



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.27.14.41 -TDI

**ESTUDO INTEGRADO E MODELAGEM DA
DINÂMICA DA PAISAGEM NO ALTO URUGUAI
(RS-SC)**

Marcos Wellausen Dias de Freitas

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pela Dr. João
Roberto dos Santos, aprovada em
10 de abril de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DQCKSP>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.27.14.41 -TDI

**ESTUDO INTEGRADO E MODELAGEM DA
DINÂMICA DA PAISAGEM NO ALTO URUGUAI
(RS-SC)**

Marcos Wellausen Dias de Freitas

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pela Dr. João
Roberto dos Santos, aprovada em
10 de abril de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DQCKSP>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Freitas, Marcos Wellausen Dias de.
F884e Estudo integrado e modelagem da dinâmica da paisagem no
Alto Uruguai (RS-SC) / Marcos Wellausen Dias de Freitas. – São
José dos Campos : INPE, 2013.
xxvi + 119 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.27.14.41 -TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Naci-
onal de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
Orientador : Dr. João Roberto dos Santos .

1. ecologia da paisagem. 2. modelagem computacional. 3. mu-
danças de uso e cobertura da terra. 4. sensoriamento remoto.
5. Sistemas de Informações Geográficas (SIG). I.Título.

CDU 528.8:332.3

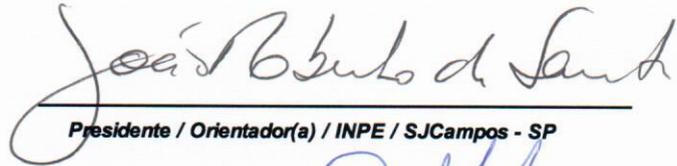


Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons
Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
Unported License.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Sensoriamento Remoto

Dr. João Roberto dos Santos



Presidente / Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Diógenes Salas Alves



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Marcio de Morisson Valeriano



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Sandra Baptista da Cunha



Convidado(a) / UFF / Rio de Janeiro - RJ

Dr. Roberto Verdum



Convidado(a) / UFRGS / Porto Alegre - RS

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Marcos Wellausen Dias de Freitas**

São José dos Campos, 10 de Abril de 2013

“Said the straight man to the late man

Where have you been?

I’ve been here and

I’ve been there and

I’ve been in between”

IAN MACDONALD E PETER SINFIELD (KING CRIMSON)

“I talk to the wind”, 1969

*A meus pais Claro (in memoriam) e Silvia, e ao meu filho
Miguel Angelo*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado com o suporte de bolsas de pesquisa CAPES e CNPq, além do suporte para trabalho de campo da Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF) e da Coordenação de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE. Agradeço em primeiro lugar à minha família (Claro, Silvia e Miguel Ângelo) pelo carinho, paciência e suporte em todos os sentidos. Agradeço ao meu orientador, Dr. João Roberto dos Santos, melhor seria impossível. Também agradeço pelas contribuições ao longo da pesquisa dos Drs. Diógenes Salas Alves, Márcio Morisson Valeriano e Eduardo Gerbi Camargo. Um agradecimento muito especial vai para o Pablo Muñoz, responsável pela programação da maior parte do modelo LanDSCAM desenvolvido neste trabalho e um grande amigo que ganhei durante o doutorado, sem palavras... Agradeço aos amigos e colegas do INPE como o Samuel Coura, Thiago Bertani, Francisco Maldonado, André Lima, Eduardo Arraut, Arian Ojeda González, Marcelo Curtarelli e Maurício do DEGRAD pela amizade e contribuições ao longo da tese. Pelo mesmo motivo, agradeço meus amigos do Sul: Jorge Buckdricker, Carlos Eduardo Moraes, Olavo Ramalho, Ricardo Dagnino, Leandro Paim Pires, Tiago Rodrigues e Marco Antônio Pletsch. Por fim, agradeço à toda equipe do INPE de secretaria, segurança, manutenção e limpeza por seu serviço essencial.

RESUMO

Neste trabalho, busca-se realizar um estudo integrado da paisagem e uma modelagem da dinâmica da paisagem no Alto Uruguai entre os anos de 1986 e 2030 com base nas mudanças de uso e cobertura da terra (MUCT) ocorridas entre 1986 e 2008. Para tal, a abordagem metodológica implementada procurou: a) gerar a partir de ferramentas e dados de SR e SIG uma série de variáveis paisagísticas de uso e cobertura da terra multitemporal (1986, 2002 e 2008), geomorfométricas, de métricas da paisagem e sociais; b) implementar um método de zoneamento hierárquico da paisagem (hólons) com base em técnicas de GEOBIA e na análise multivariada das variáveis paisagísticas; c) desenvolver um modelo dinâmico espacial das MUCT baseado em autômatos celulares que possibilite gerar cenários de prognose da paisagem entre os anos de 2008 e 2030. A estrutura hierárquica da paisagem proposta, baseada nas Unidades de Planejamento da Paisagem (UPP's) e hólons em dois níveis hierárquicos, e a análise das principais correlações paisagísticas pela análise multivariada possibilitaram a definição de uma tipologia das zonas hierárquicas mapeadas. Esta tipologia mostrou uma relação estreita com padrões de uso da terra herdados de modos de ocupação da paisagem com tecnologias tradicionais ou modernas (zonas de pecuária extensiva, de agricultura familiar tradicional, de agricultura intensiva e urbano-industriais). O modelo espacial dinâmico de MUCT desenvolvido neste trabalho possibilitou a operacionalização dos principais procedimentos envolvidos na modelagem da dinâmica de MUCT como: cálculo de taxas de transição e mapeamento de processos da dinâmica da paisagem, geração de mapas de probabilidade de transição baseados na regressão logística e alocação espacial das transições com funções de autômato celular determinística e de formação de manchas aleatórias. A estrutura modular de programação do modelo LanDSCAM e sua característica de código aberto facilitam a alteração do modelo e a implementação de novas rotinas de modelagem aos usuários com conhecimento da linguagem Fortran 90. A utilização no procedimento de calibração nos intervalos 1986-2002 (ajuste total médio $F_t = 0.771$) e 2002-2008 ($F_t = 0.646$) do zoneamento hierárquico da paisagem conferiu uma maior aproximação com os padrões dos processos de MUCT, relacionados com os mosaicos paisagísticos e a interdependência entre as variáveis físicas, ecológicas e sociais. Tais padrões de processos identificados na calibração dos modelos foram explorados nos cenários de prognose da dinâmica da paisagem no intervalo 2008-2030. Tais cenários buscaram representar diferentes modelos de desenvolvimento com um cenário de tendência atual, um cenário econômico de ampliação do modelo de desenvolvimento atual e um cenário ecológico alternativo de desenvolvimento sustentável.

LANDSCAPE INTEGRATED STUDY AND DYNAMICS MODELLING IN THE UPPER URUGUAY RIVER BASIN (RS-SC)

ABSTRACT

In this work, we performed a landscape integrated study and dynamics modelling in the Alto Uruguay region in the 1986-2030 period, based on the land use and cover change (LUCC) occurred between 1986 and 2008. For this, the implemented methodological approach sought to: a) generate a series of landscape variables as multitemporal land use and cover, geomorphometrical, landscape metrics and social data based on remote sensing and GIS tools and data; b) implement a landscape hierarchical zoning based on GEOBIA techniques and multivariate analysis of the landscape variables; c) develop a LUCC spatial dynamics model based on cellular automata enabling the generation of prognosis scenarios between 2008 and 2030. The proposed landscape hierarchic structure, based on Landscape Planning Units (UPP) and holons in two hierarchical levels, and the multivariate analysis allowed the definition of a hierarchical zoning typology. This typology showed a close link to inherited land use patterns from the land occupation modes with traditional or modern technologies (extensive cattle ranching, traditional familiar agriculture, modern-intensive agriculture and urban-industrial zones). The LUCC spatial dynamics model developed in this work allowed an operationalization of the main procedures involved in the LUCC dynamics modelling such as: transition rates estimation and landscape dynamics processes mapping, generation of transition probabilities maps based on logistic regression and spatial allocation of the LUCC transitions with deterministic cellular automata and stochastic patches formation functions. The modular structure of the LanDSCAM model and its open source characteristic facilitate the modification of the model and the implementation of new modelling routines to the users with knowledge of the Fortran 90 language. The utilization of the landscape hierarchical zoning in the calibration procedure in the 1986-2002 (average total fit $F_t = 0.771$) and in the 2002-2008 ($F_t = 0.646$) intervals has given further approximation to LUCC processes patterns, which are related to the landscape mosaics and the interdependence of physical, ecological and social variables. This identified LUCC processes patterns in the models calibration were used in the landscape dynamics prognosis scenarios between 2008 and 2030. These scenarios sought to represent different development models of the society with an current trend business as usual scenario, an economic scenario of the magnification of the current model and an ecologic scenario of alternative sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 a) representação em forma de árvore do conceito de hólón de acordo com Koestler (1978) e b) estrutura da segmentação multi-resolução em GEOBIA.	12
2.2 Exemplo de autômato celular simples (1 transição) e determinístico, com dez passos do Jogo da Vida.	14
3.1 Fluxograma representando a estrutura geral da metodologia adotada neste trabalho.	25
3.2 Localização da área de estudo na Região Sul do Brasil com a divisão municipal.	26
3.3 Diagrama ombrotérmico da estação meteorológica de Lages-SC, com dados médios de precipitação e temperaturas máximas e mínimas a partir de série histórica de 30 anos.	27
3.4 Exemplo de regras e funções de pertinência utilizadas: a) regras lógicas (<i>AND</i>) utilizadas para classificação da classe silvicultura, b) função nebulosa entre o intervalo de valores da média da imagem-fração água, c) função booleana (menor que um valor da média da banda 3, d) função booleana (menor que um valor da média da banda 5 e e) função nebulosa de valores acima de um valor de mínimo do relevo local.	34
3.5 Fluxograma representando a entrada de dados, procedimentos e produtos utilizados para o zoneamento hierárquico da paisagem.	39
3.6 Exemplos de níveis de segmentação multi-resolução baseados em dados geomorfométricos e utilizados no mapeamento integrado da paisagem.	40
3.7 Procedimento geral para a geração de UPP's baseadas em geons da paisagem compatibilizados com setores censitários.	42
3.8 Fluxograma representando a estrutura de modelagem do LanDSCAM.	46
3.9 Exemplo de mapa de transição definido a partir da Tabela 3.6.	49
3.10 Matriz de transição utilizada para a classificação das transições ocorridas entre os mapas iniciais e finais nos períodos 1986-2002 e 2002-2008. Abreviaturas: FOM é floresta, CAMPO-NAT é campo nativo, SILV é silvicultura, AGRIC-FAM é agricultura familiar, AGRIC-GP é agricultura de grande porte, URB é água, DEGRADAÇÃO FOM é degradação florestal.	52

3.11	Filtragem de candidatos a transição em um passo de tempo através de análise de vizinhança, regras de autômato celular e lista de candidatos a transição.	57
3.12	Função de geração de manchas a partir de uma semente aleatória.	60
3.13	Exemplo do procedimento de validação multi-resolução baseado em janelas móveis em duas cenas de 10 x 10 pixels com o mapa real e o mapa simulado em quatro categorias. Os dois mapas apresentam um ajuste moderadamente bom com um aumento significativo conforme maior a resolução. O ajuste total (F_t) é uma média exponencialmente ponderada dos valores de ajuste em todas as janelas.	61
3.14	Estrutura do modelo dinâmica de sistema adotado.	64
3.15	Variáveis adotadas para a geração dos cenários de prognose.	65
3.16	Interface do modelo de dinâmica de sistemas com os dados de entrada, as variáveis dos cenários e os resultados gráficos com os totais em cada passo de tempo das classes floresta (fom), campo nativo (campo), silvicultura (silv), agricultura familiar (agfam), agricultura de grande porte (aggp) e urbano (urb).	66
4.1	Exemplos das variáveis paisagísticas físicas, ecológicas e sociais processadas em ambiente de SIG.	68
4.2	Áreas (em hectares) das classes de uso e cobertura da terra em 1986, 2002 e 2008.	69
4.3	Áreas (em hectares) das classes de uso e cobertura da terra em 1986, 2002 e 2008. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.	70
4.4	Os dois níveis hierárquicos (hólons) gerados a partir da análise de agrupamento das variáveis socioambientais das UPP's e fotos de mosaicos de paisagem característicos.	72
4.5	Perfis geoambientais dos dois níveis hierárquicos (hólons).	73

4.6	Diagrama de ordenamento gerado pela CCA. Abreviaturas: floresta (% FLORESTA), campo nativo (% CAMPO-NAT), agricultura de grande porte (% AGRIC-GP), silvicultura (% SILVICULTURA), agricultura familiar (% AGRIC-FAM), urbano (% URBANO), modelado côncavo-convexo de dissecação média a forte (GEOM-3), modelado tabular de dissecação média a forte (GEOM-4), cambissolos e neossolos litólicos (SOLOS-G1), cambissolos, nitossolos e neossolos litólicos (SOLOS-G2), nitossolos, cambissolos e neossolos litólicos (SOLOS-G3), nitossolos e latossolos (SOLOS-G4), média e desvio-padrão da área de mancha (AREA-FRAG-MED e AREA-FRAG-DP), densidade de bordas (DB), média do índice de forma (SHP-MED), número de manchas (NF), densidade de fragmentos (DF), tamanho de mancha efetivo (MESH), média do relevo local (REL-MED), amplitude da rugosidade superficial (RUGO-AMPL) e densidade populacional (DENS-POP).	74
4.7	Mapas de dos processos de mudanças de uso e cobertura da terra nos intervalos 1986-2002 e 2002-2008: degradação para agricultura familiar (DEG-AGFAM), degradação para agricultura de grande porte (DEG-AGGP), regeneração (REG), expansão da silvicultura (SILV-EXP), intensificação (INT), extensificação (EXT) e urbanização (URB).	81
4.8	Mapas de probabilidade de transição dos processos de MUCT no intervalo 1986-2002: degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura familiar (DEG-AGFAM), degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura de grande porte (DEG-AGGP), regeneração (REG), expansão da silvicultura (SILV-EXP), intensificação (INT), extensificação (EXT) e urbanização (URB).	82
4.9	Mapas de probabilidade de transição dos processos de MUCT no intervalo 2002-2008: degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura familiar (DEG-AGFAM), degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura de grande porte (DEG-AGGP), regeneração (REG), expansão da silvicultura (SILV-EXP), intensificação (INT), extensificação (EXT) e urbanização (URB).	87
4.10	Resultado do modelo de MUCT no intervalo 1986-2002. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.	92
4.11	Resultado da validação do modelo de MUCT no intervalo 1986-2002, onde Ft é a média ponderada de ajuste total.	93

4.12	Resultado do modelo de MUCT no intervalo 2002-2008. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.	95
4.13	Resultado da validação do modelo de MUCT no intervalo 2002-2008, onde Ft é a média ponderada de ajuste total.	96
4.14	Resultado dos cenários de prognose da paisagem no intervalo 2008-2030. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.	98
4.15	Gráfico representando os resultados em área (hectares) dos cenários de prognose da paisagem no intervalo 2008-2030 relativos às classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP) e urbano (URB).101	

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Variáveis físicas, ecológicas e sociais utilizadas neste estudo.	29
3.2 Unidades geomorfológicas definidas a partir da adaptação das legendas de IBGE (2003) e RADAMBRASIL (1986).	31
3.3 Unidades pedológicas definidas a partir da adaptação das legendas de EMBRAPA (2005) e RADAMBRASIL (1986).	31
3.4 Exemplo de regras de decisão baseadas nos atributos, níveis de segmentação e nas funções de pertinência booleanas e nebulosas; cena 221/79 de 1986.	35
3.5 Exemplo de matriz de demandas de transição do intervalo 2002-2008 com 1 região, i.e., a demanda total de transições.	48
3.6 Exemplo de matriz de processos definidos pelo usuário, neste caso com valores únicos para cada transição.	48
3.7 Exemplo de tabela com as médias das áreas de cada transição pra o intervalo 2002-2008, em metros quadrados.	59
3.8 Exemplo de tabela com as medidas de desvio-padrão das áreas de cada transição pra o intervalo 2002-2008, em metros quadrados.	59
4.1 Dados da estrutura fundiária do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006), apenas disponível por municípios, com o total de propriedades, total de área e a área média das propriedades; áreas em unidades de hectares.	76
4.2 Matrizes de demandas de transição regionais do intervalo 1986-2002, em pixels.	79
4.3 Matrizes de demandas de transição regionais do intervalo 2002-2008, em pixels.	80
4.4 Resultados dos modelos de regressão logística dos modelos dos processos de MUCT no intervalo 1986-2002.	83
4.5 Resultados dos modelos de regressão logística dos modelos dos processos de MUCT no intervalo 2002-2008.	88
4.6 Totais de áreas (hectares) referentes às diferentes classes do resultado da simulação 1986-2002 em relação ao uso real em 2002.	93
4.7 Proporção entre as funções de alocação espacial determinística de autômatos celulares e estocástica de formação de manchas no modelo de MUCT do intervalo 2002-2008.	94

4.8	Totais de áreas (hectares) referentes às diferentes classes do resultado da simulação 2002-2008 em relação ao uso real em 2008.	96
4.9	Proporção entre as funções de alocação espacial determinística de autômatos celulares e estocástica de formação de manchas no modelo de MUCT do intervalo 2002-2008.	97
4.10	Totais de áreas (hectares) referentes às diferentes classes do resultado dos cenários da dinâmica da paisagem 2008-2030.	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEOBIA	–	Análise de Imagens Orientada a Objetos Geográficos
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ZEE	–	Zoneamento Ecológico-Econômico
UTB	–	Unidades Territoriais Básicas
PDI	–	Processamento Digital de Imagens
SIG	–	Sistema de Informação Geográfica
MUCT	–	Mudança de Uso e Cobertura da Terra
SR	–	Sensoriamento Remoto
CLUE	–	Conversion of Land Use and its Effects
CLUE-S	–	Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent
ZEE	–	Zoneamento Ecológico-Econômico
MDE	–	Modelo Digital de Elevação
MOLAND	–	Monitoring Land Dynamics
LUCC	–	Land Use and Cover Change
FOM	–	Floresta Ombrófila Mista
ACP	–	Análise de Componentes Principais
MLME	–	Modelo Linear de Mistura Espectral
TM	–	<i>Thematic Mapper</i>
IVM	–	<i>Institute for Environmental Studies</i>
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
UPP	–	Unidade de Planejamento da Paisagem
MAUP	–	<i>Modifiable Area Units Problem</i>
UP	–	Unidade de Planejamento
CCA	–	Análise de Correspondência Canônica
ANOVA	–	Análise da Variância
ASCII	–	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
GDAL	–	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i>
LRT	–	<i>Likelihood Ratio Test</i>
ROC	–	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
AUC	–	<i>Area Under Curve</i>
GUI	–	<i>graphical user interface</i>
DEC	–	declividade
REL	–	relevo local
GEOM- <i>n</i>	–	unidades geomorfológicas
SOLOS- <i>n</i>	–	associações de solos
DIST-ROD	–	distância às estradas
DIST-RIOS	–	distância aos rios
DIST-URB	–	distância às manchas urbanas
DENS-POP	–	densidade populacional
POP-15-64	–	porcentagem da população economicamente ativa

ENN	–	distância entre manchas
LPI	–	índice de maior mancha
DB	–	densidade de bordas
NM	–	número de manchas
FRAC ^a	–	média da dimensão fractal das manchas
SHAPE ^a	–	média do índice de forma das manchas
AREA-MC ^a	–	média da área das manchas

LISTA DE SÍMBOLOS

NP	– número de manchas
TLA	– área total de cada unidade de paisagem
ALP	– área da maior mancha da unidade de paisagem
p	– perímetro de cada fragmento de cobertura vegetal
a	– área de cada fragmento de cobertura vegetal
$P_{(i,j)}$	– probabilidade de transição em cada pixel
β_0	– intercepto do modelo de regressão logística
$\beta_{1,n}$	– coeficiente de cada variável independente
$X_{n(i,j)}$	– valor de cada variável independente em cada pixel
Dt_r	– demanda total da transição t na região r num passo de tempo único
Pa	– proporção para a função determinística de autômato celular
Pb	– proporção para a função aleatória de formação de manchas
nt	– número de passos de tempo
nl	– número de células da classe l encontrada na janela de 3×3 pixels
m_{ijr}	– pixel central da janela com classe m na região r
l_{ijr}	– pixel presente na lista de candidatos à transição da classe m para a classe l
v	– parâmetro de número de vizinhos definido pelo modelador
F_w	– ajuste para o tamanho de janela w
w	– dimensão em pixels de um lado da janela
a_{ki}	– número de células da categoria i da cena k na janela de amostragem
c	– número de diferentes categorias na janela
s	– janela móvel de dimensão w por w que percorre as células uma de cada vez
t_w	– total de janelas de amostragem de tamanho w na cena
F_t	– média ponderada do ajuste em todas janelas móveis
k	– constante
Pt_l	– probabilidade de transição para a transição l
Dt_{ini}	– demanda de transição oriunda da calibração em pixels
LU_{ini}	– total de pixels da classe inicial de transição
$Prop_{cen}$	– proporção de incremento das demandas de transição para cada processo
K	– variável de cenário de capital
M	– variável de tecnologia moderna
A	– variável de cenário de ambiente
T	– variável de cenário de tecnologia tradicional
w	– constante
z	– constante
y	– constante
u	– constante

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipóteses e objetivos	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Paisagem e complexidade: considerações epistemológicas	5
2.1.1 A paisagem: sistema complexo	5
2.1.2 Ecologia da Paisagem: conceitos e métodos	7
2.2 Contribuição de SIG e Sensoriamento Remoto aos estudos integrados da paisagem	9
2.3 Modelagem da dinâmica da paisagem	12
2.3.1 Perspectivas teóricas no estudo das mudanças de uso e cobertura da terra	14
2.3.2 Modelos computacionais de mudança de uso e cobertura da terra	18
2.3.2.1 Modelos baseados em autômatos celulares	19
2.3.2.2 Modelos probabilísticos de alocação espacial	21
2.3.2.3 Modelos baseados em agentes	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 Área de estudo	25
3.2 Processamento de variáveis paisagísticas	29
3.2.1 Base cartográfica, mapas geoambientais e dados sociais	30
3.2.2 Variáveis geomorfométricas	31
3.2.3 Classificação multitemporal de uso e cobertura da terra	32
3.2.4 Mensuração das métricas de paisagem	37
3.3 Zoneamento hierárquico da paisagem	38
3.3.1 Mapeamento integrado da paisagem	38
3.3.1.1 Geons da Paisagem	39
3.3.1.2 Unidades de Planejamento da Paisagem	41
3.3.2 Análise multivariada e tipologia hierárquica das Unidades de Planejamento da Paisagem	43
3.4 Modelagem da dinâmica da paisagem	45
3.4.1 Cálculo de demandas de transição e mapas de mudanças	47
3.4.2 Geração de mapas de probabilidade de transição	49

3.4.2.1	Definição das variáveis dependentes e independentes	50
3.4.2.2	Módulo de amostragem espacial aleatória	53
3.4.2.3	Análise de regressão logística	54
3.4.2.4	Módulo de cálculo de mapas de probabilidade de transição	55
3.4.3	Alocação espacial das mudanças de uso e cobertura da terra	55
3.4.3.1	Alocação espacial baseada em autômatos celulares	56
3.4.3.2	Alocação espacial com formação de manchas	58
3.4.4	Calibração e validação dos modelos	60
3.4.5	Geração de cenários de prognose	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	Sensoriamento Remoto, SIG e as variáveis paisagísticas	67
4.2	Zoneamento hierárquico da paisagem	69
4.2.1	Mapeamento integrado da paisagem	69
4.2.2	Análise multivariada das Unidades de Planejamento da Paisagem	71
4.2.3	Análise dos padrões do zoneamento hierárquico da paisagem	76
4.3	Modelagem da dinâmica da paisagem	78
4.3.1	Demandas de transição e mapas de processos de mudanças de uso e cobertura da terra	78
4.3.2	Mapas de probabilidade de transição	78
4.3.2.1	Mapas de probabilidade de transição 1986-2002	81
4.3.2.2	Mapas de probabilidade de transição 2002-2008	86
4.3.3	Calibração dos modelos de mudança de uso e cobertura da terra	91
4.3.3.1	Modelo de mudança de uso e cobertura da terra 1986-2002	91
4.3.3.2	Modelo de mudança de uso e cobertura da terra 2002-2008	94
4.3.4	Cenários de prognose da dinâmica da paisagem 2008-2030	97
5	CONCLUSÕES	103
5.1	Variáveis paisagísticas	103
5.2	Zoneamento hierárquico da paisagem	103
5.3	Modelagem da dinâmica da paisagem	104
5.4	Perspectivas de aperfeiçoamentos teórico-metodológicos	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1 INTRODUÇÃO

A paisagem se apresenta como um sistema complexo adaptativo e integrado formado pela interação de variáveis físicas, ecológicas e sociais que atuam em sua formação, hierarquia, estrutura e dinâmica processual de acordo com os princípios da Ecologia da Paisagem. Principalmente a partir de meados do século XX, ocorre uma grande aceleração das atividades antrópicas, baseada na transformação técnica, científica e cultural da sociedade (POLANYI, 2000; MONTEIRO, 1988; HARVEY, 1999) que acarretaram numa ampla modificação das condições geocológicas da paisagem. Estas transformações passam pela posição epistemológica tradicional da modernidade e o estabelecimento de uma sociedade mundial capitalista através do princípio de separação entre a terra e o trabalho que cria um sistema de mercado baseado em riquezas fictícias ou artificiais, visto que a natureza e o homem se encontram em relação de interdependência (POLANYI, 2000).

Como reação aos princípios epistemológicos tradicionais, forma-se uma nova corrente de pensamento identificada com os estudos da complexidade e dos sistemas complexos se forma com base nos fundamentos de interdisciplinaridade, auto-organização, caos, dinâmicas e processos não-lineares, imprevisibilidade e incerteza, hierarquia e outros para a geração de conhecimento que contemple a integração entre a natureza e a sociedade e também das ciências físicas, ecológicas e sociais (PRIGOGINE; STENGERS, 1991; NUSSENZVEIG, 1999; MORIN, 2002; LEWIN, 2002). O ponto de vista da complexidade busca superar as contingências do reducionismo parcelar através da concepção sistêmica e integrada dos mais diversos objetos de estudo, reestabelecendo a ponte entre as ciências da natureza e da sociedade que já estiveram ligadas como nas origens da Ecologia da Paisagem e na Geografia Tradicional. A adoção dos princípios da complexidade e dos sistemas complexos, em conjunto com a abordagem da Ecologia da Paisagem influenciada por estes, apresenta contribuições importantes ao planejamento territorial e gestão ambiental, já que as questões e problemáticas ambientais são problemas influenciados pela interação de fatores naturais e sociais.

Tais características fazem com que a maioria das problemáticas socioambientais envolvendo o planejamento territorial (e.g., falta de estudos de prevenção e mesmo, de mapeamento em tempo quase real referente a desastres naturais; falta de um zoneamento de ocupação e análise da dinâmica de uso da terra; carência de estudos sistemáticos de impactos ambientais, etc.) necessite do suporte de análises baseadas em dados espaciais para a formulação eficaz de estratégias relacionadas à paisagem. Assim, pode-se definir a tomada de decisão, em especial no âmbito das

políticas públicas. Esta necessidade também se relaciona à disponibilidade de dados socioambientais diversos, de preferência com um grau de compatibilização que permita análises integradas em relação aos elementos naturais e à atividade humana na paisagem, como o mapeamento de unidades de paisagem de acordo com princípios hierárquicos (FREITAS; CARVALHO, 2009; FREITAS, 2009). A aplicação de geotecnologias, em especial de Sensoriamento Remoto (SR) e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), na tomada de decisões ligadas ao ordenamento territorial e à gestão ambiental apresenta diversas potencialidades relacionadas à capacidade de aquisição, organização e análise de dados espaciais (BURROUGH; MCDONNELL, 1998; SALINERO, 2002).

As recentes transformações culturais e ambientais, bem como suas derivações antropogênicas da paisagem, têm por base as mudanças de uso e cobertura da terra que é o fator essencial para a interpretação da dinâmica da paisagem e impactos ambientais associados, pois o uso da terra seria a forma de expressão espacial da influência humana sobre a paisagem (LANG; BLASCHKE, 2009). As mudanças de uso e cobertura da terra (MUCT), conhecidas internacionalmente como *Land Use and Cover Change* (LUCC), são um dos principais fatores de atenção na atualidade frente às mudanças ambientais globais em curso a partir de meados do século XX (TURNER II et al., 2007). Um estudo recente coloca as MUCT entre os elementos fundamentais para se estabelecer limites de segurança do sistema terrestre para atividades antrópicas de desenvolvimento econômico e social, onde se propôs o limite de 15% de modificação da cobertura global da terra para atividades agrícolas (ROCKSTRÖM et al., 2009).

Além de estudos integrados da paisagem com a abordagem de SIG e SR, o uso de modelos espaciais dinâmicos em ambiente computacional, com base nos dados geo-espaciais temáticos e sintéticos, pode trazer uma grande contribuição à tomada de decisão em questões de planejamento territorial. Os modelos de mudanças de uso e cobertura da terra apresentam a aplicação de princípios oriundos dos estudos da complexidade (e.g., autômatos celulares) e técnicas de análise espacial para a representação e simulação de padrões dinâmico-espaciais complexos que emergem a partir de interações locais simples em nível de células ou pixels. A aplicação destes métodos de modelagem espacial dinâmica de MUCT apresenta uma abordagem também relacionada com a integração de fatores sociais e naturais com base em variáveis físicas, ecológicas e sociais processadas e analisadas em ambiente de SIG e SR (GEOGHEGAN et al., 1998). A maior parte dos dados utilizados nesta abordagem são oriundos da classificação de imagens de satélite, em especial da família

Landsat (devido à série temporal que abrange do início dos anos 70 até 2012), de dados geomorfométricos (elevação, declividade e outros), de indicadores ecológicos como as métricas da paisagem e de dados censitários sociais. Como visto, tais dados são os mesmos necessários para a realização dos estudos integrados da paisagem e de zoneamentos ambientais.

1.1 Hipóteses e objetivos

Nesta pesquisa, busca-se realizar um estudo integrado da paisagem e uma modelagem da dinâmica da paisagem no Alto Uruguai entre os anos de 1986 e 2030 com base nas mudanças de uso e cobertura da terra ocorridas entre 1986 e 2008. A principal aplicação desta abordagem integrada da dinâmica da paisagem com as mudanças de uso e cobertura da terra é a geração de cenários paisagísticos, entendidos de forma complexa e interdisciplinar, que servem como subsídio fundamental para a tomada de decisões no planejamento territorial e gestão ambiental.

A hipótese principal deste trabalho é que a modelagem da dinâmica da paisagem, com base em concepções direcionadas a sistemas complexos como os autômatos celulares, pode ser enriquecida com o uso de um zoneamento hierárquico da paisagem de acordo com princípios de integração da natureza e sociedade da abordagem geossistêmica da Ecologia da Paisagem (MONTEIRO, 2001).

O objetivo geral desta pesquisa é integrar variáveis físicas, ecológicas e sociais com base na abordagem interdisciplinar e complexa da Ecologia da Paisagem e em técnicas e métodos de SR, SIG e modelagem dinâmica espacial para o zoneamento hierárquico da paisagem e para a geração de cenários de mudanças de uso e cobertura da terra numa área de paisagem heterogênea, com grande dinâmica de MUCT e com altos níveis de fragmentação.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- gerar a partir de ferramentas e dados de SR e SIG uma série de variáveis paisagísticas geomorfométricas, de métricas da paisagem e sociais, além de uma classificação multitemporal de uso e cobertura da terra com base em imagens Landsat-TM implementada por análise de imagens orientada a objetos geográficos (GEOBIA);
- implementar um método de zoneamento hierárquico da paisagem (hólons) com base na segmentação multi-resolução de Modelo Digital de Elevação (MDE) e produtos derivados, compatibilização com unidades de agregação

oficiais e hierarquização através da análise estatística multivariada de variáveis geomorfométricas, métricas da paisagem e dados censitários sociais.

- desenvolver um modelo dinâmico espacial das mudanças de uso e cobertura da terra baseado em autômatos celulares que possibilite: a) a mensuração e projeção de demandas de uso e cobertura da terra (cenários para as simulações); b) a geração de mapas de probabilidade de transição baseados em processos de MUCT (variáveis dependentes) e as variáveis socioambientais (variáveis independentes); c) a espacialização das demandas (cenários de mudanças de uso e cobertura da terra); d) a calibração dos parâmetros dos modelos e validação dos resultados gerados;
- gerar cenários de prognose paisagísticos entre os anos de 2008 e 2030 que permitam uma melhor compreensão dos padrões e processos fundamentais da dinâmica da paisagem, assegurando na resultante dos modelos um nível de validação aceitável aos planejadores e tomadores de decisão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta fundamentação teórica, busca-se uma revisão do tripé sob o qual se sustenta a presente tese através do estabelecimento de articulações entre: a) a base epistemológica proveniente da Ecologia da Paisagem e da abordagem de sistemas complexos, b) a contribuição dos métodos e técnicas de SIG e Sensoriamento Remoto aos estudos integrados da paisagem e c) o desenvolvimento de modelos dinâmicos espaciais voltados à geração de cenários de mudanças de uso e cobertura da terra.

2.1 Paisagem e complexidade: considerações epistemológicas

2.1.1 A paisagem: sistema complexo

A paisagem apresenta características comuns aos sistemas complexos que vem sendo definidos e estudados por uma série de cientistas em diferentes áreas de estudo que contribuem para a formação de um campo de estudos interdisciplinar preocupado em questões como complexidade, caos, auto-organização, não-linearidade e outras (NUSSENZVEIG, 1999; MORIN, 2002; ALVES, 2012). O suporte epistemológico para o desenvolvimento dos estudos de sistemas complexos foi fundado na cibernética (WIENER, 1968), teoria geral dos sistemas (BERTALANFFY, 1975), física quântica e o princípio da incerteza (HEISENBERG, 1959), entre outras contribuições como a teoria da informação. Este campo interdisciplinar de estudos da complexidade desenvolveu uma série de novas concepções como geometria fractal (MANDELBROT, 1998), estruturas dissipativas (PRIGOGINE; STENGERS, 1991), redes booleanas, autômatos celulares e sistemas complexos adaptativos (NUSSENZVEIG, 1999; LEWIN, 2002).

Tais estudos da complexidade buscam a superação da visão de mundo relacionada ao pensamento científico tradicional do modernismo de cunho cartesiano, newtoniano e positivista que se baseia no reducionismo e dicotomia das partes, busca de leis universais através do princípio da causalidade linear, nos princípios de determinismo e ordem para a interpretação da realidade (SANTOS, 1995; HARVEY, 1999). Sem abandonar uma série de princípios e contribuições da escola tradicional, os estudos da complexidade buscam introduzir uma série de concepções para a interpretação de fenômenos complexos no limite entre a organização e o caos, não-estacionários tanto espacial quanto temporalmente e com interações hierárquicas flexíveis entre elementos físicos, ecológicos e sociais.

Uma contribuição epistemológica de tais estudos que pode ser relacionada ao estudo da paisagem de forma complexa e integrada é a de Bateson (1972). Ao lembrar que

“o território não é o mapa”, i.e., a paisagem é diferente da representação que fazemos desta por nossos mapeamentos (interpretações), este autor busca ressaltar a importância da base epistemológica para se construir uma ponte entre os modos de pensar e investigar das ciências rígidas (física, química, etc.) e das ciências suaves (ecologia, psicologia, antropologia, etc.). Enquanto no campo das ciências rígidas, um mundo de objetos, impactos e forças é descrito através de fundamentos e leis (lei da relatividade; nas ciências suaves, um mundo de sujeitos vivos, formas e interações é visto através de categorias e noções probabilísticas e de cunho heurístico. A ponte de tais mundos e culturas de conhecimento é necessária para uma explicação mais exitosa dos sistemas complexos que exibem circuitos de interações de retroalimentação e retroação (*feedbacks* e *loops*) entre variáveis físicas, ecológicas e sociais interdependentes que trazem a informação necessária para a regulação e homeostase do sistema. Este autor ainda aponta que os fundamentos da crise ecológica que passa a sociedade global a partir dos anos de 1970 se relacionam diretamente com a posição epistemológica tradicional de dicotomia entre os mundos das ciências naturais e das ciências sociais que não permite a interpretação dos sistemas ambientais auto-organizados formados pelo homem, o ambiente e a técnica. Além de formar a base de uma atitude arrogante da sociedade frente à natureza e seus processos vistos como um objeto a ser dominado pela técnica sem o reconhecimento das características peculiares aos sistemas complexos vivos e suas cadeias de interações homeostáticas com limites de resiliência que expressam a noção de irreversibilidade.

Os sistemas complexos adaptativos, não-lineares, abertos e integrados são caracterizados por seu desenvolvimento ou evolução a partir de interações locais simples que tem a propriedade de produzir uma complexa estrutura global emergente com uma dinâmica evolutiva não-determinística podendo seguir tendências diversas (MORIN, 2002; LEWIN, 2002). O processo envolvido na evolução dos sistemas complexos adaptativos apresenta um padrão de dinâmica ordenada nos estágios iniciais, que evolui para a desordem e caos nos estágios intermediários, e por fim atinge o estágio de criticalidade auto-organizada no auge de evolução de tais sistemas (NUSSENZVEIG, 1999). Tais sistemas complexos adaptativos são guiados pelo princípio da incerteza e imprevisibilidade em sua evolução, devido à intrínseca dinâmica caótica destes, onde pequenas alterações em escalas locais de interação produzem efeitos imprevisíveis nos níveis superiores de organização (NUSSENZVEIG, 1999).

A paisagem, vista como um sistema complexo, apresenta-se condicionada pela interdependência entre as variáveis físicas, ecológicas e sociais que se relacionam de forma dialética (BERTRAND; BERTRAND, 2002), i.e., apresentam múltiplas determinações,

aspectos contraditórios e a característica de síntese na noção de totalidade (BENSAÏD, 2003). Outra característica dos sistemas complexos presente no estudo da paisagem se refere à noção de escala e de hólón (KOESTLER, 1978), referindo-se à interpretação da hierarquia de forma flexível com múltiplas interações verticais e horizontais, não obedecendo aos princípios rígidos da taxonomia tradicional. Tais características da paisagem, em conjunto com diversas outras dos sistemas complexos, requerem abordagens integradas e interdisciplinares para uma eficácia na tomada de decisão relacionada com o planejamento e gestão do território. Tais ações relacionadas às políticas públicas devem ainda ter a contribuição de uma abordagem da dinâmica das paisagens que apresentam alta complexidade e onde podem ser adotados paradigmas dos estudos da complexidade (autômatos celulares, fractais e outros) no desenvolvimento de modelos espaciais dinâmicos e na geração de cenários de acordo com tendências e padrões de mudança da paisagem.

2.1.2 Ecologia da Paisagem: conceitos e métodos

O estudo da paisagem a partir de uma abordagem integrada entre a natureza e a sociedade que contempla a interdisciplinaridade e a adoção de concepções oriundas dos estudos da complexidade é o principal enfoque da chamada Ecologia da Paisagem. Esta é um ramo interdisciplinar composto basicamente por ecólogos, biólogos e geógrafos (entre outras áreas), onde as concepções oriundas da Biologia e do estudo dos sistemas ecológicos (ecossistemas, nichos, habitat, cadeias tróficas, etc.) se encontram com as noções espaciais da Geografia (paisagem, lugar, território, escala, distância, hierarquia espacial, etc.) com fins de aplicação no planejamento territorial e gestão ambiental da paisagem. A potencialidade da Ecologia da Paisagem para a abordagem da paisagem como um sistema híbrido de natureza e cultura (LATOURE, 1994) é ressaltado por antropólogos que apontam a necessidade de um ponto de vista que leve em conta a história das intervenções humanas para a interpretação dos padrões e processos ecológicos com hierarquia espacial definida (SILVEIRA, 2007).

A origem da Ecologia da Paisagem está na escola geográfica alemã fundamentada sobre uma visão holística da paisagem e na busca da interpretação, classificação e mapeamento das paisagens naturais e culturais em suas estrutura, forma, função e fisiologia com objetivos relacionados ao planejamento e gestão da paisagem (BERG, 1915; SAUER, 1925; TROLL, 1950). Para Sauer (1925) a paisagem é definida como um organismo complexo constituído por uma interdependência entre os fatores naturais e culturais, conferindo ainda à paisagem o lugar de conceito unitário da Geografia. A concepção de integração entre a natureza e a sociedade no estudo da paisagem

se refere a uma necessidade intrínseca ao conhecimento geográfico e à compartimentação do espaço, levando em conta as interações entre os componentes naturais e humanos. Cabe ressaltar que esta postura epistemológica na origem da Ecologia da Paisagem é influenciada diretamente pela Geografia Tradicional e seu ponto de vista holístico das relações natureza e sociedade, oriundo do Romantismo e outras influências. Diversos autores da Geografia Tradicional, como Elisée Reclus (GIBLIN, 1981) e Max. Sorre (MEGALE, 1985), apresentam tais características relacionadas com o ponto de vista da complexidade como apontado por Moreira (2008) e Freitas (2009).

Esta visão original da Ecologia da Paisagem, aprofundada com a contribuição epistemológica da Teoria Geral dos Sistemas (BERTALANFFY, 1975), da cibernética (WIENER, 1968) e de concepção de hólón (KOESTLER, 1978), possibilita a adoção de concepções sistêmicas e integradas entre a natureza (biosfera) e a sociedade (tecnosfera), na busca de uma classificação hierárquica relacionada às escalas espaço-temporais com o objetivo de aplicação no planejamento e gestão da paisagem, como pode ser visto em Naveh (1988).

Um conceito chave na Ecologia da Paisagem, especialmente do ponto de vista dos geógrafos físicos, é o de geossistemas, considerado na escola geográfica russa por Sochava (1977), e que busca uma compreensão global da paisagem em seus elementos físicos, ecológicos e sociais e seus ciclos e intercâmbios de matéria e energia. A paisagem nesta escola é representada em níveis hierárquicos e o conceito de geossistema foi criado em estações experimentais com monitoramento detalhado de uma grande variedade de dados ambientais, esses constituintes dos ciclos biogeoquímicos (ROUGERIE; BEROUTCHACHVILI, 1991). Uma grande variedade de escolas geográficas se inspiraram na abordagem geossistêmica russa e desenvolveram metodologias para estudos integrados da paisagem com conceitos adaptados às peculiaridades de cada país, como na França (TRICART; JONGE, 1992; BERTRAND; BERTRAND, 2002), Holanda (ZONNEVELD, 1988), Leste europeu (HAASE, 1986) e diversos outros, citados em Rougerie e Beroutchachvili (1991) e Freitas (2009).

No Brasil, as principais contribuições com foco nos geossistemas vieram de Monteiro (2001) que busca a aplicação de metodologias integradas de análise da paisagem com fins de: a) estudar a relação entre a natureza e a sociedade na formação da paisagem, b) efetuar a tomada de decisões em nível de planejamento territorial e gestão ambiental, c) subsidiar a modelagem de sistemas ambientais que permitam a geração de cenários e prognósticos da paisagem. Este autor lembra que, apesar das

diversas denominações existentes de acordo com respectivas escolas (ecossistemas, geossistemas, unidades de paisagem, unidades geoambientais, unidades territoriais básicas, unidades homogêneas, sistemas de paisagem, geocomplexos, etc.), todas estas contribuições apresentam uma base convergente a respeito da necessidade de uma compreensão integrada entre o homem e a natureza para uma aplicação eficaz de políticas de planejamento territorial. Em relação à denominação de unidades de paisagem, esse autor propôs a utilização da noção de hólón de Koestler (1978) para a caracterização da hierarquia da paisagem.

A busca por metodologias de análise e mapeamento integrados da paisagem ocorre devido a demandas sociais referentes às condições da paisagem na tomada de decisões envolvendo o uso da terra e suas mudanças propostas em projetos de planejamento territorial e de previsão de impactos socioambientais. Haase (1986) destaca quatro funções principais deste tipo de estudo: a) determinação de propriedades potenciais das condições naturais, i.e., as potencialidades paisagísticas; b) determinação da adequação da paisagem em relação às diferentes demandas sociais de usos da terra e interferências espaço-temporais; c) caracterização do estado atual de resiliência da paisagem em relação aos impactos socioambientais como consequência de usos intensivos; d) avaliação da disponibilidade espaço-temporal para certas formas de uso limitadas às condições naturais, estrutura da paisagem e seu padrão de uso existente.

Tais demandas sociais e ambientais requerem o desenvolvimento de técnicas de mapeamento integrado da paisagem para a delimitação de unidades de paisagem, voltada para certos objetivos previamente estabelecidos, i.e., adaptações metodológicas podem e devem ocorrer de acordo com a natureza da paisagem a ser mapeada e aos objetivos a serem alcançados (e.g. implantação de novas atividades agrícolas, industriais e obras de engenharia, planejamento territorial, prevenção de riscos e desastres naturais, etc.). Monteiro (2001), baseado em Feyerabend (1989), sustenta a necessidade de adoção de variados métodos, de diferentes escolas de pensamento, para a geração de um movimento de superação metodológica constante frente aos desafios da complexidade da paisagem, com de pontos de vista múltiplos, de cunho analítico e sintético, para sua interpretação.

2.2 Contribuição de SIG e Sensoriamento Remoto aos estudos integrados da paisagem

O estudo dos sistemas complexos, neste caso a paisagem, começa pelos dados espaço-temporais que não podem ser considerados como dados brutos (*raw data*), como lem-

bra [Bateson \(1972\)](#), pois apresentam em si diversas características que influenciam no tipo de pesquisa que pode ser feita (e.g., resolução espectral, espacial e temporal, escala cartográfica, unidade de agregação, etc.). Além de provedor de dados a respeito da paisagem, SIG e SR podem ser utilizados com fins de análise e síntese de variáveis espaço-temporais diversas através de uma abordagem espacialmente explícita que permite a interpretação dos circuitos de interações entre as variáveis, os quais formam mosaicos e padrões paisagísticos. Assim, a contribuição dos SIG e SR nos estudos integrados pode ser dividida entre: a) os métodos e técnicas de armazenamento, organização e extração de informações temáticas com base em seus produtos e b) os métodos e abordagens aplicados no mapeamento de unidades de paisagem de acordo com princípios hierárquicos.

Em relação aos primeiros, os dados de sensores orbitais apresentam características fundamentais para a aplicação nos estudos de uso e cobertura da terra como a capacidade de observação e monitoramento de forma sinóptica, dinâmica e em diferentes escalas espaço-temporais que possibilita quantificar as taxas de conversão e modificação de uso e cobertura da terra, avaliar as atividades antrópicas e caracterizar os diferentes sistemas de uso da terra. ([TURNER II et al., 2007](#)). Os métodos e técnicas principais aplicados ao uso e cobertura da terra envolvem a classificação de imagens por técnicas pixel-a-pixel ou orientada a objetos, análises multitemporais de imagens e produtos derivados (e.g., índices de vegetação) para a detecção de mudanças e a geração de indicadores sintéticos da fragmentação da paisagem (métricas da paisagem) baseados na classificação de imagens ([SALINERO, 2002](#); [LANG](#); [BLASCHKE, 2009](#)). Também cabe ressaltar o papel do Modelo Digital de Elevação (MDE) para a geração de variáveis geomorfométricas como hipsometria, declividade, orientação de vertentes, curvaturas horizontal e vertical ([VALERIANO; ROSSETI, 2011](#)) que são usualmente utilizadas na análise da paisagem e suas características físicas e ecológicas (geologia, geomorfologia, solos e biogeografia). Por fim, temos a integração de dados de sensoriamento remoto e dados sociais censitários que envolve diversas variáveis sociais, demográficas, rurais, econômicas e biofísicas agregadas em limites político-administrativos e setores censitários utilizada em estudos interdisciplinares para caracterização da estrutura e funcionamento dos sistemas de uso da terra ([GEOHEGAN et al., 1998](#); [WOOD](#); [SKOLE, 1998](#)).

Já em relação à abordagem de SIG em mapeamentos integrados, a metodologia principal de mapeamento de unidades de paisagem com dados de Sensoriamento Remoto em ambiente de SIG no Brasil é a das Unidades Territoriais Básicas (UTB), do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), que se baseia no uso de mapas geoambientais

(geomorfologia, solos e geologia) refinados em relação à escala original. Esses são compatibilizados pelo uso de imagens de satélite como “âncora” na delimitação das UTB resultantes de cruzamento por análise booleana dos mapas geoambientais e de classificação de uso e cobertura da terra baseada em imagens de satélite (CREPANI et al., 2001). Uma aplicação do mapeamento de geossistemas, conforme os princípios de Bertrand e Bertrand (2002), tendo como exemplo um caso no Nordeste brasileiro, foi realizado por Freitas (2006) e Freitas e Carvalho (2009) em escala de semi-detalle, com a identificação de geossistemas e de geofácies, que permitiram caracterizar a dinâmica de mudanças de uso e cobertura da terra num período de 24 anos. Princípios de hierarquização da paisagem em hólons, conforme tratado por Monteiro (2001), foram utilizados para o mapeamento de geossistemas em uma bacia hidrográfica na região Sudeste do Brasil, citado por Cunha e Freitas (2004).

O desenvolvimento de nova abordagem na área de SR e SIG, denominada Análise de Imagens Orientada a Objetos Geográficos (GEOBIA), chamou atenção por ser um sistema baseado no conhecimento do especialista, que permite classificar uma série de dados matriciais a partir de objetos vetoriais gerados por técnicas como segmentação multi-resolução. Isso substitui a abordagem pixel-a-pixel, predominante na maioria dos softwares de Processamento Digital de Imagens (PDI), conforme citado por (BLASCHKE, 2010). A partir da incorporação do conhecimento do especialista, este sistema combina funções complementares de PDI e de SIG com implementação de regras de decisão nebulosas (*fuzzy*), além da incorporação de atributos espectrais, espaciais, texturais e temáticos para a classificação de imagens de alta e média resolução. Isso permite a detecção de atributos diversos em diferentes áreas (e.g., geomorfologia, Ecologia da Paisagem, agricultura, urbanismo, etc.).

A principal característica da GEOBIA que a aproxima do mapeamento integrado da paisagem é a segmentação multi-resolução e sua estrutura hierárquica que se aproximam da noção de hólón (KOESTLER, 1978), como apontado por Lang (2008) e pode ser visto na Figura 2.1. Ao contrário da taxonomia e sua hierarquia rígida imposta de cima para baixo, ou vice-versa, aquela proposta por Koestler (1978) estabelece uma hierarquia mais livre onde as estruturas superiores, intermediárias e inferiores apresentam relações mútuas, de acordo com o ângulo de vista (de cima para baixo, ou vice-versa). Assim, os subsistemas em cada nível da hierarquia apresentam uma face de Janus, i.e., atuam como todo quando olham para baixo e como partes quando observam acima (WU, 1999). Baseado em tal noção, Lang (2008) propõe o conceito de *geon*, baseado em GEOBIA, que é um quadro integrador para a regionalização, análise e monitoramento com base em variáveis espaciais para fornecer uma plu-

ralidade de soluções orientada ao suporte de políticas públicas devido à inerente complexidade da paisagem e dos fenômenos do mundo real. Como pode se notar, o conceito de *geon* apresenta similaridade com a abordagem geossistêmica, tanto do ponto de vista metodológico como ferramenta de regionalização, análise e monitoramento, como do objetivo principal de sua aplicação que é o suporte à tomada de decisão no planejamento territorial e tantas outras questões que requerem um tratamento integrado da paisagem.

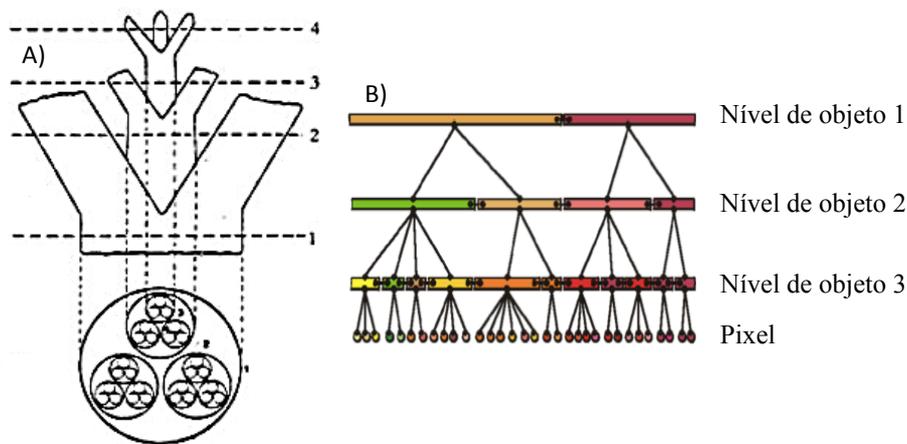


Figura 2.1 - a) representação em forma de árvore do conceito de hólon de acordo com Koestler (1978) e b) estrutura da segmentação multi-resolução em GEOBIA.

2.3 Modelagem da dinâmica da paisagem

O estudo da dinâmica da paisagem e seus processos associados pode ser realizado, em parte, com a utilização de modelos de mudanças de uso e cobertura da terra, fator fundamental para a apreciação da dinâmica e dos processos da paisagem. Estes modelos utilizam variados métodos, incluindo concepções dos estudos da complexidade (por exemplo, autômatos celulares, fractais, teoria hierárquica e outros), para a simulação de cenários baseados em variáveis físicas, ecológicas e sociais e com o fim de aplicação na tomada de decisões relacionada ao planejamento territorial (COSTANZA; VOINOV, 2004). Estes modelos permitem uma análise da dinâmica da paisagem com base nos princípios da complexidade e na interação de fatores naturais e sociais, como vimos anteriormente, uma necessidade inerente ao estudo integrado da paisagem.

A modelagem dinâmica espacial surge no âmbito dos estudos da complexidade e da revolução tecnológica da informática nos anos 1970 que permitiram a aplicação de autômatos celulares e fractais em modelos espaciais para a simulação de processos

complexos e a geração de cenários que possibilitem *insights* sobre a dinâmica dos sistemas complexos espaciais (COUCLELIS, 1988). Apesar de surgirem no âmbito dos estudos da complexidade, os modelos dinâmicos espaciais empíricos apresentados apresentam com frequência uma baixa reflexão epistemológica, filosófica e política. As primeiras aplicações de tais modelos foram na modelagem do crescimento urbano de Detroit (Estados Unidos) por Tobler (1979). Este trabalho pioneiro foi influenciador do trabalho de Couclelis (1988), também em Geografia Urbana, que foi contemporâneo do desenvolvimento dos estudos da complexidade na computação aplicada e do desenvolvimento dos SIG (BATTY, 2000).

Os autômatos celulares foram desenvolvidos no princípio da computação digital por John Von Neumann e Alan Turing e utilizados em diversas aplicações nos mais diferentes campos científicos (WOLFRAM, 2002). Estes são considerados objetos computáveis (células) cujos estados temporais mudam discretamente e uniformemente em função dos estados das células vizinhas. De modo mais preciso, os autômatos celulares podem ser definidos por quatro características principais (BATTY, 2000): a) são células com relações espaciais de vizinhança e proximidade, b) cada célula apresenta um único estado em cada instante de tempo e o conjunto de estados define os atributos do sistema, c) o estado de cada célula depende dos estados e configurações das células vizinhas, d) existem regras de transição uniformes e locais que controlam as mudanças de cada célula.

Na Figura 2.2 podemos ver dez passos do exemplo de autômato celular mais clássico, o Jogo da Vida criado por John Conway, onde as regras de autômato celular implementadas são as seguintes: a) uma célula viva com menos de dois vizinhos vivos morre de solidão, b) uma célula viva com mais de três vizinhos vivos morre de superpopulação, c) uma célula morta com exatamente três vizinhos vivos se torna uma célula viva e d) uma célula viva com dois ou três vizinhos vivos continua no mesmo estado para a próxima geração. Note-se que padrões complexos são criados a partir das simples regras de transição das células e de uma configuração inicial também bastante simples.

Tais características representam a principal potencialidade para o uso dos autômatos celulares na modelagem de dinâmica espacial de sistemas complexos adaptativos, devido aos padrões complexos que emergem das simples regras de transição, localmente aplicadas de acordo com a configuração dos estados das células vizinhas. Através desta abordagem, os autômatos celulares reproduzem o comportamento dos sistemas complexos adaptativos de geração de estruturas globais emergentes com-

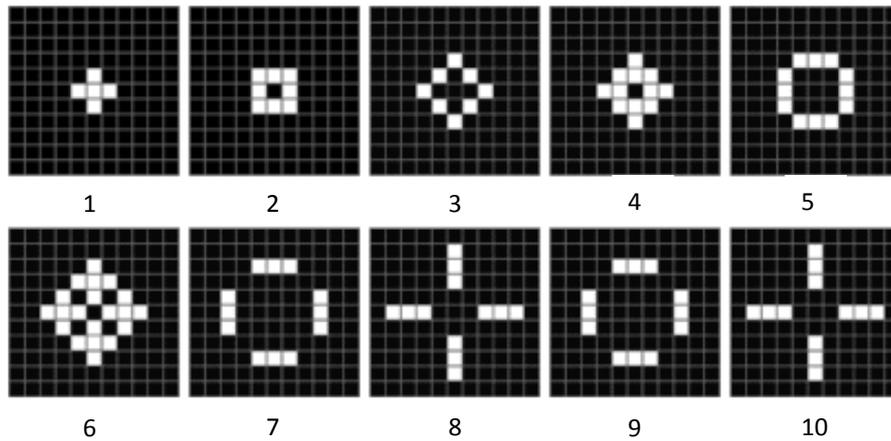


Figura 2.2 - Exemplo de autômato celular simples (1 transição) e determinístico, com dez passos do Jogo da Vida.

plexas a partir de interações locais simples (LEWIN, 2002). A principal vantagem de tal abordagem seria a sua habilidade em reduzir sistemas complexos ao seu essencial, em termo de processos e padrões, sem perder a capacidade de representar a complexidade dos mesmos (BATTY, 2000). Pois, no processo de modelagem de sistemas complexos, não se deve confundir a complexidade com complicação e a busca incessante de variáveis e interações, devendo se buscar os padrões, processos e variáveis determinantes para a compreensão do sistema complexo modelado (COUCLELIS, 1988), um referencial epistemológico também adotado nos estudos da complexidade por Bateson (1972) e Morin (2002). O uso destes modelos computacionais de simulação na modelagem de mudanças de uso e cobertura da terra apresentam em seu desenvolvimento uma gama de combinações de objetivos, concepções teóricas, métodos e técnicas de modelagem que são estudadas por Briassoulis (2000), onde se encontra uma tipologia detalhada de tais modelos.

2.3.1 Perspectivas teóricas no estudo das mudanças de uso e cobertura da terra

A análise das mudanças de uso e cobertura da terra é, desde sua origem, baseada na interdependência de fatores naturais e sociais, os quais necessitam de um tratamento integrado em face da impossibilidade de redução a apenas um tipo de fator neste tipo de questão. Os processos de MUCT são, assim, diretamente relacionados com a abordagem integrada da paisagem, bem como um elemento fundamental para o entendimento da dinâmica da paisagem e seus processos de formação bio-resistáticos (TRICART; JONGE, 1992; AB'SABER, 2003; FREITAS; CARVALHO, 2009).

A análise das MUCT com base em processos econômicos e sociais na formação do capitalismo e do processo de acumulação primitiva de capitais pode ser visto em Marx (1966) que analisou a revolução agrária gerada por processos de desapropriação de pequenos camponeses das áreas de uso comum no Reino Unido entre os séculos XV e XVIII para a formação de um contingente de operários industriais nos centros urbanos. Esta revolução agrária foi baseada em legislações de origem parlamentar como as leis de cercamento dos terrenos comuns (*Bills for Inclosures of Commons*) que, ao expulsar a massa camponesa de suas áreas, instituiu o sistema agrário capitalista de grandes proprietários e de intensificação das atividades agrícolas através da incorporação da ciência e técnica, a qual acarreta em menor uso de mão de obra e de extensão de terras. Como resultado deste processo, houve a conversão das terras cultivadas para os campos na Inglaterra com criação de ovinos para a produção da matéria-prima da indústria de tecidos, muito importante no período. Segundo Marx (1966), o último grande processo de expropriação dos pequenos agricultores foram as “limpezas de fazendas” (*Clearing of Estates*) da Escócia nas primeiras décadas do século XIX, onde em apenas um caso, em cerca de 15 anos, 15.000 camponeses foram substituídos por 131.000 ovelhas. Além destas grandes conversões de usos agrícolas para campos com uso pecuário, a Escócia passou por processo de conversão de campos para florestas utilizadas para a caça esportiva, um esporte nobre, e produtos florestais com fins de lucro. Por fim, Marx (1966) lembra que estas MUCT na Europa apresentam relação direta com o desmatamento no período de colonização das Américas com as mesmas origens nos processos de formação do sistema mundial capitalista.

O estudo dos fatores condicionantes das mudanças de uso e cobertura da terra é uma das principais motivações deste campo da ciência, sendo que Geist e Lambin (2001) realizaram uma meta-análise de pesquisas em todos continentes das causas relacionadas ao desmatamento de florestas tropicais, a qual pode ser generalizada e adaptada para diferentes tipos de mudanças e paisagens. Tais autores realizaram uma divisão do complexo conjunto de ações, agentes, fatores e escalas associados a tal processo em três agregados de causas próximas, subjacentes e outras, relacionadas a diferentes conjuntos de variáveis. As causas próximas do processo de desmatamento são constituídas pelas atividades antrópicas que afetam diretamente o ambiente na escala local, as quais foram distinguidas em três categorias: expansão agrícola, extração madeireira e expansão da infraestrutura. Já as causas ou fatores subjacentes são processos sociais de um complexo conjunto de variáveis sociais, políticas, econômicas e culturais que constituem o sistema de relações entre natureza e sociedade e podem operar em nível local, regional, nacional ou global. As outras causas se referem aos

fatores ambientais de predisposição (como potencialidades paisagísticas), fatores bi-físicos (como desastres naturais, secas e inundações) e eventos sociais (como guerras e crises socioeconômicas); enquanto os primeiros são moldadores das mudanças, os outros dois são fatores catalíticos que levam a drásticas mudanças de uso e cobertura da terra, sendo que todos operam em diferentes níveis escalares.

Uma série de teorias de mudanças de uso e cobertura da terra já foi apontada na literatura, os quais buscam captar os principais padrões e processos das diferentes formas de ocupação e utilização das terras no mundo. Os três principais modelos teóricos preocupados com a definição dos padrões e processos de mudanças de uso e cobertura da terra e suas principais tendências de desenvolvimento são: degradação, extensificação e intensificação.

O modelo teórico de degradação segue o princípio de ideias (neo)malthusianas a respeito da evolução da paisagem de acordo com o aumento populacional (pressão demográfica) e a exploração de recursos naturais para a satisfação das necessidades da sociedade (MORTIMORE, 1993). Os processos de degradação ambiental, gerados basicamente a partir do aumento da densidade populacional, gerariam um caminho de degradação do solo e da cobertura da terra nas mais diversas escalas. A principal conversão relacionada com a degradação é o desmatamento e avanços da fronteira agrícola sem a preocupação com o manejo dos agroecossistemas e a conservação dos ecossistemas naturais, com conseqüências de caráter histórico aos níveis dos ecossistemas e do sistema terrestre global (CHAPIN III et al., 2002). A permanente ou longa conversão das florestas para agroecossistemas acarreta na queima ou retirada da maior parte da biomassa, o que leva a grandes perdas de carbono, nitrogênio e outros nutrientes com impactos globais ao sistema terrestre. Ocorre ainda a perda de biodiversidade, em especial das florestas tropicais, e desequilíbrios locais e regionais nos ecossistemas oriundos do processo de fragmentação da paisagem.

O modelo teórico de extensificação busca representar o processo de aumento de produção (ou a tentativa de aumentá-la) pela extensão da área cultivada, mantendo ou reduzindo os níveis de entrada por unidade de área (ERENSTEIN, 2006). Este processo assume, em sua maior parte, a condição de uma modificação de uso e cobertura da terra com a geração de um padrão de uso de campos nativos, ambientes semi-áridos e savanas para atividades pecuárias de forma extensiva, com níveis baixos de tecnologia e sem cuidados com o manejo de tais ecossistemas (PINTO-CORREIA; MASCARENHAS, 1999). A modificação induzida pelo uso extensivo de ecossistemas de fitofisionomia herbácea e arbustiva para atividades pecuárias permite considerar

esses ecossistemas mantidos em estado de não-equilíbrio pela interação de fatores naturais e antrópicos (CHAPIN III et al., 2002). As formas rudimentares de manejo de tais ecossistemas, principalmente com queimadas e pastoreio excessivo, mantêm o estágio de sucessão e alteram os processos ecossistêmicos. Isto leva à redução da fertilidade e produtividade dos solos, problemas de retenção de umidade e alterações no balanço regional de gases-traço.

A teoria intensificação do uso da terra é originado no trabalho de Boserup (1965) que busca a compreensão da relação entre a produção de alimentos e o crescimento populacional sob um ponto de vista crítico à interpretação (neo)malthusiana. O processo de intensificação é visto como a mudança gradual para padrões de uso da terra que permitem o cultivo mais frequente da terra do que em estágios iniciais, o que se reflete no aumento da produção agrícola por unidade de área. Este processo pode ser subdividido em dois tipos complementares: a intensificação do uso da terra, com o aumento da frequência dos cultivos por unidade de área, e a intensificação tecnológica com o aumento do uso de capital, técnica e trabalho por cultivo e unidade de área. Assim, o incremento populacional leva a sistemas de uso da terra mais intensivos com o aumento da produtividade por unidade de área, do trabalho despendido na produção e da inovação das técnicas de cultivo (mecanização, fertilizantes, herbicidas, inseticidas, rotação de culturas e rebanhos, sistemas de alimentação de rebanhos, etc.) (BOSERUP, 1965; ERENSTEIN, 2006). Apesar do sucesso obtido pela intensificação do uso da terra, do ponto de vista da produção de alimentos, este processo afeta diretamente o equilíbrio dos ecossistemas locais e do sistema terrestre como um todo, do ponto de vista ambiental (MATSON et al., 1997; CHAPIN III et al., 2002). Entre os principais impactos identificados, estão alterações nos ciclos biogeoquímicos globais, redução da proteção do solo pela matéria orgânica, alterações nos ciclos globais de nutrientes, do nitrogênio e do carbono, aumento das emissões de gases-traço e outros que assumem um papel importante nas mudanças ambientais globais e na degradação dos ecossistemas locais e regionais.

Estes modelos teóricos apresentam relação direta com os paradigmas de desenvolvimento da sociedade e do sistema socioeconômico em nível global como mostrou o relatório do Clube de Roma dos anos de 1970 quanto aos limites ao ritmo de crescimento das sociedades capitalistas atuais relativos a questões como a produção de alimentos, recursos não-renováveis e a degradação ambiental (MEADOWS et al., 1972). Este relatório foi baseado na teoria de sistemas dinâmicos e num modelo computacional para a geração de cenários de desenvolvimento da sociedade mundial entre 1900 e 2100 de acordo com o padrão de desenvolvimento do capitalismo em escala global.

Apesar de uma abordagem calcada nos pressupostos malthusianos da futura falta de alimentos e de terras agricultáveis, sem uma análise mais profunda das relações sociais e questões ambientais envolvidas, este relatório permitiu um primeiro sinal de alerta para os tomadores de decisão em nível global a respeito do grau de degradação dos ecossistemas nas mais diversas escalas oriundas do modelo de desenvolvimento socioeconômico atual das sociedades (MORIN, 2002).

Tais modelos teóricos das MUCT também servem como base para a geração de cenários de prognose aplicados ao planejamento territorial, apesar de muitos casos onde ocorre um fraco embasamento teórico na implementação dos modelos para a geração dos cenários. Esta questão afeta também os estudos exploratórios a respeito dos fatores socioambientais condicionantes das MUCT, onde os modelos teóricos são ainda pouco explorados. Estudos neste sentido vem incorporando diretamente múltiplos modelos teóricos de MUCT através do uso conjugado de dados geoespaciais e técnicas de análise estatística multivariada e análise espacial de fatores socioambientais relacionados com as MUCT (HIETEL et al., 2004; BATISTELLA; VALLADARES, 2009; FREITAS et al., 2013). Esta abordagem aplicada em modelos para a geração de cenários de MUCT apresenta potencialidade para a representação de fenômenos complexos de MUCT que na realidade apresentam uma intrínseca gama de processos de MUCT relacionados com os modelos teóricos.

2.3.2 Modelos computacionais de mudança de uso e cobertura da terra

A seguir, veremos alguns exemplos práticos de modelos computacionais de mudança de uso e cobertura da terra, com ênfase em modelos espaciais dinâmicos probabilísticos e baseados em autômatos celulares. Diversas técnicas de modelagem são utilizadas, sendo estas as principais, em conjunto com modelos baseados em agentes (BRIASSOULIS, 2000).

A estrutura de tais modelos é basicamente a mesma e é composta de quatro procedimentos principais: a) a mensuração de demandas de transição com base nos dados multitemporais de uso da terra; b) a geração de mapas de probabilidade de transição ou de uso da terra a partir de variáveis socioambientais; c) a alocação espacial das transições através de algoritmos iterativos de cunho determinístico ou estocástico com base em procedimentos ordenados de acordo com regras de autômato celular ou em ajuste de demandas por processos de competição de classes para cada célula; d) calibração e validação dos resultados dos modelos com a devida parametrização; e) geração de cenários de prognose de MUCT com base nos resultados da parametrização.

2.3.2.1 Modelos baseados em autômatos celulares

Os modelos de mudanças de uso e cobertura da terra baseados em autômatos celulares são os mais tradicionais, como vimos anteriormente. A partir daí, uma grande variedade de plataformas de modelagem computacional com autômatos celulares foram desenvolvidas. Aqui serão focadas duas plataformas: DINAMICA EGO e MOLAND.

A plataforma de modelagem ambiental DINAMICA EGO é um modelo de autômatos celulares para a simulação estocástica em múltiplos passos de tempo, originalmente arquitetado para a simulação da dinâmica da paisagem na fronteira agrícola da Amazônia (SOARES-FILHO et al., 2002). Apresenta-se como um *software* de distribuição livre na *internet*, porém de código-fonte fechado, o que obriga aos usuários a trabalharem a partir das funções e modelos disponibilizados pelos desenvolvedores do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais. Com o desenvolvimento do Projeto DINAMICA, uma série de aplicações da modelagem dinâmica espacial foram implementadas para a modelagem MUCT em paisagens urbanas (ALMEIDA, 2003) e em paisagens de floresta tropical (MAS; SANDOVAL, 2011), o estabelecimento de cenários de conservação na Bacia Amazônica (SOARES-FILHO et al., 2006) e a modelagem para a geração de cenários das metas de desmatamento previstas pelo governo brasileiro para o ano de 2020 para a Amazônia (NEPSTAD et al., 2009).

Em relação à estrutura de modelagem, a entrada das variáveis do modelo é composta por dados matriciais como as classificações multitemporais de uso e cobertura da terra e as variáveis espaciais responsáveis pelo resultado final das simulações (MDE e produtos derivados, mapas temáticos, mapas de distâncias e custo, entre outros). Existe também a possibilidade de incorporação de variáveis dinâmicas atualizadas pelo próprio modelo a cada passo da simulação, tipicamente de distâncias a classes de uso e cobertura da terra.

O método de implementação do modelo DINAMICA é composto de uma série de operações e algoritmos separados nas seguintes fases complementares (SOARES-FILHO et al., 2002):

- cálculo das matrizes de transição entre os mapas de uso e cobertura da terra inicial e final em um único e múltiplos passos de tempo;
- cálculo de intervalos para categorização de variáveis contínuas utilizadas no modelo, através de uma adaptação do método de (BONHAM-CARTER,

1994), devido ao método de pesos de evidência apenas utilizar variáveis categóricas;

- cálculo dos coeficientes dos pesos de evidência, baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes (BONHAM-CARTER, 1994), para cada tipo de transição de uso e para cada variável relacionada. Outros métodos podem ser usados no cálculo dos coeficientes como a regressão logística (SOARES-FILHO et al., 2002) regressão espacial (SOARES-FILHO et al., 2008) e redes neurais (ALMEIDA et al., 2008);
- análise da correlação par a par entre as variáveis para seleção das variáveis a serem utilizadas nas diferentes transições, com a utilização do critério de multicolinearidade e implementada através dos testes de Cramer, Contingência, Entropia e Índice de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty*);
- configuração e calibração da simulação com ajuste dos parâmetros de *patcher* (formação de manchas), *expander* (expansão de manchas pré-existentes), área média, variância e isometria das manchas para cada tipo de transição. As saídas desta fase são os mapas de probabilidade de transição e os mapas de simulação para cada passo de tempo;
- validação dos resultados da simulação com o uso da adaptação do método baseado na similaridade *fuzzy*, denominado como cálculo da similaridade recíproca (*Calc Reciprocal Similarity*), que emprega janelas de múltipla resolução com uma função de decaimento exponencial com a distância para a comparação entre os mapas iniciais, finais e simulados de uso e cobertura da terra.

Outra plataforma de modelagem urbana e regional da dinâmica de uso da terra baseada em autômatos celulares é o MOLAND (*Monitoring Land Dynamics*) de Engelen et al. (2007). Esta plataforma de modelagem foi atualmente incorporada ao sistema de suporte à decisão espacial conhecido como GEONAMICA (HURKENS et al., 2008), um software comercial e de código-fonte fechado, desenvolvido pela empresa *Research Institute for Knowledge Systems*.

Esta plataforma acopla modelos em três níveis escalares: a) global (uma região única), b) regional (unidades administrativas) e local (células ou pixels). No nível regional, a demanda em nível global é dividida pelas regiões com base em quatro sub-modelos: a) regional econômico (produção e emprego por setor econômico), b)

regional demográfico (crescimento populacional por faixas de população), c) sub-modelo de transportes (fluxos de pessoas e bens, infraestrutura e acessibilidade) e d) sub-modelo de áreas protegidas (reservas naturais e áreas de recreação).

Já no nível local, as demandas regionais são alocadas por meio de regras de autômato celular baseadas no potencial de transição das células com tamanho variando de 0,25 a 4 hectares. Este potencial de transição é baseado nas funções de uso de cada célula determinadas por quatro elementos: a) a aptidão física (preparada em SIG com base no cruzamento de fatores como MDE, declividade, capacidade agrícola, poluição sonora, qualidade dos solos e do ar), b) zoneamento ou aptidão institucional (planos diretores municipais e outros zoneamentos), c) acessibilidade (baseada na distância e qualidade de infraestrutura a cada nó e ponto da rede viária) e d) dinâmica em nível local (calculada numa vizinhança de raio com 8 células com base na competitividade, repulsão e atração de usos existentes neste raio). Do ponto de vista da modelagem de autômatos celulares, a principal contribuição do MOLAND se refere ao uso de técnicas de auto-calibração do modelo ainda em protótipo e com uma interferência ainda substancial por parte do especialista.

2.3.2.2 Modelos probabilísticos de alocação espacial

A modelagem das mudanças de uso da terra na plataforma CLUE (*Conversion of Land Use and its Effects*) é baseada em relações empiricamente quantificáveis entre o uso da terra e os fatores condicionantes (*driving factors*) em combinação com modelagem dinâmica (simulação computacional). Esta plataforma é atualmente desenvolvida pelo *Institute for Environmental Studies* (IVM) da Universidade de Amsterdam e apresenta distribuição livre na internet, porém tem código-fonte fechado, o que restringe os usuários a trabalhar apenas com o ajuste dos parâmetros originais do modelo. O modelo CLUE foi originalmente desenvolvido para escalas continentais e nacionais, de resolução espacial grosseira, com cada célula associada a diferentes porcentagens de classes de uso da terra e diretamente relacionada com uma base de dados ambientais e sociais (VERBURG, 2000; AGUIAR, 2006).

Para a aplicação em escalas mais detalhadas, de cunho regional, foi desenvolvido o CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent*), em que a principal diferença se refere à representação computacional dos dados geoespaciais, com pixels de resolução fina representando apenas uma classe de uso dominante, portanto sem porcentagens como o CLUE (VERBURG et al., 2002). A estrutura do modelo CLUE-S é subdividida em dois módulos complementares: a) um módulo de demanda, de natureza quantitativa, onde se realiza o cálculo das áreas

de mudanças de cada classe de uso e cobertura em níveis agregados (e.g., divisões político-administrativas, setores censitários ou células); b) um módulo de alocação de mudanças, de natureza espacial e multi-escalar, em que são espacializadas as mudanças calculadas no primeiro módulo (VERBURG et al., 2002).

O módulo de demanda possibilita diferentes abordagens metodológicas desde as mais simples (superfícies de tendência), passando pela construção empírica de cenários, até as mais complexas (modelos econômicos complexos). O cálculo da demanda é, em última análise, definido pela decisão do modelador e muda de acordo com as diferentes áreas, variáveis e mudanças de uso e cobertura da terra estudadas (VERBURG et al., 2002; AGUIAR, 2006). As variáveis determinantes usualmente utilizadas em tal módulo têm natureza socioeconômica e de macroescala, enquanto no módulo de alocação espacial são utilizadas variáveis de características espaciais relacionadas à microescala; e a retroalimentação entre estes dois níveis representa a característica multiescalar durante o processo de modelagem (VERBURG et al., 2004). Esta característica possibilita a separação no processo de modelagem das causas próximas (caráter micro) e das causas subjacentes (caráter macro) identificadas pelos modelos teóricos de mudanças de uso da terra (GEIST; LAMBIN, 2001).

O módulo de alocação espacial se baseia na integração de: a) análise empírica, b) análise espacial e c) modelagem dinâmica. A análise empírica, parte inicial do processo de modelagem, revela as relações entre a distribuição espacial e a série de variáveis das mudanças de uso usados no modelo. A análise espacial é baseada na regressão logística *stepwise* (HOSMER; LEMESHOW, 2000) que é usada para indicar a probabilidade de uma célula assumir um tipo de uso a partir da data inicial a ser modelada, dado um conjunto de fatores condicionantes de mudança. A influência da autocorrelação espacial é minimizada pela realização da regressão em amostras de pixels aleatórios num raio de distância mínimo estipulado pelo modelador. (VERBURG et al., 2002)

A modelagem dinâmica das mudanças de uso da terra começa com a definição de regras de decisão baseada em conhecimento do usuário para a elasticidade dos tipos de mudança de uso da terra. O parâmetro de elasticidade das classes de uso é definidos entre o intervalo de 0 a 1; como exemplo as unidades de conservação, que não apresentam mudanças possíveis, tem valor 1 e as áreas agrícolas, que podem sofrer todos os tipos de mudanças possíveis, tem valor 0. Há a necessidade de um cuidado especial na definição das regras de decisão, pois essas alteram sensivelmente os resultados do modelo. A continuação do processo de modelagem dinâmica envolve a alocação

competitiva das mudanças que realiza a alocação espacial dos valores produzidos no módulo de demanda. Esta etapa é composta por cinco passos: a) exclusão de áreas de elasticidade igual a 1, b) cálculo da probabilidade total, c) alocação preliminar com valores iguais da variável de iteração, d) áreas totais alocadas são comparadas com as demandas calculadas e ocorre o aumento de valores da variável iterativa nos casos de tipos de uso com áreas menores do que a demanda calculada e e) passos de 2 a 4 são repetidos até atingir os valores calculados no módulo de demanda. (VERBURG et al., 2002)

Uma abordagem metodológica baseada na integração de modelos globais de desenvolvimento socioeconômico com modelos locais de uso da terra foi realizada na Europa para geração de cenários entre os anos 2000 e 2030 com enfoque em espaços rurais (VERBURG et al., 2008). Nos níveis global e regional foram conjugados um modelo econômico global e um modelo integrado de mensuração para a quantificação das demandas de mudanças de uso da terra. Estas demandas foram repassadas ao modelo CLUE-S, responsável pela alocação espacialmente explícita na escala da paisagem, onde foi utilizada uma grade com resolução de 1 x 1 km. As variáveis utilizadas nos modelos globais foram de caráter econômico, político, tecnológico e político, enquanto para a alocação espacial no módulo espacial foram de acessibilidade, solos, geomorfologia, clima, densidade demográfica e altitude.

Outra plataforma em desenvolvimento pelo Centro de Ciências do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), baseada até o momento no modelo probabilístico CLUE e CLUE-S, é a LuccME (AGUIAR et al., 2011), uma extensão do ambiente de programação TerraME (CARNEIRO, 2006) que suporta modelos espaciais dinâmicos baseados em autômato celular, em agentes e de rede. Este ambiente de programação permite a construção de modelos de MUCT contínuos (como o CLUE) e discretos (como o CLUE-S) baseados em espaços celulares com diferentes atributos sociais e ambientais. Apresenta uma estrutura baseada, como os anteriores, em módulos de cálculo de potencial (regressão linear, espacial global e logística), de cálculo linear de demandas fornecidas pelo usuário e de alocação espacial probabilística de acordo com os princípios de competitividade das células e realização das demandas.

2.3.2.3 Modelos baseados em agentes

Os modelos baseados em agentes de mudanças de uso e cobertura da terra são compostos por dois componentes principais: a) um modelos celular que representa a paisagem estudada e pode ser representado por autômatos celulares, modelos es-

paciais de difusão ou modelos markovianos; b) um modelo baseado em agentes autônomos que representa a tomada de decisão social (BERGER et al., 2002). Estes dois componentes são integrados através da especificação das interdependências e retroalimentações *feedbacks* entre os agentes e seu ambiente, permitindo aplicações em pesquisas relacionadas com a complexidade das mudanças de uso e cobertura da terra. Nos sistemas multi-agente, as propriedades globais do sistemas como um todo emergem do comportamento individual dos agentes baseados em informação local (PARKER et al., 2003).

A modelagem baseada em agentes de mudanças de uso e cobertura da terra envolve uma série de complexidades muito difíceis de tratar do ponto de vista computacional. No caso, a modelagem de um sistema ambiental altamente complexo e dinâmico que interage de forma complexa e dinâmica e é composto por agentes de tomada de decisão também altamente complexos e dinâmicos. Assim, esta abordagem metodológica de modelagem apresenta sérios problemas de implementação, onde seus benefícios muitas vezes não superam a complexidade computacional requerida. (COUCLELIS, 2002)

Outro problema de implementação envolve a necessidade de dados detalhados a respeito dos agentes e suas ações que se apresentam no nível micro. A necessidade de inventários e pesquisas de campo detalhadas com questionários e a participação das comunidades estudadas possibilita um relacionamento profundo com o pesquisador, porém acaba por relegar a aplicação de tais estudos a escalas locais de análise e também à incorporação apenas de causas próximas das mudanças. O uso de tais modelos em estudos regionais passa a ser um grande desafio em sua implementação e apenas recentemente vem sendo desenvolvidos. Quando são realizados em tais escalas, ainda ocorrem problemas de implementação para a caracterização das causas subjacentes das mudanças que ocorrem em níveis hierárquicos superiores (global, nacional e regional) e não podem ser diretamente incorporados nos modelos por serem baseados em atores externos às áreas estudadas. (CASTELLA; VERBURG, 2007)

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as características gerais da área de estudo no Alto Uruguai, os dados utilizados neste trabalho e a abordagem metodológica desenvolvida neste estudo. A metodologia foi baseada nas etapas de organização e processamento das variáveis paisagísticas, no zoneamento hierárquico da paisagem e na modelagem de mudanças de uso e cobertura da terra com geração de cenários de prognose. A estrutura geral da metodologia é representada de forma esquemática por um fluxograma que pode ser visto na Figura 3.1 e apresenta os dados de entrada, produtos gerados e os principais procedimentos realizados (classificação multi-temporal de uso e cobertura da terra, zoneamento hierárquico da paisagem e modelagem espacial dinâmica da paisagem).

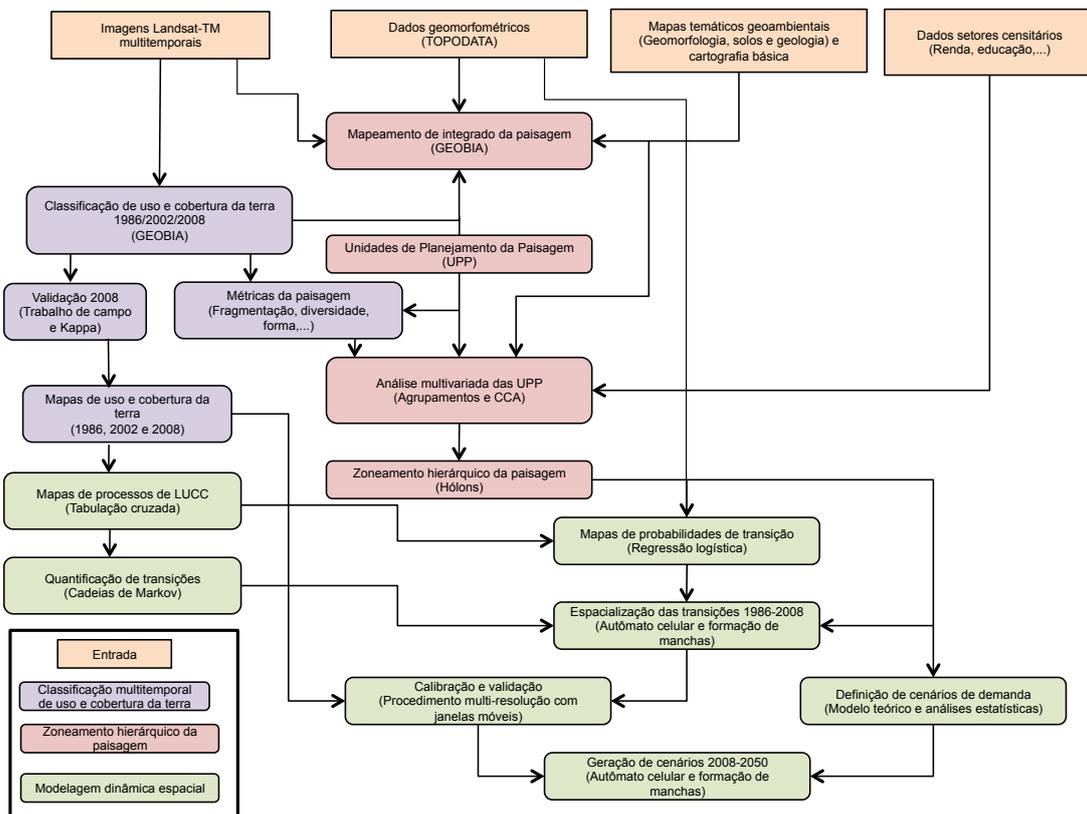


Figura 3.1 - Fluxograma representando a estrutura geral da metodologia adotada neste trabalho.

3.1 Área de estudo

A área estudada (Figura 3.2) é uma região com 18 municípios localizados no Alto da Bacia do Rio Uruguai, nos limites estaduais brasileiros do Rio Grande do Sul

e Santa Catarina, com uma área aproximada de 12.000 quilômetros quadrados. Os principais municípios são Lages, um centro regional urbano-industrial e de serviços, e Campos Novos, centro de produção agrícola de grande porte de soja, trigo e outros produtos, ambos no Estado de Santa Catarina. O restante dos municípios apresentam características rurais com um misto de agricultura de grande porte e agricultura de cunho familiar, com urbanização e industrialização mais ou menos significativa. Esta área apresentou nas últimas décadas um rápido e amplo processo de mudanças de uso e cobertura da terra com destaque aos processos de expansão da silvicultura e da agricultura de grande porte e, como contrapartida, de degradação das matas e campos nativos.

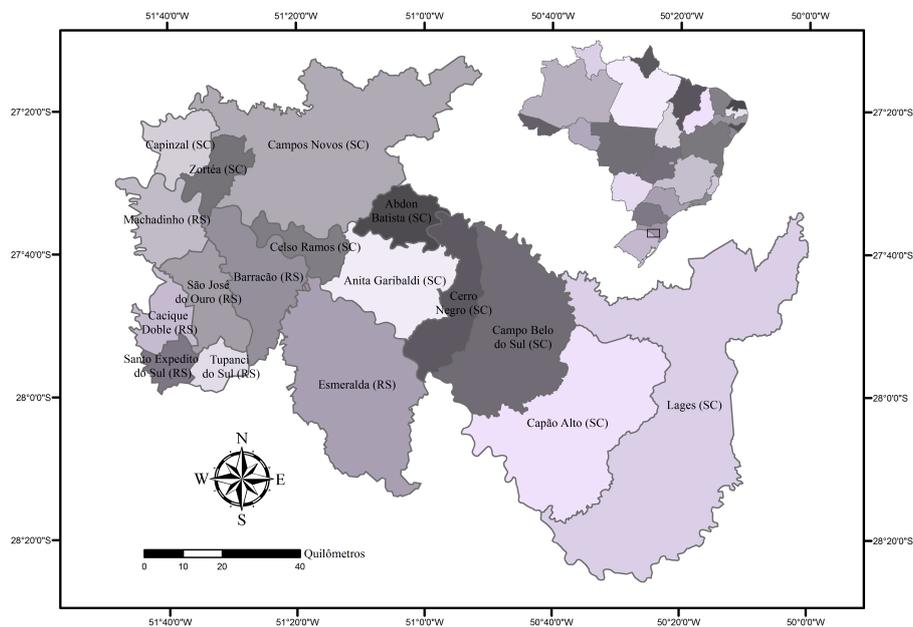


Figura 3.2 - Localização da área de estudo na Região Sul do Brasil com a divisão municipal.

Apresenta suporte geológico de derramamentos ácido-básicos de basaltos oriundos de vulcanismo relacionado à separação do continente de Gondwana em torno de 150.000 A.P., considerada a maior atividade vulcânica no mundo. Tais camadas de atividade vulcânica são acompanhadas de camadas de arenito inter-trápico testemunhos do clima árido do Deserto de Botucatu, em especial nas áreas de menor altitude (KAUL, 2004). É uma área típica do Planalto Basáltico Meridional com altitudes entre 600 e 1200 metros, com altos platôs com superfícies de aplainamento e fundos de vales encaixados com grande amplitude altimétrica nos principais rios (Canoas e Pelotas).

Apresenta drenagem com claro controle estrutural de acordo com os falhamentos na direção NE-SW, sendo estes rios principais utilizados para barragens hidrelétricas de pequeno e médio porte (Machadinho, Campos Novos e outras) devido ao potencial de encaixamento e amplitude altimétrica altas. Tais barragens alagaram especialmente áreas de floresta de araucária e expulsaram agricultores familiares que formaram no fim dos anos de 1970 o Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB) a partir da reação às hidrelétricas de Itá e Machadinho no Rio Grande do Sul que fazem parte do “Projeto Uruguai” com a instalação de 25 hidrelétricas (REIS, 2008).

O clima da área de estudo (com base na estação meteorológica de Lages) é Cfb, mesotérmico úmido com precipitação média anual em torno de 1500 milímetros, constantemente úmido com verão brando e com quatro estações bem definidas. Caracterizada por grande variação térmica entre 7° e 26° centígrados de média mínima e máxima mensais e chuvas bem distribuídas ao longo do ano com média de 125 milímetros. Apresenta, ainda, a ocorrência de geadas e neve nos meses de inverno, em especial nos campos nativos dos altos platôs. O diagrama ombrotérmico na Figura 3.3 apresenta de forma sintética os principais dados climáticos da área de estudo.

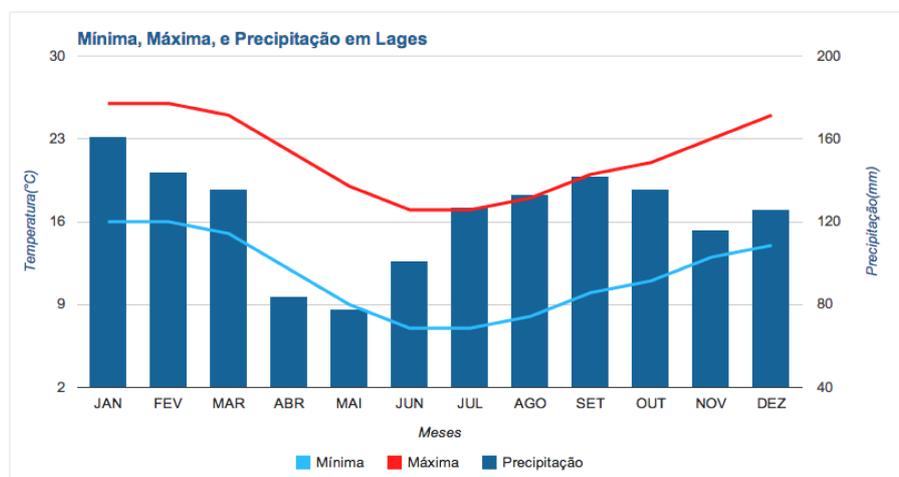


Figura 3.3 - Diagrama ombrotérmico da estação meteorológica de Lages-SC, com dados médios de precipitação e temperaturas máximas e mínimas a partir de série histórica de 30 anos.

Fonte: (CLIMATEMPO, 2000).

Localizada numa área de transição (ecótono) entre o Bioma Mata Atlântica e seu domínio fitogeográfico da Floresta Ombrófila Mista (conhecida também como Floresta de Araucária) e o Bioma Pampa dos campos de cima da serra (campos de altitude).

A Floresta de Araucária forma mosaicos com os campos de altitude (subdivididos em campo sujo e campo limpo) que apresentam predomínio de espécies gramíneas, herbáceas, ciperáceas e arbustos, principalmente da família Asteraceae (*Baccharis gaudichaudiana*, *B. uncinella*) e gravatás (*Eryngium sp.*; Apiaceae), com elevado grau de biodiversidade (OVERBECK et al., 2009). As alterações climáticas, seguidas por transformações na vegetação, durante o período Quaternário mostram: climas secos e mais frios de 18.000 até 4.000 A.P. com vegetação dominada por campos, um aumento na quantidade e frequência de precipitações entre 4.000 a 1.500 A.P. com o início da expansão da Floresta de Araucária ao longo dos rios e as condições climáticas atuais a partir de 1.500 A.P. com a franca expansão da Floresta de Araucária também sobre áreas elevadas (BEHLING et al., 2009). Desta forma, apenas ocorreu o desenvolvimento das matas nos vales úmidos dos cursos d'água das vertentes do planalto, o que sugere a presença de uma paisagem originalmente herbácea em processo de evolução florestal (VERDUM, 2004).

Em relação ao solo e ao uso da terra, apresenta dinâmicas próprias de ocupação das terras, sobre variados agrupamentos de solos, desde neossolos litólicos, latossolos e nitossolos nos altos platôs, até cambissolos e neossolos litólicos nas áreas mais movimentadas de fundo de vale. Originalmente ocupada por indígenas, principalmente da etnia Kaingang, que sofreram violento processo de expropriação de terras e dizimação cultural, sendo hoje restritos na área à Terra Indígena de Cacique Doble, conta também com a presença de descendentes de escravos e mestiços, conhecidos como “caboclos” (RIBEIRO, 2006). A formação do espaço sul rio-grandense tem por base a luta e ocupação territorial do século XVIII até fins do século XIX com base em grandes propriedades cedidas pelo governo (sesmarias) que, nesta região, eram localizadas nas áreas elevadas de campos e usados pela pecuária extensiva (RIBEIRO, 2006), fazendo parte da rota de gado dos tropeiros entre a região das Missões e o interior de São Paulo. A partir de fins do século XIX, ocorre o marco que é a colonização de origem europeia (em especial alemã e italiana) que traz consigo novas frentes e formas de ocupação baseadas na pequena propriedade (RIBEIRO, 2006), localizadas nas áreas desocupadas de serra com mata. O início da colonização não atinge tanto a Bacia do Rio Uruguai, porém a partir do segundo fluxo imigratório (início do século XX) as partes do Alto Uruguai passam a receber as “novas colônias” (CONTERATO; SCHNEIDER, 2006). Em meados do século XX, abriu-se na região uma fronteira agrícola com intensivos desmatamentos das matas de Araucária e degradação dos campos da Bacia com fins de uso agrícola e de extração de madeira. Mais recentemente, a área sofre um processo de expansão da silvicultura com a conversão de campos de altitude para plantações extensivas de *Pinus sp.* com

fins industriais. Estas plantações se apresentam como densas monoculturas, pois não permitem o crescimento de plantas no sub-bosque devido à falta de luz, não sendo sistemas silvopastoris em que parte da composição original de espécies permanece (OVERBECK et al., 2009). Em geral, atualmente, a região apresenta cobertura vegetal com alto grau de fragmentação que acarreta em problemas de biodiversidade, em especial referente às matas de Araucária (CARLUCCI et al., 2011).

3.2 Processamento de variáveis paisagísticas

Nesta seção, abordam-se os materiais utilizados e o processamento das variáveis socioambientais utilizadas em todo estudo (Tabela 3.1). Mais adiante são detalhadas as metodologias utilizadas para a classificação de uso e cobertura da terra baseada em imagens de satélite multitemporais, a geração de variáveis geomorfométricas e o cálculo de métricas de paisagem com base nos dados de uso e cobertura da terra. Foram empregadas, no presente trabalho, variáveis físicas (mapeamentos temáticos geoambientais e atributos geomorfométricos), ecológicas (classificação multitemporal de uso e cobertura da terra e métricas de paisagem) e sociais (dados censitários), além da base cartográfica, inicialmente processadas e organizadas em ambiente de SIG. Tais dados foram compatibilizados frente aos diferentes projeções, escalas e formatos em que se encontram originalmente. No caso, utilizou-se uma padronização cartográfica na projeção UTM, datum WGS-84 e zona 22-Sul, com uma resolução espacial de 30 metros que é compatível com a escala de semi-detulhe de 1:100.000.

Tabela 3.1 - Variáveis físicas, ecológicas e sociais utilizadas neste estudo.

<i>Variáveis</i>	<i>Equações</i>	<i>Unidades/Tipo</i>
Geomorfologia (4 unidades)		Catégorica (binária)
Solos (7 grupos)		Catégorica (binária)
Uso e cobertura da terra (7 classes)		% de área da classe
Elevação		Metros
Declividade		Graus
Relevo local		Metros
Rugosidade superficial		-
Área de mancha		Metros quadrados
Número de manchas		Contagem
Densidade de manchas	$(NP/ TLA) \times 100$	Contagem/ Km^2
Densidade de bordas	(TEL/ TLA)	Metros/ Km^2
Índice de maior mancha (LPI)	(ALP/ TLA)	m^2
Dimensão fractal	$2\log(p)/ \log(a)$	m^2
Índice de forma	$p/ 2\sqrt{\pi a}$	m^2
Razão perímetro-área	(p/ a)	-

(Continua)



Tabela 3.1 - Continuação

<i>Variáveis</i>	<i>Equações</i>	<i>Unidades/Tipo</i>
Tamanho efetivo de mancha (MESH)	$\sum a^2 / TLA$	Hectares
Índice de retalhamento (SPLIT)	$TLA / \sum a^2$	-
Distância entre manchas (ENN)		<i>m</i>
Renda nominal		Reais(\$)
Renda média		Reais(\$)
Média de anos de estudo		Contagem
Taxa de alfabetização		%
Densidade populacional		<i>Km²</i>
Razão de dependência		%
Residentes por domicílio		Contagem
População menor de 15 anos		%
População de 15 a 64 anos		%
População acima de 64 anos		%

Abreviaturas: *NP* é o número de manchas, *TLA* é a área total de cada unidade de paisagem, *TEL* é o comprimento total das bordas, *ALP* é a área da maior mancha da unidade de paisagem, *p* é o perímetro e *a* é a área de cada fragmento de cobertura vegetal.

3.2.1 Base cartográfica, mapas geoambientais e dados sociais

A base cartográfica foi composta por mapeamento topográfico na escala de 1:50.000 disponível em formato digital (*Shapefile*) que cobre toda área de estudo. Por sua vez, os dados censitários do ano 2000 disponibilizados por IBGE (2000), bem como os setores censitários rurais e urbanos, foram devidamente processados em ambiente de SIG com adequação de projeção cartográfica e de topologia.

Os mapas geoambientais que não estavam disponibilizados em formato de SIG foram georreferenciados e usados para visualização e preenchimento da tabela de atributos, de acordo com adaptações das legendas das diversas fontes e escalas usadas (Tabelas 3.2 e 3.3). Nesse caso foi necessário realizar uma adaptação das legendas dos mapeamentos geomorfológico e pedológico com a definição de 4 unidades geomorfológicas e 7 grupos de associações de solos. O mapeamento geológico (RADAMBRASIL, 1986; CPRM, 2005) e hidrogeológico (CPRM, 2005a) foi utilizado apenas como referência, e não como uma variável paisagística, em vista da grande homogeneidade do suporte geológico na área de estudo.

No caso da geomorfologia, utilizaram-se na porção do estado do Rio Grande do Sul as folhas do mapeamento geomorfológico do IBGE (2003) na escala 1:250.000, enquanto em Santa Catarina foram usadas folhas do RADAMBRASIL (1986) na escala 1:1.000.000. As unidades geomorfológicas foram assim definidas (Tabela 3.2): a) platôs côncavo-convexos suave-ondulados (GEOM-1), b) modelado côncavo-convexo de dissecação fraca a média

(GEOM-2), c) modelado côncavo-convexo de dissecação média a forte (GEOM-3), d) modelado tabular de dissecação média a forte (GEOM-4).

Em relação aos solos, foram utilizadas no Rio Grande do Sul folhas do RADAMBRASIL (1986) na escala 1:1.000.000 e em Santa Catarina o mapeamento pedológico na escala 1:250.000 (EMBRAPA, 2005). Já as associações de solos foram classificadas da seguinte forma (Tabela 3.3): a) cambissolos e neossolos litólicos (SOLOS-G1), b) cambissolos, nitossolos e neossolos litólicos (SOLOS-G2), c) nitossolos, cambissolos e neossolos litólicos (SOLOS-G3), d) nitossolos e latossolos (SOLOS-G4), e) cambissolos, latossolos e nitossolos (SOLOS-G5), f) latossolos, nitossolos e cambissolos (SOLOS-G6), g) latossolos (SOLOS-G7).

Tabela 3.2 - Unidades geomorfológicas definidas a partir da adaptação das legendas de IBGE (2003) e RADAMBRASIL (1986).

<i>Unidades geomorfológicas</i>	<i>Abreviatura</i>	<i>Legenda RADAM</i>
Platôs côncavo-convexos suave-ondulados	GEOM-1	Pgu, Pr1 e Dg1
Modelado côncavo-convexo de dissecação fraca a média	GEOM-2	Dc32 e D1
Modelado côncavo-convexo de dissecação média a forte	GEOM-3	Dc42 e Dc43
Modelado tabular de dissecação média a forte	GEOM-4	Dt43, Dt33 e D2

Tabela 3.3 - Unidades pedológicas definidas a partir da adaptação das legendas de EMBRAPA (2005) e RADAMBRASIL (1986).

<i>Unidades pedológicas</i>	<i>Abreviatura</i>
Cambissolos e neossolos litólicos	SOLOS-1
Cambissolos, nitossolos e neossolos litólicos	SOLOS-2
Nitossolos, cambissolos e neossolos litólicos	SOLOS-3
Cambissolos, latossolos e nitossolos	SOLOS-5
Latossolos, nitossolos e cambissolos	SOLOS-6
Latossolos	SOLOS-7

3.2.2 Variáveis geomorfométricas

As variáveis geomorfométricas utilizadas nesse trabalho foram baseadas em dados do Projeto Topodata (VALERIANO; ROSSETI, 2011), que consiste em Modelo Digital de Elevação (MDE) baseado na refinação com tratamento geoestatístico dos dados Shuttle Radar To-

pographic Mission (SRTM) de 3" para 1" (em torno de 30 metros). Foram, ainda, utilizados dados derivados do MDE pelo Projeto Topodata, como declividade e relevo sombreado.

Com base nos dados do Projeto Topodata, foram ainda geradas duas outras variáveis geomorfométricas que são importantes em face das características geomorfológicas da área de estudo. A variável de relevo local baseada na operação de diferença entre duas janelas móveis de tamanho 7×7 pixels com os máximos e de mínimos locais do MDE (EVANS, 1972); e a variável de rugosidade superficial baseada numa janela móvel 7×7 com o desvio-padrão da declividade, devidamente normalizada de 0 a 1 (GROHMANN et al., 2011).

3.2.3 Classificação multitemporal de uso e cobertura da terra

A classificação multitemporal de uso e cobertura da terra foi obtida de imagens Landsat 5-TM (cenas 221/79, 221/80, 222/79 e 222/80) dos anos de 1986, 2002 e 2008, com resolução espacial de 30 metros e com as bandas originais nas faixas do visível (bandas 1, 2 e 3), infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho médio (bandas 5 e 7). Estes dados orbitais foram escolhidos pelas características do referido sensor que permitem o monitoramento e detecção das mudanças de uso e cobertura da terra num período em torno de 25 anos em escala compatível com o estudo em semi-detalle. Na classificação de uso e cobertura da terra foram consideradas as seguintes classes: a) Floresta Ombrófila Mista (FOM), em estágios avançado e médio de sucessão natural; b) campo nativo, utilizado para pecuária extensiva; c) silvicultura, com plantações em especial de *Pinus sp.*; d) agricultura familiar, atividades agropecuárias de semi-subsistência que formam um sistema tradicional de uso da terra heterogêneo com a formação de mosaicos de pastagens, atividades agrícolas, silvicultura e matas em regeneração de pequeno porte; e) agricultura de grande porte, definidas por atividades agrícolas intensivas de alta mecanização e uso de tecnologia para a produção, em especial, de soja, trigo e milho; f) urbano; g) corpos d'água.

Essas imagens foram inicialmente pré-processadas com a correção geométrica com erro inferior a 0.5 pixel usando como referência a base cartográfica na escala 1:50.000 na última data, enquanto as imagens das outras datas foram devidamente registradas com base nesta. As imagens georreferenciadas foram processadas para a geração de atributos espectrais por técnicas de Análise de Componentes Principais (ACP), considerando as primeiro quatro componentes do sistema, e de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), com as frações de vegetação, solo e água (SHIMABUKURO; SMITH, 1991). Além destes atributos espectrais, foi utilizada, como dado auxiliar, a variável geomorfométrica de relevo local que apresenta relação direta com a distribuição espacial de algumas classes de uso e cobertura da terra na área de estudo.

Estes dados serviram como base para a classificação orientada a objetos gerada em ambiente de GEOBIA através da segmentação multi-resolução e do uso de regras hierárquicas

baseadas em funções de pertinência nebulosa (*fuzzy membership functions*) (FREITAS; SANTOS, 2012). Este procedimento foi realizado de forma individual para cada cena Landsat 5-TM e em cada data, pois a área apresenta grande variação nas condições de iluminação e no comportamento espectral de classes de uso e de cobertura ao longo do ano. A classe de agricultura de grande porte apresenta intensa variação sazonal de acordo com os estágios de desenvolvimento dos cultivos e a rotação agrícola típica na região de plantio de soja no verão, trigo no inverno e milho numa safra intermediária. Já a classe de campo nativo apresenta variação no comportamento espectral ao longo do ano devido à redução da atividade fotossintética no inverno pela ocorrência de geadas. Apesar da maioria das imagens utilizadas serem datadas entre os meses de outubro e novembro (estação da primavera), a resolução temporal do Landsat 5-TM (26 dias) não permitiu o uso de cenas com datas diferentes nas condições referidas da área de estudo. Foram testados procedimentos de correção radiométrica e de normalização entre bandas de diferentes datas que permitiriam o uso de um único conjunto de regras para a classificação multitemporal, porém não houve sucesso nos resultados de tais procedimentos. Assim, foi escolhido o procedimento de classificação cena-a-cena e data-a-data com o uso dos dados originais em 8-bits do Landsat 5-TM, sem transformação radiométrica. Ao fim, foi gerado um mosaico para cada data, com as cenas correspondentes.

A primeira etapa na classificação orientada a objetos é a segmentação dos pixels originais para a obtenção de objetos onde, neste caso, utilizou-se o algoritmo de segmentação multi-resolução que permite a geração de níveis de objetos compatibilizados, os quais podem ser utilizados em regras de decisão hierárquicas. O procedimento de segmentação multi-resolução foi baseado nas bandas originais (1, 2, 3, 4, 5 e 7) do Landsat 5-TM, utilizando-se de forma fixa os parâmetros de forma e compacidade (0.1 e 0.5, respectivamente) e com a variação do parâmetro de escala de 12 a 50 (e.g., 12, 14, 15, 18, 20, 25, 30, 40 e 50), gerando diferentes níveis hierárquicos com níveis de agregação correspondentes. Estes níveis de objetos gerados eram devidamente analisados para a escolha dos níveis a serem utilizados na hierarquização das diferentes classes.

No procedimento de geração de regras hierárquicas de classificação, foram utilizados os atributos espectrais originais e derivados das imagens Landsat, a variável geomorfométrica de relevo local e atributos espaciais e texturais gerados pelo sistema de GEOBIA utilizado (DEFINIENS, 2007). Estas regras foram baseadas em funções de pertinência nebulosa combinadas por regras lógicas (*AND* e *OR*), sendo que, no caso das funções de pertinência, foram utilizadas funções booleanas (*crisp*) e nebulosas (*fuzzy*) dos tipos maior/menor e de intervalos entre valores dos diferentes atributos, como pode ser visto na Figura 3.4.

Na Tabela 3.4, como exemplo, podem ser vistas as regras de decisão, os atributos utilizados, os níveis de segmentação e as funções de pertinência booleanas e nebulosas utilizadas para a classificação da cena 221/79 de 1986. No restante das cenas de cada data foi

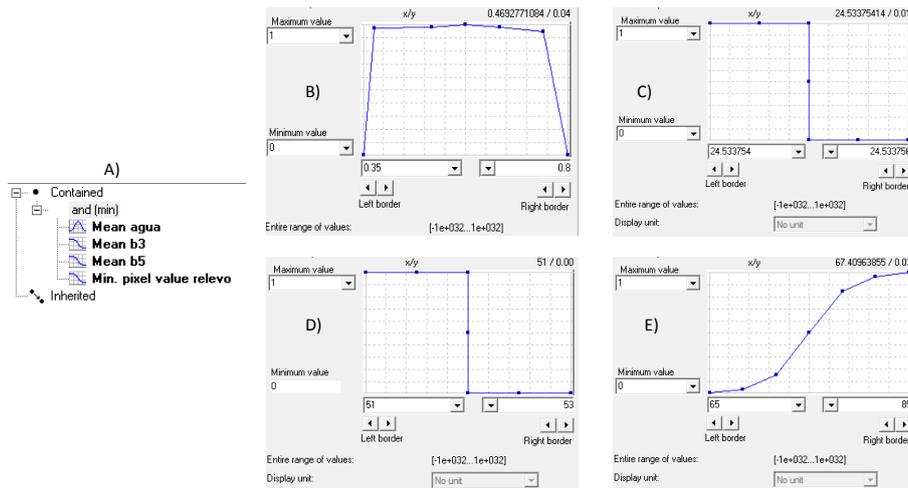


Figura 3.4 - Exemplo de regras e funções de pertinência utilizadas: a) regras lógicas (*AND*) utilizadas para classificação da classe silvicultura, b) função nebulosa entre o intervalo de valores da média da imagem-fração água, c) função booleana (menor que um valor da média da banda 3, d) função booleana (menor que um valor da média da banda 5 e e) função nebulosa de valores acima de um valor de mínimo do relevo local.

utilizado um procedimento semelhante, ocorrendo alguma alteração em cada uma frente às especificidades encontradas em cada data. Neste caso, pode-se ver o uso intenso de valores médios e de desvio-padrão das bandas do visível (banda 3), infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho médio (banda 5), bem como de produtos espectrais derivados como as médias das imagens-fração de vegetação e água. Tais atributos foram complementados por atributos espaciais (índice de forma e ajuste retangular), bem por atributos auxiliares como os valores médios e mínimos de relevo local.

Como pode ser visto na Tabela 3.4, algumas classes foram subdivididas para a possibilidade de geração de regras mais simples frente às diferenças espectrais e espaciais de algumas subclasses, as quais foram agrupadas posteriormente.

A classe de floresta foi subdividida em floresta e mata ciliar, sendo a primeira classificada por atributos espectrais (médias das bandas 3 e 5) e geomorfométricas (média do relevo local), enquanto a mata ciliar herdou as regras da classe floresta e adicionou outros atributos espectrais e espaciais (média da banda 4 e ajuste retangular, respectivamente). Seguindo o padrão do comportamento espectral da vegetação da FOM, a qual se caracteriza por um forte sombreamento relacionado com a característica estrutural do dossel superior formado por densas copas de Araucária, utilizaram-se valores baixos na faixa do visível e valores altos de bandas do infravermelho próximo e médio. Também foram usados atributos geomorfométricos para o caso de encostas ensolaradas com grande amplitude de relevo, as quais eram confundidas espectralmente com agriculturas em estágio avançado,

Tabela 3.4 - Exemplo de regras de decisão baseadas nos atributos, níveis de segmentação e nas funções de pertinência booleanas e nebulosas; cena 221/79 de 1986.

<i>Classe</i>	<i>Atributos</i>	<i>Funções</i>	<i>Regras</i>	<i>Nível</i>
Floresta	MED-B3	≤ 31 (B)	<i>AND</i>	12
	MED-REL	≥ 90 (B)		
	MED-B3	≤ 29 (B)	<i>AND</i>	
	MED-B5	≥ 48.61 (B)		
Mata ciliar	HERD-FL		<i>OR</i>	12
	MED-B4	≥ 65 (N)	<i>AND</i>	
	RET-FIT	$0.1 - 0.65$ (N)		
Campo nativo	MED-B4	≥ 100 (B)	<i>AND</i>	25
	MED-B5	$90 - 135$ (N)		
	MED-VEG	$0.35 - 0.7$ (N)		
	DP-B4	$0 - 11$ (N)		
Silvicultura	MED-B3	≤ 24.53 (B)	<i>AND</i>	12
	MED-B5	≤ 52 (B)		
	MED-AG	$0.35 - 0.8$ (B)		
	MIN-REL	≤ 40 (B)		
Solo exposto	MED-B3	≥ 30 (N)	<i>AND</i>	15
	MED-B5	$40 - 95$ (N)		
	MED-VEG	≤ 0.6 (N)		
	SHP	≤ 4 (B)		
Agricultura avançada	MED-B3	≥ 24.53 (B)	<i>AND</i>	12
	MED-B5	$54 - 83$ (N)		
	RET-FIT	≥ 0.6 (N)		
Agricultura familiar	N-CLASS			12
Água	MED-B5	≤ 38 (B)		40
Urbano	Manual			12

Abreviaturas: B é uma regra booleana, N é uma regra nebulosa, MED-B3 é a média da banda 3, MED-B4 é a média da banda 4, DP-B4 é o desvio-padrão da banda 4, MED-B5 é a média da banda 5, HERD-FL são regras herdadas da classe floresta, RET-FIT é o ajuste retangular (*rectangular fit*), SHP é o índice de forma (*shape index*), MED-VEG é a média da imagem-fração vegetação, MED-AG é a média da imagem-fração água, MED-REL é a média do relevo local, MIN-REL é o mínimo do relevo local e N-CLASS são objetos não-classificados.

e atributos espaciais para a subclasse de mata ciliar que segue a rede de drenagem com formato dentrítico, relacionado com valores baixos de ajuste retangular. A classe de floresta foi classificada no nível mais baixo de segmentação para a garantia de classificação

das bordas e de elementos finos como as matas ciliares.

A classe de campo nativo foi classificada exclusivamente de acordo com atributos espectrais correspondentes ao comportamento espectral da vegetação de campos nativos com atividade fotossintética (meses de primavera), os quais apresentam maior influência do solo devido à estrutura gramínea e herbácea deste tipo de cobertura da terra. Neste exemplo, utilizou-se valores altos com baixo desvio-padrão na faixa do infravermelho próximo e valores intermediários na faixa do infravermelho médio e na imagem-fração de vegetação. Os campos nativos foram classificados em níveis intermediários de segmentação, pois formam manchas com grande área em relação às classes classificadas nos níveis de segmentação mais baixos.

A classe de silvicultura também foi classificada exclusivamente com atributos espectrais de acordo com o padrão do comportamento espectral das plantações de *Pinus* sp., semelhante ao da floresta, porém com maior sombreamento devido ao dossel regular com uma única espécie e também sem a presença de sub-bosque e níveis estruturais inferiores. Como no caso da floresta, foram utilizados valores baixos na faixa do visível, porém, devido ao maior sombreamento, foram utilizados valores baixos no infravermelho médio e intermediários na imagem-fração de água e sombra. Também pelas características semelhantes à floresta, utilizou-se o nível mais baixo de segmentação para a classificação da silvicultura.

A classe de agricultura de grande porte teve de ser subdividida entre as culturas em estágio avançado e as áreas de solo exposto, as quais apresentam comportamentos espectrais completamente distintos: as primeiras, caracterizadas pela vegetação com alto recobrimento do solo e alta incidência de radiação solar, enquanto o solo exposto não apresenta influência da vegetação. O solo exposto foi caracterizado por valores altos na faixa do visível e valores baixos na faixa do infravermelho médio e na imagem-fração de vegetação, além de valores baixos do índice de forma devido ao formato regular das atividades antrópicas como a agricultura de grande porte. Esta subclasse foi classificada num nível de segmentação pouco acima do inferior devido à característica de homogeneidade destas manchas de uso da terra que são melhor agrupadas em níveis superiores de segmentação. Já a classe de agricultura avançada apresentou valores baixos na faixa do visível e valores intermediários na faixa do infravermelho médio, além de valores altos de ajuste retangular devido às características de forma, semelhantes ao solo exposto. Para não ocorrer uma confusão com as pequenas manchas de mata ciliar e pequenos fragmentos florestais, as quais eram agrupadas com esta classe em níveis superiores de segmentação, utilizou-se o nível inferior de segmentação para a agricultura avançada.

A classe de água foi classificada no nível de segmentação superior, devido a sua grande homogeneidade espectral e bordas bem definidas, através de cortes booleanos em valores baixos na faixa do infravermelho médio. Devido à extrema variabilidade espectral da classe

de agricultura familiar e seus mosaicos de cultivos, capoeiras, pastos e outros usos com pequena extensão, estas áreas apresentam grande confusão com a maior parte das outras classes, em especial com o campo nativo, sendo assinaladas pelas áreas que permaneceram não classificadas no nível inferior de segmentação ao fim do processo de classificação das outras classes. A classe urbana foi classificada de forma manual por interpretação visual devido ao pequeno número e extensão da maioria das sedes municipais na área de estudo.

A unificação da classificação nos diferentes níveis de segmentação foi baseada no atributo baseado na classificação de hierarquia (presença de super-objetos) através de uma sequência estabelecida por uma abordagem baixo-cima (*bottom-up*), i.e., a classificação hierárquica seguiu a ordem do nível inferior ao superior como pode ser visto na Figura ???. Esta abordagem de unificação hierárquica seguiu a ordem dos níveis de segmentação classificados que se relacionam com a homogeneidade espectral e de bordas das diferentes classes.

A validação dos resultados da classificação foi realizada de forma parcial onde a última data foi avaliada com base em dados oriundos de trabalho de campo realizado no ano de 2010. Este trabalho de campo foi voltado para o reconhecimento das classes de uso e cobertura da terra, bem como de características físicas e ecológicas básicas da paisagem. Neste trabalho de campo foi realizada uma amostragem aleatória estratificada, com pontos georreferenciados ($n = 470$), implementada de acordo com a maior ou menor acessibilidade e a homogeneidade de classes de uso e cobertura da terra dos diferentes setores da área de estudo. Esta estratégia de amostragem, baseada em uma única data, seguiu a abordagem de avaliação da incerteza de outros estudos recentes de MUCT com dados orbitais do Landsat (MUNYATI; MAKGALE, 2009; MATRICARDI et al., 2010), devido a inerente dificuldade de trabalho em áreas sem dados anteriores de uso e cobertura da terra com escala compatível. Não foi possível incorporar uma estimativa ajustada ao erro, proposta em outro recente artigo por Olofsson et al. (2013), pois esta abordagem necessita de ao menos duas datas para ser implementado.

3.2.4 Mensuração das métricas de paisagem

As métricas da paisagem foram calculadas em ambiente de SIG através de *scripts* usando apenas os fragmentos remanescentes de cobertura vegetal (floresta e campo nativo), como indicador da estrutura e grau de conservação da paisagem. A data escolhida para a geração das métricas da paisagem foi o de 2008, o último ano analisado, pois, assim, tem-se uma ideia atualizada do grau de fragmentação e da estrutura dos mosaicos de paisagem.

O cálculo das métricas da paisagem foi gerado sobre estrutura de informação vetorial de manchas de cobertura vegetal no nível da paisagem (*landscape level*), utilizando as unidades de paisagem, geradas no zoneamento hierárquico da paisagem, como nível de

agregação da paisagem, de acordo com as formulações de MacGarigal e Marks (1995) e de Lang e Blaschke (2009). A escolha do uso de métricas em nível de paisagem se deve à facilidade para utilização em análises paisagísticas diversas, desde o mapeamento integrado de unidades de paisagem e a definição de uma tipologia hierárquica, até a aplicação na análise e modelagem de mudanças de uso e cobertura da terra. A maioria destas métricas foram calculadas individualmente para cada mancha e utilizadas como métricas no nível da paisagem pela aplicação da operação de SIG de estatística zonal como média, desvio-padrão e amplitude em cada unidade de paisagem.

3.3 Zoneamento hierárquico da paisagem

A metodologia de zoneamento hierárquico da paisagem desenvolvida neste trabalho foi composta por duas etapas complementares: a) mapeamento integrado da paisagem em duas fases (geons da paisagem e unidades de planejamento da paisagem) e b) análise multivariada das unidades de planejamento da paisagem resultantes com a definição de dois níveis hierárquicos (hólons) da paisagem. A primeira etapa se refere ao mapeamento integrado da paisagem baseado em técnicas de GEOBIA e SIG para a delimitação de unidades homogêneas em relação às variáveis físicas, ecológicas e sociais. Enquanto a segunda se refere à classificação e tipologia das unidades de planejamento hierárquico de acordo com técnicas de análise estatística multivariada para a definição de uma hierarquia da paisagem baseada na concepção de hólons. A metodologia adotada neste zoneamento é representada na Figura 3.5 por um fluxograma com as principais etapas representadas.

3.3.1 Mapeamento integrado da paisagem

O mapeamento integrado da paisagem foi concebido de forma hierárquica e baseado em contribuições com origem na abordagem geossistêmica geográfica tradicional e na abordagem de GEOBIA baseada em dados geoespaciais e integração de técnicas de SR e SIG. A primeira se refere ao princípio de hólons de Koestler (1978) que já foi utilizado no mapeamento e definição de geossistemas por Monteiro (2001), Cunha e Freitas (2004). Já a segunda se refere à concepção de geon que é relacionada com unidades produzidas em ambiente SIG com informações geoespaciais, ligadas ao planejamento territorial e à tomada de decisões de cunho espacial (LANG, 2008).

Assim, neste trabalho foram definidas duas hierarquias principais no mapeamento integrado da paisagem: a) Geons da Paisagem, nível superior baseado na segmentação multi-resolução e interpretação visual de atributos físicos (geomorfométricos) e mapeamentos geoambientais disponíveis; b) Unidades de Planejamento da Paisagem (UPP's), nível inferior resultado da compatibilização dos Geons da Paisagem com as unidades sociais (setores censitários rurais), posteriormente classificadas em dois níveis hierárquicos superiores (hólons).

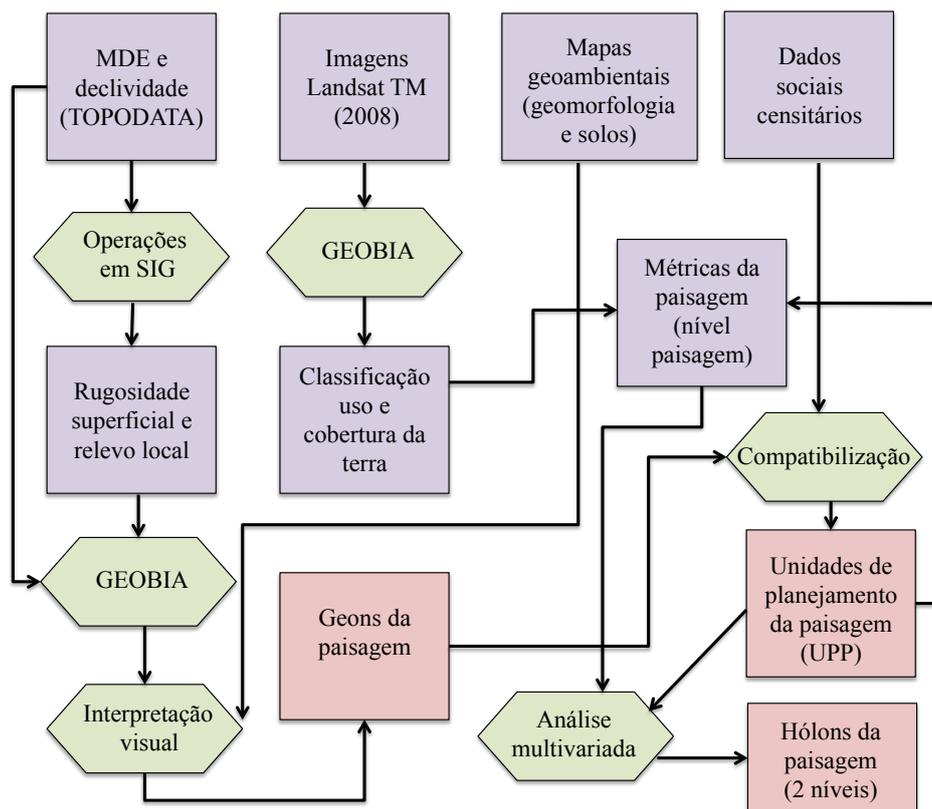


Figura 3.5 - Fluxograma representando a entrada de dados, procedimentos e produtos utilizados para o zoneamento hierárquico da paisagem.

3.3.1.1 Geons da Paisagem

A delimitação dos geons da paisagem foi baseada na segmentação multi-resolução de dados geomorfométricos (MDE, rugosidade superficial, relevo local e relevo sombreado) em ambiente de GEOBIA. O uso de dados geomorfométricos na segmentação multi-resolução usualmente é utilizado para o mapeamento geomorfológico, em conjunto com regras de decisão baseadas nos atributos geomorfométricos em ambiente GEOBIA (CAMARGO et al., 2009).

Em nosso caso, utilizou-se uma abordagem semi-automática de mapeamento integrado de atributos físicos e ecológicos baseada em níveis de objetos oriundos da aplicação da técnica de GEOBIA de segmentação multi-resolução. Para a geração de tais níveis de objetos, os parâmetros da segmentação multi-resolução de forma (*shape*) e compacidade (*compactness*) foram fixados em 0.5, enquanto o parâmetro de escala (*scale*) era variado de 50 a 300 (níveis de 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150, 180, 200 e 300).

Estes níveis de segmentação (Figura 3.6) foram devidamente exportados para ambiente SIG onde foram devidamente analisados e agrupados de forma interativa de acordo com a

interpretação visual baseada em mapeamentos geomorfológico, pedológico e geológico (RADAMBRASIL, 1986; EMBRAPA, 2005), imagens multi-espectrais Landsat, MDE e relevo sombreado. Esta abordagem metodológica é relacionada com o processo de refinamento escalar utilizado no projeto de Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) na delimitação das denominadas Unidades Territoriais Básicas (UTB) que se baseiam na interpretação visual e adequação de mapas geoambientais em escalas pequenas do Projeto RADAMBRASIL (1:1.000.000) através da “âncora” que seriam imagens Landsat com 30 metros de resolução espacial (CREPANI et al., 2001). Diversos trabalhos de mapeamentos integrados da paisagem com técnicas de SIG e SR são fundamentados nesta abordagem, como Freitas (2009) que se basearam na edição vetorial sobre base de dados em SIG para o mapeamento de geossistemas e geofácies, adaptando a metodologia de mapeamento de geossistemas da escola francesa de Bertrand e Bertrand (2002) numa área nuclear do semi-árido brasileiro.

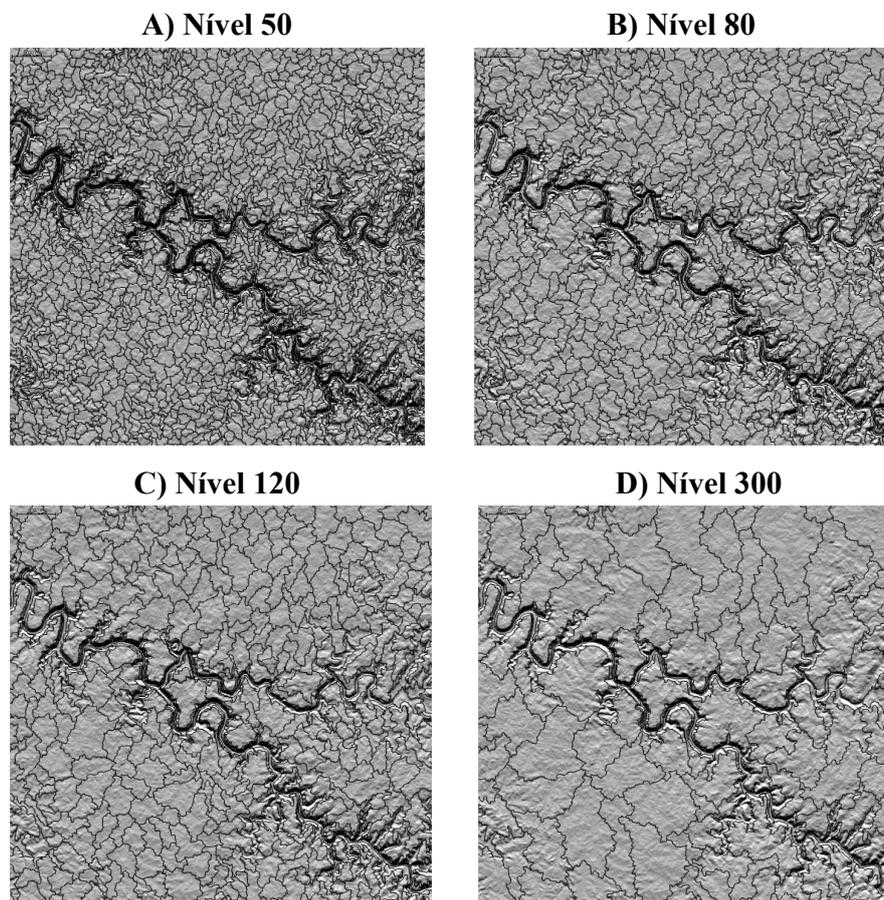


Figura 3.6 - Exemplos de níveis de segmentação multi-resolução baseados em dados geomorfométricos e utilizados no mapeamento integrado da paisagem.

Neste trabalho, o processo foi semi-automatizado, sem a necessidade do usuário realizar edições vetoriais, o que possibilita a este realizar uma agrupação de forma interativa dos

níveis de segmentação gerados por GEOBIA. Porém, em suma, este processo continua baseado na interpretação da paisagem, onde o usuário deve buscar as similaridade e correlações espaciais de dados físicos e ecológicos com o suporte de composições coloridas de imagens de satélite, de MDE e produtos derivados. Este procedimento de delimitação de unidades de paisagem pode levar em conta diferentes variáveis como unidades geomorfológicas e classes de agrupamentos de solos, sendo uma escolha do especialista qual o limite mais indicado para correlacionar os diversos elementos da paisagem que caracterizam os mosaicos paisagísticos (ZONNEVELD, 1988). No caso dos geons da paisagem os limites oriundos da segmentação de variáveis geomorfométricas devidamente foram agrupados de acordo com as características geomorfológicas e pedológicas que apresentam uma maior contribuição para a formação dos mosaicos da paisagem nesta área de estudo.

3.3.1.2 Unidades de Planejamento da Paisagem

As unidades de paisagem podem ser definidas por diversos fatores físicos, ecológicos e sociais, por isto em seu mapeamento podem ser utilizados diferentes limites baseados em mapeamentos temáticos geoambientais (mapas geomorfológicos, pedológicos, geológicos, etc.) ou em limites político-administrativos (bacias hidrográficas, municípios, distritos, setores censitários, etc.) (GUERRA; MARÇAL, 2006). Neste trabalho, escolheu-se pela compatibilização de unidades de paisagem baseadas em atributos físicos e ecológicos com os setores censitários que são as unidades de divulgação de dados sociais censitários no menor nível de agregação. Estas unidades político-administrativas apresentam ainda a potencialidade de utilização direta nos processos de tomada de decisão aplicados ao planejamento territorial.

Esta abordagem metodológica de compatibilização com base em setores censitários é usada no planejamento urbano pelo uso de Unidades de Planejamento (UP's) baseadas na compatibilização destes com as divisões empíricas "populares" oficiais e não-oficiais em nível de bairros, comunidades ou distritos (FRANÇA et al., 2008). O procedimento de compatibilização neste trabalho foi fundamentado nos setores censitários rurais do ano de 2000 disponibilizados por IBGE (2000) devido aos problemas de unidades de área modificáveis (*Modifiable Area Units Problem* - MAUP) e de falácia ecológica (OPENSHAW, 1984; WRI-GLEY et al., 1996), inerentes ao se lidar com dados geoespaciais de diferente natureza. Tais questões de unidades espaciais com limites distintos se apresentam como um problema de grande dificuldade de superação, apenas cabendo estratégias de minimização da problemática. A utilização dos setores censitários permitiu o uso de variáveis sociais sem a necessidade de transformação para outras formas de representação (como células, unidades de paisagem baseadas em atributos físicos e ecológicos, ou outras). A mensuração das variáveis sociais em outras formas de representação apresenta grande dificuldade frente às características irregulares da distribuição espacial dos dados sociais e demográficos que dificultam abordagens baseadas em relações de área entre os setores censitários e as outras

formas de representação. Assim, a saída adotada foi a compatibilização com os setores censitários oficiais onde ocorre uma maior facilidade de mensuração de atributos físicos e ecológicos, apesar de uma perda de delimitação fina de tais atributos em relação aos geons da paisagem.

A Figura 3.7 apresenta o processo de geração das UPP's desde os níveis de objetos de segmentação, a interpretação de atributos físicos e ecológicos para a agregação de tais níveis em geons da paisagem, até a compatibilização destes com os setores censitários. A delimitação das UPP's foi gerada com base na operação de SIG de intersecção entre os Geons da Paisagem e os setores censitários rurais seguida de uma compatibilização baseada na interpretação visual da classificação de uso e cobertura da terra do ano de 2008. A escolha da variável de uso e cobertura da terra na data mais recente para a compatibilização com os setores censitários se deve à relação direta com o nível de alteração atual dos ecossistemas originais e agroecossistemas da área de estudo que pode ser diretamente associado com estes dados.

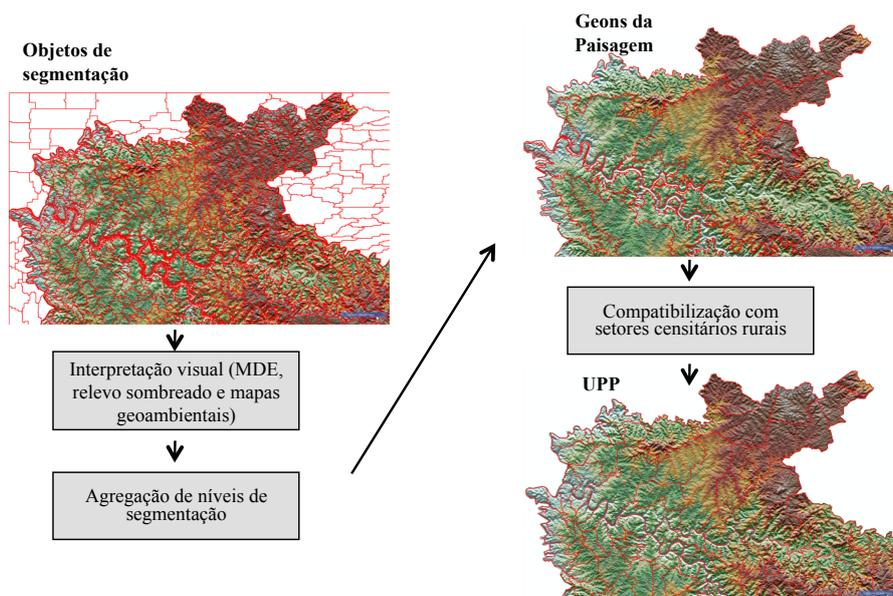


Figura 3.7 - Procedimento geral para a geração de UPP's baseadas em geons da paisagem compatibilizados com setores censitários.

Neste caso, os maiores procedimentos de compatibilização necessários foram: a) agregação de pequenos setores censitários rurais representando sedes de distritos rurais nos setores maiores que o englobam; b) divisão do setor censitário rural da sede do município de Lages (uma agregação de 172 setores censitários urbanos) de acordo com características rurais ou urbanas dos setores urbanos periféricos; bem como a correspondente adequação das informações censitárias); c) em poucos casos, devido a grandes diferenças paisagísticas,

nós dividimos o setor censitário rural original de acordo com limites geomorfológicos ou de solos que formam mosaicos de paisagem radicalmente diferentes.

As UPP's resultantes foram utilizadas como unidades de análise estatística na caracterização de uma tipologia hierárquica da paisagem. Para tal, foi necessária a integração das variáveis geomorfométricas, sociais e ecológicas a este nível de agregação mínimo através de operações de SIG de estatística zonal (média, desvio-padrão e amplitude) de dados matriciais físicos e ecológicos (e.g., variáveis geomorfométricas, uso e cobertura da terra e outras). Como visto anteriormente, a mensuração das métricas da paisagem calculadas em nível de paisagem utilizou as UPP's como o elemento de paisagem, enquanto os dados sociais já estavam em sua configuração (escala) original. Estes procedimentos de integração ao nível de agregação das UPP's se refere ao processo de agregação utilizado para a integração escalar ("*scaling*") necessária para a análise de dados em escalas diferentes.

A estrutura dos dados das variáveis paisagísticas com base nas unidades de agregação no zoneamento hierárquico da paisagem e os procedimentos operacionais utilizados (análise estatística multivariada) foram diretamente relacionados com a representação vetorial discretizada. Já a estrutura dos dados das variáveis paisagísticas, bem como do resultado do zoneamento hierárquico, utilizados na modelagem da dinâmica da paisagem necessitou a representação destes dados no formato matricial contínuo para se realizar a simulação a partir de células (pixels).

3.3.2 Análise multivariada e tipologia hierárquica das Unidades de Planejamento da Paisagem

A análise estatística multivariada é utilizada nos mapeamentos integrados da paisagem para a validação dos resultados oriundos da análise subjetiva do especialista ao interpretar as correlações entre as variáveis paisagísticas na definição dos mosaicos da paisagem. Neste trabalho, além da validação do mapeamento das unidades de paisagem, a análise multivariada foi usada para determinar uma classificação e uma tipologia hierárquica das unidades de paisagem básicas mapeadas. Para tal, foram utilizadas de forma complementar duas técnicas diferentes de análise multivariada: a) uma técnica de análise de agrupamento para a definição de agrupamentos hierárquicos das UPP's (hólons) e b) uma técnica de ordenamento para a validação e caracterização tipológica dos hólons definidos pela técnica anterior.

Os dados utilizados nas análise multivariada foram as variáveis físicas, ecológicas e sociais (Tabela 3.1), introduzindo dados categóricos binários (classes de solos e unidades geomorfológicas) em conjunto com dados contínuos de média, desvio-padrão e amplitude (geomorfométricos, de métricas de paisagem e censitários). As variáveis geomorfométricas e de métricas de paisagem em formato matricial foram integradas no nível das UPP's

através de operações de estatística zonal em ambiente de SIG devido à sua distribuição contínua. Algumas métricas de paisagem já foram calculadas com base no nível da paisagem e as calculadas no nível de manchas (*patch level*) passaram pelo mesmo processo de integração no nível da paisagem (as próprias UPP's), enquanto os dados sociais e geoambientais temáticos não precisaram deste processo por já se apresentarem no nível escalar adequado.

A análise de agrupamento (*Cluster Analysis*) foi realizada com os dados das UPP's geradas devido à necessidade de uma análise estatística para encontrar padrões paisagísticos hierárquicos de acordo com diferentes graus de homogeneidade e dissimilaridade. Esta necessidade de avaliação estatística do quanto realmente as unidades de paisagem mapeadas apresentam diferenças e correlações entre si e com respeito às outras unidades mapeadas foi preconizada por Silva et al. (2007) que utilizaram o método de análise de agrupamento. Este método também foi utilizado por Freitas (2006) e Freitas e Carvalho (2009) com base em dados fito-ecológicos estruturais e florísticos coletados em campo para a validação do mapeamento das unidades de paisagem.

Devido ao uso conjugado de variáveis categóricas e contínuas, foi usado um método adaptado das técnicas tradicionais de agrupamento baseadas em dados contínuos: o algoritmo de auto-agrupamento *TwoStep Cluster* (ZHANG et al., 1996; CHIU et al., 2001) que é um algoritmo de mineração de dados não-supervisionado para a geração de agrupamento hierárquico com dados contínuos e categóricos. Este algoritmo foi utilizado para a geração de grupos automáticos de acordo com testes de significância de qui-quadrado, para as variáveis categóricas, e de Análise da Variância (ANOVA), para as variáveis contínuas. O resultado foi a definição não-supervisionada de 3 agrupamentos (*clusters*) que formaram o nível hierárquico superior. Estes agrupamentos no nível superior foram ajustados por interpretação visual com o apoio da técnica de auto-agrupamento (flexibilizada pelo uso do parâmetro de número de grupos a serem gerados, de 4 até 7) para a definição de 5 grupos de UPP's no nível hierárquico inferior.

Já a técnica de ordenamento de Análise de Correspondência Canônica (*Canonical Correspondence Analysis - CCA*) (BRAAK, 1986; LEPS; SMILAUER, 2003), a qual também permite o uso integrado de dados contínuos e categóricos, é usada como uma técnica de ordenamento para uma interpretação numérica e visual (diagramas de ordenamento) das relações entre variáveis dependentes e independentes binárias ou categóricas. Neste caso, a CCA foi realizada com os dois agrupamentos gerados pela técnica anterior como variáveis dependentes ou espécies na nomenclatura da CCA e as variáveis físicas, ecológicas e sociais como variáveis independentes ou ambientais na nomenclatura da CCA. O objetivo desta análise foi checar a validade de ambos níveis hierárquicos e também para melhor analisá-los pela definição de uma tipologia hierárquica. Para tal, foram produzidos diagramas de ordenação com as variáveis independentes significantes de acordo com o método manual

de seleção stepwise para frente (*manual forward stepwise selection*) que se baseia no teste randômico Monte Carlo do tipo- F ($\alpha = 0.05$).

3.4 Modelagem da dinâmica da paisagem

A modelagem da dinâmica da paisagem foi baseada nas mudanças de uso e cobertura da terra entre os anos de 1986, 2002 e 2008 na área de estudo, pois este é o elemento fundamental de transformação da paisagem e alteração dos processos físico-ecológicos naturais, sendo diretamente influenciado por fatores sociais. Para a realização de tal modelagem da dinâmica da paisagem, foi desenvolvido um modelo computacional de dinâmica espacial baseado em abordagens utilizadas para a caracterização de sistemas complexos (como os autômatos celulares), técnicas de análise estatística multivariada (regressão logística) e métodos de SIG. Tais abordagens e técnicas foram aplicadas de forma conjugada, com o foco na utilização de regiões (neste caso os produtos do zoneamento hierárquico da paisagem) para a geração de modelos de MUCT com influência do nível escalar regional.

Este modelo computacional de dinâmica espacial baseado em autômatos celulares e nos dados geoespaciais processados e gerados neste trabalho foi denominado LanDSCAM (*Landscape Dynamics Simulation Cellular Automata Model*). O código deste modelo foi desenvolvido na linguagem Fortran 90 em ambiente Unix (MacOSX ou Linux) e é um código-aberto (*open source*) livre para uso e adaptação por outros usuários. A escolha do ambiente Unix se deve à falta de modelos de MUCT que, em sua maioria, são voltados ao sistema operacional Windows. Enquanto a escolha por um código-aberto também se relaciona com a falta de modelos de MUCT com tais características, o que limita muito a interação do usuário e a possibilidade de maiores adaptações e desenvolvimentos sobre a base do modelo. Já a estrutura modular de programação do modelo LanDSCAM e sua característica de código aberto facilitam a alteração do modelo e a implementação de novas rotinas de modelagem aos usuários com conhecimento da linguagem Fortran 90.

A estrutura do modelo segue a da maioria dos modelos de MUCT, sendo composta por cinco etapas, organizadas conforme módulos: a) cálculo de demandas de transição, b) geração de mapas de probabilidade de transição, c) alocação espacial das MUCT, d) calibração e validação dos resultados e e) geração de cenários de prognose de MUCT (Figura 3.8). A definição de taxas de transição e dos parâmetros de alocação espacial são gerados de forma regionalizada, de acordo com regiões definidas pelo usuário que podem representar municípios, distritos, bacias hidrográficas e outras definições regionais. Tal característica permite uma maior interação do usuário que pode definir mais facilmente relações escalares em nível macro e micro, tanto na definição de taxas, como na parametrização do modelos para cada região. O nível hierárquico inferior do zoneamento hierárquico em UPP's, com 5 hólons) foi utilizado neste trabalho por sua capacidade de síntese das características naturais e sociais dos mosaicos de paisagem principais na área de estudo. Este modelo foi

implementado com o objetivo de modelagem de conjuntos de dados matriciais de grande extensão, com o foco na rapidez e economia de memória real alocada, permitindo a geração de modelos na resolução espacial original do Landsat para grandes áreas.

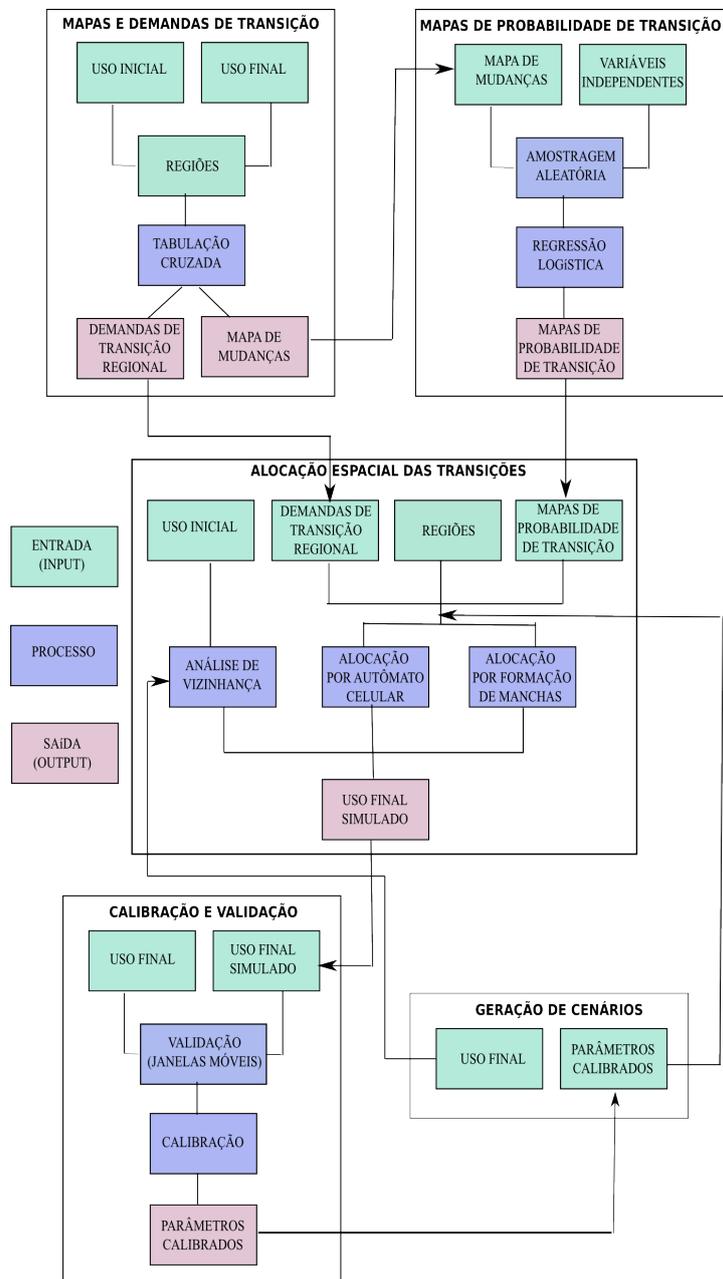


Figura 3.8 - Fluxograma representando a estrutura de modelagem do LanDSCAM.

O modelo se apresenta em rotinas conjugadas em quatro módulos principais com a entrada dos dados matriciais em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) ou em formato binário raster suportado pela biblioteca GDAL (*Geospatial*

Data Abstraction Library), como GeoTIFF, img, asc e outros formatos suportados por tal biblioteca. O uso da biblioteca GDAL em ambiente de programação Fortran é possibilitado pela interface da biblioteca FortranGIS que realiza a conversão dos dados binários para as matrizes em memória durante a compilação do código em Fortran, sendo ambas bibliotecas de código-aberto. A seguir, pode-se ver em detalhes os métodos e técnicas implementadas nestas operações.

3.4.1 Cálculo de demandas de transição e mapas de mudanças

O primeiro módulo do modelo é composto por duas funções para a preparação da entrada no modelo das demandas de transição e dos mapas de mudanças de uso e cobertura da terra entre a data inicial e a final de cada intervalo de tempo. Tais funções apresentam característica complementar com o uso do resultado da primeira etapa de cálculo das demandas de transição para a definição da codificação das mudanças.

O cálculo das demandas de transição é gerado por uma operação de tabulação cruzada dos mapas de uso e cobertura da terra inicial e final analisados no passo de tempo utilizado para a calibração do modelo. O resultado desta operação é uma matriz de probabilidades de transição que permite a definição das taxas de transição baseadas nas mudanças ocorrentes entre as datas utilizadas para a calibração. Tais taxas de transição são calculadas com base em cadeias de Markov (MARKOV, 2006), as quais são utilizadas em diversas áreas de conhecimento para o cálculo da probabilidade de transição em sistemas dinâmicos com passos de tempo discretos ou contínuos. Esta técnica é utilizada para projeção de taxas futuras de transição em modelos de MUCT de acordo com o princípio de permanência das condições iniciais através de um processo estacionário (SOARES-FILHO et al., 2002). A potencialidade em seu uso é a facilidade de cálculo e a possibilidade de uso com séries temporais pequenas, porém é um método que não representa de forma realística as MUCT que, como a maioria dos processos naturais e sociais, é um processo essencialmente não-estacionário, onde as taxas de transição flutuam ao longo do tempo ao invés de permanecerem fixas (MANDELBROT; HUDSON, 2004).

A função de definição das cadeias de Markov apresenta como entrada as regiões e os mapas de uso e cobertura da terra inicial e final. Nesta, a definição das Cadeias de Markov a partir de tabulação cruzada é gerada em um passo único entre a data inicial e final, que pode ser dividida em múltiplos passos de tempo no módulo de alocação espacial em si, por cada região. A saída deste módulo é o resultado da tabulação cruzada (Tabela 3.5) expresso em uma matriz de demandas transição multidimensional com os níveis verticais correspondendo às diferentes regiões. Esta matriz é semelhante a uma matriz de probabilidades de transição, porém preferiu-se adotar a mensuração da matriz em termos de demandas efetivas de transição na unidade de pixels, como no modelo CLUE-S, pela visualização mais direta pelo usuário das demandas, ao invés da mensuração por probabilidades. O formato

da tabela representa o uso inicial nas linhas e o uso final nas colunas com as transições definidas pelas devidas posições como, por exemplo, o total da transição da classe 1 para a classe 3 foi de 400484 pixels, da classe 1 para a classe 4 foi de 1170677 pixels, e assim por diante.

Tabela 3.5 - Exemplo de matriz de demandas de transição do intervalo 2002-2008 com 1 região, i.e., a demanda total de transições.

2002	2008						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
FOM	0	0	400484	1170677	213226	5622	0
CAMPO	0	0	119133	493521	174561	2705	0
SILV	0	0	0	26857	11647	0	0
AG-FAM	442317	0	0	0	262675	8646	0
AGGP	0	0	20250	460672	0	3865	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0

A função de geração de mapas de mudanças deve ser realizada com base no resultado da função anterior gerado com uma única região total representando a área de estudo, para não se correr o risco de deixar transições sem classificação. Esta função faz a codificação das transições a serem utilizadas nos módulos posteriores e permite ao modelador definir estas através de uma matriz de mudanças baseada no resultado expresso na Tabela 3.5. O modelador pode definir a codificação das transições existentes com uma valor único para cada uma ou ainda com a possibilidade de agrupamento de transições em processos de MUCT, como foi realizado no nosso caso (ver Seção 3.4.2.1). Esta codificação é possibilitada pela edição da Tabela 3.5 para os respectivos valores definidos pelo usuário, como pode ser visto na matriz de processos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Exemplo de matriz de processos definidos pelo usuário, neste caso com valores únicos para cada transição.

2002	2008						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
FOM	0	0	1	2	3	4	0
CAMPO	0	0	5	6	7	8	0
SILV	0	0	0	9	10	0	0
AG-FAM	11	0	0	0	12	13	0
AGGP	0	0	14	15	0	16	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0

O resultado deste procedimento é um mapa de mudanças ou transições (Figura 3.9) com os valores codificados de acordo com a matriz de processos definida pelo usuário onde, por exemplo, os pixels da transição da classe 1 para 3 têm o valor 1, da classe 1 para 4 têm o valor 2, e assim por diante. A liberdade de codificação das transições é importante ao modelador principalmente quando existem muitas classes nos mapas de uso inicial e final e muitas transições diferentes, o que acarretará na necessidade de múltiplos modelos para a geração dos mapas de probabilidade de transição. Assim, o modelador pode definir uma série de processos de acordo com agrupamentos de transições que apresentam relação direta, utilizadas como variáveis dependentes nos modelos dos mapas de probabilidade de transição.

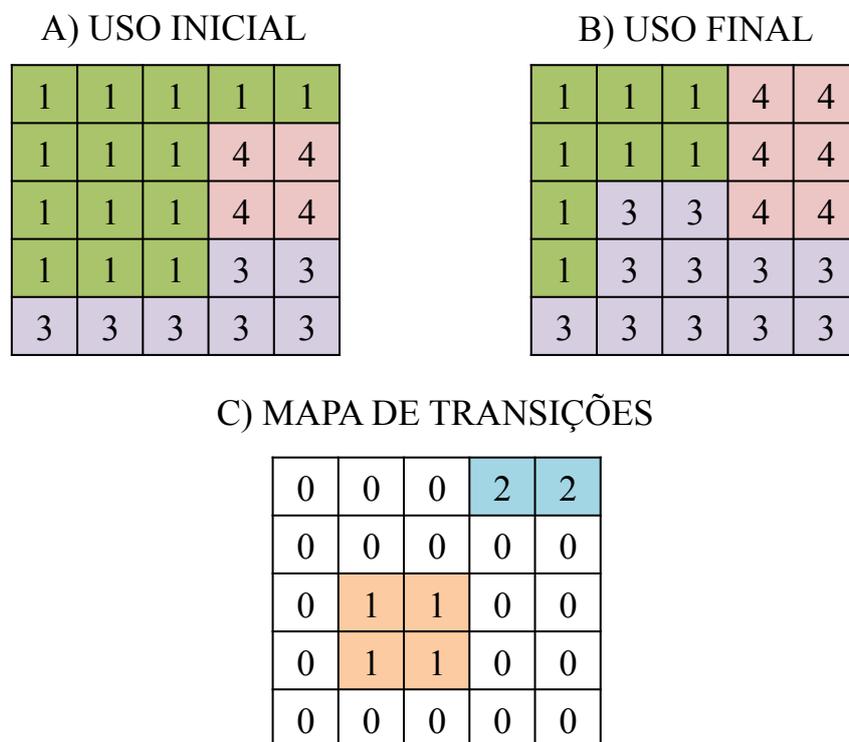


Figura 3.9 - Exemplo de mapa de transição definido a partir da Tabela 3.6.

3.4.2 Geração de mapas de probabilidade de transição

Diferentes métodos podem ser utilizados para a geração dos mapas de probabilidade de uso ou de transição nos modelos de uso e cobertura da terra (PÉREZ-VEGA et al., 2012) como análise hierárquica multi-critério (OZAH et al., 2010), regressão logística binária (VERBURG et al., 2002; SOARES-FILHO et al., 2002), análise bayesiana de pesos de evidência (SOARES-FILHO et al., 2006; PÉREZ-VEGA et al., 2012) e redes neurais artificiais (ALMEIDA et al., 2008; PÉREZ-VEGA et al., 2012). De acordo com o método implementado, abordagens diversas

são utilizadas para o cálculo dos mapas de probabilidades, sendo que nesta pesquisa será adotado a metodologia baseada em regressão logística.

Como em outros modelos de MUCT, a análise espacial utilizada para a geração dos mapas de probabilidades de uso foi baseada na regressão logística binária multivariada (HOSMER; LEMESHOW, 2000) que é usada para indicar a probabilidade de uma célula assumir uma transição determinada, dado um conjunto de variáveis independentes contínuas ou categóricas. Esta técnica é utilizada para a modelagem preditiva de uma variável dependente categórica binária (expressa em 0 e 1 de acordo com ausência e presença, respectivamente) baseada em uma série de variáveis independentes.

A metodologia adotada na geração dos mapas de probabilidade foi composta por quatro etapas: a) a definição das variáveis dependentes e independentes utilizadas no modelo, b) a amostragem espacial aleatória das variáveis dependentes e independentes realizada por um módulo do modelo, c) a análise de regressão logística propriamente dita realizada no ambiente de programação R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008) e d) o cálculo dos mapas de probabilidade de transição por outro módulo do modelo. Como a modelagem da dinâmica da paisagem deste estudo apresenta 3 datas de mapas de uso e cobertura da terra, foram gerados mapas de probabilidade de transição diferentes para os períodos 1986-2002 e 2002-2008.

3.4.2.1 Definição das variáveis dependentes e independentes

Duas abordagens principais vêm sendo utilizadas em modelos de MUCT para a definição de mapas de probabilidade de transição: a) a do DINAMICA-EGO que é baseada em modelos para cada transição a ser modelada (SOARES-FILHO et al., 2002) e b) a do CLUES que é baseada em modelos para cada classe de uso e cobertura da terra de acordo com a configuração do mapa inicial (VERBURG et al., 2002). Ambas abordagens apresentam potencialidades e limitações. Enquanto a primeira apresenta uma abordagem mais direta em relação à dinâmica entre as datas modeladas, porém, quando ocorrem muitas transições, a grande quantidade de modelos para cada transição pode levar a modelos com pouca capacidade analítica e teórica. Já a segunda apresenta a vantagem de um menor número de modelos para cada classe que podem ser mais explorados analítica e teoricamente (além da possibilidade de geração de cenários a partir de uma única data), porém a abordagem indireta baseada na configuração inicial de uso e cobertura da terra pode não responder frente a transições pouco correlacionadas com os padrões iniciais.

Neste trabalho, foi utilizada uma diferente abordagem para a definição das variáveis dependentes baseada em processos de mudanças de uso e cobertura da terra definidos a partir do resultado da tabulação cruzada entre os mapas iniciais e finais utilizados em cada intervalo de modelagem dinâmica (1986-2002 e 2002-2008). Esta abordagem permitiu a geração de

modelos diretamente relacionados com as transições ocorridas nestes intervalos de tempo, porém através de um número reduzido de modelos para cada um dos processos de MUCT definidos com base em modelos teóricos.

Com base em modelos teóricos de MUCT, foram classificados processos de MUCT a partir de classificações multitemporais de uso e cobertura da terra com dados e técnicas de SR (BATISTELLA; VALLADARES, 2009; FREITAS et al., 2013). Com pequenas adaptações dos processos estudados em Freitas et al. (2013), as transições ocorridas nos intervalos 1986-2002 e 2002-2008 foram classificadas de acordo com os seguintes processos:

- a) degradação que foi definida como as mudanças ocorridas de classes de cobertura para classes de uso da terra agrícolas (agricultura familiar e agricultura de grande porte), sendo subdividida, em relação ao estudo de Freitas et al. (2013) em degradação florestal e degradação dos campos, de acordo com a classe inicial de FOM ou campo nativo, respectivamente;
- b) regeneração que foi relacionada com as transições de classes de uso para classes de cobertura da terra, a qual apresentou apenas transições para FOM;
- c) intensificação que foi considerada como as mudanças de outras classes de uso da terra para a classe de agricultura de grande porte, a qual é definida como uma mudança tecnológica no processo de produção agrícola, incluindo altos níveis de mecanização e uso de fertilizantes e outros insumos com o objetivo de aumentar a produtividade por unidade de área de monoculturas;
- d) extensificação que foi definida pelas transições ocorridas de outras classes de uso da terra para a classe de agricultura familiar que representa formas tradicionais de ocupação da terra baseadas em múltiplas atividades em propriedades de pequeno porte;
- e) expansão da silvicultura que foi caracterizada pelas transições ocorridas de qualquer classe de uso e cobertura da terra para a classe de silvicultura, diferentemente de Freitas et al. (2013) que consideraram as transições de classes de cobertura para silvicultura dentro do processo de degradação, por motivos de maior facilidade de modelagem do processo de silvicultura;
- f) urbanização que foi definida como as transições ocorridas de qualquer classe para a classe urbana, processo diretamente relacionado com a disposição de centros regionais e processos econômicos como a industrialização e a terceirização em escala regional.

A Figura 3.10 apresenta a matriz de processos gerada neste procedimento de classificação das transições ocorridas nos intervalos de 1986-2002 e de 2002-2008. Esta matriz de tran-

sição é utilizada no módulo de alocação espacial das transições para identificar os mapas de probabilidade de transição referentes a cada transição e identificados por números diferentes. No nosso caso, com 7 classes, seriam possíveis 42 transições (i.e., o número de classes ao quadrado menos o número de classes). Como ocorreram apenas 18 transições, classificadas em 7 processos, estas foram numericamente classificadas de 1 a 7 (o número de processos) e as transições não-existentes foram identificadas pelo valor 0. Neste caso, ainda, as transições ocorridas de ou para a classe água foram zeradas, mantendo a configuração final da classe água do ano de 2008, pois ocorreu o enchimento de barragens hidrelétricas ao longo do período modelado e, desta forma, podemos impedir a alocação de mudanças de MUCT em áreas alagadas pelos reservatórios.

		USO FINAL								
		FOM	CAMPO-NAT	SILV	AGRIC-FAM	AGRIC-GP	URB	ÁGUA		
U S O I N I C I A L	FOM	0	0	4	1	1	7	0	1	DEGRADAÇÃO FOM
	CAMPO-NAT	0	0	4	2	2	7	0	2	DEGRADAÇÃO CAMPO
	SILV	0	0	0	5	6	7	0	3	REGENERAÇÃO
	AGRIC-FAM	3	0	4	0	6	7	0	4	EXPANSÃO DA SILVICULTURA
	AGRIC-GP	0	0	4	5	0	7	0	5	EXTENSIFICAÇÃO
	URB	0	0	0	0	0	0	0	6	INTENSIFICAÇÃO
	ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0	7	URBANIZAÇÃO
	ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0		

Figura 3.10 - Matriz de transição utilizada para a classificação das transições ocorridas entre os mapas iniciais e finais nos períodos 1986-2002 e 2002-2008. Abreviaturas: FOM é floresta, CAMPO-NAT é campo nativo, SILV é silvicultura, AGRIC-FAM é agricultura familiar, AGRIC-GP é agricultura de grande porte, URB é água, DEGRADAÇÃO FOM é degradação florestal.

Tais processos categorizados foram utilizados como variáveis dependentes, enquanto as variáveis independentes preditivas foram os fatores geomorfométricos, de métricas da paisagem e sociais (Tabela 3.1), todos representados computacionalmente em formato matricial. Apesar da dinâmica inerente de algumas destas variáveis ao longo de poucas décadas, estas variáveis independentes foram definidas de forma não-dinâmica, i.e., permanecem as mesmas nos dois períodos da modelagem. Esta é uma característica dos dados geomorfométricos que pouco mudam em termos de décadas, porém não é o comportamento normal principalmente dos dados sociais e ecológicos que apresentam usualmente uma grande dinâmica. No caso dos dados sociais, isto se deve a falta de disponibilização de dados censitários especializados em nível de setor censitário rural para o Censo de 1991, enquanto os dados do Censo 2010 em nível de setor censitário estão ainda sendo disponibilizados, no

presente momento. Assim, foram utilizados dados censitários do Censo 2000 e as métricas da paisagem foram calculadas no ano de 2008 para uma relação direta com a fragmentação atual da paisagem.

3.4.2.2 Módulo de amostragem espacial aleatória

A primeira fase da regressão logística é a amostragem das variáveis dependentes e independentes que foi implementada no modelo com inspiração na ferramenta de amostragem aleatória do modelo CLUE-S. O módulo de amostragem aleatória se divide em duas etapas: a) a definição dos índices (i e j) de cada pixel amostrado e b) a geração das tabelas com os dados das variáveis independentes.

Na primeira etapa da amostragem aleatória, a entrada é a matriz de inteiros representando as variáveis independentes onde, neste caso, foram usados os processos de MUCT, mas podem ser todas as transições ou ainda classes de uso e cobertura da terra da data inicial. O algoritmo implementado faz de forma automática a categorização binária (0 e 1) para cada processo ou valor da matriz de entrada. Os parâmetros definidos pelo usuário são a porcentagem de cada classe a ser amostrada, a proporção entre o número de amostras de 0 e 1 e a distância entre cada pixel amostrado. A porcentagem de amostragem de cada classe variou conforme a classe de interesse, sendo utilizada a amostragem de 15% para o processo de urbanização que apresenta menor número de pixels no total e amostragens de 1%, 3% e 5% para os outros processos de MUCT. A escolha da proporção entre o total de pixels 0 e 1 a serem amostrados permite a interação direta do usuário com a possibilidade de geração de amostragem balanceada (proporção de 0.5), proporcional em relação ao total dos processos (valor de -1) e proporcional de acordo com a escolha do usuário (por exemplo, o valor de 0.3 corresponderá a uma amostragem com 30% de valores 1 e 70% de valores 0). Neste trabalho, foram utilizadas amostragens balanceadas para a regressão logística pela dificuldade de convergência dos modelos de regressão logística baseados com dados apresentando um número muito grande de valores nulos (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Por fim, a influência da autocorrelação espacial é minimizada pela realização da regressão em amostras de pixels aleatórios num raio de distância mínimo estipulado pelo modelador. Neste caso, a distância mínima definida foi de 150 metros (referente a 5 pixels) para todos os processos amostrados, com a exceção do processo de urbanização que, pelo seu baixo número total e configuração espacial em forma de poucas manchas, foi amostrado com a distância de 30 metros (referente a 1 pixel apenas).

A segunda etapa da amostragem aleatória é composta por duas entradas: a saída do procedimento anterior (duas listas de índices i e j , os com valores 1 e os com valor 0) e as matrizes referentes às variáveis independentes (separadas ou num cubo tridimensional). Esta etapa faz a “coleta” do valor de cada variável independente de acordo com a posição definida pela lista de índices para cada processo de forma individual, gerando a saída que

é uma tabela com as variáveis dependentes e independentes a ser utilizada na análise de regressão logística no ambiente R.

3.4.2.3 Análise de regressão logística

A análise de regressão logística foi realizada no ambiente de programação de código-aberto voltado à estatística R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008) com o uso dois pacotes com funções para construção, seleção de variáveis e avaliação de performance: o pacote base do R e o pacote Design (HARRELL JR., 2012).

O início da construção dos modelos se inicia com o procedimento de seleção de variáveis foi a regressão logística *stepwise (backward)* baseado na estatística Wald com o nível de significância de 0.10. Este nível de significância foi escolhido de acordo com recomendações de Hosmer e Lemeshow (2000) que adotam níveis de significância de 0.05 a 0.2 para uma seleção que não descarte variáveis importantes com interações conhecidas com as variáveis dependentes.

Os modelos oriundos da regressão *stepwise* foram avaliados para a determinação do modelo final de acordo com três princípios fundamentais: a contribuição efetiva das variáveis nos modelos, a presença de efeitos de multicolinearidade entre variáveis e a performance dos modelos.

A contribuição das variáveis nos modelos foi avaliada por dois testes complementares baseados na Análise de Variância (ANOVA) com o nível de significância de 0.01. Inicialmente, foi adotado um teste que mede a contribuição com a adição de cada variável ao modelo, comparando com a variância do modelo nulo (apenas com o intercepto) através do valor de desvio (*deviance*). Após este foi realizado um teste que mede a contribuição de cada variável ao ser retirada do modelo através de um teste de razão de verossimilhança (*Likelihood Ratio Test - LRT*).

Os problemas de multicolinearidade afetam diretamente a qualidade dos modelos e as estimativas dos coeficientes da regressão pelo uso de variáveis redundantes altamente correlacionadas. Estes problemas foram avaliados pelo Fator de Inflação da Variância (*Variance Inflation Factor - VIF*) que quantifica, através de um índice, o quanto a variância de um coeficiente estimado da regressão é aumentada devido à colinearidade entre variáveis independentes. Uma regra geral para avaliação deste índice é que valores acima de 10 representam variáveis com problemas de multicolinearidade (NETER et al., 1985).

Diferente da regressão linear, que se baseia nos valores de R^2 de 0 a 1 para a avaliação da performance dos modelos baseada na análise de resíduos, a regressão logística não possui uma avaliação direta como esta que não pode ser aplicada diretamente a dados com distribuição binária. No caso da regressão logística, a avaliação da performance dos

modelos é realizada pela curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) e sua estimativa da área abaixo da curva (*Area Under Curve* - AUC) que apresenta uma amplitude de 0.5 a 1, onde, por exemplo, uma AUC de 0.8 representa que a seleção aleatória de casos do grupo de sucessos de classificação teve um maior número em relação aos casos do grupo de erros em 80% do tempo. Quando o modelo não consegue distinguir entre os grupos de acertos e erros de classificação, o valor da AUC é de 0.5 e, quando há uma perfeita separação entre ambos, o valor da AUC é igual a 1.

3.4.2.4 Módulo de cálculo de mapas de probabilidade de transição

O módulo de cálculo de mapas de probabilidade de transição tem como entrada os dados matriciais com as variáveis independentes e uma tabela em formato ASCII com uma lista com os coeficientes do intercepto e das variáveis independentes. Este é um módulo individual, onde cada modelo é calculado separadamente. A partir destes dados de entrada são produzidos mapas de probabilidades de transição de acordo com o modelo de regressão logística:

$$P_{i,j} = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_{1,i,j} + \dots + \beta_n X_{n,i,j}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_{1,i,j} + \dots + \beta_n X_{n,i,j}}} \quad (3.1)$$

onde $P_{i,j}$ é a probabilidade de transição em cada pixel, β_0 é o intercepto do modelo, $\beta_{1,n}$ é o coeficiente de cada variável independente e $X_{n,i,j}$ é o valor de cada variável independente em cada pixel.

A saída deste módulo corresponde aos mapas de probabilidade de transição que são utilizados como entrada no módulo de alocação espacial. Neste trabalho, os mapas corresponderam à probabilidade de transição de acordo com os 7 processos de MUCT identificados na área de estudo: degradação florestal, degradação de campos, regeneração, intensificação, extensificação, expansão da silvicultura e urbanização.

3.4.3 Alocação espacial das mudanças de uso e cobertura da terra

A alocação espacial das transições foi baseada na abordagem de autômatos celulares, seguindo outros modelos de MUCT como DINAMICA-EGO e MOLAND, através de um processo de ordenação e de escolha dos pixels candidatos a transição de acordo com o número de vizinhos e com a probabilidade de transição que busca preencher as demandas de transição nos passos de tempo do modelo. A escolha de métodos baseados em autômatos celulares se refere à potencialidade destes em representar de forma realística a dinâmica das transições com a formação de padrões globais complexos a partir de regras locais simples, característica inerente aos sistemas complexos.

Neste modelo, o total das demandas de cada transição é dividido entre dois processos de

alocação: a) um processo de escolha ordenada de candidatos baseado em regras determinísticas de autômatos celulares e b) um processo de formação de manchas por crescimento de regiões a partir de sementes (*seeds*) estocásticas. Ambos procedimentos de alocação são baseados em demandas por região o que permite um maior controle pelo modelador das transições de acordo com o conhecimento de realidades intra-regionais e acoplagem de modelos de escala regional e local.

A entrada do módulo de alocação espacial é composta pelo mapa de uso inicial, o mapa de regiões, os mapas de probabilidades de transição, a matriz de processos e a tabela de demandas de transição por região. Os parâmetros definidos pelo modelador são o número de vizinhos (de 1 até 8), o número de passos de tempo e a proporção do total da demanda de cada transição a ser satisfeita pelos dois procedimentos de alocação (de 0 a 1). Estes parâmetros são tratados de forma dinâmica no modelo, podendo ser flexibilizados durante a execução do módulo para a garantia de satisfação das demandas de transição ao final do período modelado.

O procedimento inicial na alocação espacial das transições é a geração de demandas de transição em múltiplos passos de tempo conforme o número destes definido pelo modelador. Após isto, ocorre a divisão proporcional da matriz de demanda total de transição de acordo com a porcentagem da função de alocação determinística por autômato celular definida para cada transição de acordo da seguinte forma:

$$Dt_r = \left(\frac{Pa_{tr} \times (\text{Autômato Celular})}{100} + \frac{Pb_{tr} \times (\text{Formação de Manchas})}{100} \right) / nt \quad (3.2)$$

onde Dt_r é a demanda total da transição t na região r num passo de tempo único, Pa é a proporção para a função determinística de autômato celular, Pb é a proporção para a função aleatória de formação de manchas, onde $Pb = 100 - Pa$ e nt é o número de passos de tempo.

3.4.3.1 Alocação espacial baseada em autômatos celulares

O procedimento de alocação espacial baseada em autômatos celulares buscou a satisfação das demandas de transição definidas pela proporção das demandas totais de cada transição definida a este procedimento de alocação. Este procedimento foi implementado por região a partir de regras determinísticas de vizinhança e a ordenação das probabilidades de transição, sendo realizado em separado para cada transição. O procedimento envolve rotinas conjugadas de análise de vizinhança, filtragem e ordenação de candidatos num procedimento iterativo até o cumprimento das demandas de cada transição. O principal resultado deste procedimento, do ponto de vista da configuração espacial das MUCT, é a expansão

de manchas de uso e cobertura da terra previamente existentes nas bordas (limites) com áreas de outras classes, forma bastante comum de MUCT (e.g., desmatamento, expansão de cultivos e manchas urbanas em regiões de bordas).

O algoritmo inicia com uma filtragem de candidatos (Figura 3.11) a partir de uma análise de vizinhança baseada no tipo de vizinhança Moore (8 vizinhos numa janela de 3×3 pixels) que é utilizado na maioria dos modelos de MUCT baseados em autômatos celulares. Este procedimento foi gerado com base na resolução espacial de 30 metros, conferindo um nível maior de detalhamento das MUCT em relação aos modelos baseados em dados generalizados. A análise de vizinhança realiza a definição do número de vizinhos da mesma classe do pixel central da janela e do número de vizinhos de cada uma das classes. A partir desta análise de vizinhança, inicia-se o processo de filtragem de candidatos a transição com a geração de uma lista dos índices dos pixels candidatos. Este processo é definido essencialmente de acordo com o parâmetro de número de vizinhos definido pelo modelador na regra de autômato celular. A regra de autômato celular implementada na filtragem inicial dos pixels candidatos a transição pode ser definida a partir da seguinte cláusula do tipo se-então (if-then):

$$\text{If } nl \geq v \text{ then } m_{ijr} = l_{ijr} \quad (3.3)$$

onde nl é o número de células da classe l encontrada na janela de 3×3 pixels, m_{ijr} é o pixel central da janela com classe m na região r , l_{ijr} é um pixel presente na lista de candidatos à transição da classe m para a classe l e v é o parâmetro de número de vizinhos definido pelo modelador.

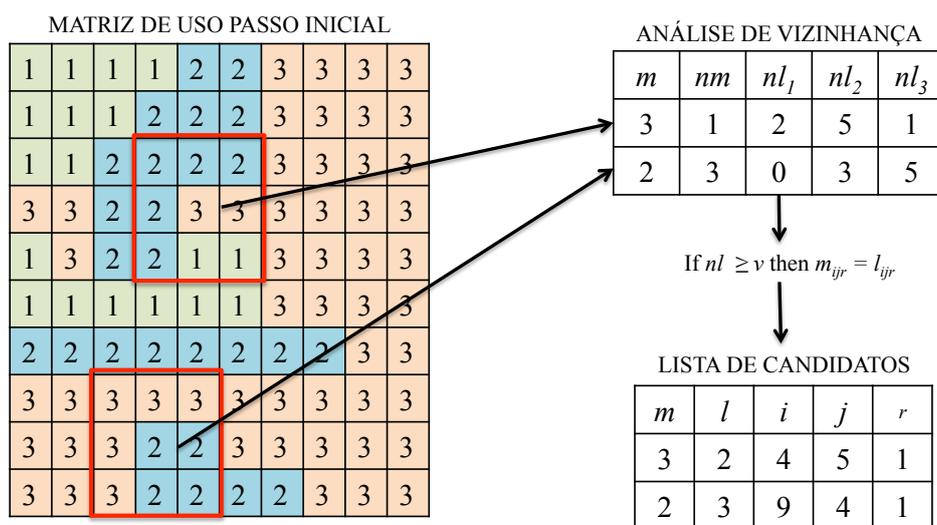


Figura 3.11 - Filtragem de candidatos a transição em um passo de tempo através de análise de vizinhança, regras de autômato celular e lista de candidatos a transição.

Por exemplo, no caso do parâmetro v ser definido como igual a 4, apenas os pixels da classe inicial com mais de 4 pixel vizinhos da classe final serão considerados para a geração de uma transição para a classe final de interesse. Assim, para a definição dos candidatos a uma transição, são filtrados os pixels da classe inicial de transição que apresentam um número de vizinhos maior do que o mínimo da classe final de transição. Desta maneira são escolhidos os elementos nas bordas de uma classe inicial que apresentam um número acima do mínimo de vizinhos de outras classes, gerando um processo de expansão das manchas anteriores da classe final de transição. Este procedimento inicial de filtragem de candidatos potenciais é realizado para cada uma das transições.

Após esta filtragem inicial, os pixels candidatos são ordenados em ordem decrescente. Isso, de acordo com os mapas de probabilidade de transição para o processo referente à cada transição modelada (identificados pela matriz de processos da Figura 3.10). E, por fim, os pixels candidatos a transição são escolhidos até a satisfação das demandas requeridas para cada transição em cada região. A satisfação das demandas pode não ser completamente satisfeita devido à oferta de candidatos em relação às demandas requeridas. Desta forma os parâmetros de número de vizinhos e de passos de tempo do modelos foram flexibilizados para a satisfação mais próxima das demandas. No intervalo 1986-2002 foram utilizados 16 passos de tempo e o número de vizinhos igual a 3, já no intervalo 2002-2008 foram utilizados 20 passos de tempo e o número de vizinhos igual a 3. Esta configuração foi determinado pelo procedimento de calibração, sendo a configuração que permitiu atender as demandas de transição nestes modelos.

O procedimento de alocação espacial das transições adotado de filtragem de pixels candidatos foi dirigido à eficiência computacional do código, pois há uma vantagem em termos de rapidez ao uso de dados escalares em comparação aos dados matriciais nos procedimentos de iteração (*loops*) na linguagem Fortran 90, a qual foi concebida para operações com dados escalares. Assim, a alocação de demandas de transição com listas de candidatos filtrados previamente se torna mais rápida do que em algoritmos que buscam em toda matriz os candidatos para a alocação de cada demanda de transição.

3.4.3.2 Alocação espacial com formação de manchas

O procedimento de alocação espacial com formação de manchas foi baseado numa abordagem estocástica onde estas são geradas através de uma técnica de crescimento de regiões a partir de sementes escolhidas de forma aleatória. Uma função semelhante de formação de manchas está presente no modelo DINAMICA-EGO com o mesmo objetivo de simular MUCT que não ocorrem apenas nas bordas entre manchas, mas que envolvem transformações abruptas do interior de manchas pré-existentes (por exemplo, novas plantações agrícolas e de silvicultura, novas manchas urbanas, etc.).

Os parâmetros definidos pelo usuário são a média e o desvio-padrão da área de cada tipo de transição que devem ser calculados com o uso de métricas em nível de paisagem do software Fragstats (MACGARIGAL; MARKS, 1995) ou em ambiente de SIG. Para gerá-los em ambiente de SIG, basta a geração de um mapa de mudanças com base nos mapas iniciais e finais, a conversão do formato matricial para vetorial deste mapa, o cálculo de áreas de cada mancha de transição e, por fim, o cálculo das estatísticas de média e desvio-padrão da área por cada classe de transição. O resultado deste procedimento deve ser representado, para a entrada no modelo, através de tabelas com a média (Tabela 3.7) e o desvio-padrão (Tabela 3.8) das áreas de cada transição, dispostas como a matriz de processos, i.e., a cada transição corresponde sua média e desvio-padrão de área da mancha a ser gerada em metros quadrados.

Tabela 3.7 - Exemplo de tabela com as médias das áreas de cada transição pra o intervalo 2002-2008, em metros quadrados.

2002	2008						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
FOM	0.0	0.0	127678	51899	26176	2000078	0.0
CAMPO	0.0	0.0	62192	1001733.60	1243900	25359	0.0
SILV	0.0	0.0	0.0	29767	47864.38	0.0	0.0
AG-FAM	3000078	0.0	0.0	0.0	63312	270018	0.0
AGGP	0.0	0.0	320029	72458.0	0.0	26352	0.0
URB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ÁGUA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabela 3.8 - Exemplo de tabela com as medidas de desvio-padrão das áreas de cada transição pra o intervalo 2002-2008, em metros quadrados.

2002	2008						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
FOM	0.0	0.0	6730055	161978	69423	58732	0.0
CAMPO	0.0	0.0	187283	2510084	257735	640079	0.0
SILV	0.0	0.0	0.0	98982	132869	0.0	0.0
AG-FAM	79930	0.0	0.0	0.0	1560027	69869	0.0
AGGP	0.0	0.0	82639	156836	0.0	100494925936	0.0
URB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ÁGUA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Estes dados são utilizados em uma função de geração de manchas (Figura 3.12) onde o tamanho de cada mancha a ser gerada e o número de sementes são definidos com base

numa distribuição gaussiana com a média e o desvio-padrão de cada transição em particular. Esta função funciona como um gerador aleatório de áreas de manchas com base numa distribuição gaussiana definida a partir da média e do desvio-padrão das áreas de manchas inseridos pelo usuário. Assim, as sementes da classe inicial são selecionadas de forma aleatória e os pixels vizinhos da mesma classe vão sendo escolhidos até cumprirem o tamanho da mancha sorteada na função de distribuição gaussiana. Esta função de crescimento de regiões foi baseada num padrão radial de expansão das manchas que assumem um formato circular.

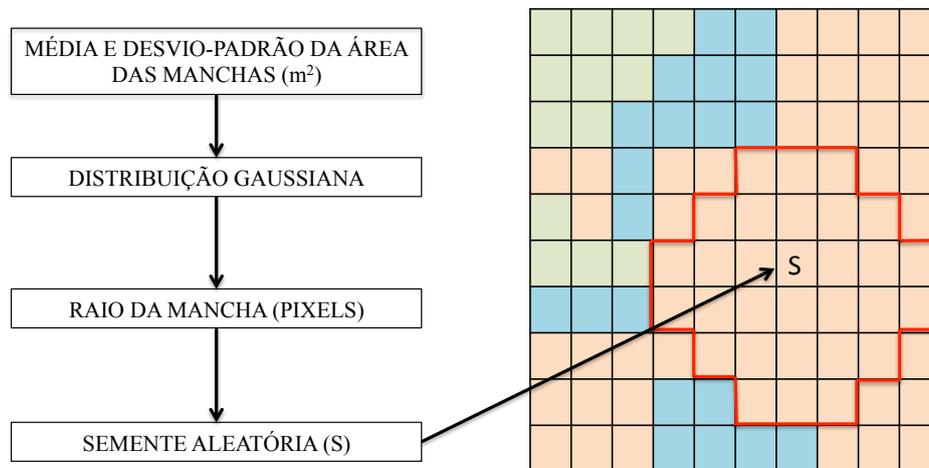


Figura 3.12 - Função de geração de manchas a partir de uma semente aleatória.

3.4.4 Calibração e validação dos modelos

A calibração dos modelos foi realizada através da modelagem em separado dos dois intervalos de tempo (1986-2002 e 2002-2008), sendo analisada através da comparação (validação) dos resultados dos modelos com diferentes parâmetros com o uso real mapeado no passo de tempo final dos modelos (2002 e 2008, em cada intervalo respectivamente). A partir dos resultado desta validação, foram calibrados parâmetros como o número de passos de tempo e as proporções entre as funções determinística de autômato celular e de formação de manchas. Assim os parâmetros dos modelos com melhores resultados serviram para a parametrização do módulo de geração de cenários futuros.

A técnica de validação utilizada foi o procedimento de validação multi-resolução baseado em janelas móveis (COSTANZA, 1989) que foi implementado para a avaliação da qualidade de modelos de simulação ecológicos e é amplamente utilizado em modelos de MUCT que utilizam dados categóricos (SOARES-FILHO et al., 2002; VERBURG et al., 2002; CASTELLA; VERBURG, 2007). A principal característica desta técnica é a busca das porcentagens de

ajuste em múltiplas resoluções, o que é importante em modelos de MUCT, onde uma validação pontual pixel a pixel não caracteriza de forma satisfatória resultados que devem ser apreciados sob o ponto de vista da paisagem e das coincidências em diversas escalas. Conceitualmente, este procedimento apresenta semelhanças com a abordagem fractal e a questão da escala que se relaciona diretamente com a abordagem integrada e hierárquica da paisagem (COSTANZA, 1989).

Este procedimento é baseado nas proporções de ajuste em cada janela móvel com tamanho crescente (de 1 até o tamanho máximo de janela definido pelo usuário) definidas como 1 – a proporção de acertos em cada janela do mapa final simulado em relação ao mapa final real. Como pode ser visto no exemplo da Figura 3.13, esta taxa de ajuste numa janela de 2x2 pixels em que dois dos quatro pixels corresponderam em ambos mapas é de 50%.

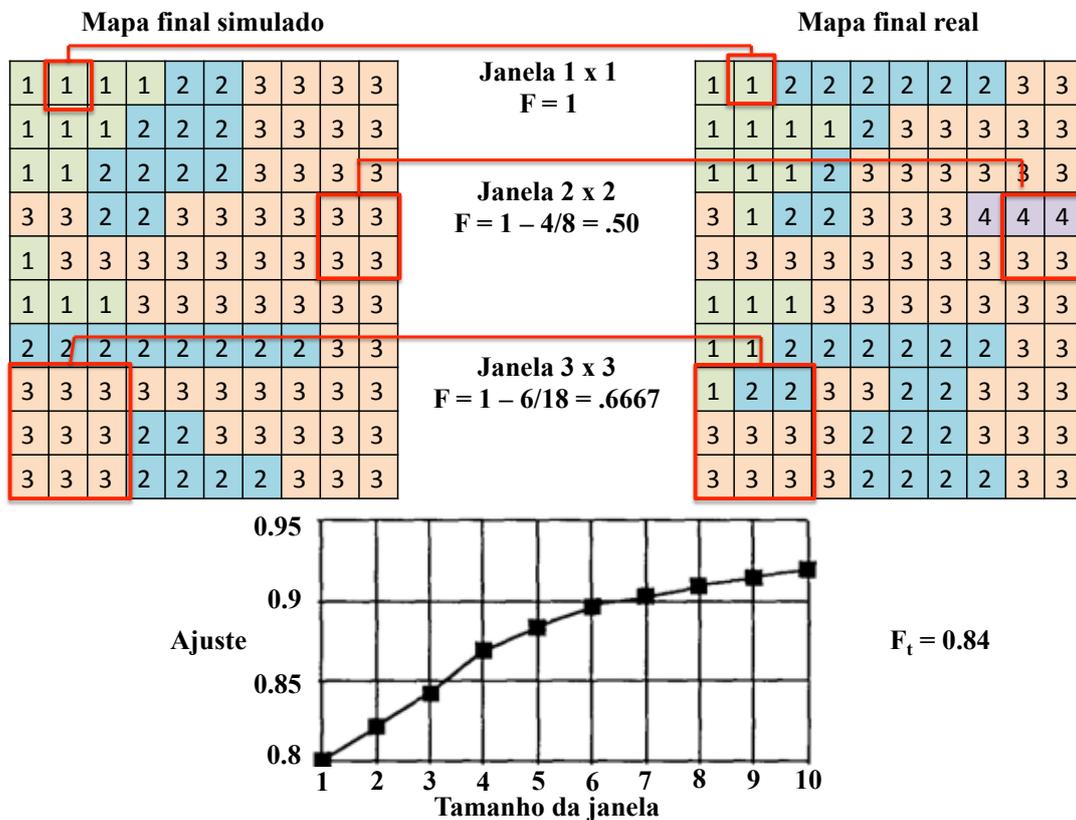


Figura 3.13 - Exemplo do procedimento de validação multi-resolução baseado em janelas móveis em duas cenas de 10 x 10 pixels com o mapa real e o mapa simulado em quatro categorias. Os dois mapas apresentam um ajuste moderadamente bom com um aumento significativo conforme maior a resolução. O ajuste total (F_t) é uma média exponencialmente ponderada dos valores de ajuste em todas janelas.

Fonte: Adaptado de (COSTANZA, 1989).

Este procedimento é realizado até percorrer toda a matriz dos mapas de acordo com o tamanho da janela e é agregado em todos os níveis de resolução de acordo com a seguinte fórmula:

$$F_w = \frac{\sum_{s=1}^{t_w} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^c |a_{1i} - a_{2i}|}{2w^2} \right]_s}{t_w} \quad (3.4)$$

onde F_w é o ajuste para o tamanho de janela w , w é a dimensão em pixels de um lado da janela, a_{ki} é o número de células da categoria i da cena k na janela de amostragem, c é o número de diferentes categorias na janela, s é a janela móvel de dimensão w por w que percorre as células uma de cada vez e t_w é o total de janelas de amostragem de tamanho w na cena.

Uma medida global da proporção de acertos é gerada através da média ponderada das taxas de ajuste dos diferentes tamanhos de janela móvel com maior peso para janelas pequenas e menor peso às maiores janelas, sem ignorar no seu cálculo as janelas de maior tamanho. Esta medida é considerada a partir da seguinte fórmula:

$$F_t = \frac{\sum_{w=1}^n F_w e^{-k(w-1)}}{\sum_{w=1}^n e^{-k(w-1)}} \quad (3.5)$$

onde F_t é a média ponderada do ajuste em todas janelas móveis, F_w é o ajuste da janela de dimensão w , w é a dimensão em pixels de um lado da janela e k é uma constante. Esta fórmula apresenta uma função de decaimento exponencial do peso para janelas móveis através do valor de k onde, se $k = 0$, todas janelas tem o mesmo peso e, se $k = 1$, apenas as janelas menores serão importantes.

Esta técnica de validação serviu como medida comparativa no procedimento de calibração. Este procedimento foi iniciado com o parâmetro da proporção entre a demanda a ser realizada pelas duas funções de alocação espacial sendo definido como 100 para todas as transições, ou seja, apenas é realizada a função de autômato celular determinística. Por sua característica determinística (i.e., seu resultado não varia), esta configuração inicial serve como parâmetro de comparação com os resultados do modelo com a presença da função de formação aleatória de manchas. Desta forma, múltiplos modelos foram rodados nos dois intervalos 1986-2002 e 2002-2008 com a variação da proporção entre as duas funções de alocação espacial e também do número de passos de tempo até a escolha dos parâmetros dos modelos finais de acordo com a medida de validação utilizada para comparação dos resultados.

3.4.5 Geração de cenários de prognose

A geração de cenários de mudanças de uso e cobertura da terra requer uma série de premissas teóricas e análises de dados para um sucesso efetivo em seu objetivo que é o suporte à tomada de decisões em nível de planejamento territorial e gestão ambiental. Para tal, são fundamentais dados a respeito do comportamento dos diversos agentes de MUCT (grandes e pequenos agricultores, empreendedores, tomadores de decisão em geral, etc.) em diferentes níveis de ação. Trabalhos neste sentido usam diferentes técnicas participativas em escala local como enquetes de campo (*field surveys*) e encontros (*workshops*) com questionários para a geração de cenários cognitivos de MUCT (VLIET et al., 2010), o uso de pinturas para representação de cenários da paisagem (PALANG et al., 2000) e a aplicação de jogos interativos com as comunidades envolvidas com as MUCT (CASTELLA; VERBURG, 2007). Já outros trabalhos buscam a geração de cenários de MUCT conforme os resultados de outros modelos como os de mudanças climáticas globais e demandas futuras de energia renovável (ROUNSEVELL et al., 2006), taxas de desmatamento a partir de modelos econométricos e espaciais (AGUIAR, 2006; NEPSTAD et al., 2009), entre outros modelos em escala regional e global. Por fim, como neste trabalho, há a abordagem de modelos de dinâmica de sistema (*system dynamics model*) que são utilizados nos modelos de MUCT para a estimativa de taxas futuras de transição de acordo com variáveis de cenários, em sua maioria de cunho social, que estão diretamente relacionadas com os possíveis padrões futuros da configuração da paisagem (RASMUSSEN et al., 2012). Os modelos de dinâmica de sistema são usualmente utilizados de forma acoplada aos modelos de dinâmica espacial de MUCT para a mensuração das taxas de transição a serem implementadas nos cenários de prognose (LUO et al., 2010).

Neste trabalho, pela falta de dados em escala local e pela escala incompatível dos cenários dos modelos globais e regionais, optou-se pela adoção de uma abordagem empírica baseada nos modelos teóricos e seus respectivos processos de MUCT identificados na área de estudo. Esta abordagem se baseia na perspectiva de que tais modelos teóricos apresentam relação direta com o paradigma e as estratégias de desenvolvimento globais, regionais e locais adotadas pelos diferentes atores das MUCT nas suas diversas escalas de atuação. Desta maneira, foram gerados cenários de prognose de MUCT de acordo com três diferentes perspectivas de desenvolvimento da sociedade: a) um modelo que retrata as condições atuais do paradigma de desenvolvimento capitalista (cenário *business as usual* - BAU), b) um modelo característico de uma estratégia alternativa de desenvolvimento participativo e sustentável (cenário ecológico) e c) um modelo que reflita a ampliação e recrudescimento do modelo atual de desenvolvimento capitalista (cenário econômico).

Para a geração destes cenários, foram utilizadas diferentes demandas de transição regionais relacionadas com os processos de MUCT identificados com base na tipologia dos hólons oriundos do zoneamento hierárquico da paisagem. Assim, diferentes taxas de transição

para cada processo e cada região foram consideradas para o cálculo das demandas totais regionais a serem cumpridas pelos modelos de geração de cenários entre 2008 e 2030. Para a alocação espacial destas demandas de transição regionais, foram utilizados os parâmetros calibrados do intervalo de tempo 2002-2008, pois este intervalo expressa com maior fidelidade a atualidade das condições de MUCT na área de estudo.

Para a modelagem da proporção de incremento das demandas de transição originais do intervalo de calibração (neste caso o período 2002-2008), foi desenvolvido um modelo de dinâmica de sistema através da plataforma de modelagem NetLogo (WILENSKY, 1999). A estrutura do modelo de dinâmica de sistemas adotado (Figura 3.14) corresponde aos fluxos de demandas de transição, permitindo a construção de cenários através das áreas de usos e proporções de incremento dos processos de MUCT.

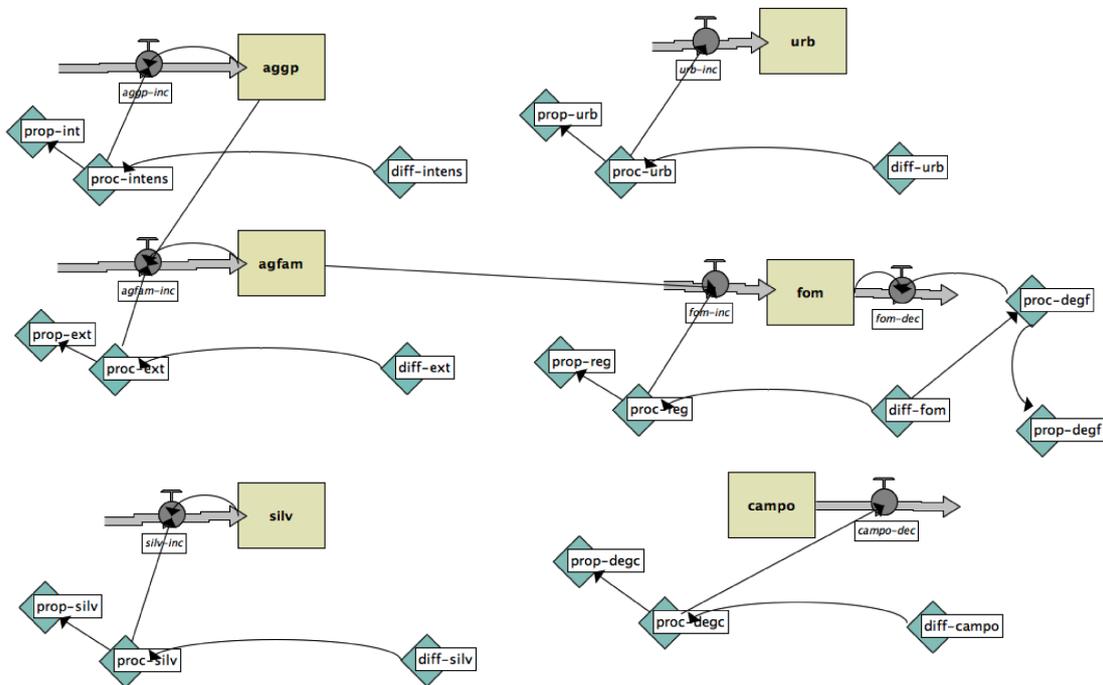


Figura 3.14 - Estrutura do modelo dinâmico de sistema adotado.

Este modelo de dinâmica de sistema foi baseado em quatro variáveis relacionadas com os cenários de prognose (Figura 3.15): capital e ambiente representando a ênfase e os valores assumidos pelo modelo de desenvolvimento adotado pela sociedade, e tecnologia moderna e tecnologia tradicional que representam os tipos de tecnologias adotadas. Tais variáveis foram representadas por valores variando de 0 a 0.5 no caso das variáveis que potencializam os cenários atuais e de ampliação do modelo de desenvolvimento capitalista e de 0 a -0.5 no caso das variáveis que potencializam os cenários alternativos com maior participação e sustentabilidade.

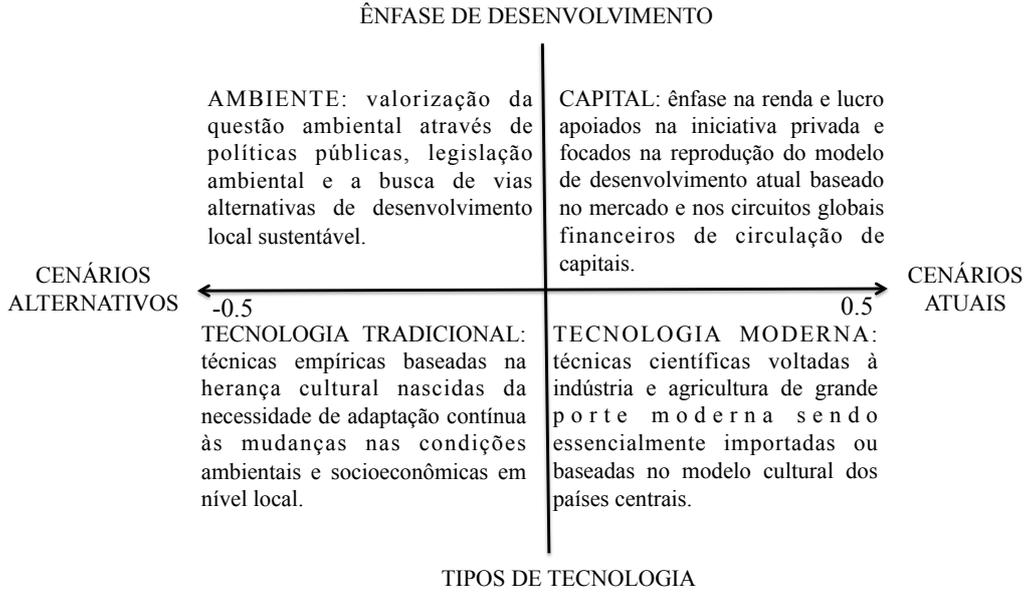


Figura 3.15 - Variáveis adotadas para a geração dos cenários de prognose.

Inicialmente é necessária a conversão das taxas de demanda de transição em pixels para a representação de probabilidades de transição a partir da seguinte equação:

$$Pt_l = \frac{Dt_l}{LU_m} \quad (3.6)$$

onde Pt_l é a probabilidade de transição para a transição l , Dt_l é a demanda de transição l oriunda da calibração em pixels e LU_m é o total de pixels da classe inicial m da transição.

A partir das variáveis de cenários, é calculada a proporção de incremento ou diferença das demandas de transição da seguinte forma:

$$Prop_{cen} = \frac{(Pr_t + Pr_t \times (w \times K + z \times M + y \times A + u \times T)) - Pr_t}{Pr_t} \quad (3.7)$$

onde $Prop_{cen}$ é a proporção de incremento das demandas de transição para cada processo de MUCT modelado, K é a variável de capital, M é a variável de tecnologia moderna, A é a variável de ambiente, T é a variável de tecnologia tradicional, w , z , y e u são constantes. Tais constantes são proporções fixadas para cada variável de acordo com o grau de importância destas em cada região e em cada processo, variando de 0.7 a 0.9 conforme a potencialidade de uma reação maior ou menor frente às alterações nas condições das variáveis dos cenários.

A partir dos parâmetros iniciais de totais de usos e de probabilidades de transição iniciais e com a variação dos pesos assumidos para cada variável, as proporções de incremento das

demandas de transição são calculadas para cada uma das cinco regiões (hólons), além dos totais de cada classe de uso e cobertura da terra nos passos iterativos do modelo, como pode ser visto na Figura 3.16.

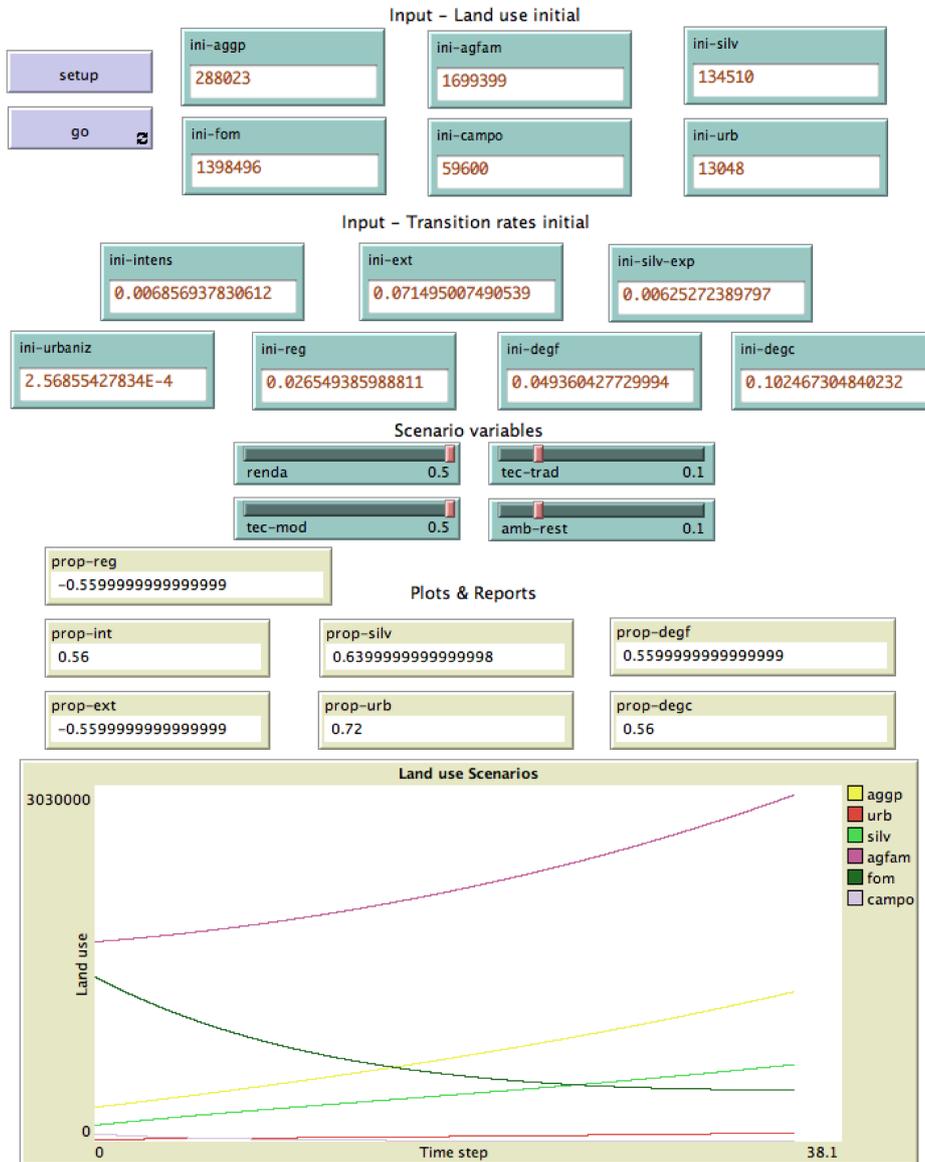


Figura 3.16 - Interface do modelo de dinâmica de sistemas com os dados de entrada, as variáveis dos cenários e os resultados gráficos com os totais em cada passo de tempo das classes floresta (fom), campo nativo (campo), silvicultura (silv), agricultura familiar (agfam), agricultura de grande porte (aggp) e urbano (urb).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados desta pesquisa de acordo com a metodologia adotada. São apresentados, desta forma, os resultados do processamento das variáveis paisagísticas utilizadas como base para todas as análises, do zoneamento hierárquico da paisagem e da modelagem da dinâmica da paisagem.

4.1 Sensoriamento Remoto, SIG e as variáveis paisagísticas

Os resultados do processamento das variáveis paisagísticas foram organizados num banco de dados geográficos em formato vetorial e matricial de acordo com a característica dos dados, sendo todas variáveis transformadas para o formato matricial para a modelagem da dinâmica da paisagem. As variáveis socioambientais utilizadas neste estudo 3.1 foram representadas de diferentes formas de acordo com os requisitos das etapas metodológicas implementadas ao longo do trabalho. Alguns exemplos das variáveis paisagísticas geomorfológicas, de métricas de paisagem e sociais podem ser vistos na Figura 4.1.

Neste caso, os resultados do zoneamento hierárquico da paisagem, como as UPP, foram representados em formato vetorial com a topologia das unidades de paisagem e os atributos socioambientais armazenados na tabela de atributos. Para isto foi necessária a discretização de dados contínuos (MDE e produtos derivados, mapas de distâncias e métricas de paisagem) através de estatísticas zonais (média, desvio-padrão e amplitude). Já na entrada do modelo de dinâmica espacial desenvolvido, os dados contínuos foram mantidos em seu formato original, a não ser as métricas de paisagem, as quais foram utilizadas em nível da paisagem com exceção da distância euclidiana entre manchas (ENN) utilizada em formato contínuo.

Os resultados da classificação de imagens multitemporais (1986-2008) permitiram uma visão inicial a respeito da dinâmica da paisagem nas duas últimas décadas. Tais resultados (Figura 4.2 e Figura 4.3) mostram a maior importância relativa em termos de área das classes de cobertura da terra (floresta ombrófila mista e campo nativo), seguidas pelas classes de uso da terra da agricultura familiar, agricultura de grande porte, silvicultura e urbano. Em relação à dinâmica de uso e cobertura da terra no período, nota-se uma tendência de diminuição da área com cobertura vegetal, especialmente do campo nativo, e um aumento da área de agricultura de grande porte, silvicultura e urbano. Também se percebe uma relação direta do aumento e diminuição da área de floresta com o comportamento inverso das áreas de agricultura familiar, sendo esta relação uma característica da forma de ocupação do espaço da agricultura de subsistência em ciclos de usos agrícolas, pastagens e pousio com a formação de capoeiras. O aumento da área da classe água está relacionado com a inundação imposta por novas barragens, especialmente entre 2002 e 2008.

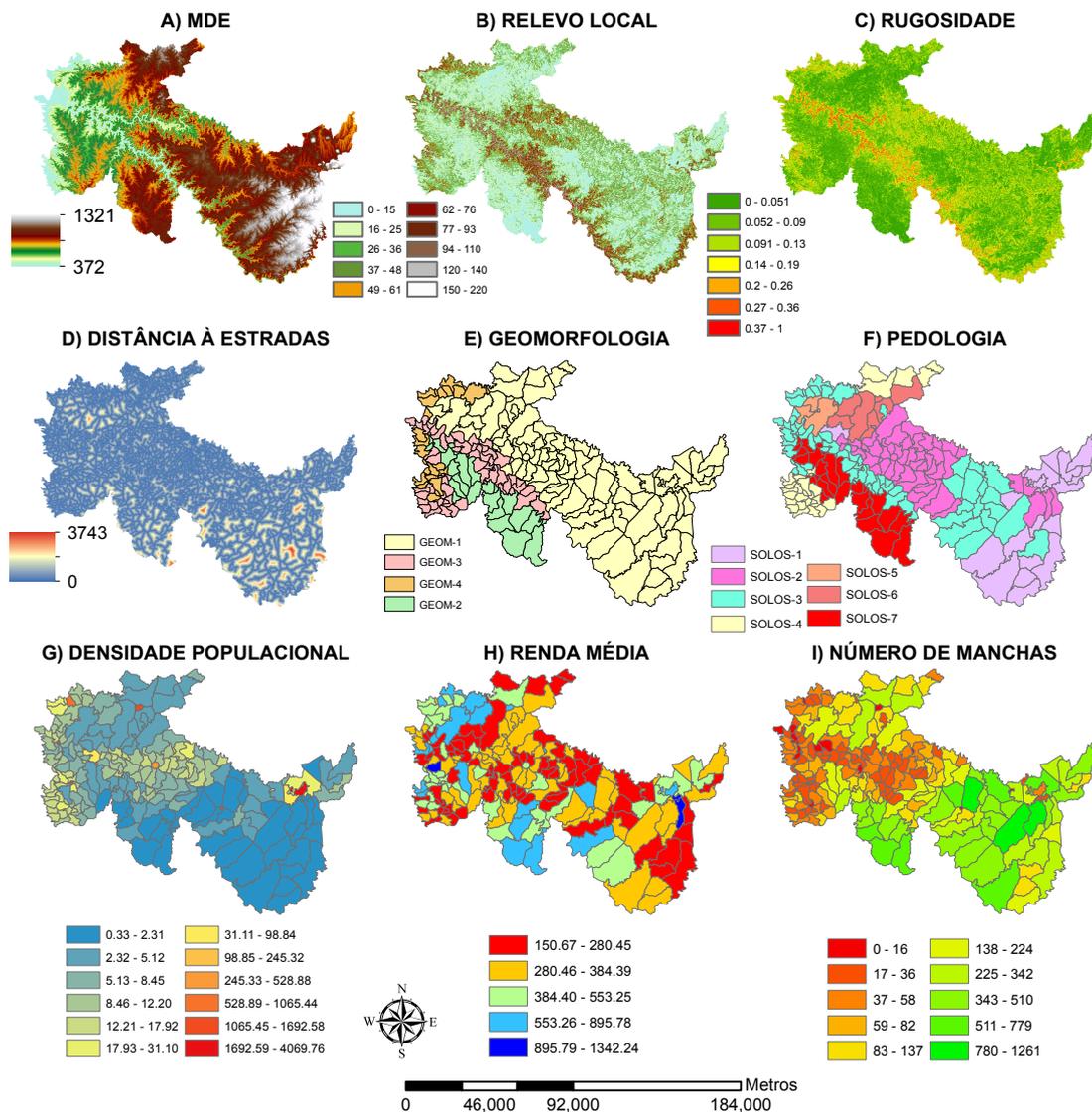


Figura 4.1 - Exemplos das variáveis paisagísticas físicas, ecológicas e sociais processadas em ambiente de SIG.

A validação dos resultados da classificação do último ano (2008) com pontos georreferenciados coletados em campo ($n = 470$) mostrou resultados muito bons de acordo com a classificação de Hudson e Ramm (1987) com uma porcentagem de acerto total de 90.4% e um coeficiente de concordância kappa de $\kappa = 0.88$. Tais resultados da validação mostram uma confiabilidade dos dados de uso e cobertura da terra gerados, os quais podem ser devidamente utilizados para o mapeamento dos processos de mudanças de uso e cobertura da terra que apresentaram uma porcentagem de área superior em relação à porcentagem de erros de classificação.

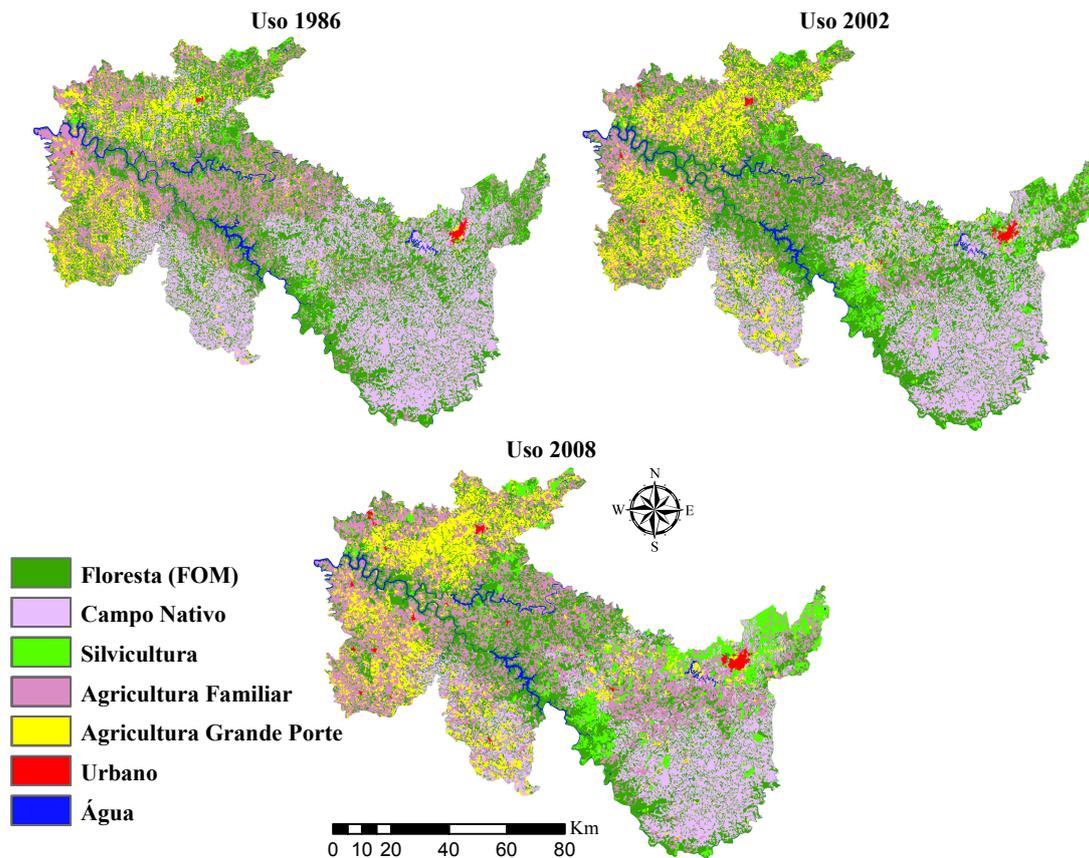


Figura 4.2 - Áreas (em hectares) das classes de uso e cobertura da terra em 1986, 2002 e 2008.

4.2 Zoneamento hierárquico da paisagem

Nesta seção são apresentados os principais resultados do zoneamento hierárquico da paisagem e da metodologia desenvolvida para a definição e tipologia das Unidades de Planejamento da Paisagem (UPP) através do mapeamento integrado da paisagem e da análise multivariada das UPP. Também é realizada uma análise a respeito dos padrões de paisagem associados com a tipologia das unidades de paisagem hierárquicas (hólons) definidas neste estudo.

4.2.1 Mapeamento integrado da paisagem

O resultado final das etapas metodológicas do mapeamento integrado da paisagem são as Unidades de Planejamento da Paisagem (UPP) que foram geradas através da compatibilização de unidades de paisagem, baseadas em variáveis físicas e ecológicas, com os setores censitários, unidade de agregação de dados sociais. No mapeamento destas unidades de paisagem, baseadas em fatores físicos e ecológicos (geons da paisagem), foi fundamental a contribuição dos dados geoespaciais (variáveis geomorfométricas e imagens de satélite)

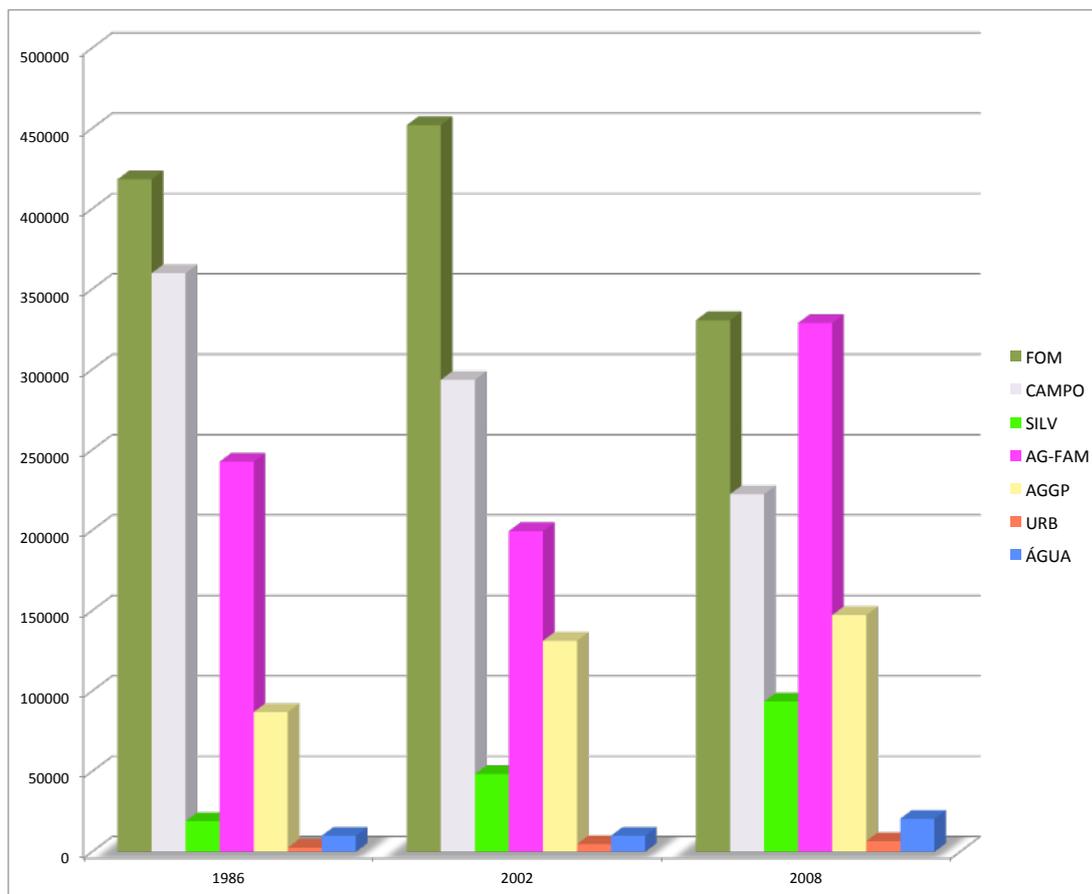


Figura 4.3 - Áreas (em hectares) das classes de uso e cobertura da terra em 1986, 2002 e 2008. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.

tratados num ambiente de GEOBIA. Isto permitiu a definição semi-automática de limites entre mosaicos da paisagem através da técnica de segmentação multi-resolução. Apesar de ser um dado intermediário, e não o resultado final do mapeamento integrado, os geons da paisagem apresentam grande relevância para uma boa definição das UPP, pois estas dependem de uma síntese das correlações entre as variáveis físicas e ecológicas definidas nos geons da paisagem.

As UPP's podem ser consideradas uma espécie de banco de dados da paisagem ou Modelo Digital da Paisagem (LANG; BLASCHKE, 2009) que se apresenta na forma de unidades compatibilizadas com setores censitários, i.e., apresentam concordância com os limites administrativos, de modo especial em nível local. Esta característica apresenta grande potencialidade para a implementação de políticas públicas e à tomada de decisões relacionadas com o planejamento territorial e a uma ampla gama de problemáticas relacionadas à fatores socioambientais (como desastres naturais, desenvolvimento local e regional, pesquisa

e desenvolvimento, entre outras). Neste trabalho, foram definidas um total de 218 UPP's com um área média de 52.75 quilômetros quadrados que permitem a realização de estudos na escala da paisagem como definida por Forman (1995) com uma adequada representação das métricas em nível de paisagem. Para tal, as UPP's serviram como unidades para agregação hierárquica (“*scaling*”) dos dados matriciais contínuos (variáveis geomorfométricas) e dados vetoriais discretizados por manchas (métricas da paisagem). Esta agregação hierárquica é um fator essencial para o desenvolvimento de estudos a respeito de sistemas complexos como a paisagem que se baseiam na aplicação de informações com múltiplas escalas de representação, o que é um fator reconhecido em diversos estudos de Ecologia da Paisagem para o aumento do erro e da incerteza (COSTANZA; VOINOV, 2004). A abordagem adotada, baseada na agregação com base nas UPP's, é uma forma de resposta a esta lacuna nos estudos envolvendo a paisagem e o uso integrado de variáveis físicas, ecológicas e sociais.

A catalogação em ambiente de SIG de variáveis físicas, ecológicas e sociais permite a geração de múltiplas análises relacionadas aos mais diversos temas de pesquisa interdisciplinares e multidisciplinares, os quais podem se desenvolver sob a mesma base de divisão do espaço. A escolha de setores censitários recaiu por esta ser a unidade mínima de divulgação de dados sociais pelo órgão de pesquisa governamental. Em outras situações essa escolha deve ser adaptada, podendo ser escolhida outra unidade mínima para compatibilização (e.g., bacias e microbacias hidrográficas ou outros limites político-administrativos). Como os setores censitários respeitam limites político administrativos de nível local como distritos rurais, bairros urbanos, terras indígenas e outras, estes apresentam grande potencialidade para a implementação de políticas públicas de planejamento territorial.

4.2.2 Análise multivariada das Unidades de Planejamento da Paisagem

O resultado da análise de agrupamento das UPP's em dois níveis hierárquicos (Figura 4.4) permitiu uma interpretação escalar das características paisagísticas principais e do quadro geral de correlações que regem os mosaicos de paisagem mapeados. Estes níveis foram baseados na concepção de hólons e definidos a partir das correlações entre as variáveis físicas, ecológicas e sociais agregadas no nível das UPP's.

Em relação ao nível hierárquico superior (3 hólons) este representa: a) áreas dominadas pela urbanização, agricultura de grande porte e processo de expansão da silvicultura (hólons A1); b) áreas relacionadas às práticas da agricultura familiar mista de semi-subsistência e às maiores manchas de florestas remanescentes (hólons A2); c) áreas com predomínio de campos nativos com a penetração de silvicultura, agricultura familiar e de grande porte em algumas partes (hólons A3). Já no nível inferior (5 hólons), ocorreu: a) a divisão do hólons A1 em relação às áreas de agricultura de grande porte (hólons B1) e de processos de urbanização e de expansão da silvicultura (hólons B5); b) o remodelamento do hólons A2

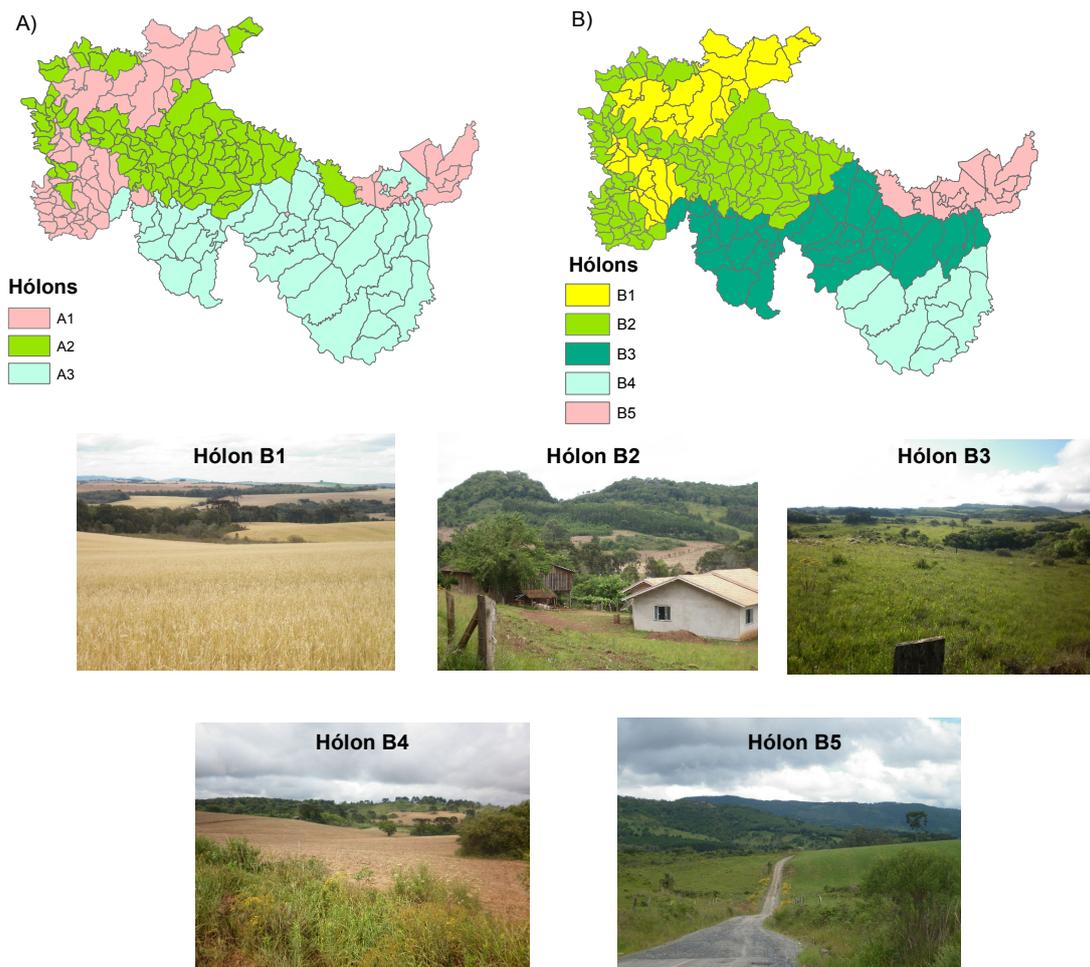


Figura 4.4 - Os dois níveis hierárquicos (hólons) gerados a partir da análise de agrupamento das variáveis socioambientais das UPP's e fotos de mosaicos de paisagem característicos.

de agricultura mista de cunho familiar (hólón B2); c) a divisão do hólón A3 em áreas com expansão de atividades agrícolas (hólón B3) e uma área conservada de campos nativos (hólón B4).

Os perfis geoambientais (Figura 4.5) permitem uma visualização da relação entre o suporte geoecológico (compartimentos topográficos, modelados do relevo associados a estes e agrupamentos de solos) e os sistemas e tipos de uso e cobertura da terra que os ocupam. O primeiro perfil geoambiental (A-B) mostra os padrões de paisagem relacionados aos hólons B1 e B2, bem como as áreas de contato entre estas unidades que representam os dois padrões de paisagem agrícola (tradicional colonial familiar x moderno intensivo de grande porte). O segundo perfil geoambiental (C-D) apresenta os padrões da paisagem dos hólons B1, B2, B3 e B4, adicionando aos dois padrões vistos no perfil anterior os hólons de campos nativos com pecuária extensiva tradicional e também com a penetração de

usos de silvicultura e agricultura familiar e de grande porte. O terceiro perfil geoambiental (E-F) revela os padrões da paisagem dos hólons B1, B2, B3 e B5, adicionando aos padrões vistos anteriormente o hólón urbano-industrial com expansão da silvicultura relacionada à indústria da celulose.

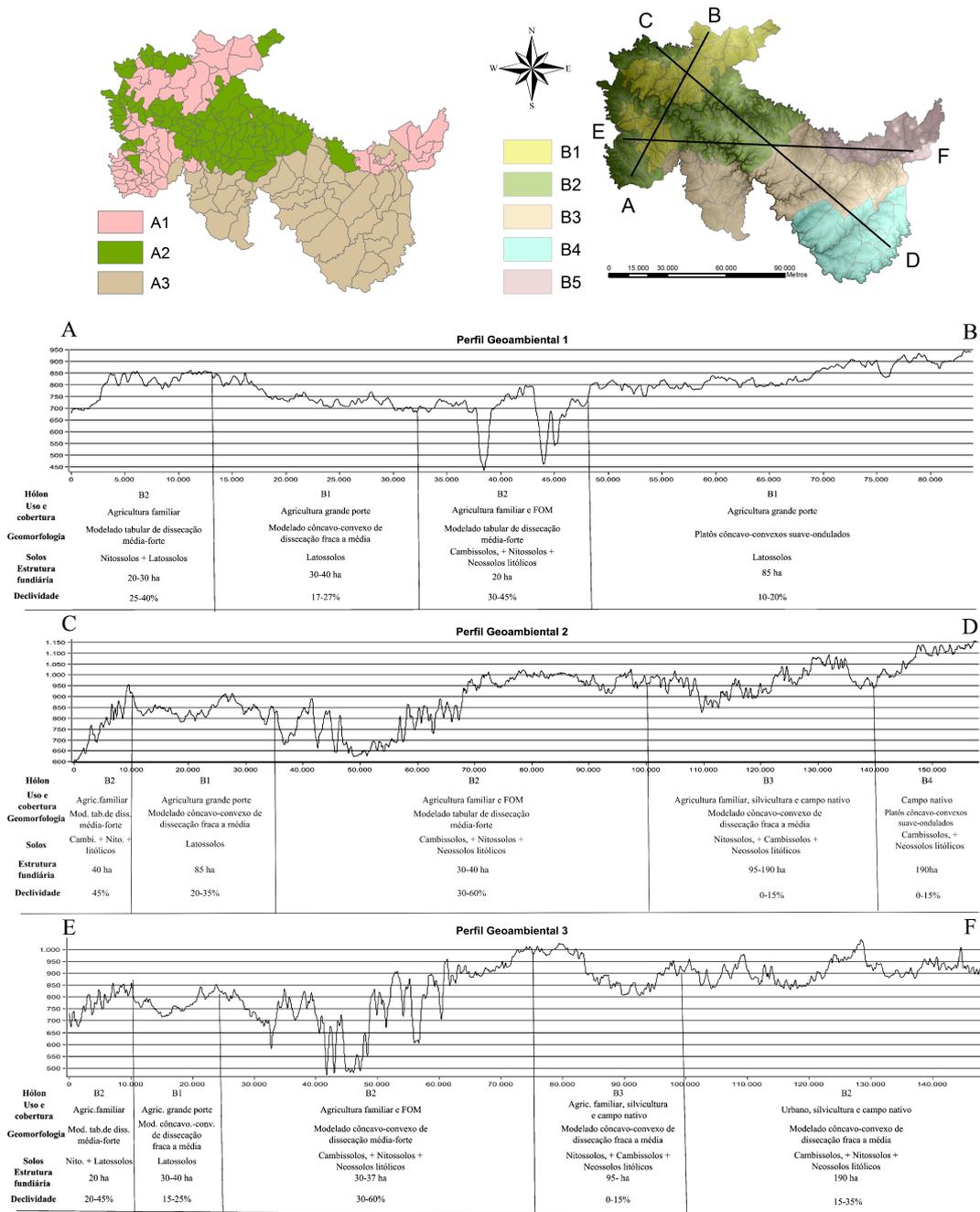


Figura 4.5 - Perfis geoambientais dos dois níveis hierárquicos (hólons).

A análise do diagrama de ordenamento resultante da CCA (Figura 4.6) possibilita uma

de mancha de cobertura vegetal, o que revela a menor taxa de conservação do ambiente natural nestas áreas de uso agrícola, industrial e urbano intensivo. Esta situação se reflete na distinção entre o hólón B1, no entorno de Campos Novos-SC e de Barracão-RS que é uma área de agricultura de grande porte consolidada sob solos desenvolvidos e relevo suave oriunda de uma fronteira agrícola moderna nos anos de 1950 na região do oeste catarinense (Machado, 1998), e o hólón B5, no entorno de Lages-SC que é o maior centro urbano-industrial da área, com destaque para a indústria da celulose e serviços que geram suporte ao fenômeno da concentração populacional e da expansão da silvicultura.

Já os hólons A2 e B2 apresentam posição semelhante no diagrama de ordenação e fatores bastante diferenciados dos demais hólons nos dois níveis hierárquicos. As principais correlações positivas foram encontradas com a geomorfologia mais movimentada do modelado tabular de dissecação média a forte (declividade e relevo local médios, além de amplitude da rugosidade superficial), métricas da paisagem indicativas de áreas mais conservadas (índice de forma e área de mancha médios), solos predominantes rasos (neossolos litólicos) com manchas associadas de solos férteis (nitossolos), além da maior porcentagem de floresta e agricultura familiar que sobrevivem nestas áreas. Tais condições são relacionadas com a colonização europeia e o gênero de vida relacionado com a agricultura familiar de pequena propriedade e voltada à semi-subsistência. Estas foram já introduzidas nas terras de serras e fundos de vale, em contraste com as áreas de solos agricultáveis nos altos platôs que já pertenciam a grandes proprietários, vivendo em condição de pressão e sufocamento por tais, hoje em dia, centros de agricultura moderna típicos do hólón B1 (Ribeiro, 1995). Apesar da pressão, estas áreas permanecem pelas potencialidades paisagísticas e culturais que combinam com o sistema de uso da terra tradicional que vem apresentando transformações ultimamente, porém em ritmo mais lento do que das áreas urbano-industriais e de agricultura de grande porte dos hólons A1, B1 e B5.

Os hólons A3, B3 e B4 apresentam posição semelhante, contrastando com os dois tipos de hólons apresentados até agora. As principais correlações positivas encontradas foram com a porcentagem de campo nativo e com métricas de paisagem (número de manchas, tamanho de mancha efetivo e densidade de bordas), as quais retratam o bom estado de conservação na maior parte do campo nativo desta parte (em especial do hólón B4); enquanto os solos são em sua maioria rasos (neossolos litólicos) e o relevo local é negativamente correlacionado, representando os altos platôs de relevo suave dos campos de cima da serra, como são popularmente conhecidos. Tais áreas representam a forma de ocupação do espaço do Alto Uruguai mais antiga que se refere à pecuária extensiva em campos nativos desde o século XVIII com o seu uso para rotas de transporte do gado do Rio Grande do Sul para São Paulo pelos tropeiros e na manufatura do charque, ambas baseadas no domínio da terra em amplas extensões, em especial dos altos platôs. A divisão da área em dois hólons no nível hierárquico inferior se deve às condições naturais e culturais mais conservadas do hólón

B4, enquanto o hólón B3 é palco de um avanço de atividades agrícolas e de silvicultura com maior velocidade.

4.2.3 Análise dos padrões do zoneamento hierárquico da paisagem

Do ponto de vista da ocupação espacial e desenvolvimento histórico, características econômicas e culturais relacionadas à potencialidade paisagística dos fatores físicos e ecológicos das diferentes áreas interagem na formação de uma estrutura espacial que deixa heranças nas características destes mosaicos paisagísticos. Os dados referentes à estrutura agrária (tamanho médio das propriedades agropecuárias) na Tabela 4.1 permitem a visualização deste fenômeno relacionado à característica de palimpsesto referente à paisagem (AB'SABER, 2003), onde as heranças da ocupação do espaço participam ativamente do processo de transformação da paisagem, i.e. antigas características e modos de ocupação do espaço ainda participam nos processos atuais da paisagem através dos padrões de uso da terra herdado.

Tabela 4.1 - Dados da estrutura fundiária do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006), apenas disponível por municípios, com o total de propriedades, total de área e a área média das propriedades; áreas em unidades de hectares.

<i>Município</i>	<i>Total</i>	<i>Área</i>	<i>Área média de propriedade</i>	<i>Hólons</i>
Lages	889	169187	190.3115861	A1 e A3
Capão Alto	505	95665	189.4356436	A3
Esmeralda	524	65659	125.3034351	A3
Campo Belo do Sul	925	88247	95.40216216	A3
Campos Novos	1447	124186	85.82308224	A1
Zórtea	173	10307	59.57803468	A1
Capinzal	486	19602	40.33333333	A2
Cerro Negro	719	28037	38.99443672	A2
Barracão	1082	41695	38.53512015	A1
Pinhal da Serra	561	21303	37.97326203	A2
Anita Garibaldi	1397	42568	30.47100931	A2
São José do Ouro	903	27390	30.33222591	A1
Abdon Batista	726	20441	28.15564738	A2
Machadinho	983	25066	25.49949135	A2
Tupanci do Sul	465	11413	24.54408602	A2
Celso Ramos	671	14489	21.59314456	A2
Cacique Doble	968	18854	19.47727273	A2
Santo Expedito do Sul	628	11852	18.87261146	A2

Neste caso, pode-se ver o papel de três tipos de ocupação diferentes deixando marcas na caracterização atual da paisagem: a) zona de pecuária extensiva, sistema original de pecuária extensiva sobre campos nativos situados nos altos platôs com solos litólicos rasos;

b) zona de pequena propriedade colonial, sistema tradicional de agricultura familiar de pequena propriedade oriundo da colonização europeia; c) zona agrícola moderna, sistema de agricultura moderna e intensiva em propriedades médias oriundas do avanço de fronteiras agrícolas do século XX sobre áreas tradicionais de pecuária extensiva, porém com presença de solos produtivos (latossolos e nitossolos). O primeiro tipo é relacionado à pecuária extensiva e ocupação dos campos nativos por grandes propriedades concedidas no final do século XVIII até o século XIX que deixa a marca ainda hoje na estrutura agrária pelo tamanho das propriedades dos municípios do hólón A3 com valores entre 100 e 190 hectares. O segundo tipo apresenta relação com a colonização europeia de fins do século XIX e início do século XX que deixa como principal marca um sistema de uso da terra diversificado e de semi-subsistência, calcado na pequena propriedade, como pode ser visto nos tamanhos entre 20 e 40 hectares das propriedades nos municípios do hólón A2. Já o terceiro tipo está relacionado com frentes pioneiras da primeira metade do século XX no oeste catarinense, onde áreas de uso tradicionais da pecuária extensiva são incorporadas à sistemas de uso intensivos da agricultura moderna, representado pelo tamanho intermediário (entre 30 e 100 hectares) do tamanho das propriedades dos municípios do hólón A1, não por acaso as áreas com maior fragmentação da paisagem em termo de remanescentes florestais.

De forma sintética e geral, esta tipologia das unidades de paisagem (hólons) mapeados pode ser relacionada com a contribuição de [Herrera \(1981\)](#) à caracterização das interações entre sociedade e cultura no processo de geração e introdução de tecnologias em sociedades em desenvolvimento. Este autor identifica dois setores principais que compõe estas sociedades duais: a) um setor moderno que compreende entre 10 e 30% da população com uma renda per capita muito superior, com hábitos culturais e modelos de consumo dos países desenvolvidos e com a adoção de tecnologia moderna científica usualmente importada; b) um setor tradicional que apresenta a grande maioria da população com renda per capita inferior, uma economia de subsistência baseada em modelos culturais prevalecentes no passado e com a adoção de tecnologias tradicionais empíricas. Ampliando e adaptando esta divisão proposta por [Herrera \(1981\)](#) às características dos hólons mapeados na área de estudo, podemos identificar o hólón A1 com o setor moderno baseado em atividades econômicas urbano-industriais (hólón B5) e de agricultura de grande porte (hólón B1). Já o setor tradicional pode ser identificado com os hólons A2 e A3, porém com características e atores tradicionais diferentes: o hólón A2 apresenta relação com a colonização europeia e as práticas de agricultura mista de subsistência baseada no minifúndio em áreas de relevo movimentado e floresta de araucária, enquanto o hólón A3 é relacionado com as atividades de pecuária extensiva tradicionais desde a formação do espaço rio-grandense baseada no latifúndio em áreas de altos platôs e campo nativo. Este último tipo apresenta uma maior renda per capita relacionada com o regime de propriedade de grande porte dominante.

4.3 Modelagem da dinâmica da paisagem

Nesta seção são apresentados os resultados da modelagem da dinâmica da paisagem através do modelo desenvolvido denominado LanDSCAM com destaque para as demandas de transição e mapas de processos de MUCT, os mapas de probabilidade de transição, os resultados dos modelos de calibração (1986-2002 e 2002-2008) e dos cenários de prognose (2008-2030).

4.3.1 Demandas de transição e mapas de processos de mudanças de uso e cobertura da terra

As demandas de transição nos dois intervalos de tempo de calibração (1986-2002 e 2002-2008) apresentaram comportamentos distintos, como pode ser visto nas Tabela 4.2 e Tabela 4.3. No intervalo inicial 1986-2002 ocorreu o predomínio da transição de agricultura familiar para floresta e capoeiras, enquanto no intervalo 2002-2008 houve o predomínio das transições referentes ao processo de expansão da silvicultura. Em relação aos outros processos, houve um comportamento semelhante nos dois intervalos com as maiores alterações percebidas no hólón B3, onde houve um incremento geral nas taxas de transição em função do recente ritmo maior de mudanças nestes mosaicos da paisagem. No hólón B1, percebeu-se a predominância em ambos intervalos de tempo de processos de degradação, intensificação e extensificação, com um incremento deste último no intervalo mais recente 2002-2008. No hólón B2, ocorreu o predomínio dos processos de regeneração, degradação e intensificação, com maiores taxas de regeneração no primeiro intervalo. No hólón B4, houve um comportamento bastante semelhante em ambos períodos com baixas taxas de transição, características desta área dominada pela pecuária extensiva. No hólón B5, ocorre o predomínio do processo de expansão da silvicultura, degradação e urbanização, especialmente no segundo intervalo de tempo.

O mapeamento dos processos de mudanças de uso e cobertura da terra nos dois intervalos (Figura 4.7), os quais foram utilizados como variáveis dependentes para os mapas de probabilidade de transição, apresentou um agrupamento de transições diversas com fins de simplificação na modelagem de regressão logística. As principais características oriundas da análise das demandas de transição podem ser percebidas de forma espacializada nestes mapas de processos de MUCT.

4.3.2 Mapas de probabilidade de transição

Os modelos de regressão logística para cada intervalo de tempo (1986-2002 e 2002-2008) apresentaram bons resultados conforme os valores de AUC, com níveis de significância das variáveis independentes abaixo de 0.07 e com um número de variáveis independentes entre 3 e 14. Os modelos apresentaram interações entre as variáveis geomorfométricas, métricas

Tabela 4.2 - Matrizes de demandas de transição regionais do intervalo 1986-2002, em pixels.

1986	2002						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
Hólon B1							
FOM	0	0	750	6765	9806	88	0
CAMPO	0	0	349	4987	9161	39	0
SILV	0	0	0	364	476	0	0
AG-FAM	12974	0	0	0	11980	76	0
AGGP	0	0	10824	364	0	200	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B2							
FOM	0	0	1420	18255	3797	66	0
CAMPO	0	0	360	2742	675	17	0
SILV	0	0	0	473	177	0	0
AG-FAM	50160	0	0	0	8439	180	0
AGGP	0	0	353	14091	0	183	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B3							
FOM	0	0	4495	4809	2525	57	0
CAMPO	0	0	4381	6745	8912	48	0
SILV	0	0	0	10	19	0	0
AG-FAM	12111	0	0	0	724	28	0
AGGP	0	0	531	740	0	5	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B4							
FOM	0	0	929	537	60	57	0
CAMPO	0	0	1975	234	675	48	0
SILV	0	0	0	14	0	0	0
AG-FAM	2275	0	0	0	36	0	0
AGGP	0	0	0	10	0	0	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B5							
FOM	0	0	3434	2235	655	132	0
CAMPO	0	0	2170	1176	680	321	0
SILV	0	0	0	67	19	28	0
AG-FAM	6725	0	0	340	8439	88	0
AGGP	0	0	279	0	0	122	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0

de paisagem, mapeamentos geoambientais e dados sociais o que confirma a característica de integração entre fatores condicionantes naturais e sociais nos processos de MUCT (FREITAS et al., 2013). A escolha por modelos de regressão logística globais, em detrimento do uso de regimes espaciais, se deve à quantidade de UPP's ($n = 209$) que conferiria uma baixa diferenciação de valores para os modelos regionais na configuração com 5 hólons.

Tabela 4.3 - Matrizes de demandas de transição regionais do intervalo 2002-2008, em pixels.

2002	2008						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
Hólon B1							
FOM	0	0	5815	33090	19925	112	0
CAMPO	0	0	17	1563	2237	0	0
SILV	0	0	0	618	617	0	0
AG-FAM	13171	0	0	0	26813	234	0
AGGP	0	0	485	36179	0	74	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B2							
FOM	0	0	9929	90347	7753	287	0
CAMPO	0	0	487	6934	922	7	0
SILV	0	0	0	1592	103	0	0
AG-FAM	45118	0	0	0	12472	453	0
AGGP	0	0	502	28617	0	138	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B3							
FOM	0	0	13946	52614	5473	43	0
CAMPO	0	0	6318	55289	20969	69	0
SILV	0	0	0	1235	450	0	0
AG-FAM	10717	0	0	0	3065	111	0
AGGP	0	0	480	10437	0	66	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B4							
FOM	0	0	1667	5308	462	0	0
CAMPO	0	0	837	7998	1274	0	0
SILV	0	0	0	101	0	19	0
AG-FAM	1876	0	0	0	142	0	0
AGGP	0	0	34	125	0	0	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0
Hólon B5							
FOM	0	0	35388	13752	1923	493	0
CAMPO	0	0	12194	10467	3691	373	0
SILV	0	0	0	928	751	0	0
AG-FAM	2835	0	0	0	1285	642	0
AGGP	0	0	1872	1418	0	364	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0

Os resultados dos modelos de regressão logística no intervalo 1986-2002 podem ser vistos na Tabela 4.4 e no intervalo 2002-2008 na Tabela 4.5 com as variáveis independentes selecionadas no procedimento *backward stepwise*, os coeficientes, razões de possibilidade *odds ratio*, valores de significância (*p-values*) e a área abaixo da curva (AUC). Os coeficientes nos modelos de regressão logística não permitem uma interpretação linear direta com a

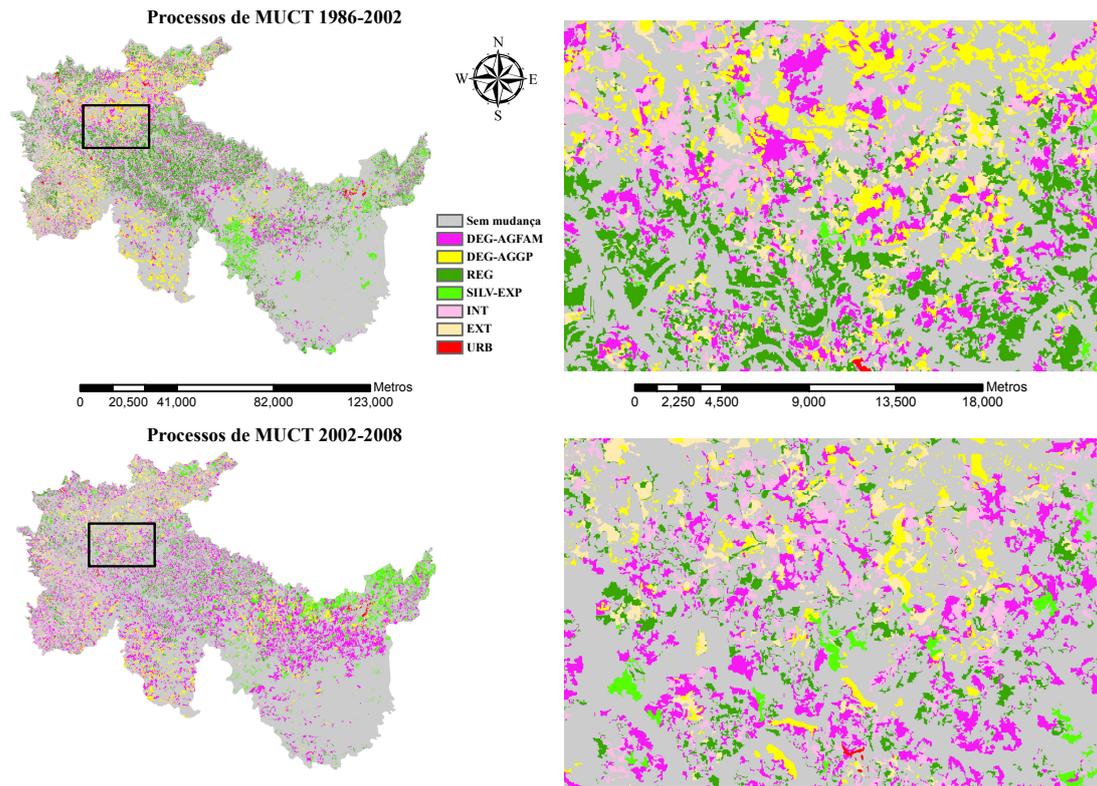


Figura 4.7 - Mapas de dos processos de mudanças de uso e cobertura da terra nos intervalos 1986-2002 e 2002-2008: degradação para agricultura familiar (DEG-AGFAM), degradação para agricultura de grande porte (DEG-AGGP), regeneração (REG), expansão da silvicultura (SILV-EXP), intensificação (INT), extensificação (EXT) e urbanização (URB).

variável dependente, como no caso dos modelos de regressão linear, porém pode ser interpretada a correlação negativa ou positiva através dos coeficientes. Uma interpretação mais direta da relação entre as variáveis dependente e independente é permitida pela razão de possibilidades (*odds ratio*) que reflete a chance de ocorrência do processos de MUCT (variável dependente), em razão do aumento em uma unidade do valor da variável independente (HOSMER; LEMESHOW, 2000). Por exemplo, um *odds ratio* de 1.5 da variável MDE significa uma chance 1.5 vezes maior de ocorrência do processo de MUCT modelado a cada um metro de diferença, positiva ou negativa, no MDE.

4.3.2.1 Mapas de probabilidade de transição 1986-2002

A seguir, são analisados os modelos de regressão logística que serviram de base para o resultado do mapeamento das probabilidades de transição no intervalo 1986-2002, considerando os respectivos processos de MUCT (Figura 4.8).

O modelo de regressão logística do processo de degradação da cobertura vegetal para

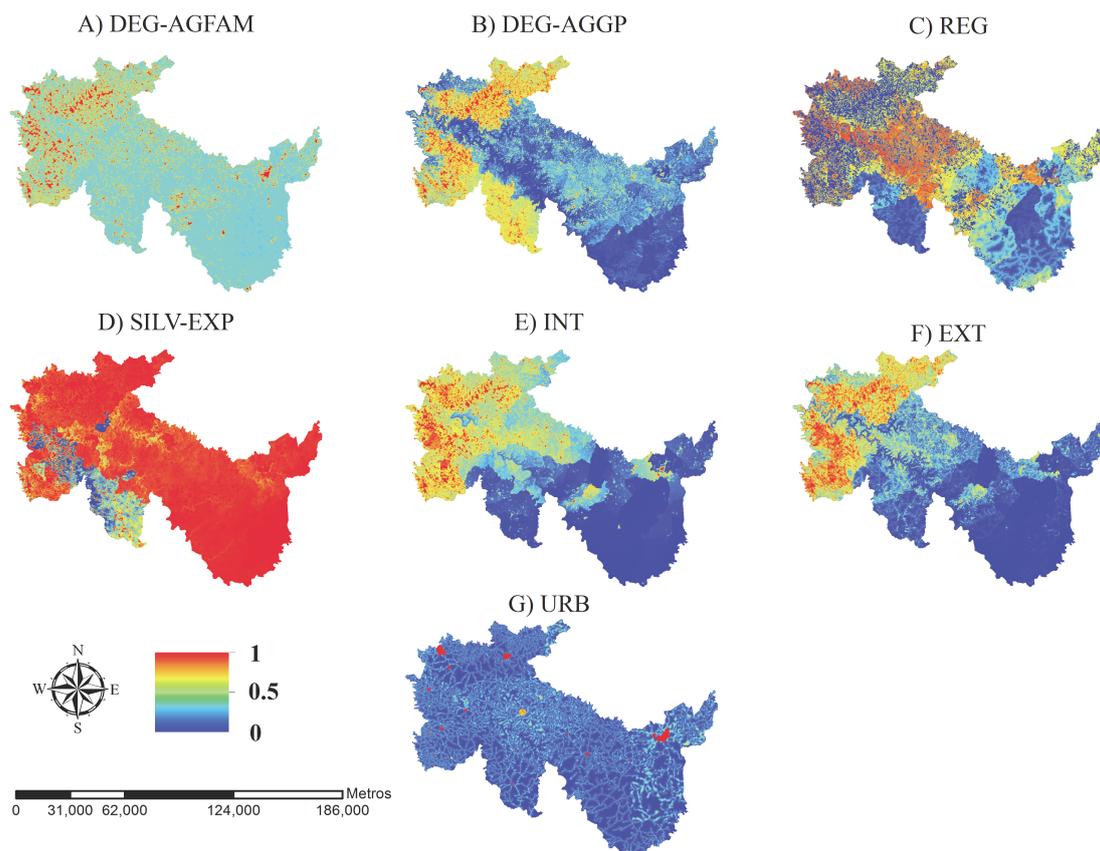


Figura 4.8 - Mapas de probabilidade de transição dos processos de MUCT no intervalo 1986-2002: degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura familiar (DEG-AGFAM), degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura de grande porte (DEG-AGGP), regeneração (REG), expansão da silvicultura (SILV-EXP), intensificação (INT), extensificação (EXT) e urbanização (URB).

agricultura familiar (DEG-AGFAM), no intervalo 1986-2002 (Tabela 4.4), apresentou correlações positivas com os relevos mais movimentados do modelado de dissecação média a forte e com solos com melhores condições de produção agrícola (nitossolos e latossolos), uma correlação negativa com a distância aos rios (denotando uma posição mais próxima aos fundos de vales) e uma correlação positiva com a distância entre as manchas de cobertura da terra, mostrando relação com a distância às áreas previamente degradadas.

O modelo de regressão logística do processo de degradação da cobertura vegetal para agricultura de grande porte (DEG-AGGP) no intervalo 1986-2002 (Tabela 4.4) apresentou em relação às condições geoambientais um comportamento típico de áreas com alta potencialidade às atividades agrícolas de grande porte: correlações negativas com a declividade e relevo local, além de correlações negativas com associações de solos com menor potencialidade agrícola, dominados por neossolos litólicos e cambissolos. A correlação positiva com

a distância aos cursos fluviais mostra a posição de cimeira destas atividades agrícolas de grande porte, mais afastadas dos fundos de vale que são dominados pelos solos de menor potencialidade agrícola e apresentam relevo mais movimentado. A correlação negativa com a densidade populacional pode estar relacionada com a estrutura fundiária da região que apresenta as atividades de agricultura de grande porte em propriedades de tamanho médio a grande. Em relação à estrutura da paisagem, este processo apresentou relação com áreas fragmentadas através das correlações negativas com o tamanho das manchas e positivas com a distância às manchas de cobertura da terra.

Tabela 4.4 - Resultados dos modelos de regressão logística dos modelos dos processos de MUCT no intervalo 1986-2002.

<i>Modelo</i>	<i>Variável</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Odds Ratio</i>	<i>p</i>	<i>AUC</i>
DEG-AGFAM	β_0	-0.5484616		0.0000	0.808
	GEOM-3	0.3877754	1.47	0.0598	
	SOLOS-6	0.1750203	1.19	0.0614	
	DIST-RIOS	-0.0002659	0.94	0.0394	
	ENN	0.0084966	2.77	0.0000	
DEG-AGGP	β_0	1.2836604		0.0000	0.847
	DEC	-0.0247058	0.79	0.0000	
	REL	-0.0242594	0.69	0.0000	
	SOLOS-1	-2.2290295	0.11	0.0000	
	SOLOS-2	-1.3543811	0.25	0.0000	
	SOLOS-3	-1.3543811	0.26	0.0000	
	DIST-RIOS	0.0007657	1.19	0.0000	
	DENS-POP	-0.0015121	0.99	0.0000	
	LPI	-0.0209291	0.71	0.0000	
	ENN	0.0050581	1.97	0.0000	
REG	β_0	3.396203		0.0000	0.864
	REL	0.010273	1.31	0.0000	
	SOLOS-2	0.883180	2.42	0.0000	
	SOLOS-3	0.796875	2.22	0.0000	
	DIST-ROD	-0.000725	0.71	0.0000	
	ENN	-0.063336	0.00	0.0000	
	NM	-0.001713	0.59	0.0000	
	SHAPE ^a	-0.001713	0.59	0.0004	
SILV-EXP	β_0	-7.162e-01		0.3627	0.863
	MDE	6.193e-03	2.25	0.0000	
	DEC	2.818e-02	1.46	0.0000	
	GEOM-2	6.434e-01	1.90	0.0000	
	SOLOS-1	-4.079e-01	1.50	0.0025	
	SOLOS-3	8.192e-01	2.27	0.0000	
	SOLOS-7	-2.645	0.07	0.0000	
	DIST-ROD	3.838e-04	1.26	0.0000	

(Continua)

Tabela 4.4 - Continuação

<i>Modelo</i>	<i>Variável</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Odds Ratio</i>	<i>p</i>	<i>AUC</i>
	DIST-URB	1.873e-05	1.24	0.0022	
	ENN	1.112e-02	4.12	0.0000	
	AREA-MC ^a	-1.512e-06	0.70	0.0002	
	FRAC ^a	-1.413	0.93	0.0000	
	SHAPE ^a	-7.070e-01	0.57	0.0000	
INT	β_0	3.859		0.0000	0.882
	DEC	-4.670e-02	0.60	0.0000	
	GEOM-3	-6.310e-01	0.53	0.0003	
	SOLOS-1	-2.041	0.13	0.0000	
	SOLOS-2	1.414	0.24	0.0000	
	SOLOS-3	-8.912e-01	0.41	0.0000	
	DIST-ROD	-7.059e-04	0.71	0.0000	
	DIST-RIOS	1.205e-03	1.32	0.0000	
	DIST-URB	-2.485e-05	0.81	0.0000	
	DENS-POP	-2.087e-03	0.99	0.0000	
	ENN	4.003e-03	1.82	0.0000	
	DB	-3.582e-02	0.41	0.0000	
	FRAC ^a	-3.859e-01	0.98	0.0014	
	NM	-2.823e-03	0.56	0.0000	
EXT	β_0	1.898		0.0000	0.862
	REL	-6.332e-03	0.89	0.0028	
	GEOM-2	-1.120	5.24	0.0000	
	SOLOS-5	1.657	0.13	0.0000	
	SOLOS-6	1.154	3.17	0.0000	
	SOLOS-7	1.136	3.11	0.0000	
	DIST-URB	-4.793e-05	0.65	0.0000	
	DENS-POP	-1.109	0.99	0.0000	
	ENN	5.977e-03	2.45	0.0000	
	DB	-2.323e-02	0.57	0.0000	
NM	3.729e-03	0.46	0.0000		
URB	β_0	-1.650918		0.0000	0.908
	DIST-ROD	-0.001473	0.52	0.0000	
	DIST-RIOS	0.001507	1.51	0.0000	
	DENS-POP	0.008793	427036.52	0.0000	

Abreviaturas: MDE é a elevação, DEC é a declividade, REL é o relevo local, GEOM-*n* são unidades geomorfológicas, SOLOS-*n* são associações de solos, DIST-ROD é a distância às estradas, DIST-RIOS é a distância aos rios, DIST-URB é a distância às manchas urbanas, DENS-POP é a densidade populacional, AREA-MC^a é a média da área das manchas por unidade de paisagem, ENN é a distância entre manchas, DB é a densidade de bordas, NM é o número de manchas, FRAC^a é a média da dimensão fractal das manchas por unidade de paisagem e SHAPE^a é a média do índice de forma das manchas por

unidade de paisagem.

O modelo de regressão logística do processo de regeneração da cobertura vegetal (REG) no intervalo 1986-2002 (Tabela 4.4) apresentou, em relação às variáveis geoambientais, correlações positivas com a variável geomorfométrica de relevo local e com as associações de solos dominados por neossolos litólicos e cambissolos, áreas com dificuldades naturais para a produção agrícola que vem sendo abandonadas. A correlação negativa com a distância às rodovias demonstra a dificuldade de acesso para a circulação da produção nestas áreas de abandono. Já em relação à estrutura da paisagem, as correlações negativas com o número de manchas e com o índice de forma nas unidades de paisagem mostram uma relação com áreas com maiores níveis de fragmentação, enquanto a correlação negativa com a distância às manchas de cobertura da terra mostra a ocorrência deste processo em áreas próximas à manchas pré-existentes.

O modelo de regressão logística do processo de expansão da silvicultura (SILV-EXP) no intervalo 1986-2002 (Tabela 4.4), em relação às condições geoambientais paisagísticas, mostrou correlações positivas com a elevação, com a declividade e com o modelado de dissecação convexa fraca a média, além de correlações negativas com neossolos litólicos e com latossolos e de correlações positivas com associações de neossolos litólicos, cambissolos e nitossolos. Este processo apresentou correlações positivas com a distância às rodovias e às manchas urbanas, mostrando uma característica de menor acessibilidade que é requerida pela silvicultura em relação às atividades agrícolas que necessitam de um ritmo maior de escoamento dos produtos. Em relação às métricas da paisagem, ocorreram correlações negativas com a área média das manchas de cobertura da terra nas unidades de paisagem e com as medidas de forma (dimensão fractal e índice de forma), além de correlações positivas com a distância às manchas de cobertura da terra, todas estas são condições de áreas com paisagem em estágios intermediários a avançados de fragmentação.

O modelo de regressão logística do processo de expansão da intensificação (INT) no intervalo 1986-2002 (Tabela 4.4) demonstrou em relação às variáveis geoambientais correlações negativas com a declividade e com o modelado de dissecação convexa média a forte, bem como correlações negativas com os neossolos litólicos e associações de neossolos litólicos, cambissolos e nitossolos e correlações positivas com associações de neossolos litólicos e cambissolos, correlações que mostram a preferência de ocorrência deste processo em áreas de relevo plano e de solos mais produtivos agricolamente nas bordas de áreas de agricultura familiar (FREITAS et al., 2013). As variáveis de distância apresentaram correlações positivas com a distância aos rios, representando a posição deste processo nos interflúvios, e correlações negativas com as distâncias às estradas e às manchas urbanas, mostrando a interação direta deste processo com os mercados urbanos e a facilidade de acesso e transporte da produção agrícola de grande porte (soja, trigo, milho, etc.). A correlação negativa com a densidade populacional apresenta relação com a estrutura fundiária baseada em médias

e grandes propriedades no caso da agricultura de grande porte. Em relação á estrutura da paisagem, o processo de intensificação apresentou correlações negativas com o número de manchas, a densidade de bordas e a dimensão fractal e correlações positivas com a distância entre as manchas, condições típicas de áreas agrícolas intensivas com alto grau de fragmentação e formas geométricas antrópicas.

O modelo de regressão logística do processo de expansão da extensificação (EXT) no intervalo 1986-2002 (Tabela 4.4), relativamente às condições geoambientais da paisagem, apresentou correlações negativas com o relevo local e positivas com as associações dominadas por nitossolos e latossolos, representando áreas com relevo plano e solos bastante desenvolvidos já utilizadas pela agricultura de grande porte e, provavelmente, em pouso e recuperação. A correlação negativa com a distância às manchas urbanas denota a relação rural-urbano na formação dos mercados da agricultura de grande porte. A correlação negativa com a densidade populacional representa o fenômeno da estrutura fundiária anteriormente referido em outros processos associados à agricultura de grande porte. As condições da estrutura da paisagem, através das correlações positivas com a distância entre as manchas e número de manchas e das correlações negativas com a densidade de bordas, mostram um grau intermediário a avançado de fragmentação em áreas limítrofes com a agricultura familiar (FREITAS et al., 2013).

O modelo de regressão logística do processo de expansão da urbanização (URB) no intervalo 1986-2002 (Tabela 4.4) apresentou correlações negativas com a distância às rodovias e correlações positivas com a distância aos rios e com a densidade populacional (a variável mais importante). Estas condições representam o fenômeno de concentração populacional e de centralização da rede de transportes das áreas urbanas, bem como a posição de cimeira da principal cidade (Lages).

4.3.2.2 Mapas de probabilidade de transição 2002-2008

A partir deste momento, são analisados os modelos de regressão logística, a base do resultado do mapeamento das probabilidades de transição no intervalo 2002-2008 para os respectivos processos de MUCT (Figura 4.9).

O modelo de regressão logística do processo de degradação da cobertura vegetal para agricultura familiar (DEG-AGFAM) no intervalo 2002-2008 (Tabela 4.5) apresentou interações com um maior número de variáveis. Em relação à configuração geoambiental da paisagem, este processo apresentou correlação negativa com a variável geomorfométrica de relevo local e positiva com o modelado de dissecação média a forte, correlações que podem estar relacionadas com áreas de menor amplitude altimétrica dentro de uma unidade de relevo movimentado. Também ocorreram correlações positivas com associações de neossolos litólicos e cambissolos e de correlações negativas de associações do últimos solos com

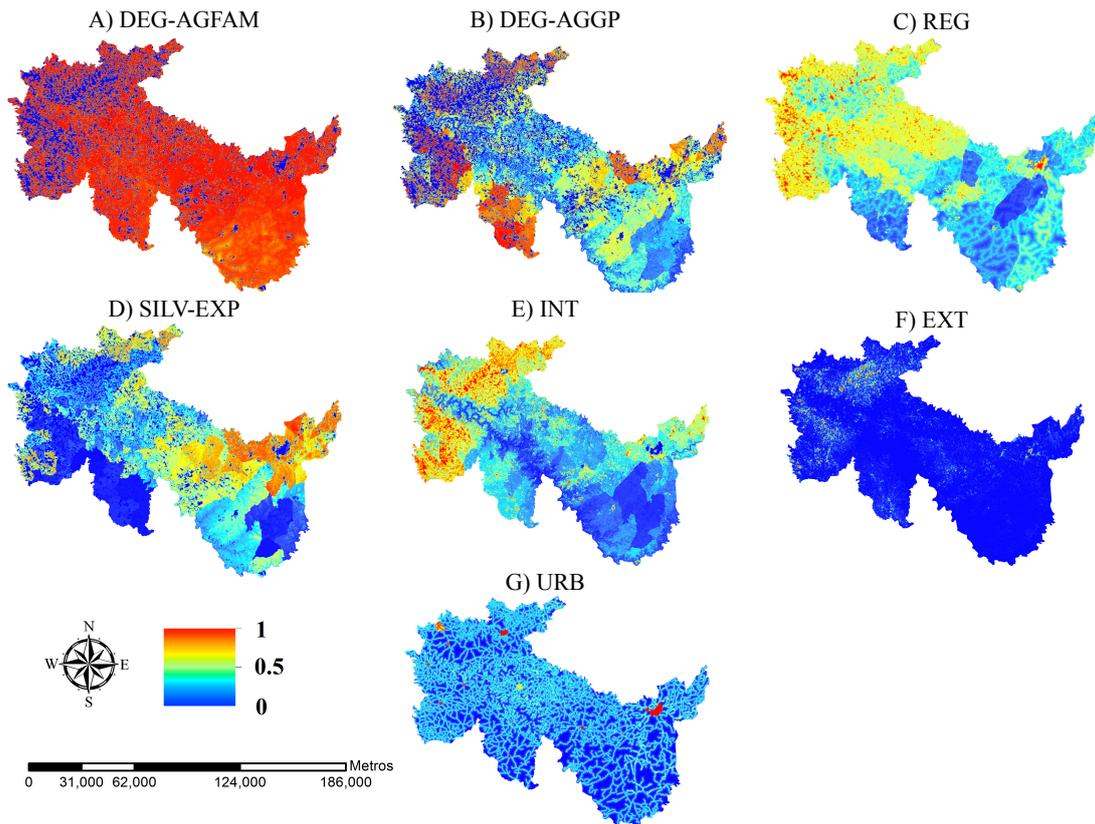


Figura 4.9 - Mapas de probabilidade de transição dos processos de MUCT no intervalo 2002-2008: degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura familiar (DEG-AGFAM), degradação da da tipologia vegetal natural para agricultura de grande porte (DEG-AGGP), regeneração (REG), expansão da silvicultura (SILV-EXP), intensificação (INT), extensificação (EXT) e urbanização (URB).

nitossolos, o que pode representar uma saturação das áreas com os últimos tipos de solos que são os mais usados tradicionalmente pelas atividades de agricultura familiar. Em relação às variáveis de distâncias, ocorreram correlações negativas das distâncias às rodovias e das distâncias às áreas urbanas, demonstrando relação do processo de degradação com os mercados urbanos em função da facilidade de acesso e escoamento das novas atividades de agricultura familiar. Em relação à estrutura da paisagem, este processo apresentou correlações negativas com o número e tamanho das manchas de cobertura da terra nas unidades de paisagem, correlações positivas com a dimensão fractal e negativas com o índice de forma (comportamento típico de áreas com maior antropização através da presença de formas geométricas de cobertura da terra) e correlações negativas com a distância entre as manchas, o que mostra a presença deste processo em áreas próximas às manchas de cobertura da terra.

O modelo de regressão logística do processo de degradação da cobertura vegetal para agri-

cultura de grande porte (DEG-AGGP) no intervalo 2002-2008 (Tabela 4.5), em relação às condições geoambientais, apresentou correlações negativas com o relevo local e correlações positivas com solos dominados por cambissolos, nitossolos e latossolos, ou seja, uma relação direta com as áreas de relevo suave e solos desenvolvidos com maior potencialidade de produção agrícola. A correlação positiva com a porcentagem de população entre 15 e 64 anos denota a atratividade das áreas de agricultura de grande porte para a população economicamente ativa (usualmente originária das áreas de agricultura familiar) em função da maior oferta de emprego no campo (RIBEIRO, 2006; FREITAS et al., 2013). Já em relação à estrutura da paisagem, este processo apresentou correlações negativas com a densidade de bordas e a distância entre as manchas, bem como correlação positiva com o número de manchas, mostrando a ocorrência deste processo em áreas com processo inicial a médio de fragmentação.

Tabela 4.5 - Resultados dos modelos de regressão logística dos modelos dos processos de MUCT no intervalo 2002-2008.

<i>Modelo</i>	<i>Variável</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Odds Ratio</i>	<i>p</i>	<i>AUC</i>
DEG-AGFAM	β_0	3.027		0.0000	0.801
	REL	-8.130e-03	0.84	0.0000	
	GEOM-3	3.125e-01	1.37	0.0000	
	SOLOS-2	5.326e-01	1.70	0.0000	
	SOLOS-3	-4.529e-01	1.57	0.0000	
	DIST-ROD	-4.724e-04	0.79	0.0000	
	DIST-URB	-2.822e-05	0.76	0.0000	
	LPI	-2.397e-02	0.62	0.0000	
	ENN	-5.943e-02	0.00	0.0000	
	FRAC ^a	2.535e-01	1.01	0.00005	
	NM	-6.688e-04	0.77	0.0000	
	SHAPE ^a	-2.572e-01	0.76	0.0000	
DEG-AGGP	β_0	-0.690026		0.011	0.837
	REL	-0.025486	0.67	0.0000	
	SOLOS-3	0.431684	1.54	0.0000	
	SOLOS-4	1.057785	2.88	0.0000	
	SOLOS-5	1.004789	2.73	0.0000	
	SOLOS-7	2.018219	7.52	0.0000	
	POP-15-64	0.048022	1.28	0.0000	
	DB	-0.043885	0.20	0.0000	
	NM	0.001396	1.67	0.0000	
	ENN	-0.049937	0.52	0.0000	
REG	β_0	0.650673		0.0000	0.738
	GEOM-2	-0.514195	0.60	0.0000	
	DIST-ROD	-0.000615	0.75	0.0000	
	ENN	0.004423	1.52	0.0000	

(Continua)

Tabela 4.5 - Continuação

<i>Modelo</i>	<i>Variável</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Odds Ratio</i>	<i>p</i>	<i>AUC</i>
	NM	-0.002222	0.60	0.0000	
SILV-EXP	β_0	0.7928906		0.0375	0.865
	MDE	0.0030267	1.44	0.0000	
	GEOM-3	-3.7044462	0.02	0.0003	
	SOLOS-5	-0.8033152	0.45	0.0000	
	SOLOS-6	-1.9277574	0.15	0.0000	
	SOLOS-7	-3.6350931	0.03	0.0000	
	DIST-RIOS	0.0006801	1.19	0.0000	
	DENS-POP	-0.0012219	0.99	0.0000	
	POP-15-64	0.0506426	1.32	0.0000	
	ENN	-0.0179171	0.00	0.0000	
	LPI	-0.0331672	0.55	0.0000	
	DB	-0.0416916	0.29	0.0000	
	NM	0.0008419	1.35	0.0000	
	SHAPE ^a	-0.5686933	0.57	0.0000	
INT	β_0	-1.758		0.0000	0.863
	REL	-2.625e-02	0.66	0.0000	
	SOLOS-1	-6.233e-01	0.54	0.0000	
	DIST-URB	-2.754e-05	0.78	0.0000	
	DENS-POP	-1.101e-03	0.99	0.0000	
	ENN	6.826e-03	3.18	0.0000	
	DB	-1.929e-02	0.60	0.0000	
	LPI	-4.638e-02	0.47	0.0000	
	FRAC ^a	-5.069e-01	0.97	0.0004	
	SHAPE ^a	5.916e-01	1.87	0.0000	
EXT	β_0	2.1118391		0.0000	0.834
	DEC	-0.0157853	0.85	0.0004	
	REL	-0.0169010	0.75	0.0000	
	GEOM-1	-0.6742658	0.51	0.0000	
	SOLOS-2	-0.8164902	0.44	0.0000	
	SOLOS-3	-0.8736105	0.42	0.0000	
	DENS-POP	-0.0024221	0.99	0.0000	
	DB	-0.0138816	0.66	0.0000	
	ENN	0.0065388	2.40	0.0000	
	LPI	-0.0314643	0.58	0.0000	
	NM	-0.0009199	0.80	0.0000	
URB	β_0	-0.6611432		0.0000	0.931
	DIST-ROD	-0.0030690	0.31	0.0000	
	DIST-RIOS	0.0008518	1.26	0.0026	
	DENS-POP	0.0044659	1040.61	0.0000	

Abreviaturas: MDE é a elevação, DEC é a declividade, REL é o relevo local, GEOM-*n* são unidades geomorfológicas, SOLOS-*n* são associações de solos, DIST-ROD é a dis-

tância às estradas, DIST-RIOS é a distância aos rios, DIST-URB é a distância às manchas urbanas, DENS-POP é a densidade populacional, POP-15-64 é a porcentagem da população economicamente ativa, ENN é a distância entre manchas, LPI é o índice de maior mancha, DB é a densidade de bordas, NM é o número de manchas, FRAC^a é a média da dimensão fractal das manchas por unidade de paisagem e SHAPE^a é a média do índice de forma das manchas por unidade de paisagem.

O modelo de regressão logística do processo de regeneração da cobertura vegetal (REG) no intervalo 2002-2008 (Tabela 4.5) apresentou correlações negativas com o modelado de dissecação convexa fraca a média, com as distâncias às estradas e com o número de manchas, além de positivas com a distância entre as manchas. Estas condições representam áreas de relevo mais movimentado, próxima aos acessos aos mercados e com alto grau de fragmentação, as quais se encontram em processo de recuperação da cobertura da terra.

O modelo de regressão logística do processo de expansão da silvicultura (SILV-EXP) no intervalo 2002-2008 (Tabela 4.5) apresentou, relativamente às variáveis geoambientais, correlações positivas com a elevação e correlações negativas com o modelado de dissecação convexa média a forte e com os solos dominados por associações de nitossolos e latossolos, o que representa a ocorrência deste processo em áreas de altos platôs e com menor presença de solos com maior produtividade agrícola. A correlação positiva com variável de distância aos rios reforça a relação deste processo com a posição dos altos platôs. A correlação negativa com a densidade populacional e positiva com a população entre 15 e 64 anos mostra as condições de áreas com estrutura fundiária de médio a grande porte com condições de atração para a população economicamente ativa. Em relação à estrutura da paisagem, a expansão da silvicultura mostrou correlações negativas com o número de manchas, o tamanho das manchas, a densidade de bordas e o índice de forma, apresentando relação com áreas com alto grau de fragmentação, além de correlações negativas com a distância entre as manchas, i.e. proximidade com áreas mais conservadas.

O modelo de regressão logística do processo de intensificação (INT) no intervalo 2002-2008 (Tabela 4.5), em relação às características geoambientais da paisagem, apresentou correlações negativas com o relevo local e com os neossolos litólicos, denotando a preferência agrícola por áreas de relevo suave e solos mais desenvolvidos. A correlação negativa com a variável de distância às manchas urbanas revelou a relação do processo de intensificação com o circuito econômico centralizado pela economia urbana. Já em relação à estrutura da paisagem, ocorreram correlações negativas com a densidade de bordas, o tamanho e a dimensão fractal das manchas, além de correlações positivas com a distância entre as manchas e o índice de forma, o que representa a ocorrência deste processo em mosaicos de paisagem altamente fragmentados em áreas de contato com a agricultura familiar.

O modelo de regressão logística do processo de extensificação (EXT) no intervalo 2002-2008

(Tabela 4.5), em relação às condições geoambientais, apresentou correlações negativas com as variáveis geomorfológicas de declividade e relevo local, além da unidade geomorfológica de altos platôs (superfícies de aplainamento) e dos solos dominados por neossolos litólicos e cambissolos, demonstrando a relação com relevos suaves e solos desenvolvidos. A correlação negativa com a densidade populacional apresenta a relação do processo de intensificação com a estrutura fundiária e as propriedades médias a grandes. Em relação à estrutura da paisagem, ocorreram correlações negativas com a densidade de bordas, o tamanho e a quantidade de manchas, bem como correlações positivas com a distância entre as manchas, o que mostra a relação deste processo com áreas altamente fragmentadas pela agricultura que estão em estado de pousio ou recuperação das condições de produtividade agrícola.

O modelo de regressão logística do processo de urbanização (URB) no intervalo 2002-2008 (Tabela 4.5) apresentou correlações negativas com a distância às estradas e correlações positivas com a distância aos rios e com a densidade populacional. Isto ressalta a relação do processo de urbanização com a rede urbana regional e sua atratividade populacional, além da posição interfluvial da cidade de Lages que é o maior centro regional e apresenta maior ocorrência deste processo.

4.3.3 Calibração dos modelos de mudança de uso e cobertura da terra

De modo geral, os resultados dos modelos gerados para os intervalos 1986-2002 e 2002-2008 foram de moderados a bons, de acordo com o ajuste mensurado pelo método de janelas móveis (janelas de 1×1 a 15×15). Além desta avaliação, ocorreu a comparação do ajuste do modelo simulado com o ajuste de um modelo nulo (*null model*). Este modelo nulo é composto pela validação do uso final com relação ao uso inicial, i.e., reflete a validação de um modelo onde a simulação não apresente mudanças entre os dois períodos. Esta comparação da validação do modelo simulado com o modelo nulo permite uma referência para a avaliação dos resultados da validação, pois é incomum os modelos de simulação de MUCT apresentarem valores de ajuste superiores aos dos modelos nulos (PONTIUS JR. et al., 2008).

4.3.3.1 Modelo de mudança de uso e cobertura da terra 1986-2002

O resultado do modelo de mudança de uso e cobertura da terra no intervalo 1986-2002 (Figura 4.10) apresentou resultados superiores aos do modelo nulo, com um ajuste médio total de 0.771 em relação ao ajuste de 0.703 do modelo nulo, como pode ser visto na Figura 4.11. Esta boa performance pode ser relacionada com a maior simplicidade das MUCT neste intervalo de tempo em relação à complexidade e intensidade das MUCT no intervalo 2002-2008. A comparação das áreas das classes no resultado do modelo em relação ao uso real em 2002 apresentou erros inferiores a 2.8%, com exceção da classe urbano que apresentou um erro de 9.57% (Tabela 4.6).

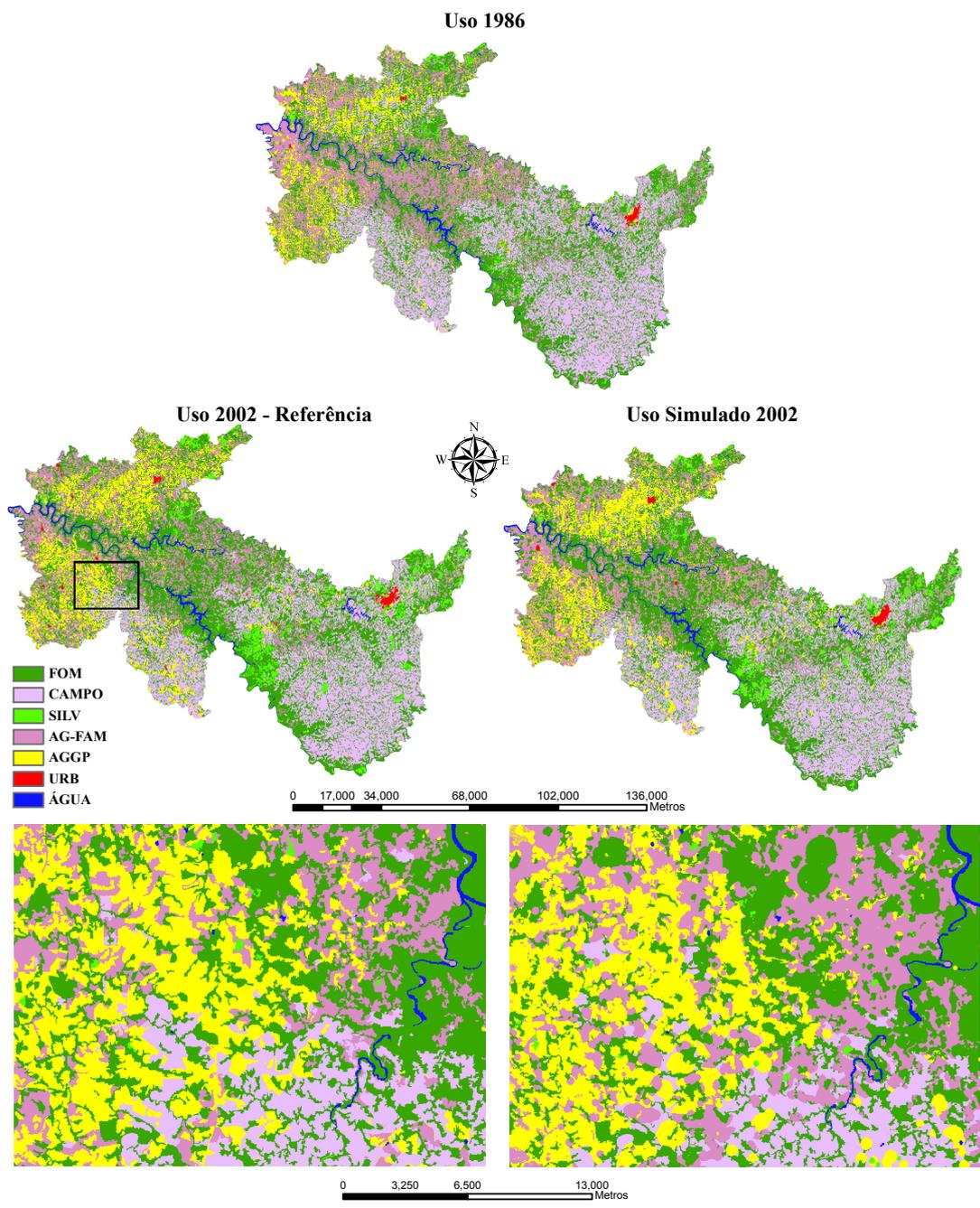


Figura 4.10 - Resultado do modelo de MUCT no intervalo 1986-2002. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.

Os padrões de MUCT seguiram as características dos sistemas de uso da terra e os mosaicos da paisagem em que se encontram. O processo de regeneração foi devidamente localizado no hólón B2 que é área nuclear (*core area*) das atividades relacionadas com o sistema de uso da terra colonial-familiar e baseado no minifúndio, sistema que apresenta de forma endógena um ciclo de degradação e regeneração da cobertura da terra através da rotação

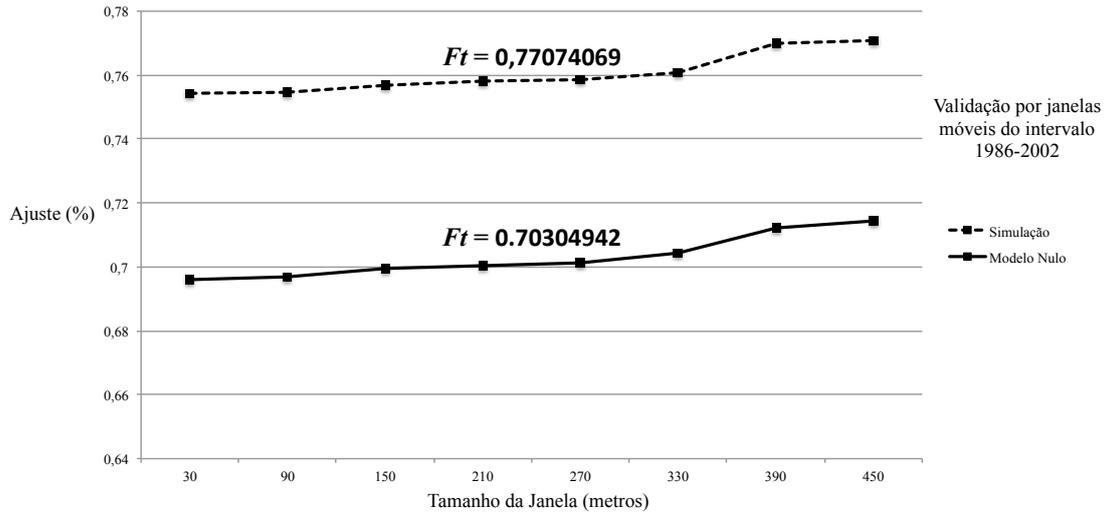


Figura 4.11 - Resultado da validação do modelo de MUCT no intervalo 1986-2002, onde Ft é a média ponderada de ajuste total.

Tabela 4.6 - Totais de áreas (hectares) referentes às diferentes classes do resultado da simulação 1986-2002 em relação ao uso real em 2002.

<i>Classe</i>	<i>Real 2002</i>	<i>Simulado 2002</i>	<i>Erro (%)</i>
Floresta	451986.03	452093.67	0.02
Campo Nativo	293539.59	299860.02	2.15
Silvicultura	48355.83	47759.85	1,23
Agric. Fam.	199496.43	197713.35	0.89
Agric. Grande Porte	131270.31	127679.67	2.73
Urbano	4789.53	4331.16	9.57
Água	20542.23	20542.23	0

de cultivos e áreas em pousio. Os processos de degradação para agricultura familiar e de extensificação também foram, em sua maioria, localizados nesta área nuclear da agricultura familiar do hólón B2, porém com presença expressiva também no hólón B1 no entorno de Campos Novos. Já os processos de degradação para agricultura de grande porte e de intensificação dominaram as MUCT ocorridas no hólón B1, a área agrícola mais produtiva tanto em relação às condições naturais quanto ao suporte científico-tecnológico empregado e dominada por médias a grandes propriedades. O processo de expansão da silvicultura foi localizado em sua maioria no hólón B3, o qual, no início deste intervalo de tempo, era uma unidade de paisagem mais conservada e tradicional com domínio de campos nativos e pecuária extensiva. O processo de urbanização foi localizado em especial no entorno de Lages, praticamente a única cidade que apresentou incremento populacional forte no período.

Em relação ao particionamento entre as funções de alocação de autômato celular determi-

nística e de formação de manchas, a maior parte das transições foi alocada com a primeira função (Tabela 4.7). Já a função de formação de manchas foi mais utilizada nas transições relacionadas com o processo de expansão da silvicultura e também na transição de campo nativo para agricultura de grande porte, transições estas que apresentam uma maior proporção de novas manchas. Enquanto a maioria das transições é dominada pelo padrão de expansão de manchas pré-existentes representado pelo procedimento de autômato celular.

Tabela 4.7 - Proporção entre as funções de alocação espacial determinística de autômatos celulares e estocástica de formação de manchas no modelo de MUCT do intervalo 2002-2008.

1986	2002						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
FOM	0	0	60	90	95	100	0
CAMPO	0	0	60	90	75	100	0
SILV	0	0	0	75	95	0	0
AG-FAM	100	0	0	0	95	100	0
AGGP	0	0	60	85	0	100	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0

4.3.3.2 Modelo de mudança de uso e cobertura da terra 2002-2008

O resultado do modelo de mudança de uso e cobertura da terra no intervalo 2002-2008 (Figura 4.12) apresentou resultados inferiores aos do modelo nulo, com um ajuste médio total de 0.646 em relação ao ajuste de 0.708 do modelo nulo, como pode ser visto na Figura 4.13. Este desempenho inferior, em relação ao resultado do intervalo 1986-2002, pode estar relacionada com a grande intensidade de mudanças ocorridas no intervalo 2002-2008, especialmente em relação às classes de silvicultura e agricultura familiar. Tais transformações da paisagem neste último período foram bastante extremas e apresentaram, principalmente em relação ao processo de expansão da silvicultura, padrões novos de ocupação do espaço que apresentaram dificuldades para sua modelagem, o que pode explicar este desempenho inferior. Em relação às áreas totais das classes no resultado do modelo comparadas com o uso real em 2008, houve um pequeno erro inferior a 3.5% (Tabela 4.8).

Apesar das dificuldades para a modelagem das MUCT e do conseqüente desempenho inferior, em relação ao modelo no intervalo 1986-2002, os principais padrões de MUCT foram respeitados conforme os diferentes mosaicos de paisagem e sistemas de uso da terra associados na modelagem deste intervalo 2002-2008. O processo de expansão da silvicultura foi em sua maioria localizada no hólón B5 no entorno da cidade de Lages que é o maior centro urbano-industrial da região, representando a interação direta da silvicultura com

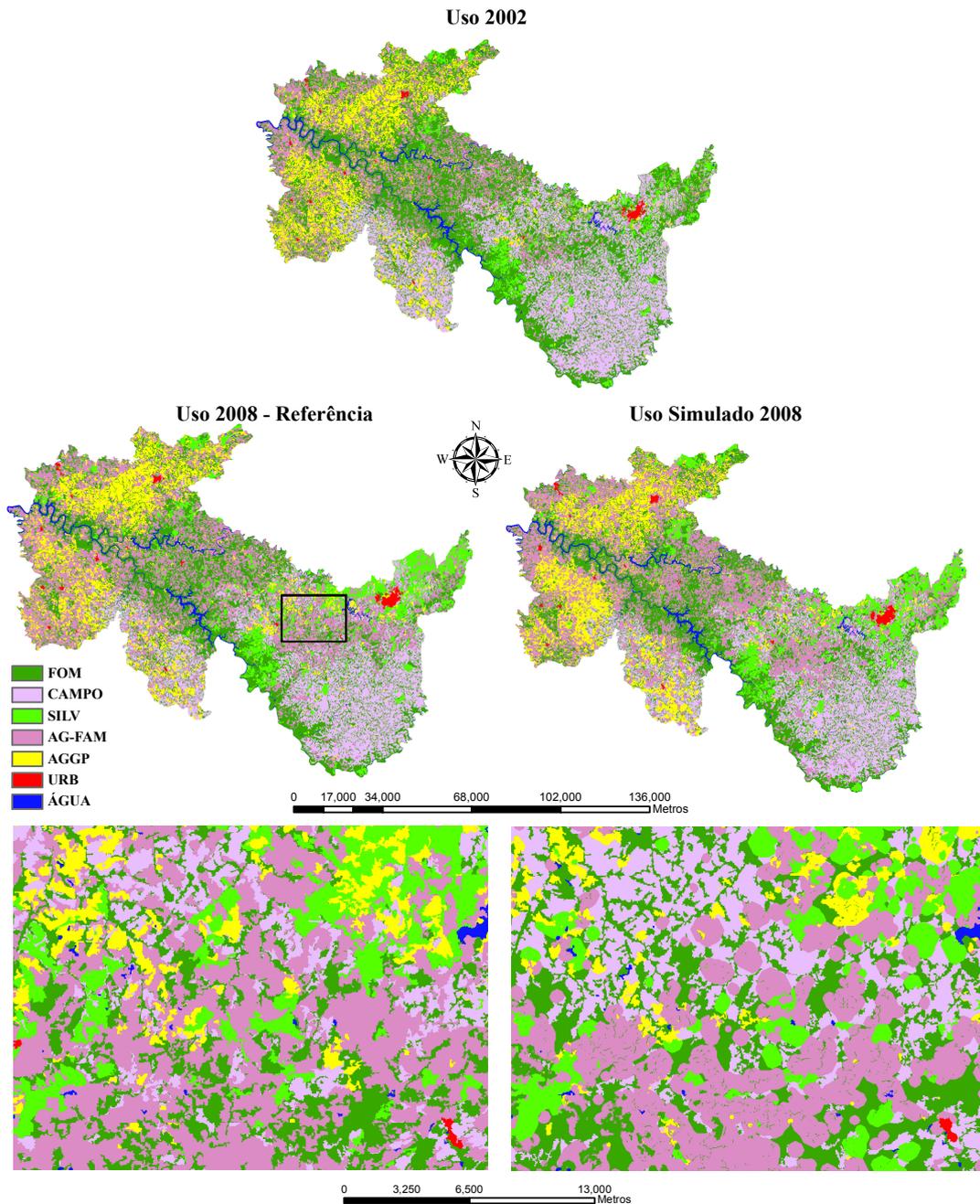


Figura 4.12 - Resultado do modelo de MUCT no intervalo 2002-2008. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.

a industrialização. Enquanto a as transições referentes ao processo de degradação para agricultura familiar foram localizadas no hólón B3 que apresenta condições de expansão destas atividades, enquanto no processo de extensificação foram localizadas no cinturão agrícola (*belt*) do hólón B1 no entorno de Campos Novos. A maioria das transições referentes ao processo de degradação para agricultura de grande porte foi localizado na área

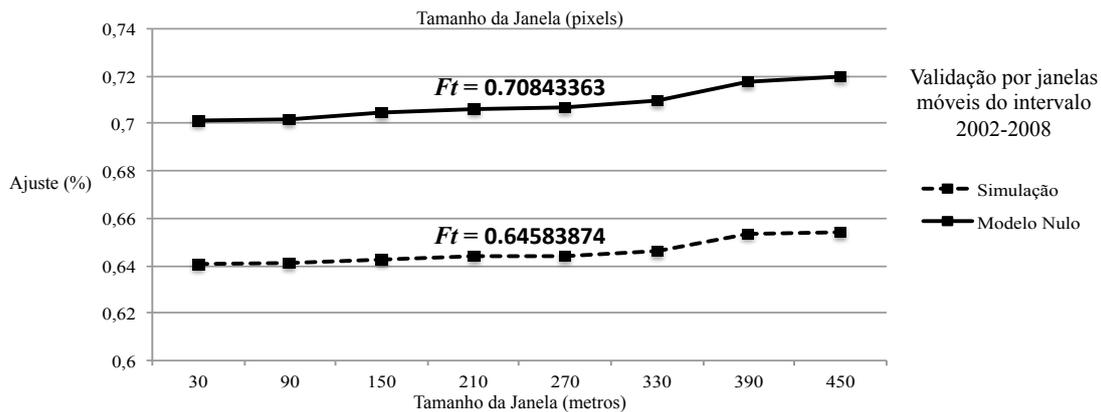


Figura 4.13 - Resultado da validação do modelo de MUCT no intervalo 2002-2008, onde Ft é a média ponderada de ajuste total.

Tabela 4.8 - Totais de áreas (hectares) referentes às diferentes classes do resultado da simulação 2002-2008 em relação ao uso real em 2008.

<i>Classe</i>	<i>Real 2008</i>	<i>Simulado 2008</i>	<i>Erro (%)</i>
Floresta	330693.75	333057.78	0.714
Campo Nativo	222446.79	230074.83	3.429
Silvicultura	93478.5	91133.28	2.508
Agric. Fam.	328924.44	321320.97	2.31
Agric. Grande Porte	147229.29	147212.01	0.011
Urbano	6664.95	6638.85	0.391
Água	20542.23	20542.23	0

do hólón B3 no entorno do município de Esmeralda, enquanto o processo de intensificação foi localizado no hólón B1 no entorno de Campos Novos e Barracão. Já os processos de regeneração e de urbanização foram localizados nas áreas de agricultura familiar do hólón B2 e nas bordas das manchas urbanas de Lages e Capinzal, respectivamente.

Neste modelo do intervalo 2002-2008, foi usada uma proporção maior da função aleatória de formação de manchas, como pode ser visto na Tabela 4.9, para as transições do processo de expansão da silvicultura. Porém, de forma geral, a maioria das transições foi modelada pelo procedimento determinístico de autômato celular. Esta configuração está relacionada com a intensa expansão de atividades de silvicultura através da formação de novas plantações, enquanto a maioria dos processos correspondeu ao padrão de expansão das manchas anteriormente existentes.

Tabela 4.9 - Proporção entre as funções de alocação espacial determinística de autômatos celulares e estocástica de formação de manchas no modelo de MUCT do intervalo 2002-2008.

2002	2008						
	FOM	CAMPO	SILV	AG-FAM	AGGP	URB	ÁGUA
FOM	0	0	80	90	95	100	0
CAMPO	0	0	80	90	95	100	0
SILV	0	0	0	85	95	0	0
AG-FAM	100	0	0	0	95	100	0
AGGP	0	0	60	85	0	100	0
URB	0	0	0	0	0	0	0
ÁGUA	0	0	0	0	0	0	0

4.3.4 Cenários de prognose da dinâmica da paisagem 2008-2030

Os resultados dos cenários de prognose da dinâmica da paisagem no intervalo 2008-2003 (Figura 4.14) representaram condições diferenciadas conforme um cenário de tendência atual *business as usual* (BAU), um cenário econômico (ou seja com o incremento da tendência atual capitalista) e um cenário ecológico (i.e., relacionada com perspectivas de alterações no sentido de práticas ecologicamente corretas focadas no desenvolvimento sustentável).

Os cenários de prognose da dinâmica da paisagem demonstraram as possíveis tendências de mudanças de uso e cobertura da terra nos próximos 22 anos, de acordo com o modelo de desenvolvimento adotado pela sociedade e seus atores em múltiplas escalas decisórias. A partir da definição de pesos para as variáveis de cenário de capital, ambiente, tecnologia moderna e tecnologia tradicional para cada região, foram estimadas as proporções de alteração das taxas de demandas oriundas do período de calibração 2002-2008. Durante as rodadas dos diferentes cenários, tais proporções de alteração das taxas de demanda de transição foram calibradas em face dos resultados obtidos, com o fim de gerar cenários mais realísticos. Estas alterações foram implementadas de acordo com a potencialidade paisagística de cada região, bem como aos sinais de saturação de atividades de acordo com as diferentes regiões.

O cenário de prognose de tendência atual (BAU) mostra os perigos da trajetória atual de desenvolvimento na área de estudo para o futuro das condições de conservação da cobertura da terra, com destaque para o processo de expansão da silvicultura no hólón B5 com característica urbano-industrial. Neste hólón B5, as taxas atuais de transição tiveram de ser reduzidas em 30% devido à falta de oferta de pixels de classes de cobertura da terra para seu atendimento, demonstrando um estágio de saturação de tais atividades neste hólón em alguns anos. Para satisfazer as demandas da tendência atual, as taxas de transição do

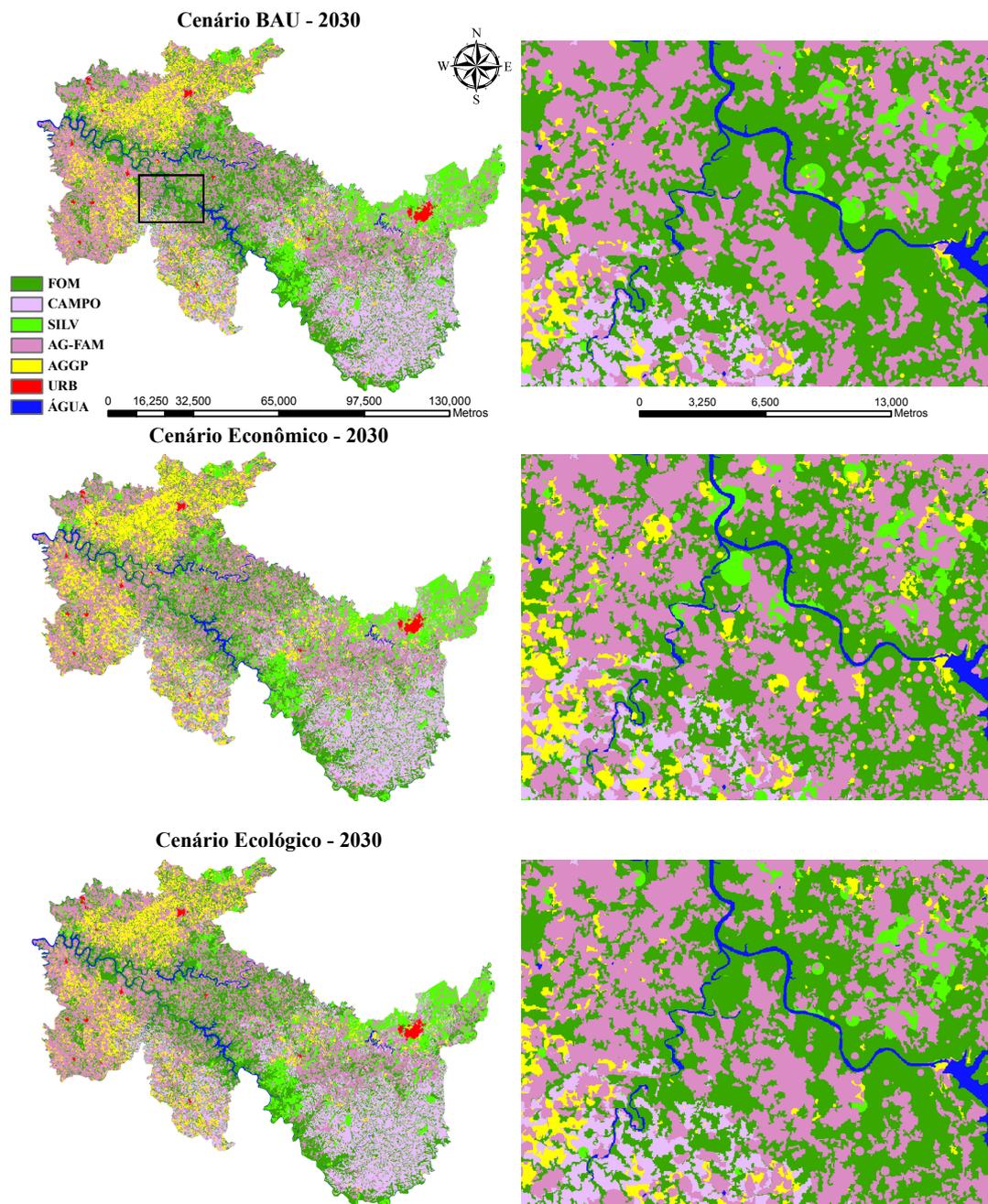


Figura 4.14 - Resultado dos cenários de prognose da paisagem no intervalo 2008-2030. Classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP), urbano (URB) e água.

processo de silvicultura foram bastante aumentadas no hólón B4, vizinho do anterior e com maior possibilidade de penetração destas atividades de silvicultura. Outra área com sinais de saturação é o cinturão agrícola do hólón B1 que apresenta a tendência de aumento da área de agricultura familiar pelo processo de extensificação, o qual pode estar relacionado

com a tendência de “acomodação” da agricultura de grande porte em áreas com maior potencialidade paisagística e produtividade agrícola. Já o hólón B3 apresenta a tendência de aumento das atividades de agricultura de grande porte no entorno do município de Esmeralda pelo processo de degradação em especial de campos nativos, enquanto nas outras áreas apresenta tendência de aumento de processos de expansão da silvicultura e de degradação para agricultura familiar. O hólón B2 com características essencialmente de agricultura familiar apresenta a tendência de acumulação da grande maioria do processo de regeneração, em conjunto com os processos de degradação para agricultura familiar.

O cenário de prognose econômico representa a ampliação do modelo de desenvolvimento atual, com as questões ambientais referentes ao avanço das atividades de silvicultura no hólón B5 ainda mais fortes. Este processo de expansão da silvicultura no hólón B5 teve as taxas de demanda atuais diminuídas em 20% devido à saturação de tais atividades nesta área. As taxas de demanda de transição do processo de expansão da silvicultura também foi bastante aumentada no hólón B4, a área com maior área de campo nativo com potencialidade para transformação em silvicultura, até pelo tamanho maior das propriedades. Apesar da tendência atual de saturação da agricultura de grande porte no cinturão agrícola do hólón B1, este cenário apresenta uma tendência contrária com o aumento da intensificação nesta área. O hólón B3 apresenta neste cenário a ampliação da tendência atual de desenvolvimento, com o aumento da degradação de campo nativo para a agricultura de grande porte no entorno do município de Esmeralda e com o aumento da degradação para agricultura familiar e da expansão da silvicultura nas áreas mais próximas ao município de Lages. O hólón B2 neste cenário apresenta uma diminuição das taxas de demanda de transição do processo de regeneração e um aumento das transições relacionadas com a degradação da cobertura da terra para agricultura familiar, representando atividades tradicionais de agricultura mista com característica mais desequilibrada no padrão de uso e recuperação desta área.

O cenário de prognose ecológico busca representar um modelo de desenvolvimento alternativo com o foco na valorização da questão ambiental e da tecnologia tradicional, sendo esta também influenciada por métodos científicos modernos em um processo de apropriação tecnológica como na agroecologia (HERRERA, 1981; GLIESSMAN, 2005). Assim, as demandas das transições relacionadas com o processo de expansão da silvicultura no hólón B5 foi diminuída em 80% devido ao processo de saturação destas práticas nesta área no entorno da cidade de Lages. A principal preocupação neste cenário no hólón B4 é a conservação de suas características de domínio de campo nativo com baixas taxas de transição. No hólón B1 ocorre um aumento das taxas de transição relacionadas com o processo de extensificação e a diminuição das taxas de intensificação, refletindo uma valorização das práticas agroecológicas (e.g., produtos orgânicos) e uma concentração das atividades agrícolas de grande porte nas áreas mais produtivas com maior aplicação de recursos técnico-científicos

buscando a eficácia e sustentabilidade das condições ecológicas. No hólón B3 ocorre uma diminuição das taxas de transição relacionadas com os processos de degradação das florestas e campos nativos para agricultura familiar e de grande porte, bem como com o processo de expansão da silvicultura, representando uma maior lentidão no processo de alteração das condições naturais desta área. No hólón B2 as taxas de transição do processo de degradação para agricultura familiar são bastante diminuídas e a taxa de transição do processo de regeneração é aumentada, o que busca representar uma maior aplicação de práticas agroecológicas e conservacionistas nesta área com grande potencialidade para estas por já ser o núcleo das atividades relacionadas com as tecnologias tradicionais.

Tabela 4.10 - Totais de áreas (hectares) referentes às diferentes classes do resultado dos cenários da dinâmica da paisagem 2008-2030.

<i>Classe</i>	<i>2008</i>	<i>BAU</i>	<i>Econômico</i>	<i>Ecológico</i>
Floresta	330693.75	265640.85	259130.61	318522.69
Campo Nativo	222446.79	196520.76	190829.97	217827.81
Silvicultura	93478.5	123850.08	129009.24	98943.12
Agric. Fam.	328924.44	403633.8	387389.88	369177.84
Agric. Grande Porte	147229.29	133102.08	156387.96	118276.11
Urbano	6664.95	6744.15	6780.06	6670.53
Água	20542.23	20542.23	20542.23	20542.23

Sob o ponto de vista das quantidades totais de áreas para as classes nos três diferentes cenários (Tabela 4.10 e Figura 4.15), estes podem ser caracterizados de forma sintética. Em relação às classes de cobertura da terra, a maior quantidade está no cenário ecológico, com valores intermediários no cenário atual BAU e valores menores no cenário econômico, o que representa o maior ou menor grau de conservação da cobertura da terra em relação direta com a valorização da questão ambiental e do incentivo às práticas de agricultura sustentável. As áreas nos três cenários da classe de silvicultura e de agricultura de grande porte apresentam relação inversa com o comportamento das classes de cobertura da terra, o que mostra uma relação contrária do aumento ou diminuição das áreas de silvicultura e agricultura de grande porte com as áreas de floresta e campo nativo. As áreas da classe de agricultura familiar são maiores no cenário atual de desenvolvimento e intermediárias no cenário econômico, representando a expansão ou contração dos processos de extensificação e intensificação, enquanto as menores quantidades desta classe no cenário ecológico se relacionam com a aplicação de práticas agroecológicas e de conservação da cobertura da terra. As áreas da classe urbana nos três cenários não apresentou grandes variações devido à concentração espacial deste processo e também da tendência à expansão vertical das cidades em detrimento do crescimento da mancha urbana em si.

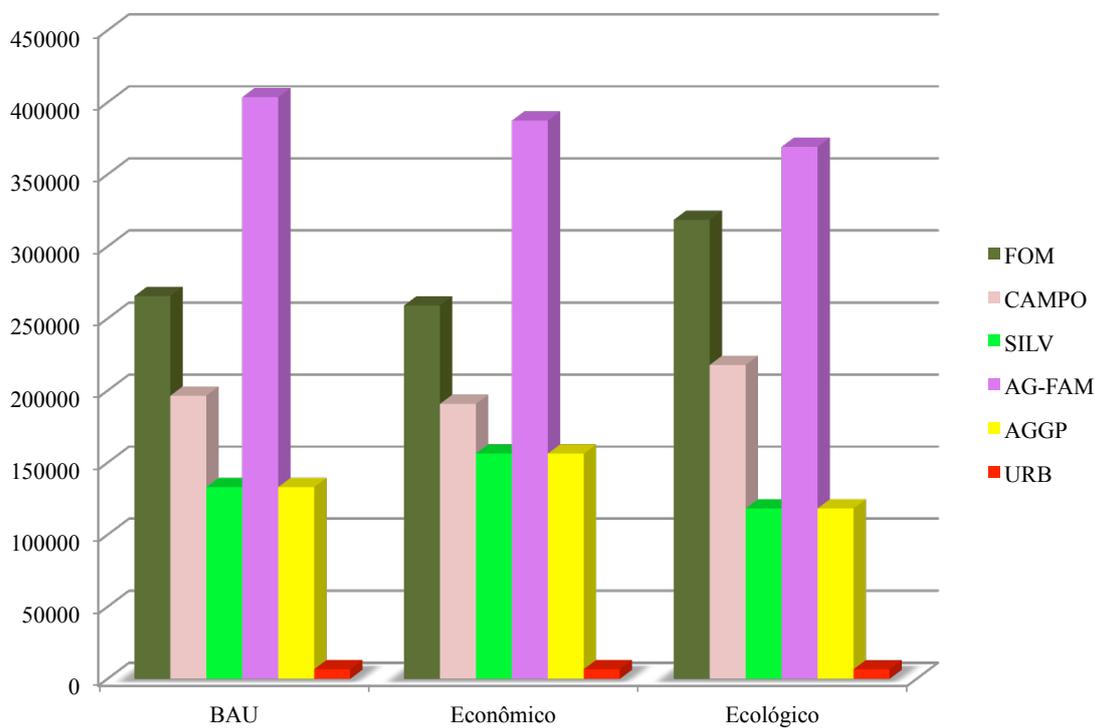


Figura 4.15 - Gráfico representando os resultados em área (hectares) dos cenários de prognose da paisagem no intervalo 2008-2030 relativos às classes de floresta (FOM), campo nativo (CAMPO), silvicultura (SILV), agricultura familiar (AG-FAM), agricultura de grande porte (AGGP) e urbano (URB).

5 CONCLUSÕES

Em relação ao objetivo geral e à hipótese principal deste trabalho, foi confirmada a importância dos estudos integrados da paisagem, através do seu zoneamento hierárquico, para a modelagem da dinâmica da paisagem e a geração de cenários de prognose da paisagem. A principal contribuição do zoneamento hierárquico da paisagem aplicado na modelagem dinâmica de mudanças de uso e cobertura da terra se refere à tipologia dos mosaicos da paisagem e da possibilidade de análises regionais dos padrões de MUCT, o que confere um caráter mais realístico nos resultados de tais modelos.

5.1 Variáveis paisagísticas

As variáveis físicas, ecológicas e sociais processadas e armazenadas em ambiente de SIG foram a base fundamental para os principais procedimentos deste trabalho: o mapeamento integrado da paisagem e a modelagem da dinâmica da paisagem. Cabe ainda lembrar a importância do uso de múltiplas formas de representação computacional do espaço geográfico conforme os variados objetivos e procedimentos operacionais, o que está relacionado com características como escala, tipo de amostragem e outras. A utilização do resultado do zoneamento hierárquico da paisagem para a agregação de dados de métricas da paisagem e para a compatibilização dos mapeamentos geoambientais (geomorfologia, pedologia e geologia) foi fundamental para a conversão destes diferentes formatos e para reduzir problemas de falácia ecológica e MAUP nas diversas análises compreendidas neste estudo.

5.2 Zoneamento hierárquico da paisagem

O zoneamento hierárquico da paisagem proposto neste trabalho apresentou a contribuição das tecnologias de GEOBIA para a regionalização de dados de SIG e Sensoriamento Remoto. A importância desta contribuição se deve às seguintes características da GEOBIA: a) integração entre SIG e PDI, b) foco nas ferramentas baseadas no conhecimento do especialista e c) concepção hierárquica da estrutura baseada na técnica de segmentação multi-resolução.

A estrutura hierárquica proposta, baseada nos geons da paisagem e nas Unidades de Planejamento da Paisagem (UPP's), possibilitou uma classificação das zonas hierárquicas mapeadas e a análise das principais correlações paisagísticas e características dos mosaicos de paisagem gerados pela análise multivariada de agrupamento (*cluster analysis*) e análise de correspondência canônica (CCA). A tipologia das zonas hierárquicas mapeadas mostrou uma relação estreita destas com padrões de uso da terra herdados de modos de ocupação da paisagem com tecnologias tradicionais ou modernas (zonas de pecuária extensiva, de agricultura familiar colonial, de agricultura intensiva e urbano-industriais). O nível hierárquico inferior (5 hólons) apresenta características relacionadas ao ritmo e adaptação de

atividades às condições locais de produção, como: a) divisão da zona agrícola-industrial entre áreas tipicamente agrícolas (ao redor de Campos Novos) e áreas urbano-industriais (no entorno de Lages); b) remodelamento da zona de agricultura familiar de cunho colonial; c) divisão da zona de pecuária extensiva em uma área bem conservada do ponto de vista de sistema de uso da terra no sul de Lages (Coxilha Rica) e uma área de transição com penetração de atividades agrícolas de agricultura familiar e de grande porte, bem como com o avanço da silvicultura.

5.3 Modelagem da dinâmica da paisagem

O modelo espacial dinâmico de mudanças de uso e cobertura da terra desenvolvido neste trabalho possibilitou, através de sua estrutura em módulos, a operacionalização dos principais procedimentos envolvidos na modelagem da dinâmica de MUCT como: cálculo de taxas de transição e mapeamento de processos da dinâmica da paisagem, geração de mapas de probabilidade de transição baseados na regressão logística e alocação espacial das transições de forma regionalizada com funções de autômato celular determinística e de formação de manchas aleatórias. As maiores contribuições deste modelo em termos de novas abordagens foram relacionadas com: a) uma orientação do modelo para os processos de mudanças de uso e cobertura da terra que permite a geração de modelos com maior poder de síntese no caso de estudos com número elevado de classes de uso e cobertura da terra, b) a implementação da alocação espacial das MUCT no modelo de forma regionalizada que possibilita a acoplagem com modelos externos em múltiplas escalas e c) uma abordagem mista na alocação espacial das MUCT com a divisão entre uma função determinística baseada em regras de autômatos celulares e uma função estocástica de formação de manchas que permite um maior controle pelo modelador dos tipos de transições implementadas.

A utilização no procedimento de calibração nos intervalos 1986-2002 e 2002-2008 e de geração de cenários entre 2008-2030 do zoneamento hierárquico da paisagem (5 hólons) conferiu uma maior aproximação com os padrões dos processos de MUCT, relacionados com estes mosaicos paisagísticos e a interdependência entre as variáveis físicas, ecológicas e sociais. Desta forma, esta abordagem permitiu na calibração dos modelos a identificação e representação dos principais processos de MUCT de acordo com as diferentes regiões. No hólón B1, cinturão agrícola no entorno dos municípios de Campos Novos e Barracão, foi identificado um domínio dos processos complementares de intensificação e extensificação com base na ocupação do espaço pela agricultura de grande porte. No hólón B2, área nuclear das atividades tradicionais de agricultura familiar, foi identificada a predominância dos processos da degradação e regeneração da cobertura da terra a partir dos ciclos rítmicos do sistema de uso tradicional da agricultura familiar. No hólón B3, área de expansão recente de atividades agrícolas e de silvicultura, foram identificados dois padrões principais em relação aos processos de MUCT: o domínio da degradação de campos nativos no entorno do município de Esmeralda e o domínio de degradação da cobertura

da terra para agricultura familiar e expansão da silvicultura nas áreas mais próximas ao município de Lages. No hólón B4, área dominada por campos nativos usados pela pecuária extensiva tradicional, foi identificada uma grande estabilidade do uso e cobertura da terra, com pequena intensidade dos processos de MUCT em sua maioria relacionados com a expansão da silvicultura. No hólón B5, centro regional urbano-industrial no entorno da cidade de Lages, identificou-se o predomínio do processo de expansão da silvicultura à partir principalmente da conversão das florestas e campos nativos.

Tais padrões de processos identificados na calibração dos modelos foram explorados nos cenários de prognose da dinâmica da paisagem no intervalo 2008-2030 que buscaram representar diferentes modelos de desenvolvimento. O cenário tendencial BAU demonstra a saturação das atividades de silvicultura no hólón B5 e da agricultura de grande porte no hólón B1, representando perigos para as condições de conservação da cobertura da terra no primeiro caso e a tendência ao incremento do processo de extensificação no segundo. O cenário econômico apresenta maiores perigos no caso da expansão da silvicultura no hólón B5 e uma tendência oposta de incremento do processo de intensificação no hólón B1, além de um aumento das taxas de degradação da cobertura da terra pela agricultura familiar nos hólón B2 e B3. Enquanto o cenário ecológico apresenta alternativas ao modelo atual e econômico de desenvolvimento, com reduções drásticas da expansão da silvicultura no hólón B5, incremento maior da extensificação no hólón B1 e incremento do processo de regeneração no hólón B2. O hólón B4 apresenta menor dinâmica da paisagem em todos os cenários, sendo utilizada para a transferência das taxas de demanda atuais da expansão da silvicultura do hólón B5 nos cenários BAU e econômico. Do ponto de vista da tomada de decisão relacionada com o planejamento territorial e gestão ambiental na área de estudo, os cenários de prognose apresentam a necessidade de adoção de uma trajetória focada na conservação e recuperação ambiental das áreas mais intensivas sob o ponto de vista dos processos de MUCT e dos padrões dos mosaicos da paisagem como os hólóns B5 e B1.

5.4 Perspectivas de aperfeiçoamentos teórico-metodológicos

Em relação ao avanço metodológico do zoneamento hierárquico da paisagem, o principal foco deve ser o desenvolvimento de técnicas de GEOBIA, bem como de avanços na perspectiva teórica com a aplicação ainda maior de contribuições interdisciplinares oriundas dos estudos de sistemas complexos. A tecnologia de GEOBIA apresenta potencialidades pouco exploradas neste trabalho que podem contribuir ainda mais para as metodologias de mapeamento integrado da paisagem, em especial a utilização de regras nebulosas (*fuzzy*) hierárquicas para a classificação de paisagens de acordo com atributos topográficos, espaciais e texturais; bem como um maior suporte de dados temáticos em formato de SIG.

De forma geral, o modelo LanDSCAM pode ser aperfeiçoado principalmente através da aplicação de técnicas e métodos oriundos dos estudos da complexidade (fractais, mode-

lagem baseada em agentes, algoritmos genéticos, etc.) e das novas contribuições da área da análise espacial (modelos de regressão espacial local, modelos mistos com incorporação de efeitos de autocorrelação espacial, etc.). No cálculo das demandas de transição, devem ser desenvolvidos métodos de estimação de taxas não-estacionárias como na abordagem fractal aplicada à séries temporais (MANDELBROT; HUDSON, 2004) que conferem maior realidade aos modelos de MUCT baseados em cadeias de Markov. Na geração dos mapas de probabilidade de transição, deve ser incorporada a componente de autocorrelação espacial nos modelos de regressão logística através da utilização de métodos de regressão geograficamente ponderada (FOTHERINGHAM et al., 2002) ou de modelos aditivos generalizados com efeitos mistos espaciais (BIVAND et al., 2008) para a geração de modelos que levem em consideração o tratamento da questão dos efeitos espaciais, especialmente de característica não-estacionária (FREITAS et al., 2013). Nas funções de alocação espacial das MUCT, a função baseada em regras de autômatos celulares pode ser incrementada com níveis de aleatoriedade e a função de formação de manchas pode ser ampliada por um uso mais direto das probabilidades de transição (menor aleatoriedade) e por novos padrões de formação de manchas, além do padrão circular da função radial de crescimento de manchas implementado. No procedimento de calibração dos modelos devem ser desenvolvidas técnicas de automatizadas de calibração que reduzem o tempo necessário e a interação do usuário nesta operação (ENGELEN et al., 2007). Além destas implementações em nível de algoritmos, deve-se desenvolver uma interface gráfica do usuário (*graphical user interface* - GUI) para facilitar o acesso ao modelo ao usuário sem domínio de procedimentos como a compilação e de linguagem de programação, apesar da estrutura atual do modelo baseada em arquivos de parâmetros apenas necessitar a compilação por parte do modelador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159 p. 14, 76

AGUIAR, A. P. D. **Modelagem de mudança de uso da terra na Amazônia: explorando a heterogeneidade intra-regional**. 2006. 182 p.
(INPE-08.10.18.21-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/08.10.18.21/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2012. 21, 22, 63

AGUIAR, A. P. D.; ANDRADE, P.; SOLER, L.; ASSIS, T. **TerraME-LuccME: an open source framework for spatially explicit land use change modeling**. Ilhabela: GLP, 2011. 23

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)**. 2003. 351 p. (INPE-10567-TDI/942/A). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/teses/claudia/tese_claudia.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2012. 19

ALMEIDA, C. M.; GLERIANI, J. M.; CASTEJON, E. F.; SOARES-FILHO, B. S. Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 9, p. 943–963, 2008. 20, 49

ALVES, D. S. Two cultures, multiple theoretical perspectives: the problem of integration of natural and social sciences in earth system research. In: YOUNG, S. S.; SILVERN, S. E. (Ed.). **International perspectives on environmental change**. Croacia: InTech, 2012. p. 3–24. 5

BATESON, G. **Steps to an ecology of mind: collected essays in anthropology, psychiatry, evolution, and epistemology**. Chicago: Chicago University Press, 1972. 533 p. 5, 10, 14

BATISTELLA, M.; VALLADARES, G. S. Farming expansion and land degradation in Western Bahia, Brazil. **Biotaneotropica**, v. 9, n. 3, p. 61–76, 2009. 18, 51

BATTY, M. GeoComputation using cellular automata. In: OPENSHAW, S.; ABRAHART, R. J. (Ed.). **GeoComputation**. London: Taylor and Francis, 2000. p. 96–126. 13, 14

BEHLING, H.; JESKE-PIERUSCHKA, V.; SCHÜLER, L.; PILAR, V. P. Dinâmica dos campos do sul do Brasil durante o Quaternário Tardio. In: PILAR, V. P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. A. (Ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 13–25.

28

BENSAÏD, D. **Marx intempestivo**: grandezas y miserias de una aventura crítica. Buenos Aires: Ediciones Herramienta, 2003. 539 p. 7

BERG, L. S. The objectives and tasks of geography. **Proceedings of the Russian Geographical Society**, v. 15, n. 9, p. 463–475, 1915. 7

BERGER, T.; GOODCHILD, M.; JANSSEN, M. A.; MANSON, S. M.; NAJLIS, R.; PARKER, D. C. Methodological considerations for agent-based modelling of land-use and land-cover change. In: PARKER, D. C.; BERGER, T.; MANSON, S. M. (Ed.). **Agent-based models of land-use and land-cover change**. [S.l.]: LUCC Report Series, 2002. p. 7–25. 24

BERTALANFFY, L. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1975. 351 p. 5, 8

BERTRAND, C.; BERTRAND, G. **Une géographie traversière**: l'environnement à travers territoires et temporalités. Paris: Éditions Arguments, 2002. 311 p. 6, 8, 11, 40

BIVAND, R. S.; PEBESMA, E. J.; RUBIO, V. G. **Applied spatial data analysis with R**. New York: Springer, 2008. 374 p. 106

BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 1, p. 2–16, 2010. 11

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with gis**. New York: Elsevier Science, 1994. 398 p. 20

BOSERUP, E. **The conditions of agricultural growth**: the economics of agrarian change under population pressure. London: George Allen Unwin, 1965. 124 p. 17

BRAAK, C. J. F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector method for multivariate direct gradient analysis. **Ecology**, v. 67, p. 1167–1179, 1986. 44

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change**: theoretical and modeling approaches. PhD. Thesis — Regional Research Institute/West Virginia University, West Virginia, 2000. Disponível em:

<<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acesso em: 14 dez. 2012. 14, 18

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p. 2

- CAMARGO, F. F.; FLORENZANO, T. G.; ALMEIDA, C. M.; OLIVEIRA, C. G. Geomorphological mapping using object-based analysis and ASTER DEM in the Paraíba do Sul Valley, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 6613–6620, 2009. 39
- CARLUCCI, M. B.; JARENKOV, J. A.; DUARTE, L. S.; PILAR, V. P. Conservação da Floresta com Araucária no Extremo Sul do Brasil. **Natureza Conservação**, v. 9, n. 1, p. 111–114, 2011. 29
- CARNEIRO, T. G. S. **Nested-CA: a foundation for multiscale modelling of land use and land cover change**. 2006. 114 p. (INPE-14702-TDI/1227). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/01.03.11.57/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2013. 23
- CASTELLA, J.; VERBURG, P. H. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. **Ecological Modelling**, v. 202, p. 410–420, 2007. 24, 60, 63
- CHAPIN III, F.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York: Springer-Verlag, 2002. 436 p. 16, 17
- CHIU, T.; FANG, D.; CHEN, J.; WANG, Y.; C., J. A robust and scalable clustering algorithm for mixed type attributes in large database environment. In: ACM SIGKDD INTERNATIONAL CONFERENCE ON KNOWLEDGE DISCOVERY AND DATA MINING, 7. **Proceedings....**. San Francisco: ACM, 2001. 44
- CLIMATEMPO. **Climatologia: características climáticas de Lages**. 2000. Disponível em: <<http://www.climatepo.com.br/climatologia/382/lages>>. Acesso em: 19 dez. 2012. 27
- CONTERATO, M. A.; SCHNEIDER, S. A agricultura familiar do Alto Uruguai, RS: mercantilização e estratégias de reprodução no Município de Três Palmeiras. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 23, n. 2-3, p. 151–189, 2006. 28
- COSTANZA, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**, v. 47, p. 199–215, 1989. 60, 61
- COSTANZA, R.; VOINOV, A. Introduction: spatially explicit landscape simulation models. In: COSTANZA, R.; VOINOV, A. (Ed.). **Landscape simulation modeling: a spatially explicit, dynamic approach**. New York: Springer-Verlag, 2004. p. 3–20. 12, 71
- COUCLELIS, H. Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. **Environment and Planning A**, v. 20, n. 1, p. 99–109, 1988. 13, 14

_____. Why I no longer work with agents: a challenge for ABMs of human-environment interactions. In: PARKER, D. C.; BERGER, T.; MANSON, S. M. (Ed.). **Agent-based models of land-use and land-cover change**. [S.l.]: LUCC Report Series, 2002. p. 3–5. 24



CPRM. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul (escala 1:750.000)**. Porto Alegre: CPRM, 2005. 30

_____. **Mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul (escala 1:750.000)**. Porto Alegre: CPRM, 2005a. 30

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 124 p. 11, 40

CUNHA, S. B.; FREITAS, M. W. D. Geossistemas e gestão ambiental na bacia hidrográfica do rio São João-RJ. **GEOgraphia**, v. 6, n. 2, p. 87–110, 2004. 11, 38

DEFINIENS. **Definiens Developer 7**: reference book. Munique: DEFINIENS AG, 2007. 195 p. 33

EMBRAPA. **Mapa de solos do Estado de Santa Catarina (escala 1:250.000)**. Florianópolis: Embrapa, 2005. xix, 31, 40

ENGELN, G.; LAVALLE, C.; BARREDO, J. I.; MEULEN, M.; WHITE, R. The MOLAND modelling framework for urban and regional land-use dynamics. In: KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H. J. (Ed.). **Modelling land-use change**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 279–319. 20, 106

ERENSTEIN, O. Intensification or extensification? Factors affecting technology use in peri-urban lowlands along an agro-ecological gradient in West Africa. **Agricultural Systems**, n. 90, p. 132–158, 2006. 16, 17

EVANS, I. General geomorphometry, derivations of altitude and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. (Ed.). **Spatial analysis in Geomorphology**. London: Methuen, 1972. p. 17–90. 32

FEYERABEND, P. **Contra o método**: esboço de uma teoria anárquica do conhecimento. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1989. 487 p. 9

FORMAN, R. T. T. **Land mosaics**: the ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 656 p. 71

FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNSDON, C.; CHARLTON, M. **Geographically Weighted Regression**: the analysis of spatially varying relationships. Chichester: John Wiley and Sons, 2002. 282 p. 106

- FRANÇA, C. J.; ALVES, C.; FREITAS, M. W. D.; BERGAMASCHI, R. Compatibilização dos bairros e unidades de planejamento com os setores censitários no Estado do Espírito Santo. **Geografares**, n. 6, p. 35–46, 2008. 41
- FREITAS, M. W. D. **Estudo integrado da paisagem no sertão pernambucano (NE-BRASIL) com o uso de Sistemas de Informação Geográfica e Sensoriamento Remoto**. 2006. 191 p. (INPE-14828-TDI/1268). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/05.30.19.34/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2012. 11, 44
- FREITAS, M. W. D. Estudos integrados da paisagem: abordagens complexas do espaço geográfico para o desenvolvimento sustentável. In: TORRES, F.; DAGNINO, R.; OLIVEIRA JR., A. (Ed.). **Contribuições geográficas**. Ubá: Ed. Geographica, 2009. p. 327–390. 2, 8, 40
- FREITAS, M. W. D.; CARVALHO, V. C. Uso de geotecnologias para o mapeamento integrado de paisagens no sertão pernambucano (NE - Brasil). **Geografia**, v. 34, n. 3, p. 537–558, 2009. 2, 11, 14, 44
- FREITAS, M. W. D.; SANTOS, J. R. Land use/land cover in the uruguay river basin considering the GEOBIA paradigm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHIC OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, 4. **Proceedings....**. São José dos Campos: INPE, 2012. p. 119–122. ISBN 978-85-17-00059-1. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP8W/3BT2DNS?languagebutton=pt-BR>>. 33
- FREITAS, M. W. D.; SANTOS, J. R.; ALVES, D. S. Land-use and land-cover change processes in the Upper Uruguay Basin: linking environmental and socioeconomic variables. **Landscape Ecology**, v. 28, n. 2, p. 311–327, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10980-012-9838-9>>. 18, 51, 79, 85, 86, 88, 106
- GEIST, H. J.; LAMBIN, E. F. **What drives tropical deforestation?: a meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence**. Louvain-la-Neuve: LUCC Report Series, 2001. 117 p. 15, 22
- GEOGHEGAN, J.; PRITCHARD JR., L.; OGNEVA-HIMMELBERGER, Y.; CHOWDHURY, R. R.; SANDERSON, S.; TURNER II, B. L. “socializing the pixel” and “pixelizing the social” in land-use and land-cover change. In: LIVERMAN, D.; MORAN, E. F.; RINDFUSS, R. R.; STERN, P. C. (Ed.). **People and pixels: linking Remote Sensing and Social Science**. Washington: National Academy Press, 1998. p. 51–69. 2, 10
- GIBLIN, B. Reclus: un écologiste avant l’heure. **Hérodote**, n. 22, p. 107–118, 1981. 8

- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia**: processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 658 p. 99
- GROHMANN, C.; SMITH, M.; RICCOMINI, C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 4, p. 1200–1213, 2011. 32
- GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 192 p. 41
- HAASE, G. Medium scale landscape classification in G.D.R. In: RICHTER, H.; SCHÖNFELDER, G. (Ed.). **Landscape synthesis – part II**. Halle: Martin Luther Universitat/Halle-Wittenberg, 1986. p. 5–23. 149 p. 8, 9
- HARRELL JR., F. E. **Design package**. 2012. Disponível em: <<http://biostat.mc.vanderbilt.edu/wiki/Main/Design>>. 54
- HARVEY, D. **Condição pós-moderna**: uma pesquisa sobre as origens da mudança cultural. São Paulo: Loyola, 1999. 349 p. 1, 5
- HEISENBERG, W. **Physics and philosophy**: the revolution in modern science. London: Allen Unwin, 1959. 159 p. 5
- HERRERA, A. O. The generation of technologies in rural areas. **World Development**, v. 9, n. 1, p. 21–34, 1981. 77, 99
- HIETEL, E.; WALDHARDT, R.; OTTE, A. Analysing land-cover changes in relation to environmental variables in Hesse, Germany. **Landscape Ecology**, v. 19, n. 5, p. 473–489, 2004. 18
- HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. **Applied logistic regression**. New York: John Wiley Sons, 2000. 391 p. 22, 50, 53, 54, 81
- HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, v. 53, p. 421–422, 1987. 68
- HURKENS, J.; HAHN, B.; VELDEN, H. Using the GEONAMICA software environment for integrated dynamic spatial modelling. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE INTEGRATING SCIENCES AND INFORMATION TECHNOLOGY FOR ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AND DECISION MAKING, 4. **Proceedings...**, Barcelona: International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 2008. p. 751–758. Disponível em: <http://www.iemss.org/iemss2008/uploads/Main/S07-06-Hurkens_et_al-IEMSS2008.pdf>. 20

- IBGE. **Censo demográfico**. 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19 dez. 2012. 30, 41
- _____. **Mapeamento geomorfológico do Estado do Rio Grande do Sul**. 2003. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 25 dez. 2012. xix, 30, 31
- _____. **Censo agropecuário 2006**. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 21 jan. 2013. xix, 76
- KAUL, P. F. T. Geologia. In: ESTATÍSTICA, I. B. de Geografia e (Ed.). **Geografia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. p. 29–54. 26
- KOESTLER, A. **Janus, a summing up**. Richmond South: Hutchinson of Australia, 1978. 354 p. 7, 8, 9, 11, 38
- LANG, S. Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality – dealing with complexity. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G. (Ed.). **Object-based image analysis: spatial concepts for knowledge driven remote sensing applications**. Berlin: Springer-Verlag, 2008. p. p. 3–27. 11, 38
- LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 424 p. 2, 10, 38, 70
- LATOUR, B. **Jamais fomos modernos: ensaio de antropologia simétrica**. Rio de Janeiro: Ed. 34, 1994. 152 p. 7
- LEPs, J.; SMILAUER, P. **Multivariate analysis of ecological data using CANOCO**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 269 p. 44
- LEWIN, R. **Complejidad: el caos como generador del orden**. Barcelona: Tusquets Editores, 2002. 245 p. 1, 5, 6, 14
- LUO, G.; YIN, C.; CHEN, X.; XU, W.; LU, L. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: a case study of Sangong watershed in Xinjiang, China. **Ecological Complexity**, v. 7, p. 198–207, 2010. 63
- MACGARIGAL, K.; MARKS, B. J. **Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure**. Portland, OR: US Department of Agriculture, 1995. 122 p. 38, 59
- MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman, 1998. 468 p. 5
- MANDELBROT, B. B.; HUDSON, R. L. **Mercados financeiros fora de controle: a teoria dos fractais explicando o comportamento dos mercados**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. 317 p. 47, 106

- MARKOV, A. A. An example of statistical investigation of the text Eugene Onegin concerning the connection of samples in chains. **Science in Context**, n. 19, p. 591–600, 2006. 47
- MARX, K. **El capital I**: crítica de la economía política. México, D. F.: Fondo de Cultura Económica, 1966. 769 p. 15
- MAS, J.; SANDOVAL, A. F. Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. **GeoTrópico**, v. 5, n. 1, p. 1–24, 2011. 19
- MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D.; PEDLOWSKI, M. A.; CHOMENTOWSKI, W.; FERNANDES, L. C. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 5, p. 1117–1129, 2010. 37
- MATSON, P. A.; PARTON, W. J.; POWER, A. G.; SWIFT, M. J. Agricultural intensification and ecosystem properties. **Science**, v. 277, n. 504, p. 504–509, 1997. 17
- MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W. W. **The limits to growth**. New York: Universe Books, 1972. 205 p. 17
- MEGALE, J. F. (Ed.). **Max. Sorre**. São Paulo: Ática, 1985. 192 p. 8
- MONTEIRO, C. A. F. Travessia da crise (tendências atuais na geografia). **Revista Brasileira de Geografia**, v. 50, n. 2, p. 127–150, 1988. 1
- _____. **Geossistemas**: a história de uma procura. São Paulo: Contexto, 2001. 125 p. 3, 8, 9, 11, 38
- MOREIRA, R. **O pensamento geográfico brasileiro**: as matrizes clássicas originárias. São Paulo: Contexto, 2008. 192 p. 8
- MORIN, E. **O método I**: a natureza da natureza. Porto Alegre: Chicago University Press, 2002. 479 p. 1, 5, 6, 14, 18
- MORTIMORE, M. Population growth and land degradation. **GeoJournal**, v. 31, n. 1, p. 15–21, 1993. 16
- MUNYATI, C.; MAKGALE, D. Multitemporal landsat TM imagery analysis for mapping and quantifying degraded rangeland in the Bahurutshe communal grazing lands, South Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 14, p. 3649–3668, 2009. 37
- NAVEH, Z. Biocybernetic perspectives of landscape ecology and management. In: MOSS, M. R. (Ed.). **Landscape ecology and management**. Montreal: Polyscience, 1988. p. 23–34. 149 p. 8

- NEPSTAD, D.; SOARES-FILHO, B.; MERRY, F.; LIMA, A.; MOUTINHO, P.; CARTER, J.; BOWMAN, M.; CATTANEO, A.; RODRIGUES, H.; SCHWARTZMAN, S.; MCGRATH, D.; STICKLER, C.; LUBOWSKI, C.; PIRIS-CABEZAZ, P.; RIVERO, S.; ALENCAR, A.; ALMEIDA, O.; STELLA, O. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 326, n. 5958, p. 1350–1351, 2009. 19, 63
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied linear statistical models: regression, analysis of variance, and experimental designs**. Homewood: R.D. Irwin, 1985. 1127 p. 54
- NUSSENZVEIG, H. M. (Ed.). **Complexidade e caos**. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ/COPEA, 1999. 276 p. 1, 5, 6
- OLOFSSON, P.; FOODY, G. M.; STEHMAN, S. V.; WOODCOCK, C. E. Making better use of accuracy data in land change studies: estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, p. 122–131, 2013. 37
- OPENSHAW, S. Ecological fallacies and the analysis of areal census data. **Environment and Planning A**, v. 16, p. 17–31, 1984. 41
- OVERBECK, G. E.; MÜLLER, S. C.; FIDELIS, A.; PFADENHAUER, J.; PILAR, V. P.; BLANCO, C. C.; BOLDRINI, I. I.; BOTH, R.; FORNECK, E. D. Os campos sulinos: um bioma negligenciado. In: PILAR, V. P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. A. (Ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 26–41. 28, 29
- OZAH, A. P.; ADESINA, F. A.; DAMI, A. A deterministic cellular automata model for simulating rural land use dynamics: a case study of Lake Chad Basin. In: CORE SPATIAL DATABASES - UPDATING, MAINTENANCE AND SERVICES - FROM THEORY TO PRACTICE. **Proceedings...**, Haifa: ISPRS, 2010. p. 75–82. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4_8_2-W9/papers/final_105_ISPRS_Ozah_Dami_Adesina_CA.pdf>. 49
- PALANG, H.; ALUMAE, H.; MANDER, U. Holistic aspects in landscape development: a scenario approach. **Landscape and Urban Planning**, v. 50, p. 85–94, 2000. 63
- PARKER, D. C.; MANSON, S. M.; JANSSEN, M. A.; HOFFMAN, M. J.; DEADMAN, P. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 93, n. 2, p. 314–337, 2003. 24
- PÉREZ-VEGA, A.; MAS, J.; LIGMANN-ZIELINSKA, A. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity

loss in a deciduous tropical forest. **Environmental Modelling Software**, v. 29, n. 1, p. 11–23, 2012. 49

PINTO-CORREIA, T.; MASCARENHAS, J. Contribution to the extensification/intensification debate: new trends in the portuguese montado. **Landscape and Urban Planning**, v. 46, p. 125–131, 1999. 16

POLANYI, K. **A grande transformação**: as origens de nossa época. Rio de Janeiro: Campus, 2000. 349 p. 1

PONTIUS JR., R. G.; BOERSMA, W.; CASTELLA, J.; CLARKE, K.; NIJS, T.; DIETZEL, C.; DUAN, Z.; FOTSING, E.; GOLDSTEIN, N.; KOK, K.; KOOMEN, E.; LIPPITT, C. D.; MCCONNELL, W.; SOOD, A. M.; PIJANOWSKI, B.; PITHADIA, S.; SWEENEY, S.; TRUNG, T. N.; VELDKAMP, A.; VERBURG, P. H. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. **Annals of Regional Science**, v. 42, p. 11–37, 2008. 91

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A nova aliança**: metamorfose da ciência. Brasília: Ed. UnB, 1991. 247 p. 1, 5

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2008. 50, 54

RADAMBRASIL. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguiana e SI.22 Lagoa Mirim**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1986. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 31 dez. 2012. xix, 30, 31, 40

RASMUSSEN, L. V.; RASMUSSEN, K.; REENBERG, A.; PROUD, S. A system dynamics approach to land use changes in agro-pastoral systems on the desert margins of Sahel. **Agricultural Systems**, v. 107, p. 56–64, 2012. 63

REIS, M. J. A instalação de hidrelétricas no Vale do Rio Uruguai e a constituição de um campo social de conflitos. **Ilha: Revista de Antropologia**, v. 10, n. 1, p. 28–50, 2008. 27

RIBEIRO, D. **O povo brasileiro**: a formação e o sentido do Brasil. São Paulo: Companhia das Letras, 2006. 433 p. 28, 88

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN III, F.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. A.; HUGHES, T.; LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.;

RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, n. 24, p. 472–475, 2009. 2

ROUGERIE, G.; BEROUTCHACHVILI, N. **Géosystèmes et paysages: bilan et méthodes**. Paris: Armand Colin, 1991. 302 p. 8

ROUNSEVELL, M. D. A.; REGINSTER, I.; ARAÚJO, M. B.; CARTER, T. R.; DENDONCKER, N.; EWERT, F.; HOUSE, J. J.; KANKAANPAA, S.; LEEMANS, R.; METZGER, M. J.; SCHMIT, P.; TUCK, G. A coherent set of future land use change scenarios for Europe. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 114, p. 57–68, 2006. 63

SALINERO, E. C. **Teledetecção ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio**. Barcelona: Editorial Ariel, 2002. 586 p. 2, 10

SANTOS, B. S. **Um discurso sobre as ciências**. Porto: Afrontamento, 1995. 59 p. 5

SAUER, C. O. The morphology of landscape. **University of California Publications in Geography**, v. 2, n. 2, p. 19–53, 1925. 7

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16–20, 1991. 32

SILVA, J.; CARVALHO, J.; SANTOS, R.; FELGUEIRAS, C. Zoneamentos ambientais: quando uma unidade territorial pode ser considerada homogênea? **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, p. 83–92, 2007. 44

SILVEIRA, P. C. B. Etnografia e questões sócio-ambientais: esboço de uma antropologia simétrica da paisagem. **Cadernos de Ciências Sociais**, v. 23, n. 1-2, p. 115–134, 2007. 7

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G.; PENNACHIN, C. L. 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. 19, 20, 47, 49, 50, 60

SOARES-FILHO, B. S.; GARCIA, R. A.; RODRIGUES, H.; MORO, S.; NEPSTAD, D. Nexos entre as dimensões socioeconômicas e o desmatamento: a caminho de um modelo integrado. In: BATISTELLA, M.; ALVES, D. S.; MORAN, E. F. (Ed.). **Amazônia: natureza e sociedade em transformação**. São Paulo: Edusp, 2008. p. 181–217. 20

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D.; CURRAN, L.; VOLL, E.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modeling conservation in the amazon basin. **Nature**, v. 440, n. 7083, p. 520–523, 2006. 19, 49

SOCHAVA, V. B. O estudo de geossistemas. **Métodos em questão (IG-USP)**, n. 16, p. 1–51, 1977. 8

TOBLER, W. Cellular geography. In: GALÉ, S.; OLSSON, G. (Ed.). **Philosophy in Geography**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1979. p. 379–386. 13

TRICART, J.; JONGE, K. **Ecogeography and rural management**. London: Longman, 1992. 267 p. 8, 14

TROLL, C. Die geographisched landschaft und ihre erforschung. **Studium Generale**, v. 3, p. 163–181, 1950. 7

TURNER II, B. L.; LAMBIN, E. F.; REENBERG, A. The emergence of land change science for global environment change and sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 52, p. 20666–20671, 2007. 2, 10

VALERIANO, M.; ROSSETI, D. Topodata: brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300–309, 2011. 10, 31

VERBURG, P. H. **Exploring the spatial and temporal dynamics of land use: with special reference to China**. 154 p. Thesis (PhD) — Wageningen University, Wageningen, 2000. 21

VERBURG, P. H.; EICKHOUT, B.; MEIJL, H. A. A multi-scale, multi-model approach for analyzing the future dynamics of european land use. **Annals of Regional Science**, v. 42, n. 1, p. 57–77, 2008. 23

VERBURG, P. H.; SOEPBOER, W.; VELDKAMP, A.; LIMPIADA, R.; ESPALDON, V.; MASTURAS, S. S. A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. **Environmental Management**, v. 30, n. 3, p. 391–405, 2002. 21, 22, 23, 49, 50, 60

VERBURG, P. H.; VELDKAMP, A.; WILLEMEN, L.; OVERMARS, K. P.; CASTELLA, J. Landscape level analysis of the spatial and temporal complexity of land-use. In: DEFRIES, R. S.; ASNER, G. P.; HOUGHTON, R. A. (Ed.). **Change ecosystems and land use change**. Washington: Geophysical Monograph Series, 2004. p. 217–230. 22

VERDUM, R. Depressão Periférica e Planalto: potencial ecológico e utilização social da natureza. In: VERDUM, R.; BASSO, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A. (Ed.). **Rio Grande do Sul: paisagens e territórios em transformação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004. p. 39–57. 28

VLIET, M.; KOK, K.; VELDKAMP, T. Linking stakeholders and modellers in scenario studies: The use of fuzzy cognitive maps as a communication and learning tool. **Futures**, v. 42, p. 1–14, 2010. 63

WIENER, N. **Cibernética e sociedade**: o uso humano de seres humanos. São Paulo: Cultrix, 1968. 190 p. 5, 8

WILENSKY, U. **NetLogo**. 1999. Disponível em:
<<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>>. Acesso em: 16 fev. 2013. 64

WOLFRAM, S. **A new kind of science**. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002. 1197 p. 13

WOOD, C. H.; SKOLE, D. Linking satellite, census and survey data to study deforestation in the brazilian amazon. In: LIVERMAN, D.; MORAN, E. F.; RINDFUSS, R. R.; STERN, P. C. (Ed.). **People and pixels: linking Remote Sensing and Social Science**. Washington: National Academy Press, 1998. p. 70–93. 10

WRIGLEY, N.; HOLD, T.; STEEL, D.; TRANMER, M. Analysing, modelling and resolving the ecological fallacy. In: LONGLEY, P.; BATTY, M. (Ed.). **Spatial analysis: modeling: in a GIS environment**. Cambridge: Geoinformation International, 1996. p. 25–40. 41

WU, J. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 4, p. 367–380, 1999. 11

ZHANG, T.; RAMAKRISHNON, R.; LIVNY, M. Birch: an efficient data clustering method for very large databases. In: ACM SIGMOD CONFERENCE ON MANAGEMENT OF DATA. **Proceedings...**. Montreal: ACM, 1996. 44

ZONNEVELD, I. The land unit: a fundamental concept in landscape ecology, and its applications. **Landscape Ecology**, v. 3, n. 2, p. 67–86, 1988. 8, 41

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.