já descrito, os algoritmos de transição *Patcher* e *Expander*, incorporados ao Dinamica EGO, são responsáveis por produzir os padrões espaciais de mudanças das transições e, para tanto, parâmetros como tamanho médio das manchas, variância das manchas e grau de isometria precisaram ser definidos, sendo estes apresentados anteriormente.

A partir destes parâmetros e demais arquivos gerados nas etapas anteriores, como cubo das variáveis estáticas, arquivo de Pesos de Evidência, matriz de transição e mapa inicial (2003) de uso e cobertura da terra, o modelo foi executado, gerando-se um mapa simulado para a ano 2013, o qual é apresentado na Figura 22.

A eficiência do modelo foi avaliada a partir do método adaptado de similaridade *fuzzy*, descrito na seção a seguir, e, visa validá-lo quanto a sua utilização para efetuar simulações de cenários futuros.

Figura 22 – Mapa simulado do uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil, para o ano 2013



Fonte: Autora.

4.3.3 Validação do modelo de simulação

A validação do modelo, realizada através da aplicação do índice de similaridade *fuzzy* incorporado ao *software* Dinamica EGO, teve como base os mapas de diferenças resultantes da subtração entre o mapa inicial real de 2003 e o final real de 2013, e, o mapa inicial real de 2003 e o final simulado para 2013.

Os resultados obtidos de similaridade *fuzzy*, calculados através das funções de decaimento constante e exponencial para diferentes tamanhos de janelas de resoluções estão relacionados na Tabela 24.

Tabela 24 – Índices de similaridade *fuzzy* calculados através das funções de decaimento exponencial e constante para diferentes janelas de resoluções

Janelas de resolução	Decaimento Exponencial	Decaimento Constante
3 x 3	0,5541	0,6213
5 x 5	0,6059	0,7329
7 x 7	0,6274	0,8027
9 x 9	0,6373	0,8514
11 x 11	0,6421	0,8860

Fonte: Autora.

Na escala de variação do índice *fuzzy*, a qual pode variar de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo a 1 maior a similaridade, pode-se concluir que os índices obtidos para o modelo simulado se mostraram satisfatório, demonstrando a qualidade do modelo.

Para a menor janela de resolução considerada (3x3) obteve-se valores de 0,5541 e 0,6238, calculados por decaimento exponencial e constante, respectivamente. O aumento gradativo desses índices é observado com o aumento da janela de resolução, alcançando valores de 0,6421 por decaimento exponencial e 0,8845 por constante, na janela 11x11. Indicando melhor ajuste nas janelas maiores.

Os aumentos gradativos ao longo das diferentes janelas de resoluções, ocorrem até janelas de 11x11. Segundo Ferrari (2008), janelas de resoluções acima de 11 ou 13 pixels promovem a saturação e, portanto, não geram índices de

similaridade eficientes para avaliação dos mapas simulados. Cabendo ao modelador definir a resolução máxima e ser considerada para garantir a eficiência da validação.

Ainda assim, a utilização do índice de similaridade *fuzzy*, fundamentado na lógica Fuzzy, justifica-se por basear-se não apenas na localização da célula analisada, como também na localização das células da vizinhança, definidas pelas janelas de resoluções. Assim sendo, as mudanças alocadas nesse limite são consideradas corretas, condizendo com o processo de modelagem e simulações, que não visa a reprodução exata de condições passadas, tarefa essa difícil mediante a aleatoriedade das conversões de uso e cobertura da terra (BENEDETTI, 2010; FERRARI, 2008), mas sim, a reprodução aproximada a partir de análises de tendências.

As bibliografias consultadas apresentaram índices para múltiplas resoluções, similares aos encontrados no presente trabalho. Ferrari (2008) obteve valores de similaridade *fuzzy* entre 0,44 a 0,84, referente a modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra da Quarta Colônia, RS, para o período de 2002 a 2008. Benedetti (2010), encontrou valores entre 0,64 a 0,99, para os dois períodos avaliados (2000-2004 e 2004-2008), referentes a análise da dinâmica da incorporação de áreas florestais nas Serras do Sudeste e Campanha Meridional-RS.

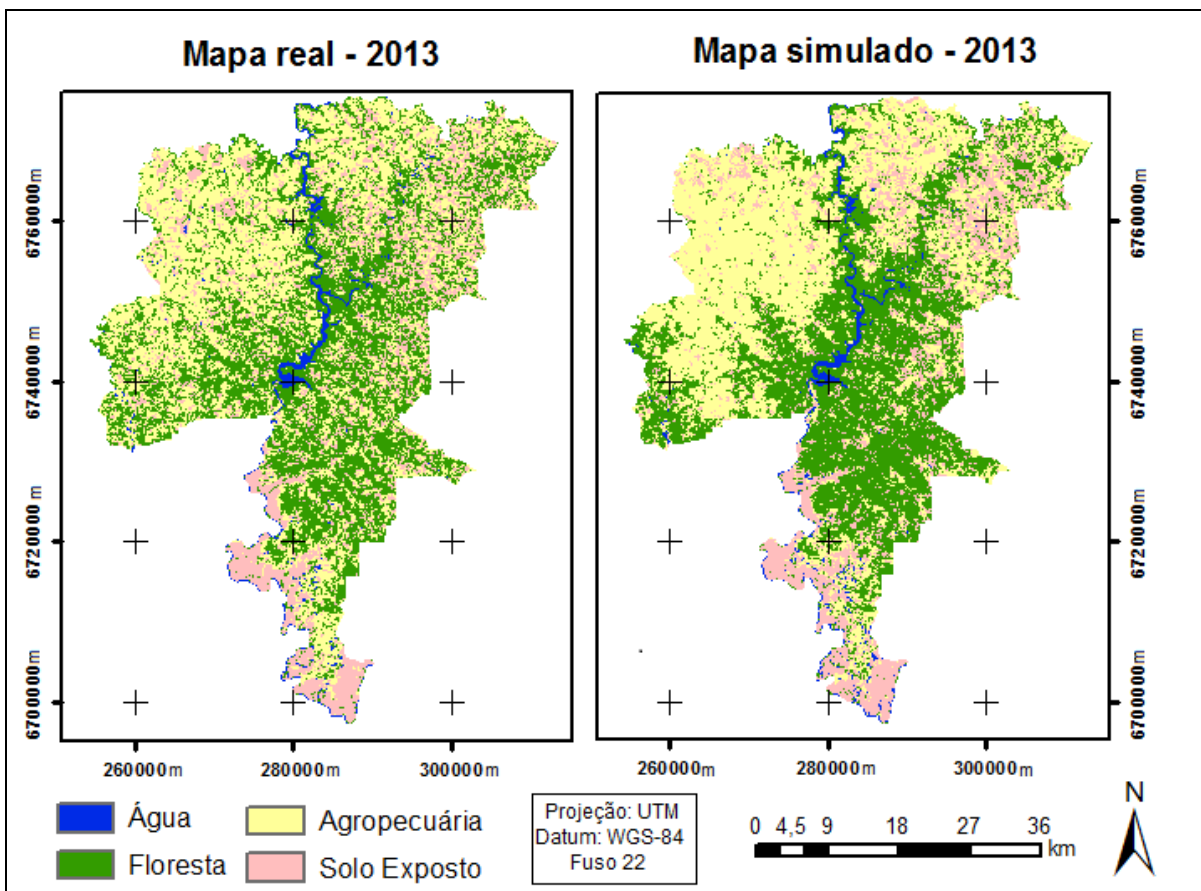
Furlan (2012) encontrou índices variando entre 0,61 a 0,99, para funções de decaimento exponencial e constante, ao avaliar a modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra entre os anos 1991 a 2011, na microbacia Arroio Grande, RS. Lima (2014), obteve valores para mínima e máxima similaridade variando de 0,36 a 0,87, em relação a construção de um modelo de simulação da dinâmica da paisagem do baixo curso do rio dos Sinos – RS, entre os anos 1990 e 2011. Ao analisar a evolução da fragmentação florestal no município de Caxias do Sul – RS, e simular cenários futuros tendo como base índices de ecologia da paisagem, Cemin (2014), obteve valores de similaridade entre 0,40 a 0,71.

Da mesma forma, Lippert (2014) verificou índices entre 0,45 a 0,99 ao simular prognósticos de localização e quantificação das florestas em unidades de paisagem do bioma Pampa. Mais recentemente, Silva (2015), ao analisar a modelagem dinâmica dos processos de arenização e cobertura florestal na Campanha Ocidental –RS, obteve índices de similaridade *fuzzy*, calculados pelas funções de decaimento exponencial e constante, entre 0,55 a 0,93.

A análise visual comparativa permitiu verificar a semelhanças entre os mapas,

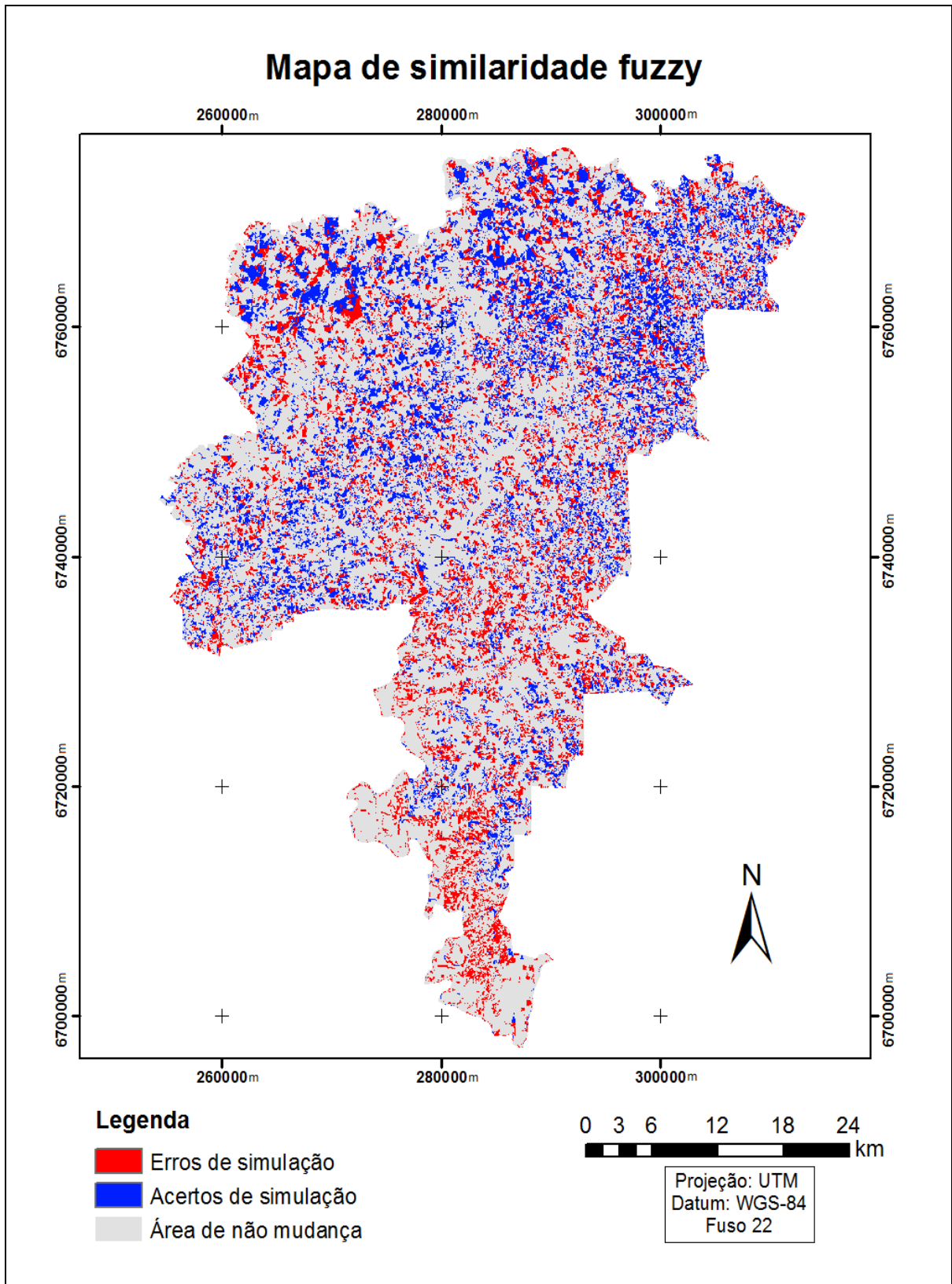
simulado e real, indicada pelos índices de similaridade *fuzzy* (Figura 23). Entretanto, em algumas regiões observa-se que o modelo deixou de representar algumas transições que ocorrerem no mapa real, da mesma forma que, representou transições que não ocorreram. Esses erros e acertos são espacializados no mapa de similaridade *fuzzy* (Figura 24).

Figura 23 – Comparação entre o mapa simulado e real do ano 2013



Fonte: Autora.

Figura 24 – Mapa de similaridade *fuzzy*, baseado na função de decaimento constante, janela 11x11



Fonte: Autora.

As áreas representadas em azul no mapa correspondem à similaridade igual a 1, e, portanto, acertos na simulação. Demonstrando a equivalência espacial entre os mapas de diferenças nessas áreas. Os erros de simulação são apresentados em vermelho e correspondem ao índice de similaridade igual a 0. Já as áreas cinzas, referem-se às células que não sofreram alteração no período avaliado e que não foram consideradas no processo de avaliação. Para Benedetti (2010), ao desconsiderar as células de não mudança, o método elimina a possibilidade de superestimar os índices de similaridade, devido a inclusão de proporções grandes de células que não sofreram mudanças, tornando-se um método rigoroso de avaliação.

Desta forma, mesmo o mapa simulado apresentando diferenças quanto a espacialização das transições, quando comparado ao mapa real, os índices de similaridade indicam a qualidade do modelo, sendo possível, a partir deste, efetuar projeções de cenários. Cabe reiterar, sobre a dificuldade em representar e modelar tais alterações de uso e cobertura da terra, sendo estas não lineares e influenciadas por diferentes fatores (CEMIN, 2014), tais como, fenômenos climáticos, intervenções antrópicas, políticas de governo e elementos econômicos, próprios do período.

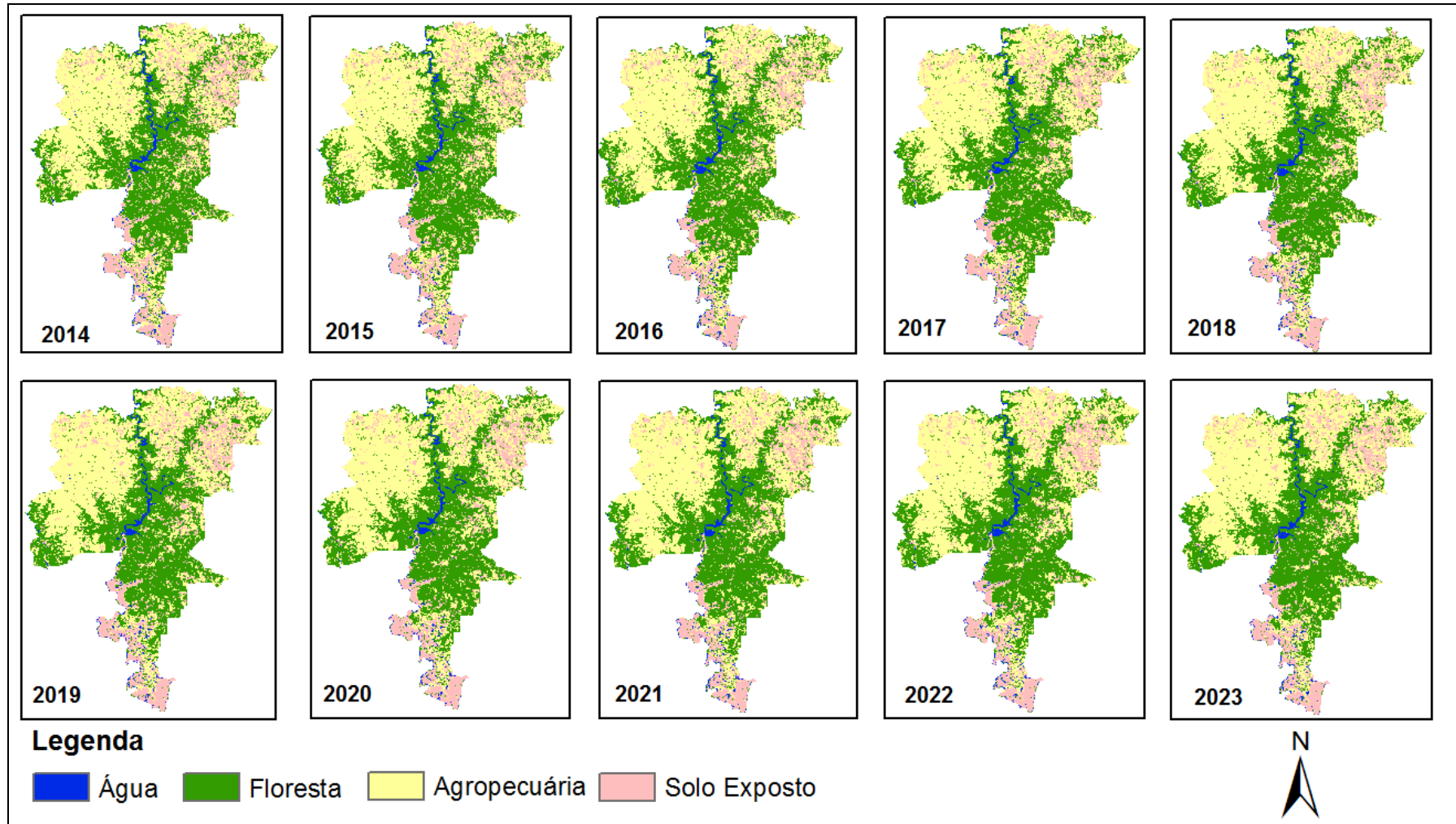
4.3.4 Simulações de cenários futuros

As simulações dos cenários foram realizadas até o ano de 2023, tendo como base o modelo validado. Considerando que as simulações apresentam maior relevância a curto e a médio prazo (ALMEIDA, 2003), as simulações dos cenários foram obtidas com horizonte de dez anos, sendo o mesmo intervalo considerado para a definição do modelo.

Os mapas de uso e cobertura da terra da área de influência da U.H.E. Dona Francisca, simulados até o ano 2023 a partir do modelo calibrado e validado, são apresentados na Figura 25.

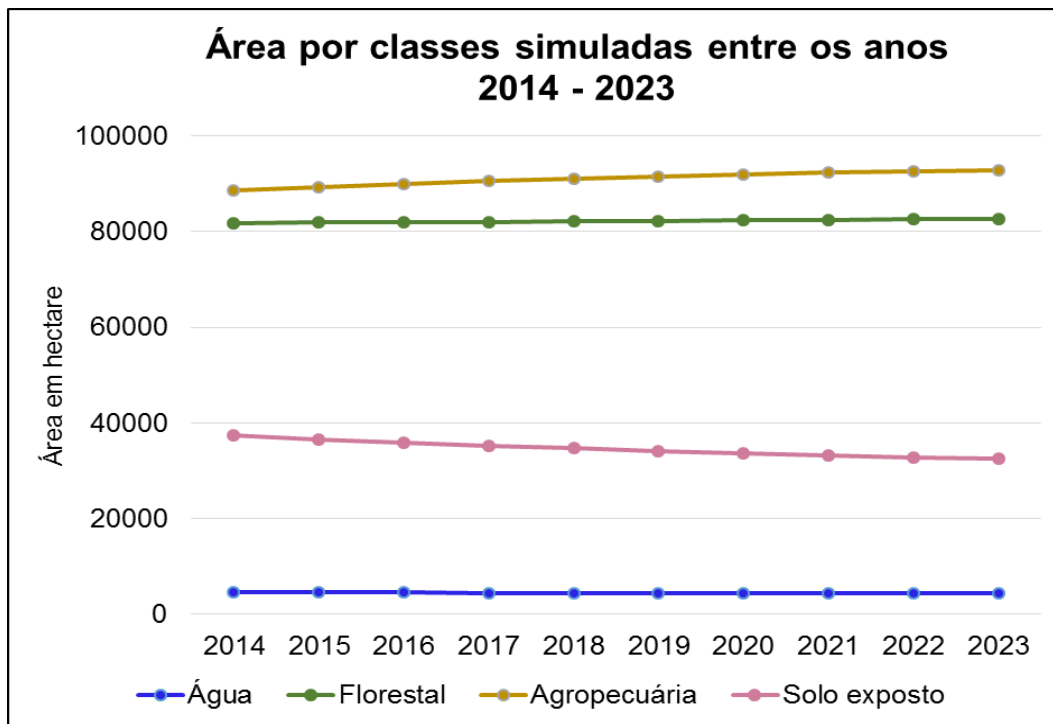
A quantificação das áreas representadas por cada classe nos mapas simulados é ilustrada da Figura 26, e indicam a tendência observada no período que se tomou como base para efetuar as simulações futuras (2003-2013). Havendo, portanto, aumento gradativo das áreas com florestas e agropecuária, declínio das áreas cobertas por solo exposto, bem como variações inexpressivas da classe água. Mostrando assim, a eficácia do modelo no processo de simulação.

Figura 25 – Mapas de uso e cobertura da terra simulados para o período de 2014 a 2023, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil



Fonte: Autora.

Figura 26 – Variação de área por classe de uso e cobertura para o período simulado (2014-2023)



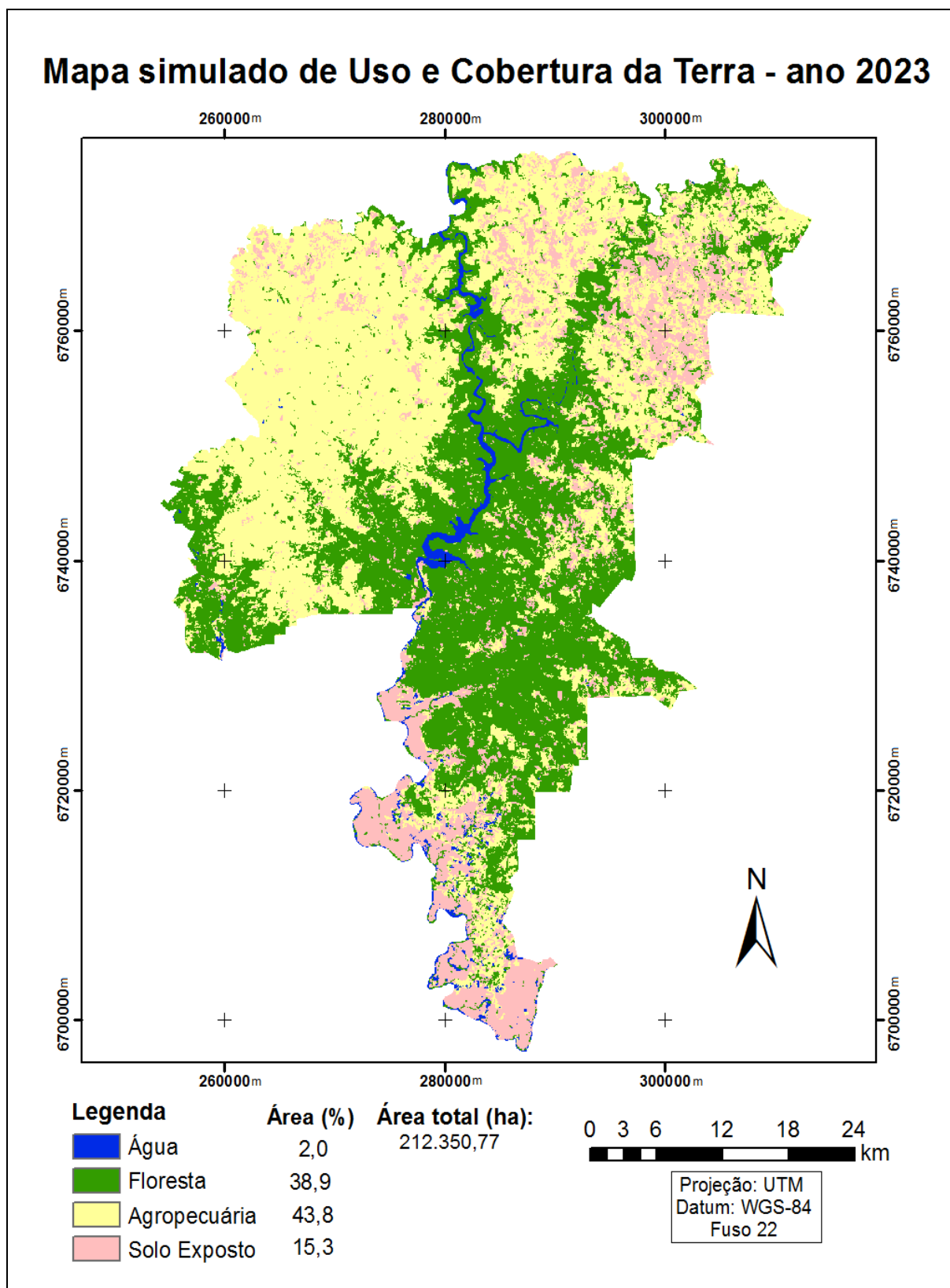
Fonte: Autora.

O mapa de uso e cobertura da terra simulado para 2023 (Figura 27), apresentou área equivalente a 82.676 ha coberta com florestas, 4.265,91 ha de água, 92.945,88 ha de agropecuária e 32.462,91 ha de solo exposto. Indicando a predominância das classes agropecuária e florestas, assim como observado para os anos 1992, 2003 e 2013.

A interpretação visual do mapa simulado para 2023 permitiu inferir sobre a espacialização das classes de uso e cobertura da terra. Sobre isso, observa-se a predominância da agropecuária na região noroeste do mapa, sobretudo de forma homogênea. A homogeneidade se dá devido a supressão de capões de florestas, bem como de áreas com solo exposto, presentes no anos anteriores, nesta mesma região.

Sobre a classe floresta, além da supressão de pequenos fragmentos em toda a área de estudo, observa-se também o adensamento da faixa de floresta ao longo do rio Jacuí e áreas declivosas. A classe solo exposto reduziu consideravelmente, principalmente em detrimento a expansão da agropecuária, mantendo-se inalterado apenas ao sul da área de estudo, região de várzea destinada ao cultivo de arroz.

Figura 27 – Mapa de uso e cobertura da terra simulado para o ano 2023, da área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, Brasil



Fonte: Autora.

A matriz de transição, obtida para o período de 2013 a 2023, e que demonstra as transições que irão ocorrer futuramente entre as classes de uso e cobertura da terra em valores percentuais, é apresentada na Tabela 25.

Tabela 25 – Matriz de transição do uso e cobertura da terra na área de influência da U.H.E. Dona Francisca - RS, Brasil, para os anos 2013 e 2023, valores em porcentagem (%)

De/Para		2023			
		Água	Floresta	Agropecuária	Solo exposto
2013	Água	-	19,99	6,20	7,47
	Floresta	0,66	-	26,37	7,02
	Agropecuária	0,48	23,70	-	12,58
	Solo exposto	0,80	18,48	40,68	-

Fonte: Autora.

As principais transições observadas para o período simulado, ocorreram entre as classes agropecuária e solo exposto. A conversão de solo exposto para agropecuária correspondeu a 40,68% e a transição de agropecuária para solo exposto equivaleu a 26,37%. Sendo estas, as classes com maiores percentuais de alterações.

As conversões para a classe floresta também foram representativas para o período, e dadas principalmente pelas classes água (19,99%) e agropecuária (23,70%). As demais transições ocorreram em menores proporções.

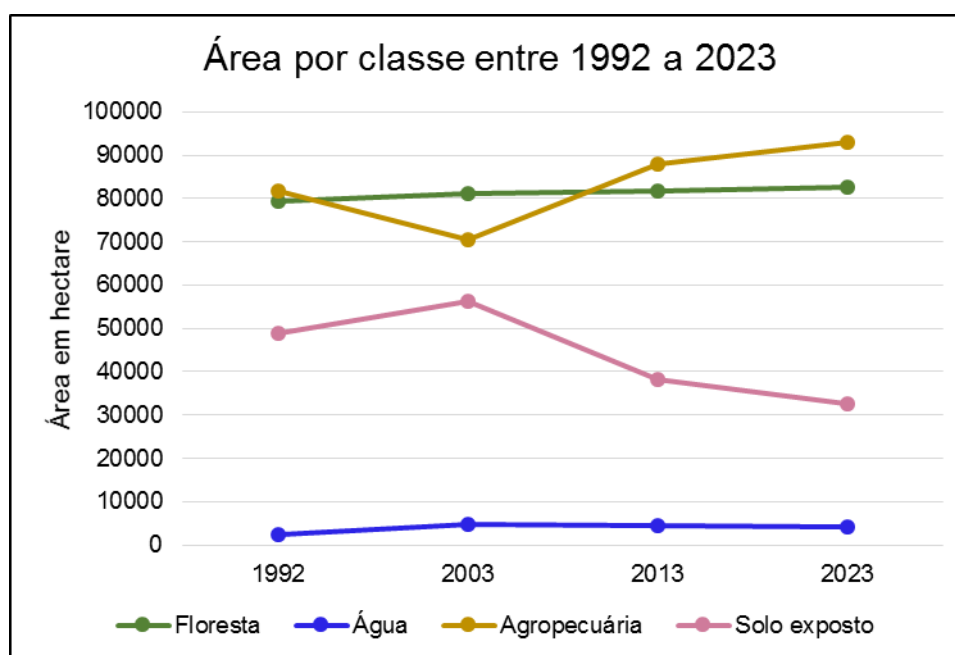
Fazendo uma análise evolutiva das classes de uso e cobertura da terra, da área de influência a U.H.E Dona Francisca, ao longo do período avaliado, incluindo o período simulado, 1992 a 2023, foi possível verificar as reduções e expansões de forma comparativa (Tabela 26 e Figura 28).

Tabela 26 – Expansão e redução de área, em hectare, por classe de uso e cobertura entre os anos 1992 a 2023

Classes de uso e cobertura	1992-2003	2003-2013	2013-2023
	(Hectare)		
Água	2.301,57	-261,36	-242,91
Floresta	1.535,76	680,13	989,84
Agropecuária	-11.145,15	17.379,81	5.121,72
Solo exposto	7.307,82	-17.798,76	-5.868,54

Fonte: Autora.

Figura 28 – Variação de área por classe de uso e cobertura entre os anos 1992 a 2023



Fonte: Autora.

A classe água apresentou expansão no primeiro período (1992-2003), sendo este marcado pela formação do lago da usina, e, redução nos períodos consecutivos (2003-2023). A expansão florestal ocorreu em todos os períodos, em maior ou menor intensidade. A agropecuária teve retração entre os anos 1992 e 2003, seguindo de expansão nos demais períodos. A classe solo exposto sofreu o processo inverso da agropecuária, apresentando expansão entre 1992 e 2003, e redução no restante do período.

Sendo assim, avaliou-se que, de acordo com o modelo simulado, e se

mantidas as condições, as florestas serão continuamente expandidas até o ano 2023 na área de influência da U.H.E Dona Francisca. Da mesma forma para a agropecuária. Entretanto, sobre a expansão da agropecuária não se pode inferir com exatidão se a expansão se dará na forma de campo (pecuária) ou agricultura, uma vez que neste estudo não foram avaliadas separadamente.

O cenário simulado para a área de influência da U.H.E Dona Francisca, no que se refere a expansão florestal, vem ao encontro dos resultados obtidos por outros autores, para diferentes regiões do Rio Grande do Sul. Lima (2014), verificou a expansão da cobertura florestal para o período de 1990 a 2022, na região do baixo curso do rio dos Sinos. Da mesma forma, Benedetti (2010) identificou tendência linear quanto aos processos de expansão da cobertura florestal para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional, no período de simulação entre 2008 a 2016.

Para Rudel et al. (2010), após um declínio prolongado, as florestas passam por uma recuperação parcial. Essa inversão é denominada pelos autores, como ponto de inflexão, momento em que, o desmatamento desaparece e o reflorestamento, ou regeneração, inicia. Uma das justificativas para esse processo está embasada na abertura de novas fronteiras para a expansão agrícola, propiciando assim, a recuperação florestal em áreas agrícolas mais velhas e com potencial produtivo reduzido.

Nesse sentido, e relacionando com os resultados obtidos, pode-se atribuir ao aumento de florestas e de áreas destinadas a agropecuária, a essa dinâmica, aliado ainda, aos fatos já discutidos e apresentados ao longo deste trabalho.

Deve-se levar em consideração, entretanto, que nenhum sistema é fechado, podendo este sofrer influências externas. As quais, foram desconsideradas neste trabalho, ao analisar as transições fechadas sobre uma extensão geográfica limitada. Como destaca Longley et al. (2013), “há sempre mais de um mundo externo à extensão, exceto em alguns casos de modelos verdadeiramente globais”.

Desta forma, a área externa à modelada tanto pode impactar, quanto ser impactada. Isso significa que as transições consideradas poderiam ser projetadas para fora do limite da área de influência da U.H.E. Dona Francisca, da mesma forma que transições que ocorrem próximas ao limite, poderiam ser projetadas para dentro.

5 CONCLUSÃO

Atendendo ao objetivo principal deste trabalho, de efetuar a modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra, da área de influência da U.H.E Dona Francisca e, com base nesse modelo, efetuar projeções de cenários futuros, chegou-se as seguintes conclusões:

O mapeamento temático e quantificação do uso e cobertura da terra na área de influência da U.H.E Dona Francisca - RS, nos anos 1992, 2003 e 2013, a partir de imagens Landsat, sensores TM e OLI, demonstrou predominância em todos os anos avaliados, das classes floresta e agropecuária. As florestas apresentaram um aumento gradativo, correspondendo a um incremento de 2.215,89 hectares ao longo dos 21 anos. Este fato pode ser atribuído aos locais de ocorrência das florestas, áreas que dificultam a ocupação humana, mediante as condições de relevo, bem como às restrições de uso, impostas pela legislação brasileira. Além disso, pode estar associado a criação do Parque Estadual da Quarta Colônia e às desapropriações das propriedades, indenizações e deslocamento da população, resultando da instalação da U.H.E Dona Francisca.

A classe agropecuária, da mesma forma, demonstrou aumento de 6.234,66 hectares entre os anos 1992 e 2013. Já a classe solo exposto, teve redução de 10.490,8 hectares para o mesmo período. As classes agropecuária e solo exposto apresentaram relação inversa, onde o aumento de uma representou a redução da outra. As inversões de predomínio estão associadas a incorporação de diferentes culturas, períodos de plantios, atrasos na colheita e questões climáticas. Em relação a classe água, esta manteve-se com pequenas variações, exceto no ano 2003, quando foi possível verificar aumento de 2.301,57 hectares, ocasionado pelo represamento da água na formação do lago da U.H.E Dona Francisca.

A agropecuária foi a classe que mais influenciou, tanto para a redução quanto para a expansão florestal, nos dois períodos avaliados (1992 a 2003 e 2003 a 2013). A classe que mais influenciou o aumento da agropecuária, nos dois períodos, foi a classe solo exposto. Enquanto que, as classes que mais contribuíram para a redução da agropecuária foi o solo exposto, no primeiro período, e floresta, no segundo período.

A análise e quantificação da evolução florestal e agropecuária, permitiram concluir que as taxas de manutenção florestal e agropecuária foram maiores após a

instalação da U.H.E Dona Francisca. Da mesma forma que, as reduções florestais e agropecuárias foram inferiores após a instalação da U.H.E.

Grande parte das variáveis estáticas e dinâmicas empregadas no processo de modelagem dinâmica espacial da área de estudo, desempenharam satisfatoriamente a função de variável explicativa para as mudanças de uso e cobertura da terra, mediante os resultados obtidos. Contudo, sugere-se que para um próximo estudo seja realizada uma análise prévia das variáveis a serem utilizadas. Esta análise evitará a confecção de mapas com alta correlação, dispensáveis no processo de modelagem. Da mesma forma, outras variáveis, não contempladas, podem ser avaliadas.

A construção e execução do modelo dinâmico de uso e cobertura da terra para o período de 2003 a 2013, permitiu obtenção de mapa simulado para o ano 2013, com similaridade *fuzzy* entre 0,55 a 0,88, sendo estes satisfatórios quando comparados aos encontrados na literatura revisada. Sendo assim, a partir desse modelo, foi possível efetuar simulações de cenários futuros anuais até o ano 2023.

Os cenários simulados obedeceram a tendência observada no período considerado para a modelagem (2003-2013). Logo, se mantidas as condições, as classes floresta e agropecuária serão continuamente expandidas até o ano 2023. As classes solo exposto e água, diferentemente, apresentarão gradativa redução, sobretudo em menores proporções.

Deve-se ressaltar sobre isso, que o modelo estocástico aplicado não prevê mudanças nas tendências, sendo o acerto diretamente relacionado a continuidade da tendência considerada no processo de modelagem. Não há controle acerca das alterações ocorridas nas áreas circundantes da área de influência da U.H.E Dona Francisca e que podem impactar nas alterações. Da mesma forma que, não há controle sobre as variáveis estáticas desconsideradas e que podem passar a explicar os processos de transições.

Contudo, as simulações de cenários futuros, como produto da modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra, ainda são e continuarão sendo, principalmente devido ao crescente desenvolvimento de ferramentas especializadas para a modelagem, importantes recursos para o estabelecimento de políticas públicas, fornecendo subsídio para as tomadas de decisões e avaliações de impactos ambientais. Destaca-se, porém, que mesmo muito usados e mencionados, os modelos devem ser utilizados considerando suas limitações. A medida que as

aplicações da modelagem ampliam, as dificuldades são superadas tornando os modelos cada vez mais importantes e precisos.

Sendo assim, espera-se que este trabalho venha contribuir aos estudos de modelagem dinâmica espacial, colaborando para o desenvolvimento de políticas públicas e pesquisas voltadas ao uso e cobertura da terra. Principalmente quanto a expansão florestal e agropecuária na área de influência da U.H.E Dona Francisca, e que possa servir de subsídio para elaboração de cenários e identificação de mudanças no uso e cobertura da terra em outras áreas de influências de usinas hidrelétricas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. M. et al. Modelos Celulares de Dinâmica Espaço-temporais: aplicações em estudos Urbanísticos. In: MEIRELLES, M. S.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. de (Ed.) **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007. Cap. 9, p. 447-496.

ALMEIDA, C. M. et al. Modelos celulares de dinâmicas espaço-temporais urbanas. In: CÂMARA, G; MONTEIRO, A.M.V. (Org.). **Introdução à modelagem dinâmica espacial**. São José dos Campos: INPE. 2003b. cap. 3, 35 p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>>. Acesso em: 4 nov. 2014.

ALMEIDA, C. M. et al. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Environment and Urban Systems**, v. 27, n. 5 p. 481-509, Sept. 2003a. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019897150200042X>>. Acesso em: 03 fev. 2015. DOI: 10.1016/S0198-9715(02)00042-X.

ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma Ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil**. 2003. 323 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

ALVES, L. et al. **Dona Francisca Hydropower Plant BR-0315: Environmental and Social Impact Report**. Inter-American Development Bank, 2000. 53 p. Disponível em: <<http://www.iadb.org/Document.cfm?id=410068>>. Acesso em: 10 set. 2015.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2014, ANO BASE 2013. Rio de Janeiro: EPE, 212 p. 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 07 jan. 2016.

ARAÚJO FILHO, M. da C.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Sistema de Classificação de uso e cobertura da terra com base na análise e imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 59/2, p. 171-179, ago. 2007.

BACA, J. F. M.; NETTO, A. L. C.; MENEZES, P. M. L. de. Modelagem da Dinâmica de Paisagem com Processos de Markov. In: MEIRELLES, M. S.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. de (Ed.) **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007. cap. 10, p. 497-528.

BACKES, A. Áreas protegidas no estado do Rio Grande do Sul: O esforço para a conservação. **Pesquisas Botânica**. São Leopoldo, n. 63, p. 225-355, 2012. Disponível em: <<http://www.anchietano.unisinos.br/publicacoes/botanica/botanica63/botanica63.html>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

BATTY, M.; COUCLELIS, H.; EICHEN, M. Urban systems as cellular automata. (Editorial). **Environment and Planning B: Planning and Design**, London, v. 24, n.

2, p. 159-164, 1997. Disponível em: <<http://epb.sagepub.com/content/24/2/159.full.pdf+html>>. Acesso em: 20 set. 2015.

BENEDETTI, A. C. P. **Modelagem Dinâmica para Simulação de Mudanças na Cobertura Florestal das Serras do Sudeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul**. 2010. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

BLESSMANN, P. S.; BIEDACHA, S. Usina Hidrelétrica Dona Francisca - Programa de Reassentamento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 24., 2001, Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 2001.

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

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília. 2012. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 30 jan. 2016.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. 1. ed. Virginia: Regional Research Institute, West Virginia University, 2000. Disponível em: <<http://www.rri.wvu.edu/webbook/briassoulis/contents.htm>>. Acesso em: 10 out. 2015.

BRITES, R. S.; BIAS, E. S.; ROSA, A. N. C. S. Classificação por Regiões. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, 2012. 266 p. cap. 13.

BRITES, R. S.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. A. Comparação de Desempenho entre Três Índices de Exatidão Aplicados a Classificações de Imagens Orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. **Anais...**Salvador: INPE, 1996, p. 813-821.

BURROUGH, P. Dynamic Modelling and Geocomputation. In: LONGLEY, P. A.; BROOKS, S. M.; MCDONNELL, R.; MACMILLAN, W. (Ed). **Geocomputation: a Primer**. Chichester: Wiley, 1998. p.165-191.

CABRAL, P; ZAMYATIN, A. Markov processes in modeling land use and cover changes in Sintra-Cascais, Portugal. **Dyna rev.fac.nac.minas**. v. 72, n. 158, p. 191-198, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000200018>. Acesso em: 24 nov. 2015.

CÂMARA, G. et al. Spring: Integrating Remote Sensing and Gis by Object-oriented Data Modelling. **Computers & Graphics**. v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. **Introdução a Ciência da Geoinformação**. 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 17 set. 2015.

CAPELETTO, G. J.; MOURA, G. H. Z. **Balanco Energético do Rio Grande do Sul 2014: ano base 2013**. Porto Alegre: Secretaria de Infraestrutura e Logística do Rio Grande do Sul, 2014. 192 p. Disponível em: <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/archives/BERS2013/Balanco_Energetico_RS_2014_base_2013.pdf>. Acesso: 09 jan. 2016.

CEEE/ Dona Francisca Energética S. A. (DFESA)/ Governo do Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. Usina Hidrelétrica Dona Francisca – 125 MW. 2001.

CEMIN, G. **Avaliação da Fragmentação Florestal no município de Caxias do Sul-RS: Implicações e Proposições de Cenários Futuros**. 2014. 123 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236 p.

COAJU - Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí. **Plano de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí**. Passo Fundo, Fev/Mar. 2009.

CORAZZA, R. **Relações entre variáveis espectrais e limnológicas no reservatório da usina Hidrelétrica Dona Francisca-RS**. 2010. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

COUCLELIS, H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. **Environment and Planning B Planning and Design**. v. 24, p. 165 -174. 1997. DOI: 10.1068/b240165.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. Banco de Dados GEOBANK. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

DIAS, L. T.; WALDE, D. H. G. Modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 65/1, p. 77-94, 2013.

DIGITALGLOBE. WorldView-3 represents a revolution in remote sensing. 2014. Disponível em: <<http://worldview3.digitalglobe.com/>>. Acesso em: 08 fev. 2014.

DRUCK, S. et al. (Ed). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planaltina, DF: EMBRAPA, 2004. 209 p.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C.; LONGHI, S. J. Composição e estrutura da mata secundária no vale do rio Jacuí, RS. **Ciência & Natura**, v. 4, p. 129–139, 1982.

EASTMAN, R. **Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing**, manual version 16.02, Clark University, 2009. 342 p.

ELACHI, C. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. New York: Wiley, 1987.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

EMBRAPA. Embrapa Monitoramento por Satélite: Missões. 2013. Disponível em: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao_landsat.php>. Acesso em: 13 nov. 2015.

FARENZENA, D.; PEREIRA FILHO, W. Organização do espaço e conflitos ambientais no entorno do reservatório da usina hidrelétrica Dona Francisca, RS. **Disc. Scientia**. Série: Ciências Humanas, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 123-146, 2006.

FERRARI, R. **Modelagem Dinâmica do Uso e Cobertura da Terra da Quarta Colônia, RS**. 2008. 131 p. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Texto, 2002. 97 p.

FLORENZANO, T. G. **Os satélites e suas aplicações**. São José dos Campos –SP: SindCT, 2008. 52 p.

FRIEDRICH, J. N. **Mapeamento do uso da terra por compartimento geomorfológico da sub-bacia da barragem Dona Francisca – RS com imagens multiespectrais TM do LANDSAT-5**. 1993. 63 p. Monografia (Especialização em interpretação de imagens orbitais e suborbitais). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1993.

FROËHLICH, J. M. et al. Capital social e a dinâmica do desenvolvimento – a colonização alemã na região central do Rio Grande do Sul. IN: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 45., 2007, Londrina. **Anais...** Londrina: SOBER, 2007. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/6/494.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

FURLAN, M. C. **Modelagem dinâmica de uso e cobertura da microbacia do Arroio Grande – RS**. 2012. 126 p. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

GAO, J. **Digital analysis of remotely sensed imagery**. New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2009. 439 p.

GODOY, M. M. G. **Modelagem da Dinâmica de ocupação do solo no Bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil**. 2004. 99 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

GOOGLE - Inc. Google Earth. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 31 jan. 2016.

GÜTING, R. H. An Introduction to Spatial Database Systems. **VLDB Journal**, Pacific Grove, v. 3, n. 4. 1994. Disponível em: <<http://dna.fernuni-hagen.de/papers/IntroSpatialDBMS.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2015.

HAGEN, A. *Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps*. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17. n.3, p.235-249, 2003.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010.

HENDGES, E. R. **Modelos estocásticos da dinâmica da paisagem florestal e simulação de cenários para o estado do Rio Grande do Sul no período de 1988 a 2020**. 209 p. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 1991. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censodem/default_censo1991.shtm>. Acesso em: 10 set. 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/default_censo_2000.shtm>. Acesso em: 10 set. 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 14 nov. 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contagem da População 1996. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem/default.shtm>>. Acesso em: 10 set. 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contagem da População 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/defaulttab.shtm>>. Acesso em: 10 set. 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Downloads: Geociência – Malhas digitais, municípios 2013. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 20 jun. 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2011a.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Pecuária Municipal 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2011b.

IBGE– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de vegetação do Brasil. 2004. 3. Ed. Escala: 1: 5.000.000. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Cartas_e_Mapas/Mapas_Murais/vegetacao_pdf.zip>. Acesso em: 4 ago. 2015.

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. In: Divisão de Processamento de Imagem - Modelagem Ambiental. São José dos Campos: INPE, 2011. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/menu/Atuacao/mod_ambiental.php>. Acesso em: 27 jul. 2015.

INPE. Divisão de Geração de Imagens. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/index.php>>. Acesso em: 3 nov. 2015.

INSTITUTO OBSERVATÓRIO SOCIAL. Perfil de Empresa Gerdau. Florianópolis, Abril, 2004. Disponível em: http://www.observatoriosocial.org.br/sites/default/files/03-01-2004_04-gerdau.pdf. Acesso em: 04 Jan. 2016.

JENSEN, J. R. **Intruductory Digital Image Processing**. 2 ed. Upper Saddle: River Prentice Hall, 1996. 316 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª Ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 672 p.

KRAMER, G. **Avaliação espaço-temporal das relações entre ecossistemas terrestre e aquático: Estudo de caso da bacia da UHE Passo Real da região sul do Brasil**. 2009. 90 p. Dissertação (Mestre em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

LAMBIN, E. F. et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environmental Change**. v. 11. p. 261-269. 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378001000073>>. Acesso em: 30 nov. 2015. DOI: 10.1016/S0959-3780(01)00007-3.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LEÃO, L. A.; FERRET, L. A.; GUARAGNA, M. L. Experiência com Implantação de Programas Sócio-Ambientais na Usina Hidrelétrica Dona Francisca. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 16., 2001, Campinas/SP. **Anais...CIGRÉ-Brasil**, Campinas/SP, 2001.

LIMA, E. C. **Modelagem da Dinâmica de Paisagem: Simulações de Cenários na Região do Baixo Curso do Rio dos Sinos –RS**. 2014. 127 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

LIMA, T. C. et al. DINAMICA EGO e Land Change Modeler para simulação de desmatamento na Amazonia brasileira: análise comparativa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013. Foz do Iguaçu. 2013. **Anais...** Foz do Iguaçu/PR: INPE, 2013.

LIPPERT, D. B. **Modelagem Dinâmica do Cenário Florestal em Unidades de Paisagem do Bioma Pampa**. 2014. 113 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

LONGHI, S. J.; DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. A vegetação da mata ribeirinha no curso médio do rio Jacuí, RS. **Ciência e Natura**, v. 4, p. 151-161, 1982.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. Tradução de André Schneider et al. Revisão de Heinrich Hasenack e Eliseu José Weber. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Blucher, 2015. 292 p.

MA, Z., REDMOND, R.L. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 61, n. 4, p. 453 - 439. 1995.

MACEDO, R.C. et al. Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira. **Bol. Ciênc. Geod.** v.19, n. 2 , p. 313-337. 2013. DOI: 10.1590/S1982-21702013000200009.

MAGNOLI, D.; OLIVEIRA, G.; MENEGOTTO, R. **Cenário gaúcho**: representações históricas e geográficas. São Paulo: Moderna, 2001. 127 p.

MARCHIORI, J. N. C.; LONGHI, S. J.; DURLO, M. A. A vegetação de capoeira na região do curso médio do rio Jacuí, RS. **Ciência & Natura**, v. 4, p. 141-150, 1982.

MARCHISIO, G. An Overview of the WorldView-3 Sensor. In: Geospatial World Forum. Geneve. 2014. 26 p. Disponível em: <http://www.geospatialworldforum.org/2014/presentation/Sensors/WGF%202014b%20-%20Giovanni%20Marchisio%20-%20DigitalGlobe_PDF.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2014.

MARIA, A. Introduction to Modeling and Simulation. In: Proceedings of the 29th conference on winter simulation. 29., 1997, Washington, DC. USA: **IEEE Computer Society**, 1997, p. 7–13. Disponível em: <http://imap.acqnotes.com/Attachments/White%20Paper%20Introduction%20to%20Modeling%20and%20Simulation%20by%20Anu%20Maria.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2015.

MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 30 - 40, fev. 2012. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712000338>>. Acesso em: 27 set. 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.026.

MAS, J. F. et al. Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15., 2011, Curitiba. **Anais...**Curitiba: INPE, 2011, p.5801.

MAYER, C. L. D.; OLIVEIRA FILHO, P. C.; BOBROWSKI, R. Análise espacial de conflitos da arborização de vias públicas: caso Irati, Paraná. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 45, n. 1, p. 11 - 20, jan./mar. 2015. DOI: 10.5380/ufv.v45i1.34309.

MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007a. 593 p.

MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R. CAMARA, G. Técnicas de Inferência Espacial. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007b. cap. 3, p.105-189.

MENESES, P. R. Princípios de Sensoriamento Remoto. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, 2012. 266 p. cap. 1.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Distorções e Correções dos Dados da Imagem. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, 2012. 266 p. cap. 6.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação Pixel a Pixel de Imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, 2012. 266 p. cap. 12.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ª ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia, 1961. 46 p.

NELSON, B. L. **Stochastic modeling: analysis & simulation**. New York: McGraw-Hill, 1995. 321 p.

NERI, D. B. **Efeitos da Implantação da Usina Hidrelétrica Dona Francisca (RS, Brasil) sobre estágios imaturos de Odonata (Insecta)**. 2009. 85 p. Dissertação (Mestrado em biodiversidade animal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.

NERI, D. B.; KOTZIAN, C. B.; SIEGLOCH, A. E. Composição de Heteroptera aquáticos e semi-aquáticos na área de abrangência da U.H.E. Dona Francisca, RS, Brasil: fase de pré-enchimento. **Iheringia, Sér. Zool.**, Porto Alegre, v. 95, n. 4, dez. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0073->

47212005000400013&script=sci_abstract&tlng=es>. Acesso em: 24 set. 2015. DOI: 10.1590/S0073-47212005000400013.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387 p.

OBSERVATÓRIO SÓCIO-AMBIENTAL DE BARRAGENS - ETERN/IPPUR/UFRJ. In: LISTA de Barragens. Rio de Janeiro: UFRJ. Disponível em: <<http://www.observabarragem.ippur.ufrj.br/barragens/9/dona-francisca>>. Acesso em: 23 mai. 2014.

PEDROSA, B. M.; CAMARA, G. Modelagem Dinâmica e Sistemas de Informações Geográficas. In: MEIRELLES, M. S.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. de (Ed.) **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007. cap. 5, p. 235-280.

PEDROSA, B. M.; CAMARA, G. Modelagem Dinâmica: Conceitos Básicos e Exemplos de Sistemas. In: CÂMARA, G; MONTEIRO, A.M.V. (Org.). **Introdução à modelagem dinâmica espacial**. São José dos Campos: INPE. 2003. cap. 1, 41 p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>>. Acesso em: 4 nov. 2014.

PEREIRA FILHO, W. et al. Influência de reservatórios em cascata nos dados de reflectância e de limnologia - Reservatórios de Passo Real e Dona Francisca, rio Jacuí – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...**Natal: INPE, 2009.

PEREIRA, P. R. B.; GARCIA NETTO, L. R.; BORIN, C. J. A. Contribuição à geografia física do município de Santa Maria: unidades de paisagem. **Geografia – Ensino e Pesquisa**, v. 3, p. 37-68, 1989.

PRADO, D. de A. et al. Caracterização física da área de captação do reservatório Dona Francisca – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu/PR. **Anais...** Foz do Iguaçu/PR: INPE, 2013. p. 4169-4176. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0976.pdf>>. Acesso em: 3 mar 2014.

PRATES, C. D. **Impactos socioambientais da Usina Hidrelétrica Dona Francisca**. 2011. 170 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

PRATES, C.; LIMA, J. V. R. B. da C. Por uma Sociologia dos Impactos Sociais de Grandes Empreendimentos. O caso da Usina Hidrelétrica de Dona Francisca, Rio Grande do Sul. **Latitude**, Maceió, v. 5, n. 2, p. 09-29, 2011. Disponível em: <http://www.seer.ufal.br/index.php/latitude/article/view/1008>. Acesso em: 24 out. 2015.

PRATES, S. H.; LUCA, S. J. de. Contribuição à gestão ambiental da UHE Dona Francisca através de modelo de simulação de qualidade de água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2000. Porto

Alegre. **Anais...** Porto Alegre/RS: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), 2000.

QUEIROZ, G. R.; FERREIRA, K. R. **Tutorial sobre Bancos de Dados Geográficos GeoBrasil 2006**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/TutorialBdGeo_GeoBrasil2006.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

RAMBO, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: Selbach, 1956.

RAMIREZ, M. R.; SOUZA, J. M de. Sistema Gerenciador de Banco de Dados em Sistemas de Informações Geográficas. In: MEIRELLES, M. S.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. de (Ed.) **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007. cap. 2, p. 57-103.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento**: Tecnologia Transdisciplinar. Juiz de Fora: Ed. do Autor, 2000. 220 p.

RODRIGUES, L. M. Alterações espaciais e temporais de características limnológicas resultantes da transformação rio-reservatório da Usina Hidrelétrica Dona Francisca, RS, Brasil. 2002. 100 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

RODRIGUES, L. M.; SCHWARZBOLD, A.; OLIVEIRA, M. A. Spatial and temporal variation of Dona Francisca reservoir (Jacuí river, Rio Grande do Sul State), a subtropical reservoir. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 34, n. 3, 2012. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciBiolSci/article/view/10078>>. Acesso em 30 out, 2015. DOI: 10.4025/actascibiolsci.v34i3.10078.

RODRIGUES, M. Geoprocessamento: um retrato atual. **Revista Fator GIS**, Curitiba, PR, n. 2, p. 20-23, 1993.

ROY, D. P. et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154 - 172, fev. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571400042X>>. Acesso em: 28 set. 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001.

RUDEL, T. K.; SCHNEIDER, L.; URIARTE, M. Forest transitions: An introduction. **Land Use Policy**. v. 27. p. 95-97. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026483770900146X>>. Acesso em 28 set. 2015. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.09.021.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impacto Ambiental**: conceitos e métodos. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006, 495 p.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. Notícias: RS cria o Parque Estadual da Quarta Colônia. 2005. Disponível em: <

http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=4&cod_conteudo=3864>.
Acesso em: 12 out. 2015.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. Bacias Hidrográficas do RS: Bacias Hidrográficas do rio Alto Jacuí e Baixo Jacuí. 2010a. Disponível: < http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=54>. Acesso em: 20 jun. 2014.

SEMA - Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. Downloads: Limite das Bacias Hidrográficas do RS para uso em SIG. 2010b. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=21&cod_conteudo=6466>. Acesso em: 20 jun. 2014.

SEPLAN – Secretaria do Planejamento, Mobilidade e Desenvolvimento Regional. Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul: Meio Ambiente. 2013. Disponível em: < http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu_filho=802&cod_menu=800&tipo_menu=MEIO&cod_conteudo=1372>. Acesso em 08 jan. 2016.

SILVA, A. de B. **Sistemas de Informações Geo-Referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora Unicamp, 2003. 236 p.

SILVA, E. A. **Modelagem dinâmica para simulação no processo de arenização e cobertura florestal na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul**. 2015. 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

SILVA, J. X. Geoprocessamento em Estudos Ambientais. In: MEIRELLES, M. S.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. de (Ed.) **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007. Cap. 1, p. 23-53.

SILVEIRA, G. V.; PEREIRA FILHO, W. Comparação do uso da terra no entorno dos reservatórios das UHs Passo Real e Dona Francisca – RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 26., 2014, Gramado. **Anais...** Gramado: SBC, 2014.

SOARES FILHO, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998. Disponível em: <<http://csr.ufmg.br/csr/publicacoes/tese/tese.html>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

SOARES FILHO, B. S.; PENNACHIN, C. L.; CERQUEIRA, G. C. DINAMICA: a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/cursos/modelling/dinamica.pdf>. Acesso em 22 ago. 2015. DOI: S0304-3800(02)00059-5.

SOARES FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinâmica EGO**. Tradução de Letícia Santos de Lima. Belo Horizonte: UFMG, 2009. 1ª ed., v.1, 115p.

SOARES, N. B.; FROELICH, J. M.; MARQUES, M. M. S. A identidade água abaixo: os reassentados da Usina Hidrelétrica Dona Francisca (UHDF) - RS. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL - SOBER, 45., 2007, Londrina/PR. **Anais...** Londrina/PR: SOBER, 2007.

STRASSBURGUER, L., PEREIRA FILHO, W. Limnologia do reservatório da Usina Hidrelétrica Dona Francisca – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2003.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

TUNDISI, J. G. Novas Perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, São Paulo, n. 70, p. 24-35, 2006. Disponível em: <<http://www.usp.br/revistausp/70/03-josegalizia.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2016.

USGS. **Landsat 8**. 2013. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2013/3060/pdf/fs2013-3060.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

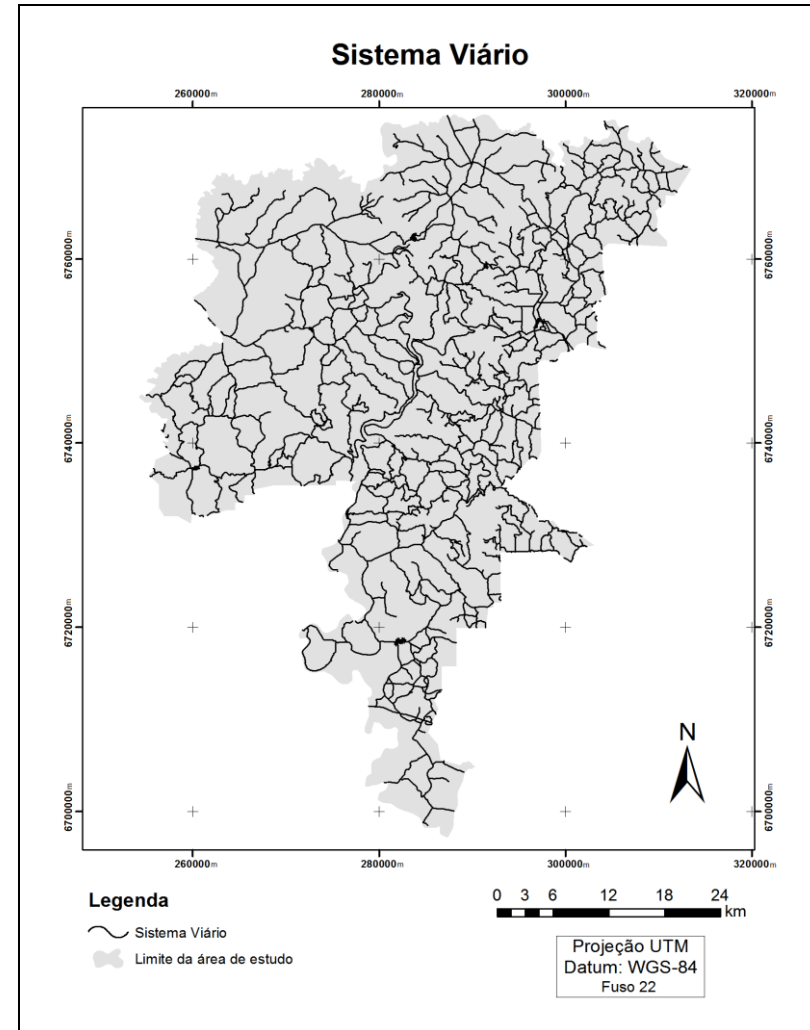
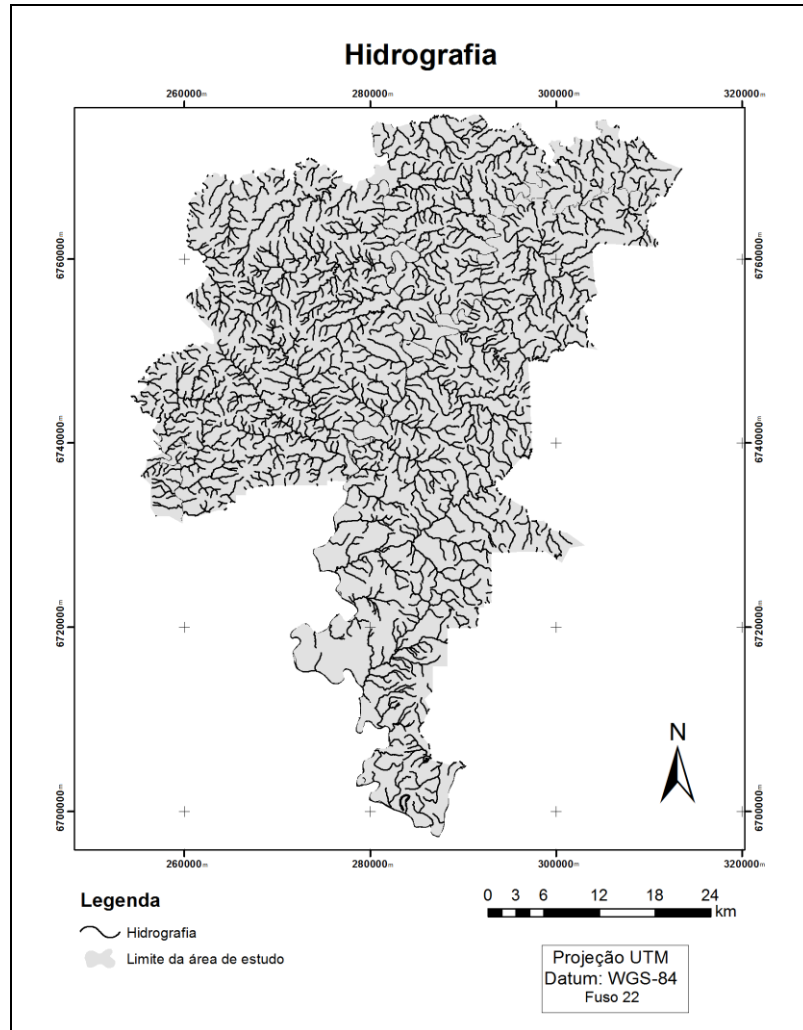
VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia/GO: INPE, 2005, p. 1-8.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2008. 72 p.

VELDKAMP, A.; LAMBIN, E. F. Predicting land-use change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85. p. 1-6, 2001. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880901001992>. Acesso em: 14 jun. 2015. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00199-2.

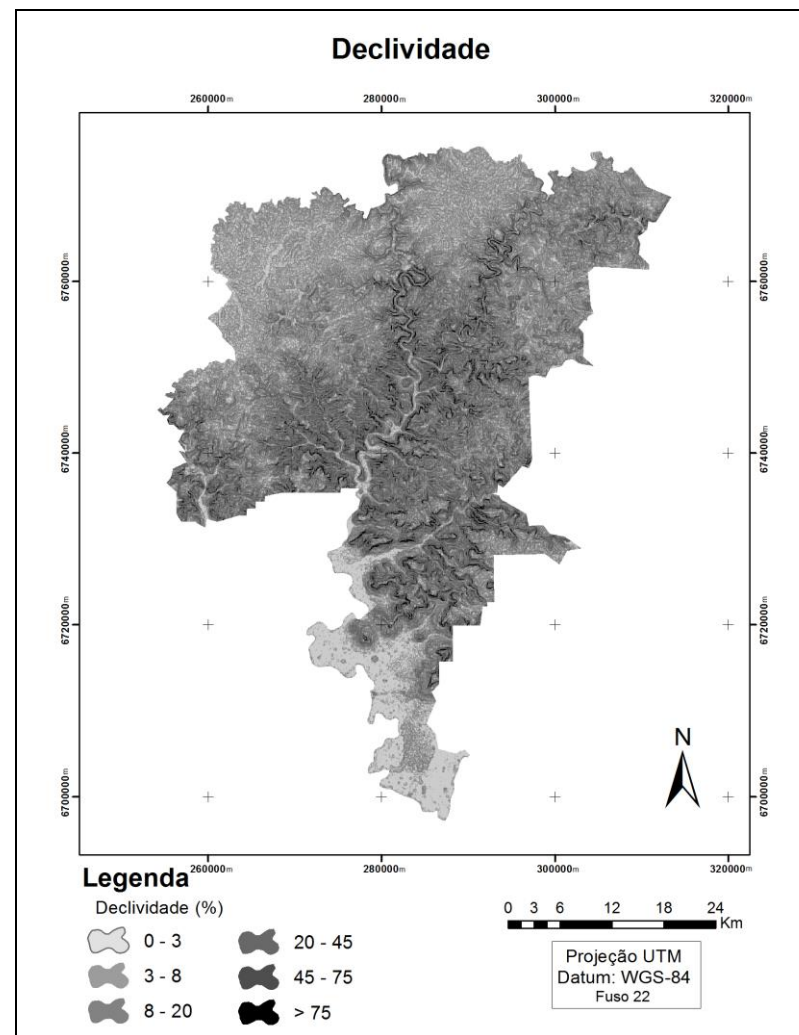
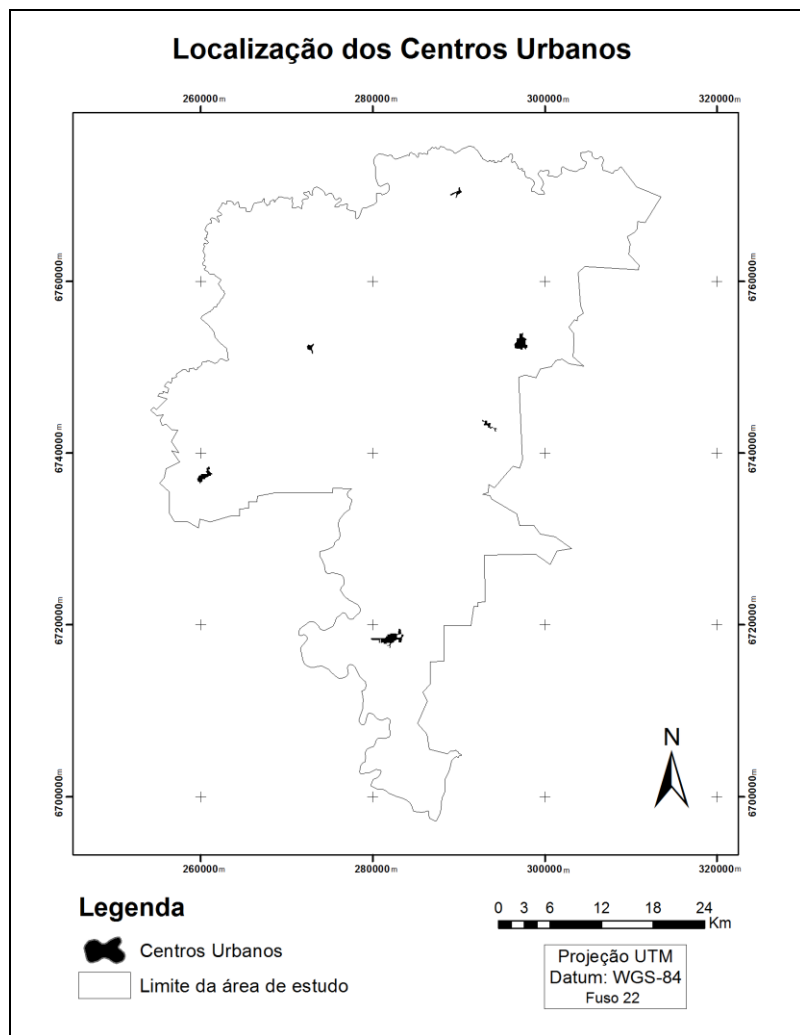
VERBURG, P. H.; OVERMARS, K. P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. **Landscape Ecology**, v. 24, n.9, p. 1167-1181, 2009. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10980-009-9355-7>. Acesso 22 jun. 2015. DOI: 10.1007/s10980-009-9355-7.

YI, W.; GAO, Z.; CHEN, M. Dynamic modelling of future land-use change: a comparison between CLUE-S and Dinamica EGO models. **SPIE**. v. 8513, 2012. DOI: 10.1117/12.927781.

APÊNDICE A – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE HIDROGRAFIA E SISTEMA VIÁRIO

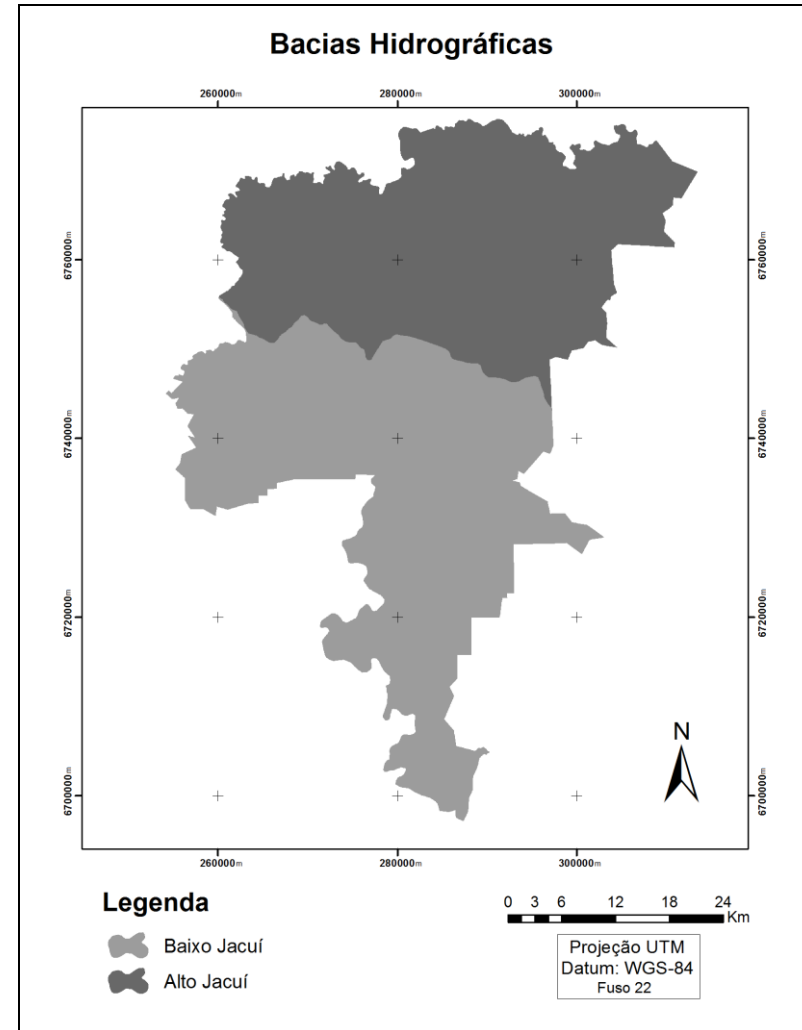
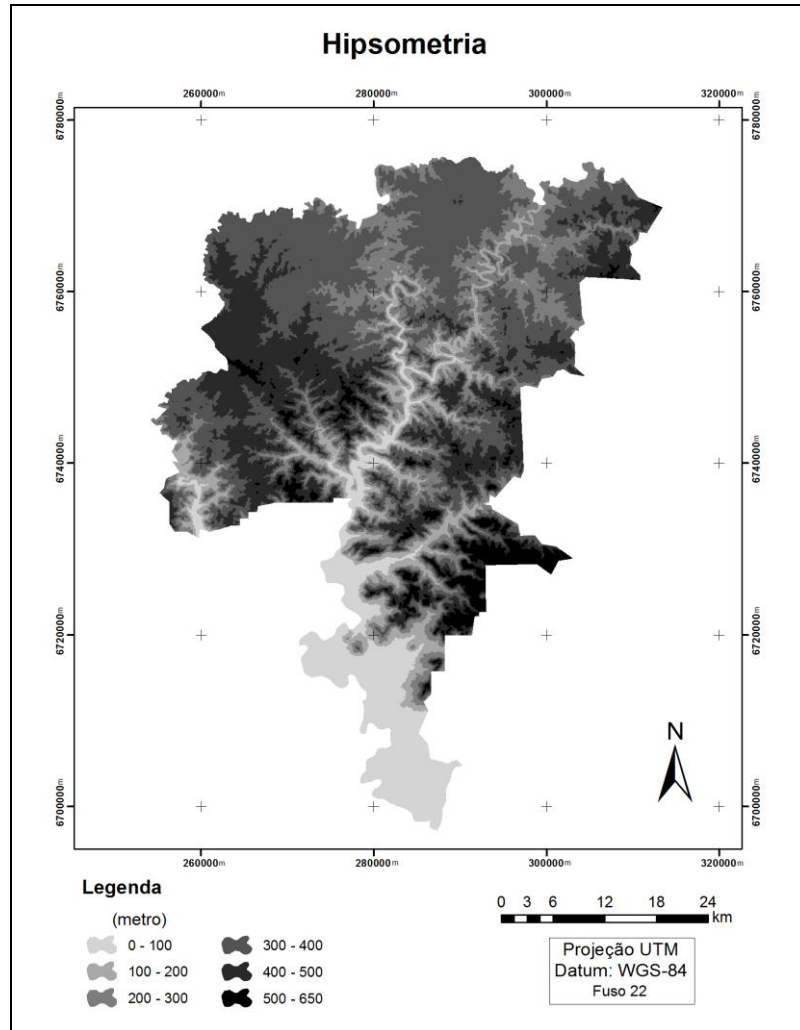
Fonte: Autora.

APÊNDICE B – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE LOCALIZAÇÃO DOS CENTROS URBANOS E DECLIVIDADE



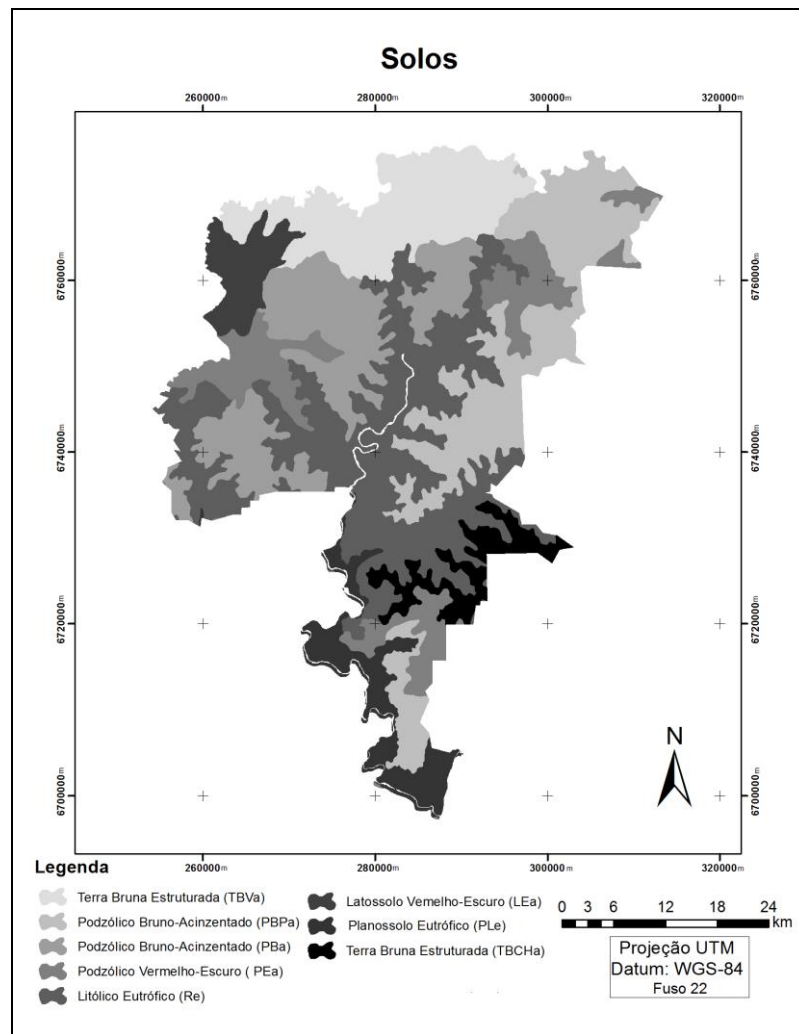
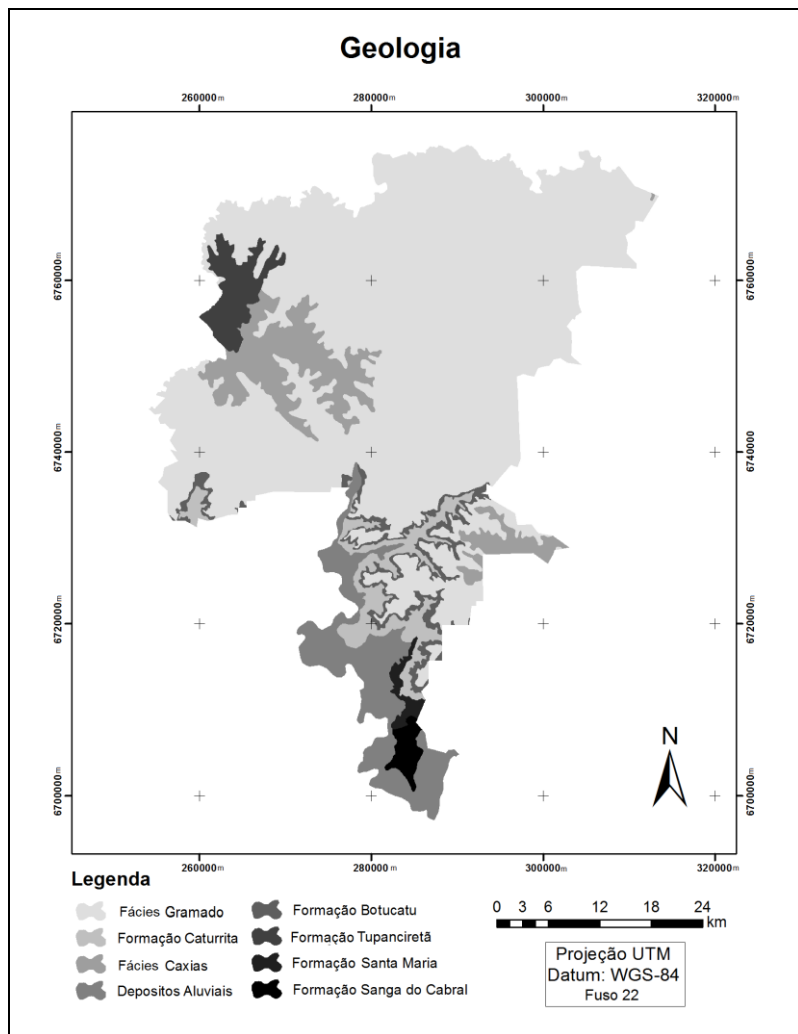
Fonte: Autora.

APÊNDICE C – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE HIPSOMETRIA E BACIAS HIDROGRÁFICAS



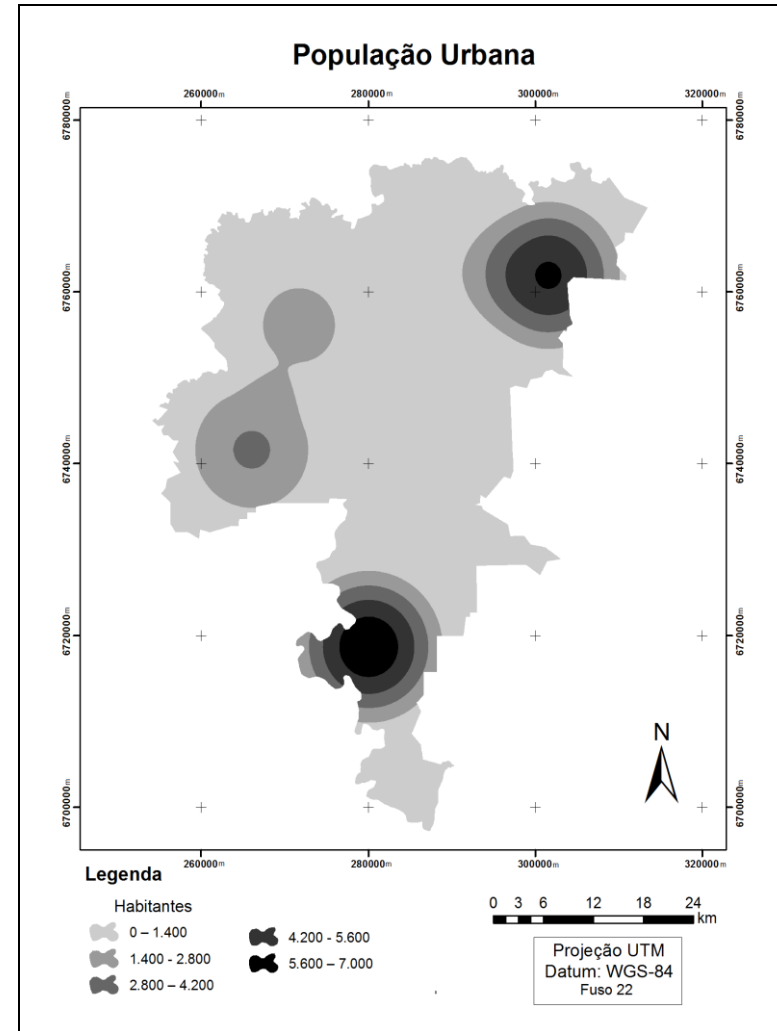
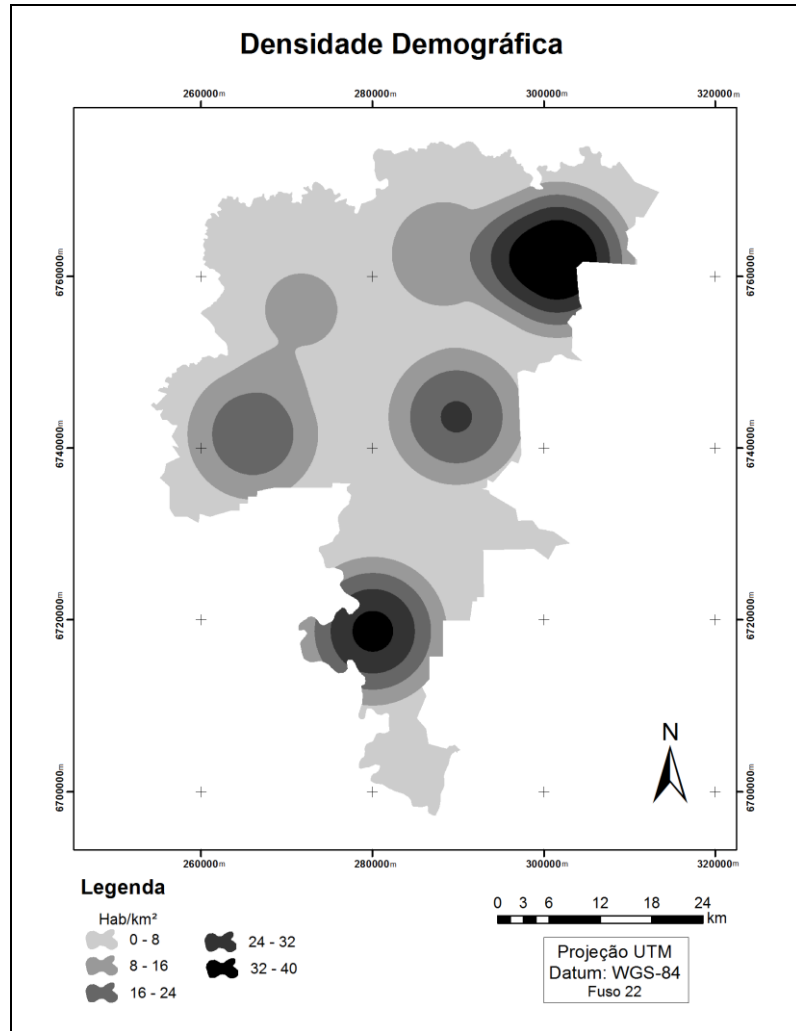
Fonte: Autora.

APÊNDICE D – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE GEOLOGIA E SOLOS



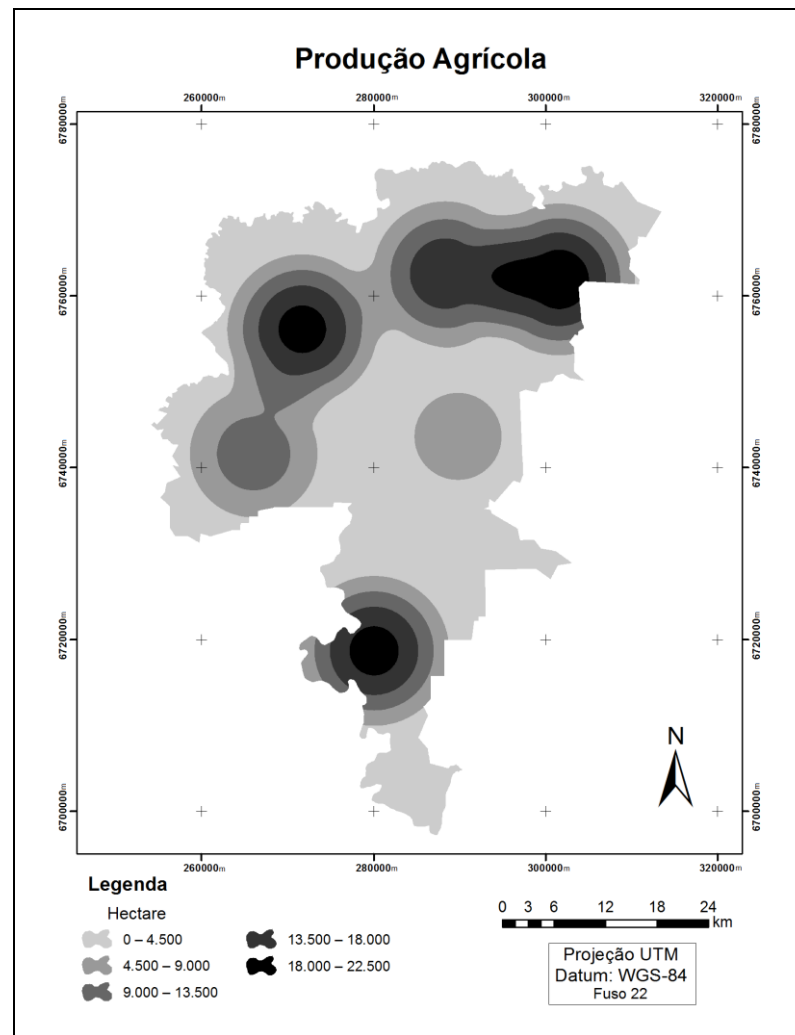
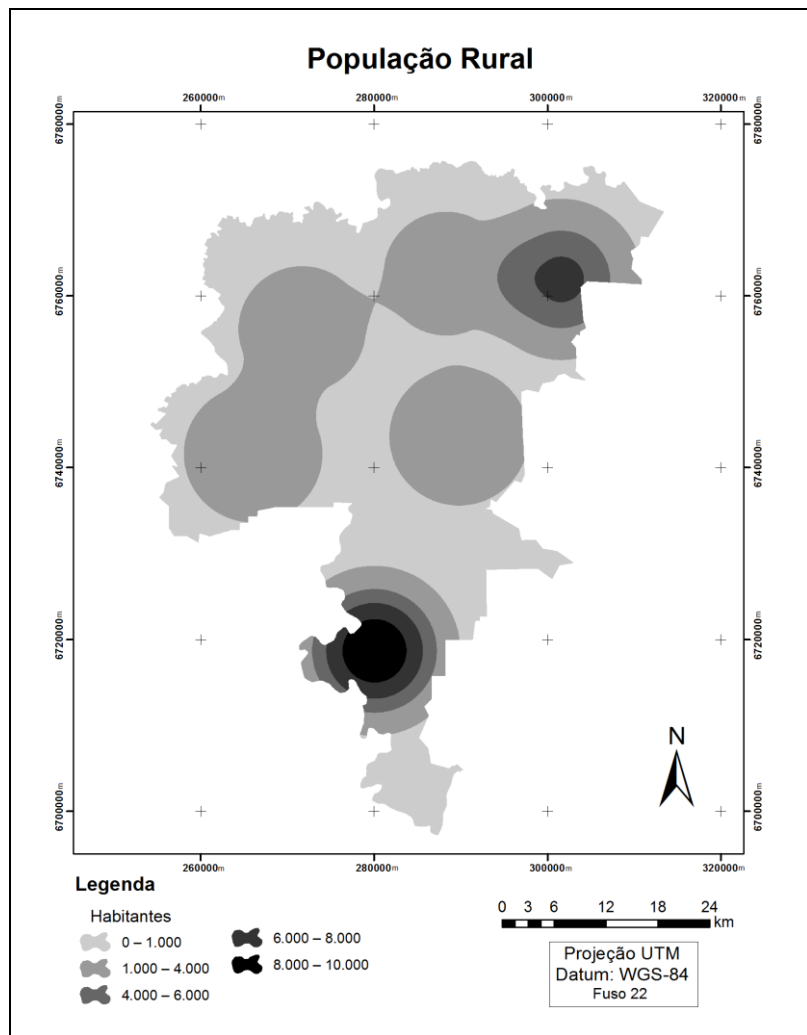
Fonte: Autora.

APÊNDICE E – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE DENSIDADE DEMOGRÁFICA E POPULAÇÃO URBANA



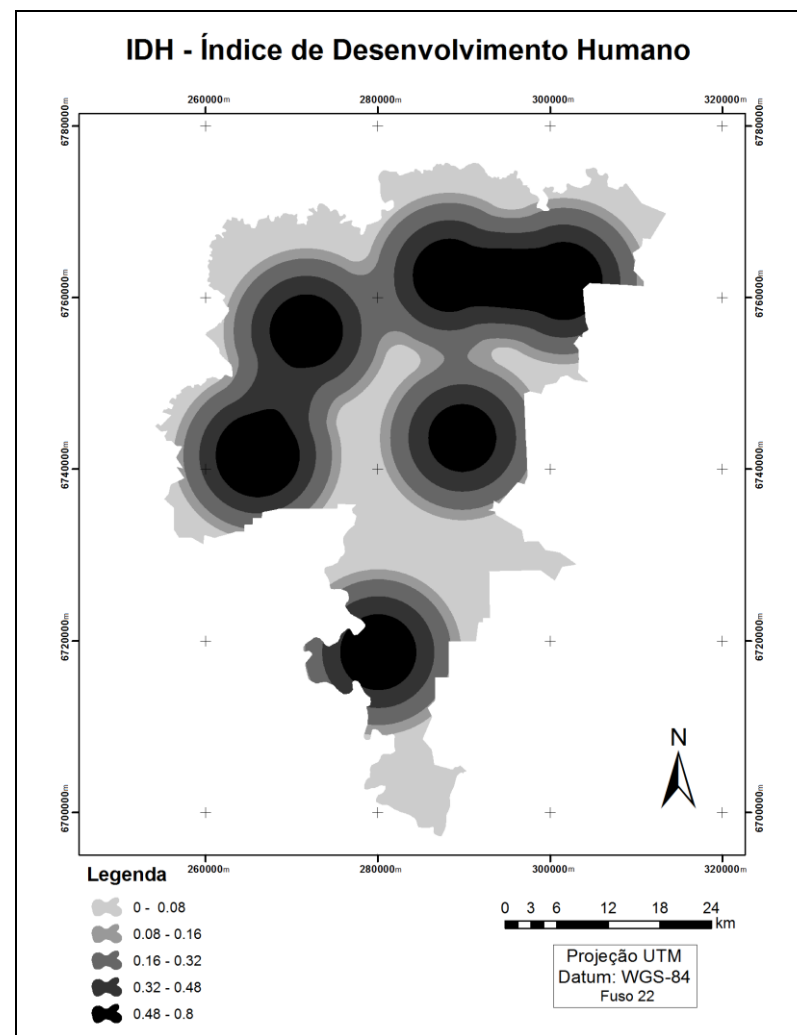
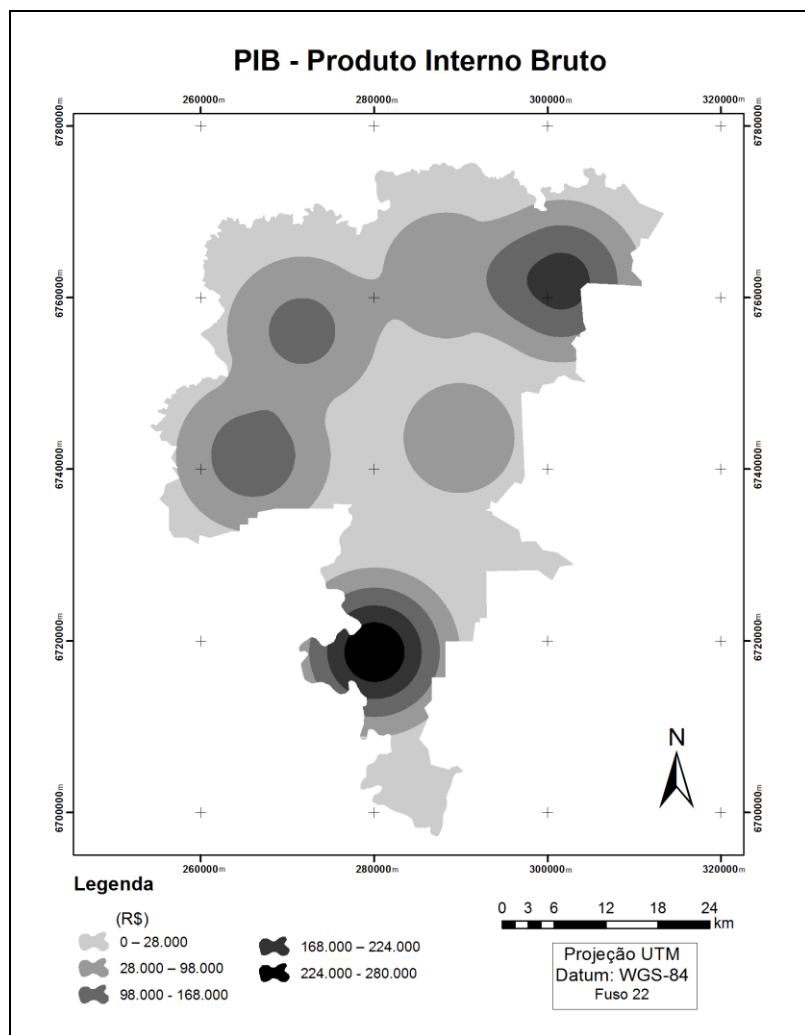
Fonte: Autora

APÊNDICE F – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE POPULAÇÃO RURAL E PRODUÇÃO AGRÍCOLA



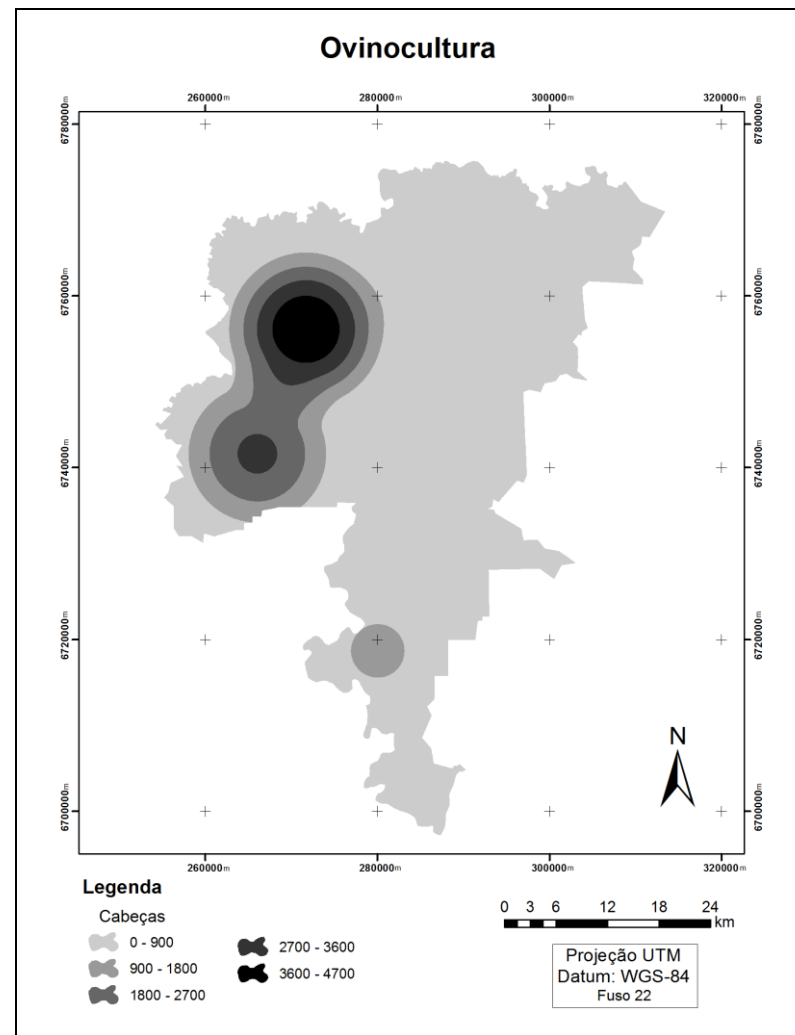
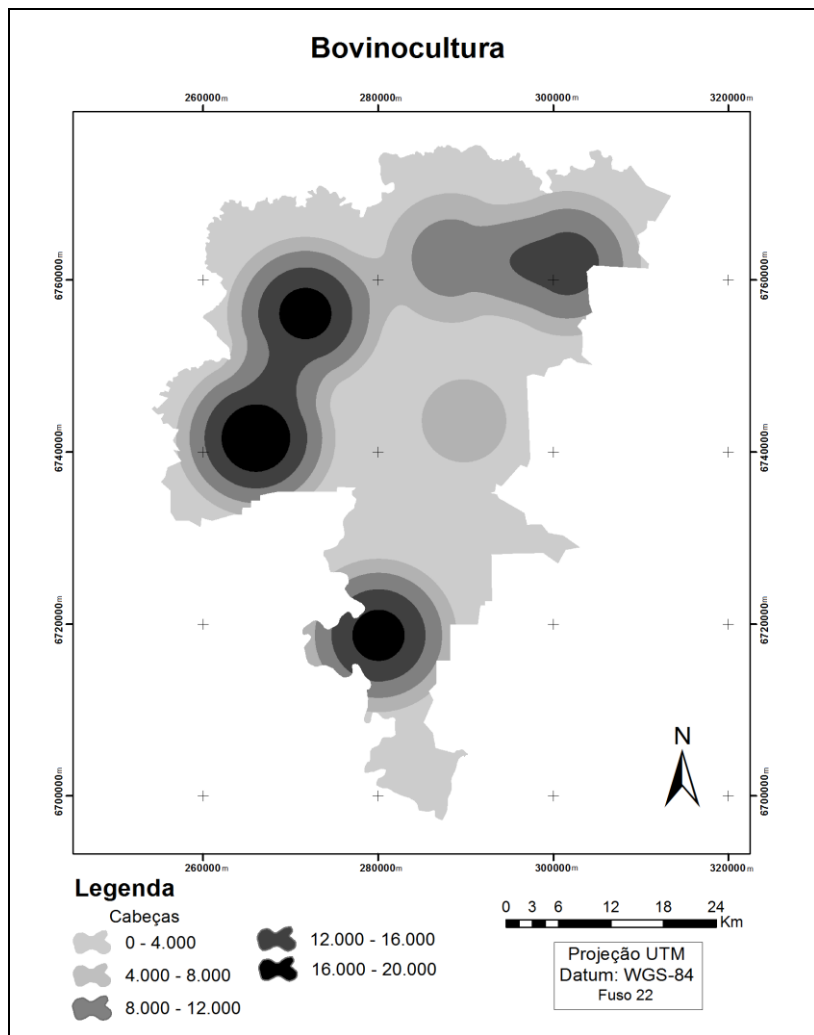
Fonte: Autora.

APÊNDICE G – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE PIB E IDH



Fonte: Autora.

APÊNDICE H – MAPAS TEMÁTICOS ESTÁTICOS DE BOVINOCULTURA E OVINOcultura



Fonte: Autora.