



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.07.01.11-TDI

**MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL DA EXPANSÃO
DA ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR: QUIRINÓPOLIS
(GO)**

Gustavo Felipe Balué Arcoverde

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Cláudia Maria de Almeida, e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff aprovada em 19 de dezembro de 2013.

URL do documento original:

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

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)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.07.01.11-TDI

**MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL DA EXPANSÃO
DA ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR: QUIRINÓPOLIS
(GO)**

Gustavo Felipe Balué Arcoverde

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Cláudia Maria de Almeida, e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff aprovada em 19 de dezembro de 2013.

URL do documento original:

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

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Arcoverde, Gustavo Felipe Balué.

Ar27m Modelagem dinâmica espacial da expansão da área de cana-de-açúcar: Quirinópolis (GO) / Gustavo Felipe Balué Arcoverde. – São José dos Campos : INPE, 2013.
xxiv + 181 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2014/01.07.01.11-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Cláudia Maria de Almeida, e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff .

1. modelagem dinâmica espacial. 2. cana-de-açucar. 3. mudanças de uso e cobertura da terra. I.Título.

CDU 528.873:633.61

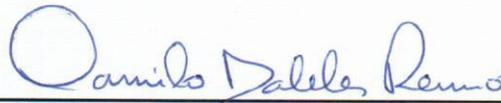


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

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

Dr. Camilo Daleles Rennó



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Cláudia Maria de Almeida



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Diógenes Salas Alves



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Michelle Cristina Araujo Picoli



Convidado(a) / CNPEM/CTBE / Campinas - SP

Dr. Daniel Alves Aguiar



Convidado(a) / Agrosatélite / Florianópolis - SC

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

Aluno (a): **Gustavo Felipe Balué Arcoverde**

São José dos Campos, 19 de Dezembro de 2013

“Seja em você a mudança que quer para o mundo”.

Gandhi

A meus pais, porque me deram educação e hoje chego aqui.

AGRADECIMENTOS

Durante a grande jornada que é um doutorado, várias situações de vida e pessoas passam por nós. Pelo fato deste doutorado ter sido desenvolvido concomitantemente à atividades laborais de outras esferas, e, na maior parte do mesmo, em outras cidades, o equilíbrio emocional, a persistência e o amor pelo que se faz são fundamentais para ter seguido adiante. Nesta lógica, algumas pessoas foram importantes para que eu pudesse ter chegado até aqui. Nos primeiros trimestres do doutorado, duas amigas me ajudaram muito em relação às dificuldades que passei, a Kenia e a Luciana. A minha noiva Alexandra, que me acompanhou quase que do início ao fim, me apoiando, me entendendo e me aconselhando. Aos colegas de mestrado que convivi mais de perto, com trocas de experiências acadêmicas e de vida, e que me animaram a seguir adiante com o doutorado. Aos animados e conselheiros colegas Antenor e Maikon. À professora e orientadora Cláudia que me aceitou e me guiou. Ao professor Bernardo por suas ótimas dicas. Ao Divino, da Conab, que desde aquela época me incentivou. Ao chefe Netto, pela sua compreensão. A minha família, especialmente a minha mãe, que me deram base e que na hora do aperto sempre estiveram por perto, apesar da distância. A todos que de alguma forma me passaram energias positivas.

RESUMO

Desde a introdução de veículos bicompostíveis na primeira década do século XXI no Brasil, ocorreu uma expansão do plantio de cana-de-açúcar sem precedentes, totalizando quase 5 milhões de hectares em pouco mais de uma década, elevando o país ao posto de maior produtor de cana-de-açúcar. Este fato pode levar a diferentes transformações do uso e cobertura da terra. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi analisar o comportamento do uso e cobertura da terra por meio de sensoriamento remoto e modelagem dinâmica espacial por autômatos celulares em uma área de franca expansão da cana-de-açúcar, o município de Quirinópolis, Goiás. Foi considerado o contexto histórico e prospectivo para o ano de 2020 sob dois cenários: expansão e base. Foram realizadas classificações de imagens restauradas para 15 m do sensor TM/Landsat-5 para três anos de referência, 2005, 2008 e 2011. Para tanto, foram utilizadas técnicas híbridas de classificação, tais como interpretação visual, subpixel e análise de séries históricas do EVI-2/MODIS, sendo delimitadas oito classes de uso e cobertura da terra. Foi adotado um critério de permanência entre culturas temporárias e pastagens plantadas de forma a evitar falsos positivos decorrentes de manejos agrícolas comumente adotados. No primeiro período analisado (2005 a 2008), a expansão da cana-de-açúcar ocorreu sob um padrão de conversão a partir de culturas agrícolas de verão e pastagens plantadas, também sendo constatada a participação de culturas agrícolas irrigadas. No segundo período (2008 a 2011), de consolidação da cana-de-açúcar, a expansão se dá prioritariamente sobre pastagens plantadas, havendo maior participação da vegetação florestal, e ocorrendo retorno gradativo das culturas agrícolas de verão e irrigadas. Os modelos gerados demonstraram que os fatores de maior atratividade à expansão da maioria das classes de uso e cobertura da terra foram a proximidade às classes de destino. No caso da cana-de-açúcar, os fatores de proximidade às usinas e disponibilidade de pastagens foram mais importantes. O modelo do período 2008 a 2011 foi utilizado para os cenários prospectivos. Em ambos cenários, o cultivo da cana-de-açúcar vai além dos fatores de atratividade comuns, sendo a pastagem plantada o principal fator de atratividade. Tal fato se dá principalmente na porção sul e oeste de Quirinópolis, onde houve certo incremento da participação da pastagem e vegetação florestal, com diminuição da participação das culturas anuais e irrigadas. O cenário de expansão apresentou maior expansão de cana-de-açúcar sobre Áreas de Preservação Permanente, fato que não ocorreu no cenário base. O cenário base apresentou melhor comparabilidade com os padrões atuais de expansão da cana-de-açúcar. Para 2020, a capacidade de processamento atual de cana-de-açúcar em Quirinópolis apresenta-se em plenas condições. Entretanto, a localização das usinas face à expansão a oeste do município deve ser revista nos próximos anos, tendo em vista a produtividade da cana-de-açúcar.

SPATIAL DYNAMIC MODELING OF SUGAR CANE AREA EXPANSION: QUIRINÓPOLIS, GOIÁS STATE, BRAZIL

ABSTRACT

Since the introduction of flex-fuel vehicles in the first decade of this century in Brazil, there was an unprecedented expansion of sugarcane farms, amounting to 5 million hectares in just a decade, rendering Brazil as the world's largest producer of sugarcane. This fact brings about considerable changes in land use and land cover. Considering this, the aim of this study was to investigate land use and land cover patterns by means of remote sensing and cellular automata spatial dynamic modeling in the municipality of Quirinópolis, Goiás, Brazil, in a historical and prospective context for 2020 under two scenarios: expansion and baseline. Images from TM/Landsat-5 were restored to 15 m for three reference years, 2005, 2008 and 2011, for the purpose of land use and land cover classifications. To this end, hybrid classification techniques such as visual interpretation, sub-pixel and analysis of historical series of EVI-2/MODIS were used, in which eight classes of land use and land cover were identified. A criterion of permanence between temporary crops and managed pastures was used in order to avoid false positives classifications from common agricultural management. In the first analyzed period (2005-2008), sugarcane expansion resulted from standard conversions from Summer crops and managed pastures, with a small share of irrigated crops. The second period (2008-2011) was marked by the consolidation of sugarcane, in which its expansion took place mostly on managed pastures, with an increasing share of forest vegetation, and also with the gradual return of agricultural and irrigated Summer crops. The models showed that the main drivers of land cover and land use change were the proximity to the target classes. In the particular case of sugarcane expansion, the proximity to mills and the availability of pasture land were more important drivers. The generated model for the period 2008-2011 was used for prospective scenarios. In both scenarios, the sugarcane expansion occurred on managed pastures. This fact was observed mainly in the southern and western sectors of Quirinópolis, where there is also a growing share of forest vegetation, particularly in the expansion scenario. The expansion scenario showed a marked incursion of sugarcane crops on Permanent Preservation Areas, what was not observed in the baseline scenario. The baseline scenario showed better comparability with the current sugar cane expansion. The current sugarcane processing capacity of Quirinópolis is able to meet the demands for sugar cane expansion in 2020. However, the location of mills considering the sugarcane expansion to the west should be reviewed in the coming years, so as to assure the high sugarcane productivity of this municipality.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Figura 2.1 - Tendência mundial da evolução do uso de fontes energéticas..... | 8 |
| Figura 2.2 - Evolução da produção de etanol (anidro e hidratado) e do licenciamento de veículos Fleves flex..... | 9 |
| Figura 2.3 - Evolução do consumo de etanol hidratado e gasolina C frente ao preço relativo entre etanol e gasolina..... | 11 |
| Figura 2.4 - Evolução anual de área plantada de cana-de-açúcar, distribuídas nas regiões brasileiras..... | 17 |
| Figura 2.5 - Evolução anual da participação nacional no cultivo de cana-de-açúcar dos municípios de fronteira agrícola de cana-de-açúcar..... | 19 |
| Figura 2.6 - Divisão de nomenclatura para levantamentos de uso e cobertura da terra adota pelo IBGE (2006). | 26 |
| Figura 2.7 - Distribuição de classes com sobreposição de probabilidades..... | 31 |
| Figura 2.8 - Evolução da ocupação antrópica global em porcentagem de área..... | 33 |
| Figura 2.9 - a) Estrutura inicial necessária para que haja perpetuação infinita e b) formações que se perpetuam infinitamente..... | 48 |
| Figura 2.10 - Esquema de Modelagem dinâmica espacial baseada em processo com abordagem tight-coupling..... | 51 |
| Figura 2.11 - Esboço dos mapas de entrada para gerar o mapa de probabilidade de transição de uma determinada classe..... | 59 |
| Figura 2.12 - Histograma de uma variável contínua plotada com An (à esquerda) e com à direita)..... | 61 |
| Figura 2.13 - Matriz de probabilidades antes da convolução pelo Expandir (a). e após a convolução pelo Expandir (b)..... | 67 |
| Figura 2.14 - Seleção de célula núcleo e as células vizinhas definidas de acordo com o critério Patcher..... | 68 |
| Figura 2.15 - Esquema da convolução pela janela 3 x 3 e do Cálculo de Similaridade Recíproca com decaimento exponencial..... | 69 |
| Figura 3.1 - Localização da área de estudo no país..... | 72 |
| Figura 3.2 - Área de estudo..... | 74 |
| Figura 3.3 - Regra de decisão para classificação de “Cultura Anual”, segundo o critério de permanência..... | 84 |
| Figura 3.4 - Mapas definidos como variáveis estáticas e contínuas para entrada na modelagem..... | 87 |
| Figura 3.5 - Fluxograma das etapas metodológicas do estudo..... | 92 |
| Figura 4.1 – Recorte de imagens do sensor TM/Landsat-5 (composição 4R, 5G 3B): sem restauração, à esquerda, e restaurada, à direita..... | 93 |
| Figura 4.2 - Recorte de imagens do sensor TM/Landsat (composição R4 G5 B3), ano de referência 2011 e período pós-chuvoso: (a) imagem sem classificação; (b) imagem com classe “Cana-de-açúcar” com 30 metros de resolução; (c) imagem com classe “Cana-de-açúcar” com 15 metros de resolução..... | 94 |
| Figura 4.3 – Recorte de imagens do sensor TM/Landsat (composição R4 G5 B3) do ano 2011, período pós-chuvoso, sendo: à esquerda, imagem da mancha urbana de Quirinópolis sem classificação; à direita, imagem com a classe “Área urbana”..... | 94 |
| Figura 4.4 – Recorte de imagens do sensor TM/Landsat (composição R4 G5 B3), ano de referência 2011 e período pós-chuvoso: à esquerda, imagem sem classificação; à direita, imagem com sobreposição da classe “Cana-de-açúcar” (em vermelho), “Cana-de-Açúcar Expansão” (em rosa) e “Corpo hídrico” (em azul)..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.5 – Acompanhamento da classificação de “Cultura permanente” no ano de referência 2008 com ícone azul, sendo (a) “período seco de 2007”, (b) período “pós-chuvoso de 2008”, (c) no período “seco de 2008”, (d) classificação da classe “Cultura Permente” no limite da área de estudo, (e) imagem de alta resolução do Google Earth, e, (f) histograma de EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSr..... | 96 |
| Figura 4.6 - Acompanhamento de talhão sobre ícone azul em diferentes datas, sendo a) talhão com pastagem na imagem TM/Landsat-5 do período seco de 2007; b) talhão com palhada na imagem TM/Landsat-5 do período pós-chuvoso de 2008; c) talhão com presença de cana-de-açúcar no período seco do ano 2008; d) talhão classificado com “Cana-de-Açúcar” e “Cana-de-Açúcar Expansão” em 2011; e) Imagem Google Earth no LVSr, e; f) histograma histórico do EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSr. | 97 |
| A Figura 4.7 - Dinâmica de uma talhão sob o ícone azul, sendo a) presença de pastagem no período pós-chuvoso do ano 2005; b) classificação da área com “Cultura Anual” em 2005; c) presença de alguma cultura agrícola anual de verão no ano de 2008; d) área sem classificação para “Cultura Anual” em 2008, permanecendo seu status de “Pastagem plantada”; e) Imagem Google Earth no LVSr, e; f) histograma histórico do EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSr. | 98 |
| A Figura 4.8 - Dinâmica de uma área sob o ícone azul, sendo a) presença de cultura agrícola anual no período pós chuvoso do ano de 2008; b) presença de cultura irrigada no período seco do ano de 2008; c) classificação da área com “Cultura agrícola irrigada” no ano de 2008; d) Imagem Google Earth no LVSr, e; e) histograma histórico do EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSr. | 99 |
| Figura 4.9 - Amostra de região de treinamento (a) e respectivo mapa de regras de “Vegetação Arbórea” (b)..... | 100 |
| Figura 4.10 - Classificações geradas para cada ano de referência..... | 101 |
| Figura 4.11 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2005 a 2008..... | 103 |
| Figura 4.12 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2008 a 2012..... | 105 |
| Figura 4.13 - Comparação dos resultados deste estudo com os do IBGE (2013)..... | 108 |
| Figura 4.14 - Comparação dos valores médios de JIU nas transições que ocorreram exclusão de variáveis devido à interdependência..... | 112 |
| Figura 4.15 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Anual”, período 2005 a 2008, na variável de distância dinâmica da classe “Cultura Anual”. | 117 |
| Figura 4.16 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cana-de-Açúcar”, período 2005 a 2008, na variável de distância à usinas (2005-2008). | 117 |
| Figura 4.17 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cana-de-Açúcar”, período 2008 a 2011, na variável de distância dinâmica à Usinas (2008-2011)..... | 118 |
| Figura 4.18 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Permanente”, período 2005 a 2008, na variável de distância à “Vegetação Florestal”..... | 119 |
| Figura 4.19 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem Plantada” para “Cultura Perene”, período 2005 a 2008, na variável “Declividade”..... | 120 |
| Figura 4.20 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cana-de-Açúcar” para “Pastagem/Outros”, período 2008 a 2011, na variável discreta “APP” (2008-2011)..... | 120 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.21 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cana-de-Açúcar” para “Pastagem/Outros”, período 2005 a 2008 (a) e 2008 a 2011 (b), em relação à variável distância a estradas pavimentadas | 122 |
| Figura 4.22 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cana-de-Açúcar” para “Pastagem/Outros”, período 2005 a 2008 (a) e 2008 a 2011 (b), em relação à variável distância a estradas não-pavimentadas..... | 123 |
| Figura 4.23 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cultura Anual” para “Cana-de-Açúcar”, período 2005 a 2008 (a) e 2008 a 2011 (b), em relação à variável distância a estradas pavimentadas..... | 124 |
| Figura 4.24 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Irrigada”, período 2005 a 2008 em relação à variável solos..... | 125 |
| Figura 4.25 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cultura Irrigada” para “Cana-de-Açúcar”, período 2005 a 2008 em relação à variável distância às usinas..... | 126 |
| Figura 4.26 - Mapas de probabilidades máximas do período 2005 a 2008, sendo as transições de destino: a) “Pastagem Plantada/Outros”, b) “Cultura Anual”, c) “Cultura Irrigada”, d) “Cultura Permanente, e) “Área Urbana”, e, f) “Cana-de-Açúcar”..... | 133 |
| Figura 4.27 - Mapas de probabilidades máximas do período 2008 a 2011, sendo as transições de destino: a) “Pastagem Plantada/Outros”, b) “Cultura Anual”, c) “Cultura Irrigada”, d) “Cultura Permanente, e) “Área Urbana”, e, f) “Cana-de-Açúcar”. | 134 |
| Figura 4.28 - Comparação dos mapas simulados com as Classificações (observados) para cada período: a) Classificação de 2008; b) Mapa simulado de 2008; c) Classificação de 2011; d) Mapa simulado de 2011. Sob os círculos constam os principais erros verificados. | 136 |
| Figura 4.29 - Diferenças percentuais de área entre os mapas simulados com as Classificações (observados) para cada período..... | 137 |
| Figura 4.30 - Comportamento do Índice de Similaridade Recíproca para o mapa simulado de 2008..... | 138 |
| Figura 4.31 - Comportamento do Índice de Similaridade Recíproca para o mapa simulado de 2011..... | 139 |
| Figura 4.32 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Cultura Anual” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011..... | 141 |
| Figura 4.33 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Cana-de-Açúcar” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011..... | 142 |
| Figura 4.34 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Cultuar Irrigada” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011..... | 143 |
| Figura 4.35 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Pastagem/Outros” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011..... | 144 |
| Figura 4.36 - Comparabilidade de proporção de classes de uso e cobertura da terra do ano de 2011 (a) com as geradas para os cenários de 2020, expansão (b) e base (c)..... | 146 |
| Figura 4.37 - Mapa classificado do ano de 2011 (acima) e Mapa gerado pela simulação para 2020 no cenário de expansão (abaixo)..... | 149 |
| Figura 4.38 - Mapa classificado do ano de 2011 (acima) e Mapa gerado pela simulação para 2020 no cenário de expansão (abaixo)..... | 150 |
| Figura 4.39 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2011 a 2020 (Cenário Expansão)..... | 155 |
| Figura 4.40 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2011 a 2020 (Cenário Base)..... | 155 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.41 - Proporção de uso e cobertura da terra nas APP de cursos d'água ano de referência de 2011 e nas simulações de expansão e base par ao ano de 2020..... | 157 |
|--|-----|

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Tabela 2.1 - Evolução anual da proporcionalidade da área plantada por cana-de-açúcar por Unidades de Federação..... | 18 |
| Tabela 2.2 - Municípios que tiveram maior área e expansão de cana-de-açúcar relativas às suas respectivas áreas municipais, no período de 2000 a 2011 e nos estados de fronteira agrícola da cana-de-açúcar..... | 19 |
| Tabela 2.3 - Métodos de classificação de imagens de sensoriamento remoto e respectivos critérios, categorias e exemplos..... | 29 |
| Tabela 2.4 - Métodos de Classificação e suas correspondências no formato Mapa de Regras..... | 30 |
| Tabela 2.5 - Tipologias e respectivas inferência de modelos de uso e cobertura da terra. | 38 |
| Tabela 3.1 - Relação de usinas de moagem e processamento de cana-de-açúcar na área de estudo..... | 74 |
| Tabela 3.2 - Relação de imagens do sensor TM/Landsat-5 utilizadas no estudo, conforme anos de referência e períodos segundo pluviosidade..... | 76 |
| Tabela 3.3 - Relação dos dados utilizados para a elaboração do uso e cobertura da terra e para os mapas de variáveis estáticas para a entrada no programa Dinamica EGO..... | 78 |
| Tabela 4.1 - Evolução da área ocupada para cada classe de uso/cobertura da terra em Quirinópolis de 2005 a 2011..... | 102 |
| Tabela 4.2 - Matriz de Transição global entre os períodos 2005 e 2008 na Área de Estudo mais <i>buffer</i> | 110 |
| Tabela 4.3 - Matriz de Transição global entre os períodos 2008 e 2011 na Área de Estudo mais <i>buffer</i> | 110 |
| Tabela 4.4 - Maiores índices de Cramer e JIU para o período 2005 a 2008 (em vermelho as variáveis excluídas para a correspondente transição)..... | 111 |
| Tabela 4.5 - Maiores índices de Cramer e JIU para o período 2008 a 2011 (em vermelho as variáveis excluídas para a correspondente transição)..... | 111 |
| Tabela 4.6 - Cruzamento de transições e variáveis explicativas com respectivos conceitos de ajuste de pesos de evidência, período 2005 a 2008..... | 115 |
| Tabela 4.7 - Cruzamento de transições e variáveis explicativas com respectivos conceitos de ajuste de pesos de evidência, período 2008 a 2011..... | 116 |
| Tabela 4.8 - Valores de Calibração adotados para o modelo no período 2005 a 2008..... | 128 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.9 - Valores de Calibração adotados para o modelo no período 2008 a 2011..... | 128 |
| Tabela 4.10 – Matriz de transição global entre 2011 e 2020 (Cenário Expansão)..... | 147 |
| Tabela 4.11 – Matriz de transição global entre 2011 e 2020 (Cenário Base).. | 147 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|------------|--|
| AC | Autômatos Celulares |
| Anfavea | Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo |
| ATR | Açúcares Totais Recuperáveis |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento |
| Canasat | Monitoramento da cana-de-açúcar via imagens de satélite |
| CATS | Chicago Área Transportation Study |
| CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos |
| CIDE | Contribuição da Intervenção no Domínio Econômico |
| CIMA | Conselho Interministerial de Açúcar e Alcool |
| CNAE | Comissão Nacional de Atividades Espaciais |
| COFINS | Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social |
| Conab | Companhia Nacional de Abastecimento |
| COP | Conferência das Partes |
| CEPEA | Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada |
| CSR - UFMG | Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais |
| DS | Dinâmica de Sistemas |
| EIFOV | Effective Instantaneous Field of View |
| Embrapa | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EVI-2 | Enhanced Vegetation Index - 2 |
| FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations |
| FDP | função de densidade |
| FEP | Função de Espalhamento Pontual no domínio espacial |
| FIM | Filtro Inverso Modificado |
| FTM | Transferência de Modulação do sensor |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estat |
| ICMS | Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviço |
| Ifov | Instantaneous Field of View |
| IGBP | Programa Internacional da Geosfera-Biosfera |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| LVSR | Laboratório Virtual de Sensoriamento Remoto |
| MDL | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo |
| MIT | Instituto de Tecnologia de Massachusetts |
| PAM | Produção Agrícola Municipal |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PIS | Programa de Integração Social |

| | |
|----------|--|
| PNA | Plano Nacional de Agroenergia |
| PREVS | Projeto e Acompanhamento de Safras |
| SAC | Sistemas Adaptativos Complexos |
| TGS | Teoria Geral dos Sistemas |
| Topodata | Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil |
| UDOP | União dos Produtores de Bioenergia |
| Unica | União da Indústria de Cana-de-Açúcar |
| ZACA | Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|--------------------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivo Geral | 4 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 5 |
| 1.3 Preparação do Trabalho..... | 5 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 7 |
| 2.1 Cana-de-açúcar | 7 |
| 2.1.1 Histórico e situação atual da cana-de-açúcar..... | 7 |
| 2.1.2 Plantio e logística da cana-de-açúcar..... | 12 |
| 2.1.3 Expansão de área da cana-de-açúcar..... | 16 |
| 2.2 Classificação e dinâmica do uso e cobertura da terra..... | 23 |
| 2.3 Modelagem do uso e cobertura da terra | 34 |
| 2.3.1 Autômatos Celulares | 45 |
| 2.3.2 Modelos baseados em processo | 50 |
| 2.3.3 Dinamica EGO..... | 56 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 71 |
| 3.1 Área de estudo..... | 71 |
| 3.2 Material | 75 |
| 3.3 Métodos para geração de Classificação de uso e cobertura da terra ... | 79 |
| 3.4 Entrada e processamento dos dados no Dinamica EGO..... | 85 |
| 3.4.1 Métodos para a simulação para o ano de 2020..... | 89 |
| 4. RESULTADOS | 93 |
| 4.1 Resultados da classificação do uso e cobertura da terra..... | 93 |
| 4.2 Resultados da modelagem dinâmica espacial | 109 |
| 4.2.1 Resultados das simulações para o ano de 2020..... | 125 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 139 |
| REFERENCIAS BIOBLOGRÁFICAS | 143 |

1 INTRODUÇÃO

Alterações do uso e cobertura da terra a partir do século XX passam a ter um ritmo e grandeza espacial sem precedentes na história humana (LAMBIN et al., 2001). O sensoriamento remoto passa a acompanhar as alterações da superfície terrestre com o lançamento de satélites orbitais de média resolução espacial com cobertura total de imagens do planeta a partir da década de 1970. Imagens orbitais são eficientes no acompanhamento das alterações da terra, pois, além de retratar o seu aspecto sinóptico, a revisita temporal permite que estudos da biosfera possam ocorrer de forma mais abreviada, ou antecipada. Este aspecto representa um benefício em relação aos estudos desenvolvidos *in loco*, e faz do sensoriamento remoto uma disciplina indispensável a tais estudos.

A conversão da cobertura ou uso da terra pelo homem é produto de diferentes fatores impulsionadores. O principal destes é a demanda por terra, oriunda do natural crescimento populacional (MEADOWS et al., 1972, 2004). Outros são decorrentes da intensidade da exploração do uso da terra - através da tecnologia -; acesso ou o controle dos recursos naturais; e fatores que motivam atitudes individuais – conceito de valor (TURNER II et al., 1993). A conversão do uso e cobertura da terra é por essência um dos eixos do debate mundial sobre o desenvolvimento sustentável (LAMBIN, 2000). Por conseguinte, remete a consequências de fenômenos diretos e indiretos, os quais, na maioria das vezes são a verdadeira problemática do pesquisador, tais como sumidouros de carbono, qualidade da água, manutenção do ciclo hidrológico, recursos naturais, resiliência de ecossistemas, efeito estufa, valoração fundiária, crédito agrícola, seguro agrícola, projetos de infra-estrutura, entre tantos outros.

Em termos de grandeza espacial, os usos de maior conversão da cobertura terrestre no planeta de 1700 à década de 1990 do século XX foi pastagem, seguido da agricultura (GOLDEWIJK, 2001; LAMBIN et al., 2003). No ocidente e após a II Guerra Mundial, a conversão da cobertura terrestre pela agricultura

ganha uma nova característica e impulso em sua expansão. A inserção do capitalismo no campo e o crescimento industrial e urbano fizeram com que a agricultura produzisse uma diversidade maior de produtos, além daqueles destinados estritamente ao abastecimento alimentar humano e de animais, fato associado a um salto na produtividade agrícola até então nunca verificado. Este cenário foi possível aos avanços tecnológicos e científicos no meio agrícola e ficou conhecido como Revolução Verde - década de 1970 no Brasil.

A introdução de avanços tecnológicos no campo em países de menor desenvolvimento industrial naquela década possibilitou que estes fossem os principais beneficiários, a exemplo do Brasil e da Índia. Este fato abarcou o desenvolvimento de instituições nacionais para o desenvolvimento tecnológico agrícola e permitiu que nas duas décadas seguintes houvesse um surto de desenvolvimento agrícola nestes países e, conseqüentemente, de expansão de área agrícola. Este fato, em parte, conduziu à importância do setor agrícola brasileiro no cenário mundial, levando à competitividade do Brasil com os países desenvolvidos neste setor.

Constata-se, desta forma, que a agricultura no Brasil, após a Revolução Verde, tem sido um dos pilares no crescimento de sua economia. O agronegócio atualmente é a atividade que melhor promove a integração do território nacional. A participação do agronegócio no PIB nacional apresentou uma variação de 26,44% a 21,8%, entre os anos de 1994 a 2011 (CEPEA, 2013). O mesmo também responde por quase 40% dos empregos e o que melhor sustenta o saldo total da balança comercial nacional, espalhando os seus efeitos positivos para a indústria e para o comércio (CRUVINEL, 2009). Também foi o agronegócio que conseguiu, após a crise econômica mundial sinalizada em 2008, auxiliar na retomada econômica do país. Esses fatos comprovam a relevância do setor primário brasileiro não somente no setor econômico, mas também no campo social e político.

Uma das culturas agrícolas mais importantes em diferentes ciclos econômicos no Brasil e que retomou sua importância no início do século XXI é a cana-de-açúcar. Seu retorno acompanha o novo ciclo de produção de etanol no país com o advento de veículos bicompostíveis (*flex*). Desta forma, a produção da cana-de-açúcar não está atrelada necessariamente ao rol da balança comercial favorável, mas também a um mercado interno que antes pertencia somente ao circuito do setor secundário: o energético. Além disso, a produção de etanol extraído da cana-de-açúcar representa uma das alternativas ao consumo do petróleo em um país insuficiente nesta fonte energética e atende à agenda ambiental mundial no tocante à redução de gases de efeito estufa, por se tratar de um combustível renovável.

Como supracitado, a agricultura é um dos usos que mais tem alterado outros usos e coberturas da terra. Por sua vez, o etanol produzido a partir de lavouras de cana-de-açúcar está dentre as principais fontes energéticas para suprir o consumo nacional até 2030 (TOLMASQUIM et al., 2007). De acordo com os dados do Projeto de monitoramento da cana-de-açúcar via imagens de satélite de observação da terra (CANASAT, 2013), a evolução da área cultivada por cana-de-açúcar na região Centro-Sul desde o início de seu monitoramento, safra 2003/2004 (3.988.530 ha), até a safra de 2012/2013, revela que a área de cana-de-açúcar aumentou 123,5%¹, tendo o seu ápice no período de 2007 a 2010. Neste sentido, considerando que o espaço é palco dos diversos interesses político, econômico e social, e que a produção de etanol no país é a que mais tem crescido nos últimos anos e está necessariamente atrelada à questão territorial – agricultura –, é mister nos questionar acerca de como será a dinâmica do uso e cobertura da terra nas regiões de fronteira agrícola de cana-de-açúcar.

¹ Região Centro-Sul é considerada pelos estados da federação de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro. Pelo fato de terem sido agregados os estados de Espírito Santo e Rio de Janeiro somente a partir do ano safra 2010/2011 no Canasat, estes estados não foram considerados no cálculo.

Estudos utilizando-se da modelagem computacional para o uso e cobertura da terra podem ser eficientes para avaliar quanto, onde e quando tais conversões podem acontecer. A abordagem da modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra pode elencar, além da perspectiva preditiva, outras igualmente interessantes, como a exploratória e a operacional (NOVAES, 1981). Atualmente, os modelos mais adequados para fins de mudanças de uso e cobertura da terra são os que levam em consideração a dinâmica temporal associada à representação espacial de forma explícita. Na modelagem dinâmica espacial, os processos são levados a cabo dentro de uma matriz celular bidimensional, em que cada célula possui relação topológica com suas células vizinhas. Diferentes conceitos que contenham relações topológicas entre as células podem ser adotados neste tipo de modelagem e passam a ser adotados como regras de transição no tempo discreto. Essas regras evoluem e culminam com o conceito de autômatos celulares (AC), desenvolvido por Von Neumann na década de 1940, aprofundado por John Conway em 1970 e Wolfram na década de 1980.

Considerando os fatos expostos, tem-se a problemática relativa ao comportamento de como ocorre e ocorrerá a expansão do plantio da cana-de-açúcar frente a outros tipos de usos e coberturas da terra em áreas de fronteira agrícola, e além disso, quais os fatores impulsionadores locais que podem propiciar tal expansão. Desta forma, podem-se citar algumas hipóteses a este respeito: i) a cana-de-açúcar continuará se expandindo sobre áreas de pastagem; ii) a cana-de-açúcar não interferirá nas áreas florestais preservadas. A modelagem dinâmica espacial tem condições de simular padrões de expansão do plantio da cana-de-açúcar e projetar tal comportamento considerando cenários diversos, conservadores e expansionistas.

1.1 Objetivo Geral

Considerando as problemáticas e hipóteses expostas, este trabalho tem como objetivo geral analisar por análise multitemporal e por modelagem dinâmica

espacial o comportamento da expansão da cana-de-açúcar frente a outros usos e coberturas da terra em uma área de fronteira agrícola.

1.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral, seguem os seguintes objetivos específicos:

- a) classificar e avaliar a dinâmica do uso e cobertura da terra para três anos de referência;
- b) elaboração de modelagem dinâmico-espacial para dois períodos de referência;
- c) análise de fatores impulsionadores da expansão da cana-de-açúcar através de modelo dinâmico-espacial;
- d) análise do uso e cobertura da terra sob influência da expansão da cana-de-açúcar através de cenários prospectivos do modelo dinâmico-espacial.

1.3 Preparação do Trabalho

Esta tese está organizada nos seguintes capítulos: Fundamentação Teórica, Material e Métodos, Resultados e Considerações Finais. O capítulo seguinte, Fundamentação Teórica, tratará de abordar assuntos pertinentes à problemática do setor sucroalcooleiro assim como dos embasamentos para os procedimentos da metodologia e análise dos resultados, sendo estes: cana-de-açúcar; classificação e dinâmica do uso e cobertura da terra, e modelagem do uso e cobertura da terra. O capítulo de Material e Métodos tratará primeiramente sobre a definição da área de estudo da tese, seguida da descrição sobre o material utilizado, e finalmente, dos métodos empregados, a saber: classificação do uso e cobertura da terra e entrada e processamento dos dados no programa Dinamica EGO. No capítulo de Resultados, serão abordados aqueles relacionados à classificação do uso e cobertura da terra e

da modelagem dinâmica espacial e cenários preditivos. E, finalmente, no capítulo de Considerações Finais, serão elencados os principais pontos analisados no estudo com possíveis hipóteses e indicação de direcionamentos para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cana-de-açúcar

Com a finalidade de organização deste capítulo, o mesmo será dividido em três partes: histórico e situação atual da cana-de-açúcar, plantio e logística da cana-de-açúcar, e expansão de área da cana-de-açúcar.

2.1.1 Histórico e situação atual da cana-de-açúcar

Atualmente, o plantio da cana-de-açúcar no Brasil é responsável pela geração de dois produtos de reconhecida importância, o etanol (hidratado e anidro) e o açúcar. Pode-se dizer que a produção atual de cana-de-açúcar faz parte do terceiro ciclo no país desde os primórdios da história colonial brasileira. Esse terceiro período tem início a partir do momento em que ocorre a quebra do monopólio da distribuição de combustível pela Petrobrás, em 1997 (FIGUEIREDO et al., 2011). A partir de então, o governo passa a não mais definir preços do etanol anidro (em 1997), da cana-de-açúcar (em 1998), e do etanol hidratado (em 1999), havendo gradativa saída da intervenção econômica por parte do Estado no setor sucroalcooleiro (SHIKIDA, PEROSA; 2012). Por outro lado, o Estado passa a regulamentar legislações ambientais relacionadas ao cultivo e à colheita da cana-de-açúcar. Esta intervenção e a própria produção de etanol pela cana-de-açúcar passaram a ser tratados como uma das respostas às metas estabelecidas no Protocolo de Kyoto em 1997.

Os países que assinaram tal Protocolo tiveram como compromisso a redução da emissão de carbono e de implantação de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) até o ano de 2012. A continuação deste acordo se deu com a 18ª Conferência das Partes (COP-18), ocorrida no ano de 2012 em Doha (Catar). De fato, a substituição gradativa de combustível fóssil por outro renovável e associado aos benefícios que o etanol tem em relação à toxicidade, à redução de nitratos, e à alta relação da razão de entrada e saída no balanço da produção de energia, torna a opção pelo combustível etanol

compatível com as demandas ambientais (COELHO et al., 2006). Além disso, o etanol, sendo energia extraída de biomassa moderna, integra a tendência mundial do crescimento de fontes energéticas alternativas frente à escassez do petróleo e derivados nas próximas décadas, conforme ilustrado na Figura 2.1.

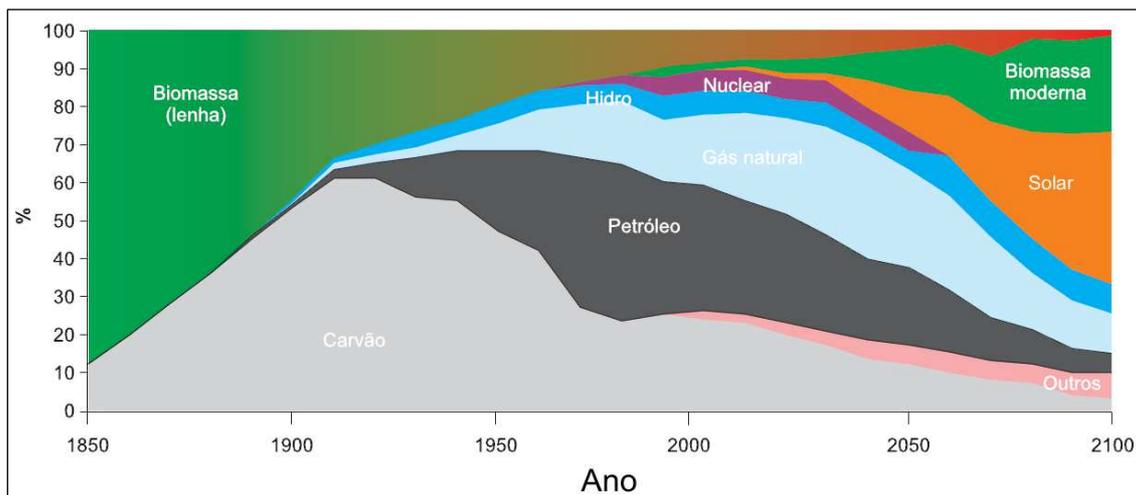


Figura 2.1 - Tendência mundial da evolução do uso de fontes energéticas. Fonte: Modificado de Nackicenovic et al. (1998) apud Crestana (2005).

Em 1998, o governo cria o Conselho Interministerial de Açúcar e Álcool (CIMA) e estabelece a medida provisória nº 1.662/1998 que dispõe sobre o aumento obrigatório do percentual de etanol anidro na gasolina, que deve oscilar entre 22% e 24% (NOVA CANA, 2013), favorecendo ainda mais a expansão do setor sucroalcooleiro. Na primeira década dos anos 2000, alguns instrumentos regulatórios propiciaram o desenvolvimento do setor energético do etanol no país, dentre eles, a Lei da Inovação (Lei nº 10.973/2004), o Plano Nacional de Agroenergia (PNA 2006–2011) e o Plano de Aceleração do Crescimento (PAC 2007–2010) (DURÃES, 2008).

Neste contexto, desenvolve-se um novo modelo de autogestão que passa a integrar remuneração da matéria-prima e regras para atender ao relacionamento entre os produtores de cana-de-açúcar e as usinas. Este

modelo, dentre outros, passa a vincular o valor de tonelada de cana-de-açúcar aos Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), que o produtor de cana-de-açúcar entrega à usina, e aos preços dos produtos industrializados no mercado (FIGUEIREDO et al., 2011). Neste cenário, no ano de 2003, as montadoras automobilísticas introduzem uma tecnologia nacional na qual um motor tem a capacidade de funcionar com gasolina e etanol, misturados no mesmo tanque do veículo – veículos flex. O advento dos veículos flex propiciou ao combustível de etanol o maior crescimento de consumo dos últimos anos, 9%, seguido da gasolina, com 4,6% (ANP, 2012). Desta forma, o consumo do combustível de etanol fica atrelado, primeiro, ao tamanho da frota de veículos bicombustível (gasolina e etanol) (flex) e, em segundo lugar, ao preço do combustível (SCANDIFFIO, 2005). O gráfico da Figura 2.2 apresenta a dependência entre a produção do etanol, sobretudo o hidratado, com a produção de veículos leves flex.

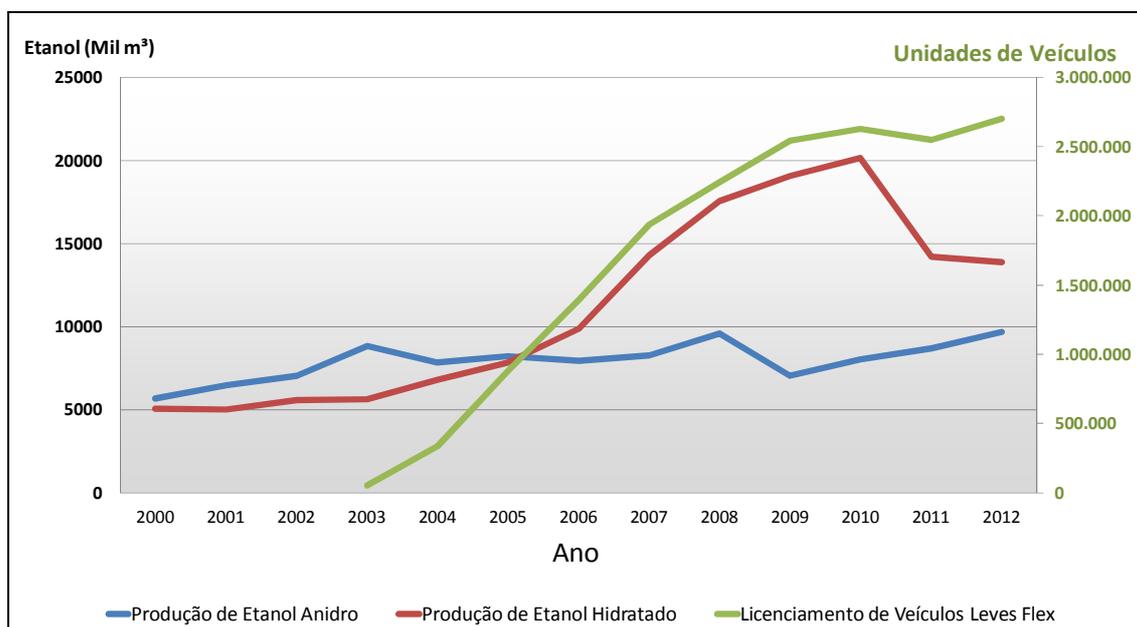


Figura 2.2 - Evolução da produção de etanol (anidro e hidratado) e do licenciamento de veículos leves flex.
 Fonte: ANP (2013b); Anfavea (2013).

O etanol apresenta algumas diferenças em relação àqueles derivados do petróleo. São elas: (a) o alto teor de oxigênio, que constitui cerca de 35% em massa do etanol, e (b) combustão mais limpa e melhor desempenho dos motores (ciclo Otto), o que contribui na redução de emissões de CO₂. (BNDES; CGEE, 2008). Tais características fazem com que o etanol atenda aos requisitos de eficiência energética e ecológica, tanto na sua produção como no seu consumo. O Brasil, no ano de 2012, respondeu por 37,8 % da produção mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia, China, Tailândia, Paquistão e México, com 19,6%, 6,9%, 5,4%, 3,2% e 2,8%, respectivamente (FAO, 2013). Entre os anos de 2005 e 2011, foram destinados em média 15% do etanol para exportação (EPE, 2013). Tais dados colocam o Brasil como o maior produtor de etanol extraído da cana-de-açúcar. Contudo, nos últimos anos o setor vem sofrendo crises.

No ano de 2010, a demanda do consumo de combustíveis passou a ser bastante sensível aos preços relativos, ocasionando movimentos bruscos de migração entre o etanol e a gasolina, e vice-versa. O gráfico da Figura 2.3 apresenta o consumo de etanol e de Gasolina C² assim como o preço relativo entre os dois combustíveis. A linha vermelha corresponde ao limiar da condição de competitividade do etanol frente à Gasolina (preço máximo de 0,7 vezes o da gasolina, em razão do menor poder calorífico do etanol em relação à gasolina). Pode-se observar que a partir do ano de 2010, a competitividade do preço do etanol hidratado fica mais vulnerável frente à gasolina.

² Gasolina com adição proporcional de etanol anidro.

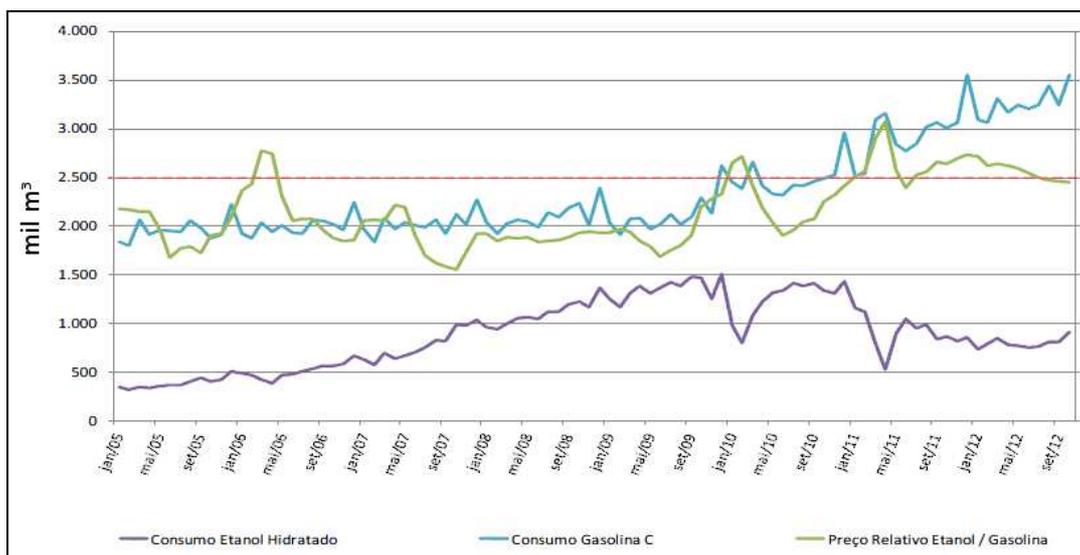


Figura 2.3 – Evolução do consumo de etanol hidratado e gasolina C frente ao preço relativo entre etanol e gasolina.
 Fonte: ANP (2013b).

De acordo com a EPE (2012), os piores anos de produção de etanol, 2010 e 2011, foram decorrentes pelos seguintes fatores: a seca excessiva ocorrida entre abril e outubro de 2010; as geadas e o florescimento em excesso na safra de 2011/2012; falta de investimento em novas usinas e reforma dos canaviais; maior demanda e rentabilidade do açúcar após a crise financeira mundial de 2008; sensível aumento de vendas de veículos importados e de motorização superior, dedicados à gasolina estritamente. A Fundação Getúlio Vargas (FGV), em conjunto com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica) (FGV, 2013), analisou que tal situação também foi resultado da falta de tributação diferenciada entre etanol e gasolina a partir do ano de 2007. Até aquele ano, eram recolhidos R\$ 0,28 por litro de gasolina referentes à CIDE (Contribuição da Intervenção no Domínio Econômico). A partir daquele ano, o governo passou a utilizar esse tributo para impedir que aumentos nos preços da gasolina e do diesel chegassem ao consumidor, mas que, no entanto, passou a prejudicar a competitividade do etanol. Além da CIDE, o diretor executivo da UNICA afirma que há falta de várias regras claras por parte do governo que favoreçam a consolidação do etanol combustível no mercado, por

exemplo, a tributação do PIS/COFINS, no caso da gasolina, é realizada sobre um volume específico do produto, enquanto, no etanol, esta tributação é cobrada sobre o preço de venda do etanol (RODRIGUES, 2013). Neste sentido, algumas medidas paliativas vêm sendo tomadas e/ou planejadas, visando ao retorno da competitividade do etanol, tais como: disponibilização orçamentária do Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) para a renovação e ampliação dos canaviais (EPE, 2012); o anúncio pelo governo da desoneração do PIS/COFINS do etanol, diminuindo o custo em R\$0,12 por litro (UNICA, 2013), e o anúncio da redução do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviço (ICMS) para o etanol em alguns estados da federação (UNICA, 2013). Costa e Guilhoto (2011) apontam que a redução do ICMS para o etanol hidratado, além de ser benéfica para a competitividade do etanol, também é benéfica em aspectos econômicos e sociais no país, tais como, aumento do PIB, valor da produção, redução na importação, aumento da remuneração e postos de emprego.

2.1.2 Plantio e logística da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é cultivada geralmente em regiões tropicais com classificação Köppen AW, entre as latitudes 35N e 30°S. A demanda hídrica da cana-de-açúcar deve ser em torno de 1.500 a 2.500 mm por ciclo vegetativo, sendo necessária a concentração hídrica nos primeiros meses de crescimento e de um período seco entre 100 e 200 mm (JUNIOR, 2011), quando as temperaturas ideais devem compreender de 10 °C a 20 °C para a maturação, quando ocorre o acúmulo de sacarose nos colmos (RODRIGUES, 1995; EMBRAPA, 2013). Na fase anterior à maturação, de crescimento vegetativo, as temperaturas devem compreender 30 °C a 34 °C, sendo que temperaturas além deste patamar e abaixo de 21°C tendem a diminuir o ritmo de crescimento vegetativo (RODRIGUES, 1995; EMBRAPA, 2013). Estes aspectos comprovam a sua adequabilidade em boa parte do Brasil.

As características supracitadas, por outro lado, evidenciam a dificuldade do avanço da expansão da cana-de-açúcar em direção à Amazônia, onde as temperaturas possuem pouca variação, o período de seca é menor e as precipitações podem atingir 3.800 mm ao ano. O Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar – ZACA (EMBRAPA, 2009) apresenta as áreas mais apropriadas para o plantio da cana-de-açúcar no país. Este estudo foi elaborado a partir de fatores que possuem relação direta com a disponibilidade hídrica: aptidão edáfica e aptidão climática. Visando à espacialização do zoneamento, foram de igual importância mapas de restrições ambientais, relevo e de uso da terra. A melhor escala alcançada para o ZACA, dependendo do tipo do dado cartográfico, foi de 1:250.000. Desta forma, o resultado de um estudo para fins municipais pode ficar comprometido dependendo do nível de detalhe. De acordo com o estudo, a estimativa é de que o país dispõe cerca de 64,7 milhões de hectares de áreas aptas à expansão da cana-de-açúcar, sendo que quase 60% destas áreas estão em áreas aptas e de pastagens.

O plantio da cana-de-açúcar (cana-de-açúcar planta) na região Centro-Sul do Brasil pode ocorrer de três formas: cana-de-açúcar de ano, cana-de-açúcar de ano-e-meio e cana-de-açúcar de inverno (CASAGRANDE, 1991). De acordo com Rodrigues (1995), a cana-de-açúcar de ano é plantada de setembro a outubro, com máximo desenvolvimento vegetativo de novembro a abril e corte por volta de julho. A cana-de-açúcar de ano-e-meio (18 meses) é plantada de janeiro a início de abril, tendo paralisação do crescimento entre maio e setembro devido à restrição hídrica, voltando a crescer entre outubro a abril do ano seguinte, com corte por volta de julho. A cana-de-açúcar de inverno é plantada entre maio a agosto, sendo necessária a irrigação devido à baixa precipitação nestes meses (CASAGRANDE, 1991). A escolha da época de plantio tem relação com o ciclo de maturação das variedades de cana-de-açúcar, que, por sua vez, tem relação com os objetivos e necessidades do produtor.

A cana-de-açúcar de ano-e-meio é o modo onde há maior produtividade no primeiro ano e, geralmente, é o mais utilizado pelas usinas e destilarias. A partir do primeiro corte da cana-de-açúcar planta, a mesma passará a ser denominada cana-de-açúcar soca e terá decréscimo da produtividade a cada colheita (SUGAWARA et al., 2007). A produtividade da cana-de-açúcar é dependente, sobretudo, das condições físicas e químicas dos solos, sendo que nos dois anos de cultivo, sua produtividade está mais relacionada a horizontes superficiais do solo e ao manejo agrícola (calagem e adubações), e, nos anos posteriores, às camadas subsuperficiais (MAPA et al., 2009). O sistema de produção por socagem, é rentável, em média, por até quatro anos (CGEE, 2009). Após este período, há um intervalo da produção da cana-de-açúcar de um ano-safra para o preparo do talhão para a entrada de um novo ciclo de produção de cana-de-açúcar, e este talhão é denominado cana-de-açúcar reforma. Conforme o BNDES e CGEE (2008), a cana-de-açúcar reforma ocupa em média 8% do total de cana-de-açúcar cultivada a cada ciclo de produção, o que resulta sempre em uma área menor a ser colhida, efetivamente, com cana-de-açúcar (BNDES; CGEE, 2008). Neste interstício, geralmente é plantada uma cultura agrícola de uma safra, escolhendo de preferência uma leguminosa (BNDES; CGEE, 2008), por exemplo, amendoim, crotalária, mucuna preta, entre outras. Tal manejo visa à recomposição do nitrogênio, aumento da capacidade de troca catiônica, melhoria na infiltração do solo, entre outros (AMBROSANO et al., 2011). Com o retorno da cana-de-açúcar planta no talhão em que foi realizada a reforma, a cana-de-açúcar cultivada no mesmo passa a ser denominada como cana-de-açúcar reformada.

A localização do plantio da cana-de-açúcar para fins industriais relaciona-se, necessariamente, à operação e localização das usinas ou destilarias. Diferentemente de outras culturas agrícolas, a cana-de-açúcar não pode ser estocada após seu corte, uma vez que há perda da qualidade da cana-de-açúcar à medida que o tempo passa após o corte. Para tanto, a cana-de-açúcar precisa ter sua moagem em até 72 horas após seu corte (LAZZARINI et

al., 2012), o que implica ter uma logística bem organizada em todo o processo agrícola e industrial. Neste sentido, na região Centro-Sul, a distância média entre o plantio e a usina gira em torno de 25 quilômetros (CGEE, 2009). Nesta mesma região, na safra 2007/2008, 34,6% do total da cana-de-açúcar produzida eram entregues por fornecedores, enquanto que este número foi para 36,6% na safra 2010/2011 (CGEE, 2009). Os estados da federação que tiveram maior incremento na participação de fornecedores foram Ceará, Rio de Janeiro, Goiás e Paraná, com as respectivas participações de terceiros na safra 2010/2011: 50,6%, 66,6%, 19,9% e 9,6%. Em nível macroeconômico, este incremento é positivo, uma vez que o PIB nestes estados pode aumentar devido à maior distribuição de renda. Por outro lado, a usina tem tido maiores vantagens neste tipo de negociação, o que tem acarretado conflitos de ordem econômica (FILHO; MARIN, 2012). No estado de São Paulo, este perfil se deve, principalmente, ao preço elevado da terra e ao baixo risco de comprometimento com a terra, devido às incertezas econômicas no futuro (FICARELLI et al., 2010).

Uma usina de processamento médio de cana-de-açúcar tem o potencial de processar 1,4 milhão de toneladas por ano de cana-de-açúcar (BNDES; CGEE, 2008). De acordo com os dados da Produção Agrícola Municipal do IBGE, no ano de 2011, a produtividade média nacional foi de 76,4 toneladas de cana-de-açúcar por hectare. Considerando que cada tonelada pode produzir 85 litros de etanol (BNDES; CGEE, 2008), para o processamento exclusivo de etanol em uma usina média no ano de 2011, em média, teriam sido necessários 18.324,6 hectares de terras colhidas com cana-de-açúcar por usina. Vale ressaltar que em usinas onde é processado o resíduo celulósico da cana-de-açúcar para a geração de etanol (2ª geração), há um acréscimo de 30% nesta produção (BNDES, CGEE, 2008). Entretanto, cabe salientar que a produção do montante de etanol nas usinas está condicionada à rentabilidade do etanol frente à do açúcar e do melaço - produtos alternativos. Considerando apenas as eficiências típicas de fermentação e destilação do etanol e o açúcar,

excluindo os custos associados ao investimento e à operação da usina, somente terá sentido a produção de etanol anidro se o preço do litro do mesmo for 1,67 vezes maior que o preço do quilo do açúcar – preço da indiferença do etanol (BNDES; CGEE, 2008). Obviamente, outras tantas situações devem ser analisadas de forma conjunta, tais como: mercado interno do etanol, mercado externo do açúcar, preço da gasolina, políticas econômicas, custos de logística, custos de energia elétrica, entre outros.

2.1.3 Expansão de área da cana-de-açúcar

Em relação ao avanço do plantio de cana-açúcar no país, este tem alcançado quase todos os estados brasileiros, ainda que sua concentração seja preponderante em certas áreas da grande região Centro-Sul e do litoral oriental do Nordeste do Brasil. De acordo com o IBGE (2013b), no ano 2000, eram 4,8 milhões de hectares de cana-de-açúcar, passando para 9,78 milhões de hectares em 2013, incremento de 2,04 vezes em pouco mais de 10 anos. A grande região Centro-Sul foi responsável por 84,1 % da expansão de cana-de-açúcar entre os anos de 2000 a 2011, enquanto que a grande região Norte-Nordeste esta cifra ficou em 12,9%. Ao analisarmos tal evolução segundo as regiões brasileiras, indiscutivelmente a região Sudeste é a que mais detém área plantada e maior crescimento absoluto, conforme gráfico da Figura 2.4. Porém, a região Centro-Oeste foi a que mais aumentou sua expansão proporcional, alcançando aumento de 280% em 2011 em relação ao ano de 2000. Este fato faz com que esta região seja uma das grandes fronteiras para o plantio da cana-de-açúcar.

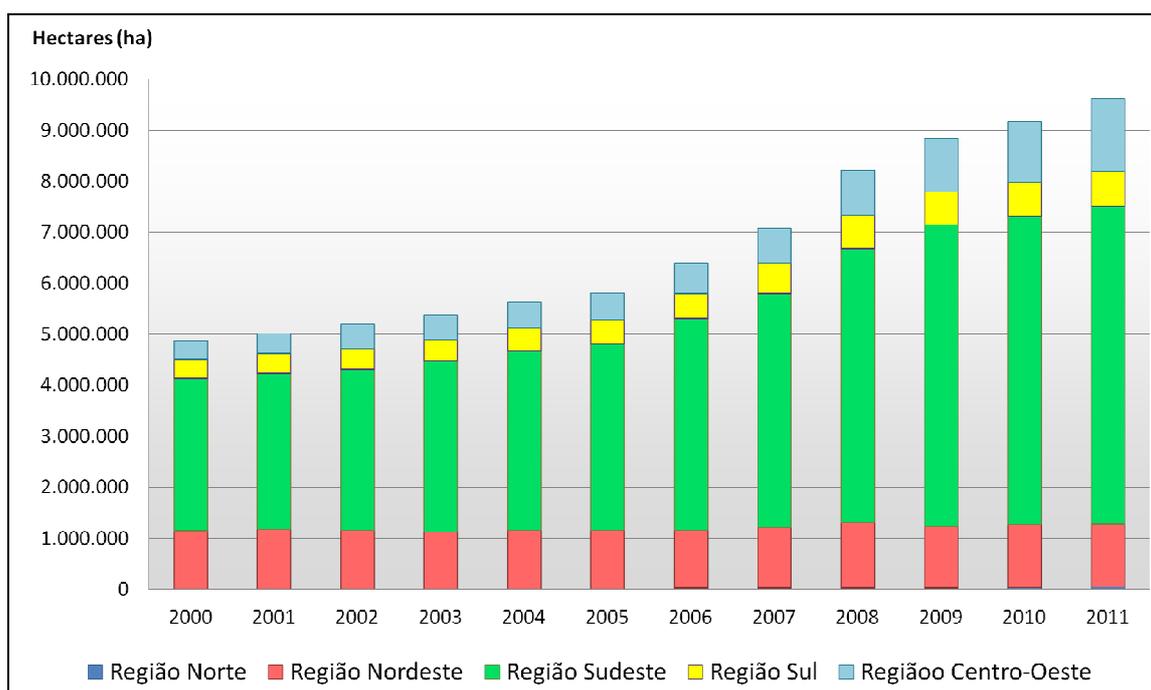


Figura 2.4 - Evolução anual de área plantada de cana-de-açúcar, distribuída nas regiões brasileiras.
Fonte: IBGE (2013b).

Ao analisarmos a expansão de área de cana-de-açúcar nas unidades da federação, o estado de São Paulo foi onde esse processo ocorreu de forma mais intensa. Entre os anos de 2006 e 2008, foram 1,55 milhões de hectares de novas áreas cultivadas no estado de São Paulo (RUDORFF et al., 2010). No ano de 2010, o estado de São Paulo detinha 59,4% e 62,1% da produção nacional de etanol e açúcar, respectivamente (RUDORFF et al., 2010). Tal fato faz com que este estado, isoladamente do resto do país, tenha competitividade com o segundo maior produtor de cana-de-açúcar no mundo, a Índia (RUDORFF et al., 2010). Porém, se analisarmos a Tabela 2.1, dentre as safras de 2006 à prévia de 2014, é possível constatar a expansão continuada de área plantada com cana-de-açúcar nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Estes estados tiveram incremento de área plantada com cana-de-açúcar em 626, 485 e 425 mil hectares na safra 2012/2013, respectivamente. Tais estados, desta forma, podem ser considerados como a grande fronteira de expansão para o plantio de cana-de-açúcar. Em relação à produção de etanol em 2013, o estado de São Paulo detém 51,6%, seguido

dos estados de Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, com 13,24%, 8,54% e 8,10%, respectivamente (ANP, 2013a).

Tabela 2.1 - Evolução anual da proporcionalidade da área plantada com cana-de-açúcar por Unidades da Federação.

| | | Unidades da Federação | | | | | | | |
|-----|-------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----------|
| | | AL | PE | MS | GO | MG | SP | PR | Outras UF |
| ANO | 2006 | 6,9 | 6,2 | 2,4 | 3,5 | 6,1 | 53,9 | 7,0 | 14,0 |
| | 2007 | 6,5 | 6,0 | 2,6 | 3,8 | 6,8 | 53,4 | 7,1 | 13,8 |
| | 2008 | 6,1 | 4,5 | 3,9 | 5,7 | 8,6 | 54,6 | 7,3 | 9,3 |
| | 2009 | 6,1 | 4,6 | 3,9 | 5,7 | 8,0 | 55,0 | 7,4 | 9,3 |
| | 2010 | 6,0 | 4,3 | 3,6 | 6,4 | 7,9 | 55,7 | 7,2 | 8,7 |
| | 2011 | 5,6 | 4,3 | 4,9 | 7,4 | 8,2 | 54,1 | 7,2 | 8,2 |
| | 2012 | 5,5 | 3,9 | 5,8 | 8,1 | 8,9 | 52,3 | 7,3 | 8,2 |
| | 2013 | 5,3 | 3,7 | 6,4 | 8,6 | 8,5 | 52,1 | 7,2 | 8,3 |
| | prévia 2014 | 5,0 | 3,3 | 7,1 | 9,3 | 8,9 | 51,3 | 7,0 | 8,1 |

Fonte: Conab (2013).

Ao analisarmos em escala municipal, nos estados da grande fronteira de expansão da cana-de-açúcar, alguns municípios despontam nesta contribuição, em nível nacional. O gráfico da Figura 2.5 apresenta a evolução dos principais municípios com participação de área plantada de cana-de-açúcar em relação à área plantada no Brasil no ano de 2000. O município que obteve maior contribuição absoluta nos três estados supracitados foi Rio Brilhante, no estado do Mato Grosso do Sul. Contudo, o município de Quirinópolis, no estado de Goiás, onde somente começou a ter área plantada com cana-de-açúcar no ano de 2006 (safra 2005/2006), apresenta-se na segunda colocação na contribuição nacional no ano de 2011 na área de fronteira agrícola. Conforme a Tabela 2.2, o município de Rio Brilhante, no Mato Grosso do Sul, é o que obteve maior área plantada com cana-de-açúcar e respectiva expansão no período de 2000 a 2011. Por outro lado, o município que teve maior área

plantada e expansão relativa à sua área municipal com cana-de-açúcar foi o município de Conceição de Alagoas, em Minas Gerais.

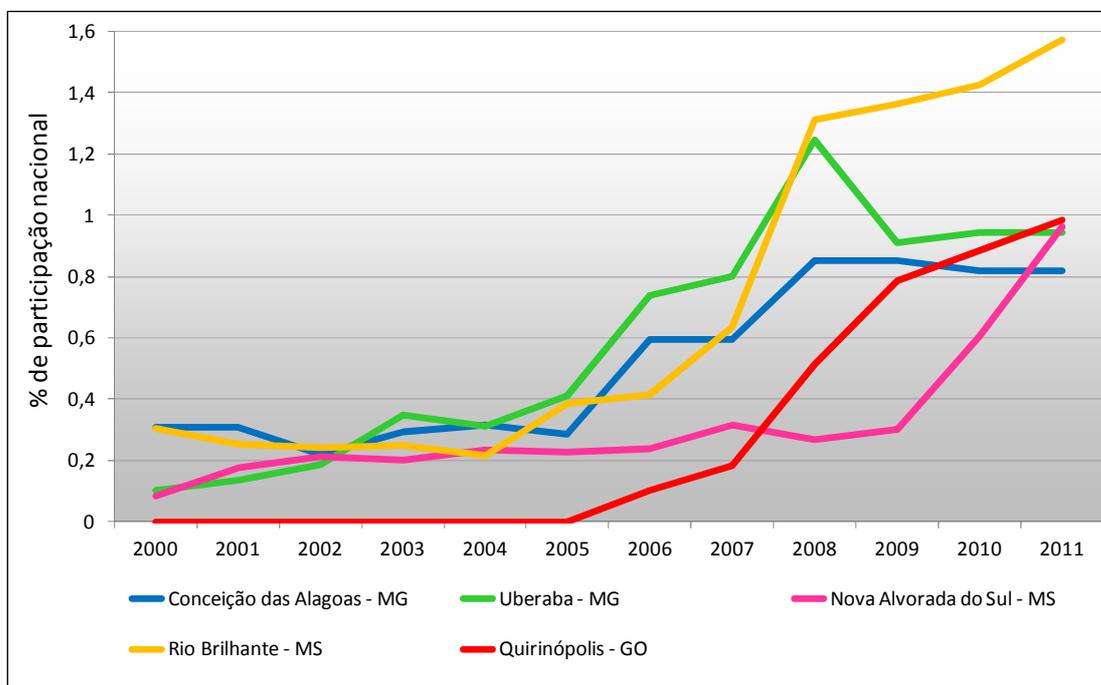


Figura 2.5 - Evolução anual da participação nacional no cultivo de cana-de-açúcar dos municípios de fronteira agrícola de cana-de-açúcar. Fonte: IBGE (2013b).

Tabela 2.2 - Municípios que tiveram maior área e expansão de cana-de-açúcar relativas às suas respectivas áreas municipais, no período de 2000 a 2011 e nos estados de fronteira agrícola da cana-de-açúcar.

| | Área (ha) | Área relativa (%) | Expansão (ha) | Expansão Relativa (%) |
|---------------------------|-----------|-------------------|---------------|-----------------------|
| Rio Brilhante - MS | 76690 | 19,23 | 61849 | 15,51 |
| Quirinópolis - GO | 48000 | 12,65 | 43000 | 11,34 |
| Nova Alvorada do Sul - MS | 47023 | 11,70 | 42929 | 10,68 |
| Uberaba - MG | 46000 | 10,12 | 41000 | 9,02 |
| Conceição de Alagoas - MG | 40000 | 29,72 | 25000 | 18,57 |

Fonte: IBGE (2013b).

Apesar das constatações de consolidação e expansão da cana-de-açúcar, o cultivo desta cultura agrícola representa pouco menos de 10% da superfície agrícola do país, sendo o 3^a colocado depois da soja e do milho (BNDES; CGEE, 2008). Não obstante, estudos da expansão da cana-de-açúcar têm aumentado, de forma a verificar possíveis implicações nas conversões do uso e cobertura da terra. Podem ser citadas algumas motivações para tais estudos: (a) saber se a expansão está ocorrendo em áreas já agrícolas ou sobre áreas naturais, que, neste caso, poderia impactar o balanço de carbono, aumentando a emissão de gás CO₂ e diminuindo reservas de carbono; (b) saber se a expansão está ocorrendo sobre culturas agrícolas alimentares, e desta forma, afetando no abastecimento e no valor econômico dos alimentos; (c) identificação das conversões indiretas de uso e cobertura da terra, decorrentes da fronteira da expansão da cana-de-açúcar; (d) impacto em variáveis físicas, tais como, temperatura, albedo e evapotranspiração.

Nassar et al. (2008) avaliaram a expansão da cana-de-açúcar sobre a região Centro-Sul do país. Utilizaram-se de dados do IBGE, em uma série de 4 anos, e imagens de sensoriamento remoto de média resolução entre 2007 e 2008. Eles concluíram que, no primeiro caso, as conversões aconteceram em 77% sobre pastagem e 12% sobre áreas já agrícolas, enquanto que no segundo caso, estas proporções foram de 45% e 53 %, respectivamente. Em estudo realizado através de imagens de sensoriamento remoto no Cerrado brasileiro, por Loarie et al. (2011), foi constatado que a expansão da cana-de-açúcar neste ecossistema foi predominantemente sobre áreas já agrícolas e de pastagens, sendo que tal conversão diminui o aquecimento médio em 0,93 °C. Rudorff et. al. (2010) também encontraram resultado semelhante no estado de São Paulo a partir de imagens de sensoriamento remoto de resolução média entre os anos 2008 e 2009, com 56,5% de conversão sobre pastagens e 40,2% sobre áreas já agrícolas. Adami et al. (2012) realizaram estudo amostral na região Centro-Sul do país no período de 2005 e 2010 através de imagens de

baixa e média resolução e identificaram as taxas de conversão de 69,7% sobre pastagens e 25% sobre áreas já agrícolas.

Nos estudos citados, a expansão da cana-de-açúcar ocorreu em áreas de pastagem (principalmente) ou áreas já agrícolas. Desta forma, a expansão da cana-de-açúcar ocorre em média em 95% dos casos sobre pastagens ou áreas já agrícolas. A outra proporção de 5%, geralmente, é atribuída às áreas restantes, indiscriminadamente, ou ao somatório de classes como floresta, áreas naturais, silvicultura ou citros. Nassar et al. (2008) identificaram um fato isolado de taxas de conversão superiores à média sobre florestas no estado do Mato Grosso, entre os anos de 2007 a 2008. Nesse mesmo trabalho, também foi identificado o deslocamento de pastagens nos estados do Paraná e Goiás. A expansão da cana-de-açúcar sobre áreas já agrícolas tem provocado, nesses estados, a conversão de pastagens para culturas agrícolas (excluindo a cana-de-açúcar) de forma parcial. No caso de se manter a mesma produção de gado e produtividade do pasto, a pastagem necessariamente deve expandir para outras áreas. Não obstante, o que tem ocorrido de forma geral no país é o aumento da produtividade das pastagens (DURÃES, 2008).

Adami et al. (2012) constataram por meio de imagens de satélite que a expansão da cana-de-açúcar implica em conversões de uso intermediárias, podendo ocultar resultados de estudos desta natureza. Durante a evolução anual da expansão da cana-de-açúcar, a conversão de pastagem para cana-de-açúcar geralmente ocorreu para uma cultura agrícola a priori. Este fato é sustentado pelo típico manejo de culturas agrícolas para a nutrição do solo, quando da substituição da pastagem para qualquer novo plantio de cultura agrícola (inclusive a cana-de-açúcar). Em 65% dos casos de conversão de pastagem para cana-de-açúcar, isso ocorre de forma direta, enquanto que em 35% dos casos, tal conversão ocorre primeiramente para uma cultura agrícola a priori, geralmente uma leguminosa. Além desta, também constataram outra conversão intermediária quando da conversão de floresta para cana, ocorrendo conversão a priori para pastagem. Contata-se, desta forma, que resultados que

compreendem a identificação do uso e cobertura da terra que consideram apenas o ano de referência, independentemente da evolução anual dos mesmos, podem gerar interpretações equivocadas acerca da expansão da cana-de-açúcar.

Em relação às expectativas da evolução da ocupação de área da cana-de-açúcar para os próximos anos, Nassar et al. (2008) realizaram um estudo tendo em vista o ano de 2018. Naquele ano, estipularam que deverão ser 11,7 milhões de hectares colhidos com cana-de-açúcar. A maior parte desta expansão continuará ocorrendo sobre áreas com pastagens, porém em uma taxa sensivelmente menor em relação ao ano de 2008, de 73,8% para 68,7%, sendo remanejadas para áreas com outras culturas agrícolas. No estado do Mato Grosso do Sul, esta expansão ocorrerá predominantemente sobre pastagens (99%), em compensação, no estado do Paraná, 58% da expansão ocorrerá em áreas com agricultura. O estado de São Paulo alcançará a maior expansão absoluta, com 1,9 milhões de hectares, enquanto que o estado de Goiás terá a maior expansão relativa, com 118 % de expansão em relação ao ano de 2008. Neste estudo, também é importante observar que há franco aumento da produtividade das pastagens no Brasil, uma vez que haverá aumento de 6,1% de cabeças de gado apesar da redução de área de pastagens.

Estudos mais recentes por Unica (2012) e Lima et al. (2013), no entanto, consideraram a expansão da cana-de-açúcar considerando a crise desta expansão em 2010 e 2011. Em Unica (2012), dentre outros resultados, foi elaborada a projeção do montante de cana-de-açúcar colhida (CO) no ano de 2020 para o estado de São Paulo. Foram considerados dois tipos de cenários prospectivos, um de maior expansão da CO (expansão) e outro de menor expansão (base). O primeiro compreendeu 12,7 milhões de hectares de CO e o segundo, 9,67 milhões de hectares de CO. Em Lima et al. (2013), em contrapartida, foram realizados cenários espacializados para 2020 para a

região Centro-Sul do país, cujo montante alcançou 14.295.776 de hectares de cana-de-açúcar colhida (CL).

2.2 Classificação e dinâmica do uso e cobertura da terra

No Brasil, as fontes oficiais que divulgam a estimativa de área de plantio das culturas agrícolas são as instituições públicas IBGE e Conab. O levantamento do IBGE e da Conab é realizado por técnicas amostrais probabilísticas. A divulgação do acompanhamento periódico das safras é realizada de forma distribuída em um ano/safra vigente: o “Levantamento Sistemático de Produção Agrícola” (LSPA) pelo IBGE e o “Levantamento de Safras” pela Conab. Em ambos os levantamentos, a divulgação é realizada por unidade de federação. Tanto o IBGE como a Conab também possuem divulgação histórica da área de plantio agrícola. O IBGE consolida essas informações em nível municipal através da “Produção Agrícola Municipal” (PAM), com um intervalo maior de tempo de divulgação, e a Conab o faz em nível de unidade da federação, através do “Séries Históricas”, com um intervalo de tempo menor de divulgação. Apesar de todos serem métodos baseados em entrevista, os mesmos têm ou tiveram participação de mapeamentos por imagens de satélite na sua composição metodológica, mediante a aplicação de projetos setoriais, tais como o PREVS (Projeto e Acompanhamento de Safras Agrícolas) coordenado pelo IBGE, tendo a duração de 1986 a 1993, e o projeto GeoSafras (Aperfeiçoamento Metodológico do Sistema de Previsão de Safras no Brasil) coordenado pela Conab e que se mantém até hoje.

O uso do mapeamento através das imagens de satélite tem contribuído de forma positiva para o levantamento de área agrícola e se constitui em uma recomendação pela FAO (1996), inclusive nos métodos amostrais. Podem ser citados os seguintes benefícios ao se utilizar o mapeamento nas estimativas de área agrícola: informação da distribuição espacial dos cultivos agrícolas; agregação da informação dinâmica temporal da distribuição agrícola;

otimização no cálculo de área através da estratificação de regiões, e conhecimento da distribuição espaço-temporal do uso e cobertura da terra na região de interesse. O mapeamento, desta forma, agrega, de forma direta, informações que vão além da questão da estimativa de área agrícola, mas que ao mesmo tempo estão correlacionadas.

Em relação ao mapeamento do uso e cobertura da terra, primordialmente se faz necessária a diferenciação entre o conceito de uso e cobertura. De acordo com Turner et al. (1995), o conceito de cobertura da terra compreende o espaço físico e biológico observado da superfície, incluindo, por exemplo, vegetação, aparatos construídos pelo homem, solo nu, rocha nua e hidrografia, enquanto que o uso da terra constitui a atividade exercida pelo Homem, com propósito planejado destinado a um ou vários tipos de cobertura da terra ou a um determinado tipo de alteração desta (MARTÍNEZ; MOLLICONJE, 2012). A informação espacial do uso e cobertura da terra constitui importante ferramenta de planejamento e de orientação na tomada de decisão na agricultura. Tendo em vista as devidas escalas, são alguns exemplos em que o uso e cobertura da terra exprimem importância na agricultura: valoração de terras, serviços ambientais, aplicação de legislação florestal e ambiental, segurança alimentar, gerenciamento de bacias hidrográficas e recursos hídricos, planejamento da produção, planejamento de reforma agrária, estimativa da colheita e valor da produção, entre outros.

No Brasil, os primeiros levantamentos de uso da terra se iniciaram no final da década de 1930 e perduraram até os anos de 1940. Desde então até meados da década de 1960, predominaram estudos sobre a colonização da região Sul, ocupação da Amazônia e padrões espaciais a partir de processos produtivos (IBGE, 2006). Na década de 1970, com o lançamento dos satélites Landsat 1, 2 e 3, desenvolvimento da geografia quantitativa e a transformação da Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CNAE) no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), formou-se a conjuntura necessária para que os estudos de uso e cobertura da terra em nível mundial pudessem ser

acompanhados e também desenvolvidos no país (IBGE, 2006). Com o lançamento de mais satélites de média resolução na década de 1980, como o SPOT, estudos de uso e cobertura da terra têm evoluído consideravelmente, tanto em desenvolvimento como em aplicação.

O levantamento do uso e cobertura da terra através de imagens de sensoriamento remoto deve considerar limitações e características inerentes ao próprio processo da representação da realidade. De acordo com o IBGE (2006), o levantamento do uso e cobertura da terra deve seguir quatro princípios básicos:

- a) Escala de mapeamento: representação gráfica de um objeto e a medida correspondente de sua dimensão real, tendo referência à margem de erro tolerável que se queira trabalhar. Toda escala de mapeamento tem como erro médio o produto do valor desta pelo valor de um erro padrão admissível em milímetros. Não obstante, esta perspectiva geométrica não deve ser considerada de forma isolada, haja vista que a questão da generalização passa a não ser somente uma questão geométrica com o surgimento dos Sistemas de Informação Geográfica (d'ALGE; GOODCHILD, 1996);
- b) Natureza da informação básica: faz relação com o tamanho da menor área interpretável. No caso de imagens orbitais, seria a resolução espacial do sensor imageador, a qual deverá ser compatível com o erro admissível da escala de mapeamento;
- c) Unidade de mapeamento: representação de uma cobertura homogênea, ou uma combinação de áreas elementares que, somadas, formam um padrão de cobertura homogêneo. Cada cobertura homogênea é distinguível das unidades de seu entorno e representa uma porção significativa dentro do contexto do mapa, considerando os princípios "a" e "b". Considera-se adequado que as menores áreas mapeadas sejam de no mínimo de 5mm x 5mm, considerando a escala utilizada, e;

d) Nomenclatura: primeiramente devem ser separadas as coberturas da terra até um terceiro nível categórico (Figura 2.6) e, após este nível, podem ser especificados os usos da terra, os quais são muitas possibilidades de retratação. Tal nomenclatura, além dos fatores acima citados, deve considerar a fonte básica de dados e a necessidade dos usuários.

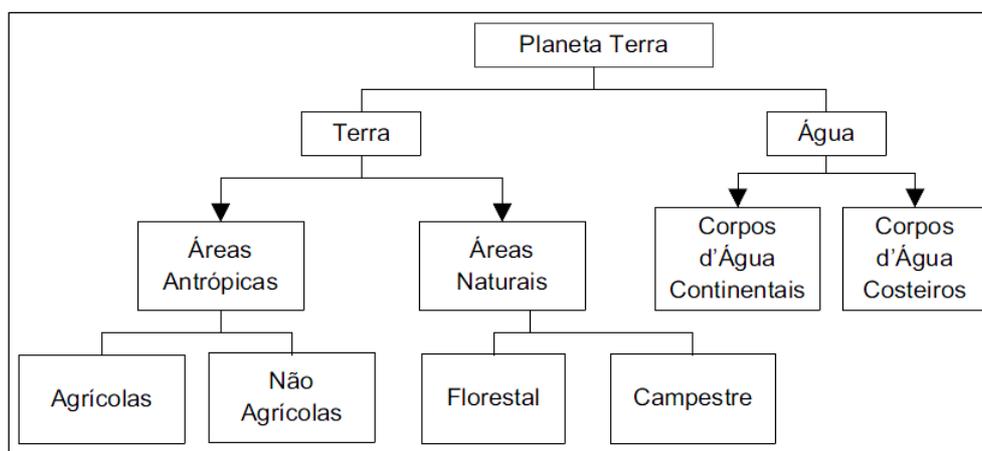


Figura 2.6 - Divisão de nomenclatura para levantamentos de uso e cobertura da terra adota pelo IBGE (2006).
Fonte: IBGE (2006).

Para o levantamento do uso e cobertura da terra a partir imagens de satélite, é preciso que se tenha todo o conhecimento prévio das diferentes resoluções das imagens que serão utilizadas: espacial, radiométrica, temporal e espectral (MATHER, 1999; MORAES, 2002). A resolução espacial é a projeção de área no terreno que pode ser resolvida pelo instrumento detector, que geralmente é representado por um elemento na imagem digital (pixel) (MATHER, 1999). Esta definição também pode ser definida como Campo de Visada Instantânea (*Instantaneous Field of View* - IFOV), que é projetado no terreno. O IFOV corresponde ao ângulo de abertura do sistema óptico em conjunção com o tamanho do detector, o qual mede a intensidade de radiância do terreno (MENESES; ALMEIDA, 2012). A resolução espacial apresentada nas imagens de satélite em seu estado bruto possui uma série de distorções inseridas pela óptica, detector, filtro eletrônico, processo de amostragem e outras distorções

oriundas de movimento e turbulência (BOGGIONE; FONSECA, 2003). Estas distorções podem ser moduladas através da Função de Transferência de Modulação do sensor (FTM) no domínio da frequência espacial, ou Função de Espalhamento Pontual no domínio espacial (FEP), resultando em uma resolução espacial efetiva, que é inferior à resolução espacial típica, o Campo Efetivo de Visada Instantânea (*Effective Instantaneous Field of View* - EIFOV).

No que diz respeito ao mapeamento de culturas agrícolas por imagens de satélite ópticas, a resolução temporal das imagens orbitais tem especial interesse (PANIGRAPHY; SHARMA, 1996; RUDORFF et al., 2007). A resolução temporal diz respeito à frequência de imageamento que o mesmo sensor realiza sobre uma dada órbita-ponto. Tal frequência possui importância devido ao fato de que grande parte das culturas agrícolas no país é de desenvolvimento vegetativo de ciclo curto (temporário), com plantio na estiagem e colheita no período pós-chuvoso – culturas anuais de verão. Devido a esta característica, um talhão agrícola dedicado ao plantio de determinada cultura agrícola apresenta antes, durante e após o seu ciclo vegetativo diferentes respostas espectrais. Tal resposta espectro-temporal auxilia na identificação de ocorrência de cultura agrícola, assim como na definição do tipo de cultura em um talhão. Por outro lado, esta resposta pode ser prejudicada quando ocorre alto índice de cobertura de nuvens durante o período de desenvolvimento vegetativo da cultura, que é geralmente chuvoso.

Em nível de sensores ópticos orbitais, um dos que melhor conjuga resolução temporal e espacial atualmente é o sensor MODIS a bordo do satélite TERRA. Possui revisita diária ou a cada dois dias, dependendo da latitude, com resolução espacial de até 250 m (SHIMABUKURO; RUDORFF, 2006). Nesta perspectiva, Freitas et al. (2011) desenvolveram um Laboratório Virtual de Sensoriamento Remoto (LVSR) (www.dsr.inpe.br/laf/series/index.html) no qual é possível realizar consulta *on line* sobre imagens do Google Earth do histograma temporal de um dos produtos do sensor MODIS, o MOD13Q1, que trata do resultado do índice de vegetação EVI-2 (Enhanced Vegetation Index-2)

(HUETE et al.; 1997) à resolução de 250 m. O valor de EVI-2 no produto MOD13Q1 é calculado pela composição das imagens no intervalo de 16 dias, com a menor taxa de cobertura de nuvens e com correção geométrica e radiométrica (ANDERSON et al., 2003).

O mapeamento de classes agrícolas ou outros usos da terra pode ser realizado por classificação através de interpretação visual das composições das imagens de sensoriamento remoto ou em observação a alguma outra variável, como o índice EVI-2 disponibilizado no LVSR, cujas classes são editadas de forma matricial ou vetorial em um SIG. Métodos de classificação de imagens de satélite comumente são separados em supervisionados e não-supervisionados. Para ambos os casos, há diferentes formas e algoritmos de extração de atributos, processamento dos mesmos e apresentação dos resultados. Lu e Weng (2007) realizaram uma revisão de diferentes classificadores baseando-se em certos critérios, conforme Tabela 2.3.

Percebe-se que grande parte dos classificadores é de ordem supervisionada, paramétrica, extração por pixel, apresentação categórica e espectral. De fato, o atributo mais comumente utilizado é o atributo de nível de cinza das imagens (ou espectral), sendo a sua extração em nível de unidade de pixel, cujo resultado é apresentado de forma categorizada em classes. No entanto, a diversidade de possibilidades contribui para viabilizar um melhor desempenho das classificações do uso e cobertura da terra. Alguns classificadores se aproximam, no quesito de reconhecimento de padrões, da interpretação humana de imagens. O ser humano, apesar do pouco reconhecimento da diversidade de níveis de cinza, que pode chegar a 40 (MUSSATTO et al., 2005) e da limitação de processamentos e da exatidão, consegue relacionar um maior número de atributos visuais na delimitação de alvos de interesse que os classificadores automáticos, sendo eles: tonalidade e cor, forma e tamanho, padrão, textura, associação e sombra, contexto e características multiescalas (multiatributos). São estes atributos que são levados em consideração pelo fotointérprete nas composições coloridas de imagens de satélite ao realizar

uma classificação por edição. A abordagem de classificação que mais se aproxima dos atributos visuais humanos é a orientada a objeto.

Tabela 2.3 - Métodos de classificação de imagens de sensoriamento remoto e respectivos critérios, categorias e exemplos.

| Critério | Categoria de Classificação | Exemplos de classificadores / plataformas |
|--|---|---|
| Treinamento de amostras | Supervisionada | máxima verossimilhança, distância mínima, rede neural artificial, árvore de decisão, distância de Bhattacharyya, ClaTex, paralelepípedo, distância de Mahalanobis |
| | Não-supervisionada | ISODATA, K-médias, ISOSEG, SOM |
| Parâmetros como média e covariância | Paramétrico | máxima verossimilhança, análise discriminante linear |
| | Não - paramétrico | rede neural artificial, árvore de decisão, raciocínio baseado em evidências, máquina de vetores de suporte |
| Tipos de informação extraída | Por pixel | grande maioria dos classificadores |
| | Sub-pixel | classificadores por lógica <i>fuzzy</i> , mapa de regras, análise de mistura linear espectral |
| | Orientada a objeto | Rede semântica hierárquica conjugada a lógica <i>fuzzy</i> ou vizinho mais próximo Definiens, ISOSEG, distância de Bhattacharyya, ENVI EX |
| | Por campo | Suporte de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) |
| Resultados em nível categórico das classes | Catagórica (<i>hard classification</i>) | maioria dos classificadores |
| | Em gradiente (<i>soft classification</i>) | classificador por lógica <i>fuzzy</i> , classificador por sub-pixel, mapa de regras, análise de mistura linear espectral |
| Tipos de Informação espacial | Espectral | máxima verossimilhança, distância mínima, rede neural artificial, mapeador angular espectral |
| | Contextual | correção contextual ponto a ponto, baseado em frequência, modo condicional iterativo, Maxver-ICM |
| | Espectro-contextual | ECHO, combinação de classificadores com algoritmos contextuais |

Fonte: Modificada de Lu e Weng (2007).

Em relação à apresentação dos resultados, grande parte dos classificadores de imagens gera as classificações em ordem categórica. Estes classificadores possuem um fator de separação das classes, baseando-se em um ordenamento das amostras ou da totalidade dos pixels (ou segmentos) que, por sua vez, é resultado de um algoritmo de medição de distâncias ou de probabilidades, por exemplo. Conforme a Tabela 2.2, este tipo de classificação

é conhecida na literatura como “hard classification” (Choodarathnakara et al., 2012) ou classificadores categóricos. Outra abordagem de apresentação dos resultados, é conhecida como “soft classification” ou subpixel (ALI, 2002). Nesta abordagem, a decisão de separação das classes pode ser atribuída ao usuário, tendo em vista que neste método o usuário tem a possibilidade de visualização do resultado do ordenamento de pixels, ou segmentos, que o algoritmo de medição de distâncias ou probabilidades (de classificação) realizou (RSI, 2004). Neste método, os valores de distâncias ou probabilidades dos diferentes classificadores por pixel podem ser representados na extensão da grade da imagem (banda) de origem, conforme cada algoritmo do classificador, denominado “rule image”, ou mapa de regras. A Tabela 2.3 apresenta os valores que o ENVI associa a cada um dos mapas de regras, conforme o algoritmo de classificação (RSI, 2004):

Tabela 2.4 – Métodos de Classificação e suas correspondências no formato Mapa de Regras.

| Método de Classificação | Valores do Mapa de Regras |
|----------------------------|--|
| Paralelepípedo | Número de bandas que satisfazem o critério do paralelepípedo |
| Distância Mínima | Soma das distâncias a partir da média da classe |
| Máxima verossimilhança | Probabilidade do pixel pertencer a uma classe |
| Distância de Mahalanobis | Distância a partir da média da classe |
| Codificação binária | Ajuste binário em percentual |
| Mapeador angular espectral | Distância angular espectral em radianos (menores valores indicam pixels mais próximos aos valores treinados) |

Fonte: (RSI, 2004).

O método da máxima verossimilhança (MAXVER) é considerado um método robusto e amplamente utilizado em imagens de sensoriamento remoto (SCHOWENGERDT, 1983). O critério para determinar se um pixel irá ou não pertencer a uma classe i no MAXVER segue a regra de Bayes (SCHOWENGERDT, 1983). Neste caso, considera-se que a distribuição de probabilidade para as classes é normal. Partindo-se desta suposição, há um

critério de decisão de separação entre classes que passa a ser adotado (SCHOWENGERDT, 1983). Existe um limite de decisão em classificar o pixel “ \bar{x} ” como pertencente à classe “ w_i ” de maior valor de “ $p(\bar{x} / w_i)$ ”, ou seja, de máxima verossimilhança. Os pixels que estão próximos aos limites de decisão podem ser questionados quanto à validade de suas classes associadas (Figura 2.7). Desta característica estática de classificação, surge a possibilidade de verificar no resultado da classificação o gradiente de probabilidades para cada classe. Para otimizar a análise da classificação e possibilitar que o especialista intervenha na geração de classes após a classificação, a função de densidade de probabilidade (FDP) das classes deve ser apresentada separadamente por imagem, as quais são denominadas de Mapas de Regras.

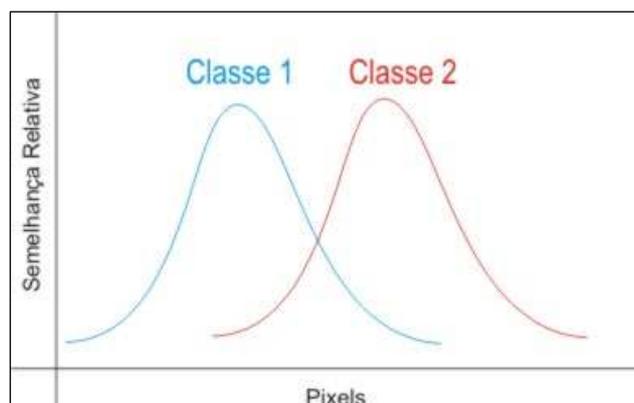


Figura 2.7 - Distribuição de classes com sobreposição de probabilidades.

Esta alternativa permite que o especialista defina classes segundo a sua probabilidade de ocorrência, pela identificação nos respectivos histogramas dos Mapas de Regras de limiares de máximos e mínimos (vales), os quais possuem relação com a ruptura de padrões (MORSE, 2000). Alguns trabalhos que utilizaram a análise dos Mapas de Regras (AMR) realizaram uma abordagem por alocação de pesos nos respectivos mapas para alcançar uma melhor classificação. Esta técnica, além de auxiliar na decisão de classificação em áreas que têm uma baixa separabilidade de classes, reduz a tendenciosidade para amostras de treinamento que não são representativas da

população, permitindo que a respectiva classe obtenha uma melhor classificação (MCIVER; FRIEDL, 2002). Uma das formas para separação de classes considerando subpixels é realizada através de fatiamentos gerando uma rede hierárquica de árvore de decisão (RSI, 2004). Cada técnica de classificação ou mapeamento pode ser mais apropriada dependendo do tipo de alvo que se queira delimitar. O uso consorciado de técnicas e realizado por etapas pode ser denominado como método híbrido de classificação ou mapeamento.

O mapeamento e classificação do uso e cobertura da terra na sua forma multitemporal (dinâmica) tem acompanhado a magnitude das transformações do planeta realizadas pelo homem na segunda metade do século XX. As causas e consequências destas transformações são fonte de estudo das ciências naturais e sociais (TURNER et al., 1995). A dinâmica do uso e cobertura da terra está associada, principalmente, às seguintes demandas: segurança alimentar e hídrica, produção de fibras, recursos naturais, energia, riqueza e bem-estar (LAMBIN et al., 2003; CHHABRA et al., 2006). Estas, por sua vez, implicam em outras variáveis, considerando as devidas escalas: gases de efeito estufa, clima regional, biodiversidade, disponibilidade e qualidade de recursos hídricos, manutenção do solo, ciclos biogeoquímicos e vulnerabilidade de espaços e ocupações humanas (TURNER et al., 1995; LAMBIN et al., 2003; WALKER, 2004; CHHABRA et al., 2006). Historicamente, os grandes ícones das conversões da cobertura terrestre no planeta de 1700 à década de 1990 do século XX foram a pastagem, seguido da agricultura (GOLDEWIJK, 2001; LAMBIN et al., 2003), conforme a Figura 2.8. Dada a importância destas transformações, em 1994, o Programa Internacional da Geosfera-Biosfera (IGBP) lançou o projeto “Mudanças de Uso e Cobertura”, de acordo com a proposta de Turner et al. (1993). Atualmente, a principal pergunta deste programa é: “Como as influências humanas e biofísicas podem afetar o uso e cobertura da terra, e quais os impactos ambientais e sociais destas mudanças?” (IGBP, 2013).

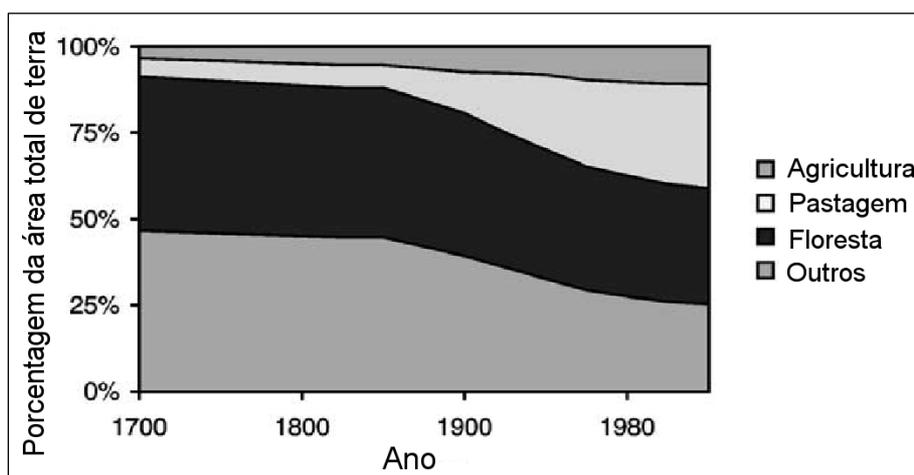


Figura 2.8 - Evolução da ocupação antrópica global em porcentagem de área.
 Fonte: Goldewijk et al. (1997).

As análises multitemporais com imagens de satélite fazem parte do rol do sensoriamento remoto denominado detecção de mudanças. De acordo com Singh (1989), existem duas categorias para o estudo das detecções de mudanças: (a) análise comparativa de classificações (ou mapeamentos) produzidas de forma independente em datas diferentes; (b) análise simultânea de dados multitemporais. A segunda opção compreende uma série de técnicas de comparação em nível radiométrico das imagens multitemporais, sendo as mais tradicionais: diferença de imagens, regressão de imagens, razão de imagens, diferença de índices de vegetação e principais componentes, sendo que a primeira opção corresponde a uma comparação pós-classificação. Duas décadas seguintes, Lu et al. (2004) realizaram uma separação maior entre as técnicas de detecção de mudanças: (a) Álgebra de imagens, compreendendo: diferença de imagens, regressão de imagens, razão de imagens, diferença de índices de vegetação, análise de mudanças de vetor e subtração de fundo; (b) Transformação: principais componentes, tasseled cap, gramm-schmidt, qui-quadrado; (c) Classificação: comparação pós-classificação, análise combinada espectro-temporal, detecção EM, detecção de mudanças não-supervionadas, detecção híbrida de mudanças, redes neurais artificiais; (d) Métodos avançados: modelo de reflectância Li-Strahler, modelo de mistura espectral,

método do parâmetro biofísico; Via SIG: método integrado SIG e sensoriamento remoto, abordagem SIG; Análise visual: interpretação visual.

Cada uma das categorias citadas possui suas vantagens e desvantagens. A categoria da Classificação é uma das mais utilizadas. Este método tem a vantagem de prover matrizes de conversões de classes e a redução de efeitos externos, como a influência atmosférica e as diferenças do ambiente local (LU et al., 2004). Além disso, diminui o rigor dos registros entre as imagens multitemporais (SINGH, 1989). A desvantagem desta recai no efeito multiplicativo dos erros das classificações multitemporais, na dificuldade que às vezes se tem em encontrar a associação ótima de quantidade e qualidade de amostras de treinamento, principalmente, em se tratando de diferentes imagens de datas específicas (LU et al., 2004; SINGH, 1989). Estes fatores podem ocasionar um grande dispêndio de tempo e levar a resultados de detecção de mudanças aquém do desejado (LU et al., 2004). Em relação aos demais métodos, com exceção dos métodos de transformação e redes neurais artificiais, os fatores externos que afetam diretamente a radiância devem ser considerados, tais como: diferenças de condições atmosféricas, ângulo de elevação solar, diferenças de calibração de sensor, diferenças temporais dos alvos, diferenças de registro (SINGH, 1989).

2.3 Modelagem do uso e cobertura da terra

A abordagem da detecção multitemporal do uso e cobertura da terra tem como principal propósito entender o papel das causas e consequências das transformações analisadas. Este princípio passa a ser mais bem sistematizado através de modelos da dinâmica do uso e cobertura da terra (VELDKAMP; VERBURG, 2004). Além disso, existe uma demanda global, pela qual a abordagem de detecção de mudanças de uso e cobertura da terra apresenta sua inerente limitação. Trata-se de uma compreensão mais abrangente da dinâmica do uso e cobertura da terra e como estas mudanças influenciam em

tal dinâmica ao longo do tempo (TURNER et al., 1993). Esses modelos têm sido desenvolvidos para a identificação de possíveis intervenções de manejos, assim como para ter uma melhor avaliação e predição futura dos papéis do uso e cobertura da terra dentro do funcionamento de um sistema (VELDKAMP; LAMBIN, 2001). Neste sentido, a detecção de mudanças a partir do sensoriamento remoto, além de sua própria abordagem de inferência, consiste em uma informação primária para modelos dinâmicos de uso e cobertura. A disponibilidade de imagens de sensoriamento remoto com maior cobertura e frequência temporal aliada ao aumento da capacidade de processamento computacional nas últimas décadas foram um dos principais pressupostos para o desenvolvimento da modelagem da superfície terrestre (COSTANZA et al., 1990).

De acordo com Wilson (1974), modelo é toda sistematização formal de uma ou mais teorias para explicar o funcionamento de um sistema, sendo este entendido como um conjunto de partes, apresentando interdependência entre seus componentes e atributos. Novaes (1981) define “modelo” como a representação de um sistema, obtida através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica, etc., e segundo uma ou mais teorias. Os modelos, de forma geral, inclusive os modelos especificamente voltados à simulação de mudanças de cobertura e uso da terra, têm sido alvo de severo criticismo em relação às suas limitações para capturar a complexidade da realidade à qual se reportam (Briassoulis, 2000). Para esta autora, o principal motivo para o distanciamento entre esses modelos e a realidade nele retratada é que existem diferenças epistemológicas entre as teorias de uso e cobertura da terra e os construtores de modelos. Estes têm uma tradição positivista, enquanto que os teóricos partem para uma gama maior de epistemologias (positivismo, relativismo, existencialismo, idealismo, estruturalismo, pós-modernismo) (BRIASSOULIS, 2000). Como consequência, a redução ou simplificação da diversidade do mundo real através das teorias de uso e

cobertura da terra acaba sendo extremamente dificultosa, ou resulta em representações simplórias da realidade.

Segundo Novaes (1981), os modelos podem ser classificados em tipologias, de acordo com suas funções, da seguinte forma (ALMEIDA, 2003):

- a) modelo descritivo: visa somente entender o funcionamento de um sistema, trata-se do modelo pelo modelo;
- b) modelo exploratório: é um modelo descritivo que envolve a análise paramétrica de diversos estados, através da variação dos elementos do sistema e de suas relações, sem que haja atuação externa sobre ele. Estes modelos estão voltados a responder a pergunta, “O que aconteceria se... (what if)”;
- c) modelo preditivo: trata-se de modelo exploratório que envolve a variável tempo, compreendendo a projeção de determinados elementos básicos;
- d) modelo operacional: é o modelo que possibilita a interferência do modelador, o qual pode introduzir fatores exógenos nos componentes do sistema e nos seus relacionamentos, visando à alteração do seu comportamento.

De acordo com Lambin (1994), podem ser separados os modelos de acordo com sua ênfase metodológica. Segundo ele, os modelos podem ser empíricos, mecanicistas ou sistêmicos. Os modelos empíricos levam em consideração a observação da relação entre as variáveis envolvidas e existe a pressuposição de que esta relação será mantida ao longo do tempo. Os modelos mecanicistas são baseados em regras que supostamente conhecemos, sendo norteado pelo método dedutivo e reproduzido por equações simples. Em vista da possibilidade de se rever parâmetros das equações utilizadas através da observação, modelos desta ordem também têm um nível de empirismo. Os

modelos sistêmicos possuem uma estrutura que possibilita o trabalho com o maior número de componentes possíveis, visando capturar complexidade do todo. Aspectos ecológicos e culturais são mais bem representados neste tipo de modelo. Sua desvantagem está na dificuldade de validação dos resultados, necessidade de grande capacidade computacional e maior dispêndio de tempo na elaboração do mesmo. Deve-se salientar que quanto mais complexo é um modelo, também maior será o seu nível de abstração. Lambin (1994) constatou também que cada modelo tinha diferentes propósitos de inferência. Cada modelo poderia responder com um determinado grau de precisão às seguintes perguntas: “Por quê?”, “Quando?” e “Onde?”. Desta forma, foi possível elaborar um diagrama entre as tipologias metodológicas e os graus de inferência, conforme a Tabela 2.5.

Almeida (2003) constatou que poderia haver uma subdivisão entre os modelos de uso do solo urbano com aspectos conceituais e operacionais básicos, como a habilidade de apreender e lidar com representações de eventos espaço-temporais, observando uma sequência cronológica do desenvolvimento dos mesmos, da seguinte forma:

- a) modelo não-dinâmico (ou teórico);
- b) modelo dinâmico não-espacial:
 - b.1) Estático comparativo;
 - b.2) Recursivo;
 - b.3) Quase-Dinâmico;
 - b.4) Modelo dinâmico implícito;
- c) Modelo dinâmico espacial;

Tabela 2.5 - Tipologias e respectivas inferências de modelos de uso e cobertura da terra.

| | | Tipos de modelos | | |
|---------------------------|----------|---|--|---|
| | | Modelos Empíricos | Modelos Mecanicistas | Modelos Sistêmicos |
| Questões abordadas | Por quê? | Modelos de Regressão | Modelos econômicos e de pressão demográfica | Modelos de ecossistema e Modelos de simulação espacial dinâmica |
| | Quando? | Cadeia de Markov e Modelagem por função logística | - | |
| | Onde? | Modelo espacial e estatístico | Modelos Periurbanos e mudanças de uso da terra | Modelos de dinâmica espacial |

Fonte: Lambin (1994).

Em relação à historicidade do desenvolvimento da modelagem de uso e cobertura da terra, remete-se à questão do homem versus a ocupação na natureza. Os primeiros teóricos desta relação na era contemporânea foram George Perkins Marsh e Johann Heinrich von Thünen, ambos do século XIX (BRIASSOULIS, 2000). Marsh elaborou obras que levaram à tona a questão de o homem estar inserido na natureza e à relevância da alteração da cobertura da terra de forma repetitiva. Segundo seus levantamentos pelo mundo, o autor constatara a grande influência que o homem havia provocado na natureza de forma devastadora. Neste sentido, o homem deveria compreender a complexidade dos processos naturais antes de qualquer intervenção. Estas constatações propiciaram o rompimento de paradigmas na época e foi um preâmbulo para os primeiros movimentos ambientalistas pós 2ª Guerra Mundial (JUNIOR; MEIRA, 2011; BRIASSOULIS, 2000). Por outro lado, J.H. Von Thünen, contemporâneo de Marsh, voltou seu pensamento sobre a forma de ocupação ligada a uma questão mais aplicada e prática, a localização dos diferentes usos nas terras rurais. De fato, Von Thünen pode ser considerado como um dos precursores da sistematização teórica dos processos de conversão de uso e cobertura da terra. Este autor elaborou, em 1826, um modelo espacial não-dinâmico acerca da teoria locacional para atividades

agrícolas. O autor queria responder a duas questões através de seu modelo: i) quais os padrões de cultivo que se formariam em torno das cidades, e ii) como os sistemas agrários seriam afetados pela distância à cidade (MESQUITA, 1978). Von Thünen elaborou, através de conceitos econômicos e geográficos, um modelo não-dinâmico em um espaço isotrópico, de localização de usos rurais. Cada tipo de uso rural teria uma distância média do centro urbano tendo em vista o tempo de transporte e a perecibilidade dos produtos, ou alimentos, em relação ao seu único mercado urbano, cujos lucros pudessem ser maximizados. Outros modelos teóricos desta ordem foram desenvolvidos até a primeira metade do século XX.

O início do século XX é marcado pelo surgimento e desenvolvimento de modelos teóricos de planejamento do uso do solo nas ciências sociais, no segmentos da economia urbana e regional, sociologia urbana e geografia econômica e social (BRIASSOULIS, 2000). Este atmosfera propiciou a continuidade do desenvolvimento dos modelos de teoria locacional. Alfred Weber, em 1909, desenvolveu um modelo não-dinâmico estático de localização industrial em um plano isotrópico. Tal modelo propôs que a localização final de uma indústria seria onde os custos de transporte de matéria prima até a indústria e os da entrega de produtos finais no mercado fossem mínimos, sendo denominado triângulo clássico de Weber (ALMEIDA, 2003; PERRATON; BAXTER, 1974). Outro modelo clássico daquela época foi o da Centralidade Hierárquica de Walter Christaller (1933). Tal modelo, também não-dinâmico e isotrópico, considera não somente um centro urbano, mas vários deles, os quais possuem uma hierarquia entre si. Além disto, este modelo desconsidera a dicotomia urbano e rural e parte para uma tricotomia, onde o distrito industrial também tem sua importância de influência. Sendo assim, cada centro de mercado de bens e serviços, dependendo da quantidade e tipo destes, possui um raio de influência sobre outros centros de mercado de bens e serviços de ordem inferior. Este raio de influência tem seu limite até o encontro de outro raio de influência de mesma ordem. Christaller considerou esta rede de

influências em forma de limites hexagonais, por ser a geometria mais próxima para igualar distâncias entre cada centro. O modelo também representou que a distância mínima de um centro ao outro deveria ser a distância que era percorrida a pé em uma hora, que correspondia a 4 a 5 quilômetros e que a densidade média da população agrícola entre os centros era de 60 habitantes por quilômetro quadrado (BONETTI, 1968). August Lösch, uma década depois, aproveita a rede hierárquica elaborada por Christaller e concebe um modelo de regionalização econômica, considerando comércio e serviços. Neste modelo, a particularidade dos produtos e serviços pode determinar uma demanda específica, além do fato de que a variável custo de transporte é considerada. É considerado que o custo de transporte aumenta com a distância e o custo da mercadoria aumenta com a escassez desta. Além disso, quanto maior for a distância, menor será a quantidade de mercadoria disponível para venda. Estas premissas, dentro da rede hierárquica hexagonal de Christaller, faz com que haja uma especialização de seis regiões mais propícias à circulação de mercadorias, que se tornam as mais ricas. Trata-se de seis regiões em forma de cone, apontando para o maior centro de bens e serviços, conhecida como roda dentada de Lösch (BONETTI, 1968).

Após a década de 1940, modelos teóricos continuaram sendo elaborados, principalmente na América do Norte, e passam a ter a inferência de locomoção dentro das cidades. Isto se deve ao problema acarretado pelo grande aumento no número de veículos nos grandes centros dos EUA (ALMEIDA et al., 2007; BATTY, 1976). O modelo CATS (Chicago Área Transportation Study) foi um deles, tendo sido desenvolvido entre as décadas de 1950 e 1960 e objetivado a redução dos engarrafamentos na cidade de Chicago, considerando questões de segurança, economia e a promoção do uso adequado do solo urbano (CARROLL-JUNIOR, 1962). Este modelo, diferente dos das décadas passadas, passou a tratar de uma localidade específica e com dados reais, inclusive de forma inovadora, considerando o uso da terra. De qualquer forma, tratava-se ainda de um modelo teórico (ALMEIDA, 2003). Na década de 1960,

ainda apareceram outros modelos teóricos que tiveram influência no avanço do estudo da modelagem, como, por exemplo, o modelo de Alonso (1960), Wingo (1961) e Muth (1969), sendo todos extensões do modelo de Von Thünen. O primeiro tratou a teoria de Von Thünen agregando aspectos da teoria microeconômica do comportamento do consumidor em relação à maximização de utilidades (BATTY, 1976). A escolha de moradia pelo consumidor ocorria em função de compensações entre custos de transporte e de moradia (ALMEIDA et al., 2007). Wingo (1961) desenvolveu um modelo teórico de localização intraurbana que associava os custos de transporte à densidade populacional (BATTY, 1976; ALMEIDA, 2003). O modelo de Muth (1969), por sua vez, examinou diferentes funções de utilidade com a finalidade de explicar a estrutura do mercado habitacional. Embora tais modelos teóricos tivessem representado avanços, principalmente na inserção de novos componentes, os mesmos apresentavam grandes limitações já naquela época. Estes modelos apresentavam grande dimensionamento, impossibilitando um processamento computacional, muitos se ancoravam esparsamente em teorias, acarretando a arbitrariedade e o mecanicismo, o que levou a que se tornassem meras simulações de estruturas urbanas estáticas observáveis (BATTY, 1976; ALMEIDA et al., 2007).

Em um contraponto aos modelos mencionados anteriormente, também foi na década de 1960 que começam a ser desenvolvidos os primeiros modelos dinâmicos não-espaciais. Fazem parte desta categoria os modelos estáticos comparativos, recursivos, quase-dinâmicos e dinâmicos implícitos, por se tratarem de predecessores dos modelos dinâmicos por excelência. De acordo com Paelinck (1970), todos os modelos devem ser desenvolvidos sob a seguinte ordem: análises empíricas, investigações baseadas em critérios matemáticos e investigação baseada em simulação. O desenvolvimento da modelagem dinâmica segue estes preceitos.

Os modelos estático-comparativos, como é o caso do modelo de Perraton e Baxter (1974), possuem dados de entrada e saída que representam o sistema

em um instante de tempo. No entanto, estes modelos não fornecem explicações para as mudanças de estrutura ao longo do tempo, as quais constituem o comportamento do sistema (ALMEIDA, 2003; BATTY, 1976). Nestes modelos, a duração do lapso de tempo entre duas datas de referência não é especificada, por isso podem ser considerados atemporais. Os modelos estático-comparativos, foram sucedidos pelos recursivos, como é o caso do modelo de Butler et al. (1969).

Os modelos recursivos representam uma sequência de modelos estático-comparativos, em que o estado final de um período atua como estado inicial do período subsequente (ALMEIDA, 2003; WEGENER, 1976). Há reconhecimento da existência de intervalos de tempo nos processos de mudança e objetivam a descrição deste processo ao longo do tempo. Igualmente ao modelo estático-comparativo, as variáveis endógenas se relacionam às exógenas por parâmetros constantes, mas os tempos de resposta podem ser explicitados. Concomitantemente aos modelos recursivos, foram desenvolvidos os modelos quase-dinâmicos (BATTY, 1976), que é o caso do modelo de Lowry (1964) e Penn-Jersey (1969). Estes modelos contêm partes estáticas em uma estrutura dinâmica e foram comumente concebidos com base em modelos que consideravam zonas de ocupação através de funções de decaimento a partir da distância (ALMEIDA, 2003). O modelo de Lowry (1964), por exemplo, é orientado à demanda do aumento de postos de emprego, cujo impacto é provocado no setor de serviços. No modelo, são realizadas iterações, mas a sua estrutura não está baseada nestas. Entretanto, nos modelos explicitamente dinâmicos, toda a sua estrutura está preparada para considerar a contagem temporal em suas respectivas variáveis.

Um dos primeiros modelos dinâmicos não-espaciais foi o desenvolvido por Czamanski (1965). O modelo de Czamanski (1965) elaborou um sistema de quatro equações para a relação entre população, emprego básico, emprego terciário e localidade do emprego (ALMEIDA et al., 2007). Embora exista a variável localidade, esta não tem nenhuma relação topológica com as demais

variáveis, portanto, sem dimensão espacial. O modelo de Hill (1965), conhecido como EMPIRIC, é considerado um modelo dinâmico implícito, de caráter econométrico linear, que trata das mudanças de uso da terra de forma indireta, através da distribuição de emprego e população dentre zonas metropolitanas (BRIASSOULIS, 2000). Para cada zona, havia a previsão de variáveis populacionais, de atividades econômicas e padrões de mudanças de uso da terra sob diferentes simulações de ordem política (BRIASSOULIS, 2000). O EMPIRIC, diferentemente do modelo proposto por Czamanski (1965), possui dimensão espacial, haja vista que utiliza o conceito de zonas metropolitanas, embora seus resultados não pudessem ser visualizáveis do ponto de vista espacial (ALMEIDA et al., 2007). Arnott (1996) fez várias críticas a este modelo, como, por exemplo, a aplicação da equação de estimativa de variável endógena não é aplicada simultaneamente em todo o conjunto de zonas, e as variáveis endógenas são tratadas de forma inapropriada. Este autor enfatiza ainda que modelos lineares, como o caso do EMPIRIC, não são adequados para simulações urbanas, sendo ideais as formulações não-lineares.

Concomitante ao desenvolvimento da modelagem dinâmica e da informática na década de 1960, um novo paradigma da ciência passaria a fazer parte deste desenvolvimento, em termos de métodos e implementação. Tal paradigma teve início no começo do século XX, sendo uma resposta à crise do método científico até então adotado, em que a observação das partes era realizada de forma independente, reducionista, ou por sistemas fechados, haja vista a física mecanicista de Descartes e Newton empregada por muitos séculos (BERTALANFFY, 1972). Porém, em 1937, o biólogo Ludwing Von Bertalanffy havia elaborado seu ensaio sobre a nova visão científica que se instaurava, a Teoria Geral dos Sistemas (TGS). A TGS seria uma ciência voltada para a “totalidade”, aplicável a várias ciências empíricas e não somente à matemática formal. Tal abordagem sistêmica passou a ser desenvolvida de forma computacional no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), passando a ser denominada Dinâmica de Sistemas (DS) (FORRESTER, 1973). Segundo

Schwaninger e Rios Perez (2008), a DS foi desenvolvida para um princípio primordial: abstrair as características de um sistema dinâmico complexo através de simulação. O primeiro trabalho desenvolvido com DS que tratou sobre o tema uso da terra, porém sem referência espacial, foi “Dinâmicas Urbanas” por Forrester (1969). Este foi elaborado em uma cidade hipotética para retratar a relação entre indústria, habitação e população, vislumbrando as principais ações e políticas que podem fazer com que uma cidade enriqueça ou empobreça (FORRESTER, 1973; JARZYNKA, 2006). O primeiro modelo de DS que integrou o uso da terra considerando sua informação espacial foi o modelo “Integração uso da terra e transportes” (WEGENER; FÜRST, 1999), cujo desenvolvimento começou na década de 1970 e continua até os dias atuais (BRIASSOULIS, 2000). Este modelo tem como objetivo analisar os impactos do uso e cobertura da terra decorrentes das mudanças do sistema de transporte e de diferentes atividades econômicas. O principal esforço no desenvolvimento deste modelo tem sido o retorno da influência de usos da terra para com os sistemas de transporte, fechando o circuito da retroalimentação (BRIASSOULIS, 2000).

Embora tenha ocorrido grande desenvolvimento de modelos dinâmicos desde a década de 1960, é somente na metade da década de 1980 que a variável espacial passa a ser tratada de forma explícita para questões de uso do solo – nos chamados modelos dinâmicos espaciais (ALMEIDA, 2003). Este tipo de modelagem, principalmente quando aplicado de forma multiescala, é uma das técnicas mais relevantes para análises preditivas e exploratórias para o uso da terra (VELDKAMP; LAMBIN, 2001). Na modelagem dinâmica espacial, os processos dinâmicos geralmente são levados a cabo dentro de uma matriz celular bidimensional, em que cada célula possui conectividade com suas vizinhas, sendo a melhor forma de representação do uso e cobertura da terra, dada a sua intrínseca dimensão espacial e de conectividade. Relações de distância euclidiana são comuns entre as células e fazem parte das equações matemáticas do modelo matricial. Contudo, deve-se salientar que a relação

especial destes modelos não se restringe estritamente à adoção do espaço euclidiano (ALMEIDA, 2003). É razoável pensar que as relações matemáticas entre os diferentes tipos de células neste tipo de modelagem sigam a 1ª. Lei da Geografia, “todas as coisas são parecidas, mas coisas mais próximas se parecem mais que coisas mais distantes” (TOBLER, 1979). Não obstante, além desta lei, muitos outros conceitos de relações topológicas, regras de transição, gradiente de escalas, por exemplo, podem ser elencados no conceito de modelagem dinâmica espacial. De acordo com Soares-Filho et al. (2002), cada vez mais vêm sendo adotadas abordagens híbridas que elencam o paradigma dos modelos espacialmente explícitos, no entanto podem ser citados três pilares em termos de abordagem: baseado em indivíduo (ou agente), espaço de autômatos celulares e baseado em processos. A seguir serão abordadas as modelagens sob autômatos celulares e baseada em processo, as quais fazem parte do programa computacional Dinamica EGO, o qual foi utilizado neste estudo.

2.3.1 Autômatos Celulares

A abordagem por autômatos celulares teve como ponto de partida a questão elaborada pelo mentor da teoria dos jogos, John von Neumann: “Uma máquina pode ser programada de forma a tornar-se auto-replicável?” Ele acreditava que tal entendimento poderia ser levado a cabo através de uma teoria geral de computação em redes complexas de autômatos. A origem do termo linguístico autômato advêm da raiz grega que significa “ação por ela mesma”, o que, traduzindo, seriam dispositivos auto-atuantes ou auto-replicáveis. Von Neumann, na década de 1940, queria produzir autômatos baseados em simples regras, mas que pudessem simular complexos processos naturais e artificiais ao longo do tempo e que fossem equivalentes em termos computacionais à máquina de Turing universal (SOUSA, 2002; AGUIAR et al., 2004). Para tanto, para que esta representação fosse possível em nível

computacional, desenvolveu autômatos apresentados em um espaço finito e celular bidimensional – autômatos celulares (AC). O AC desenvolvido por von Neuman possui regra de transição e configuração de estados iniciais particulares, sendo 29 estados possíveis e 4 vizinhanças possíveis em uma célula (vizinhança de von Neumann). O mesmo está detalhado na obra póstuma “Teoria do Autômato Auto-replicável” de 1966, organizada por Arthur Burks (NEUMANN; BURKS, 1966; AGUIAR et al., 2004).

Após von Neumann, a teoria e desenvolvimento dos autômatos celulares foi grandemente beneficiada por John Conway na década de 1970 e Wolfram na década de 1980. John Conway elaborou um simples jogo que popularizou os AC, “O Jogo da Vida”. No “Jogo da Vida”, a idéia básica é de que existe um organismo – ou população – que se reproduz na estrutura da grade ao longo de sucessivos passos de tempo. A manutenção desta população depende de cada célula, as quais seguem regras de transição fundamentadas em leis naturais: nascimento, morte e sobrevivência. De acordo com Gardner (1970), Conway escolheu estas leis cuidadosamente para o “Jogo da Vida” e observou que existem três suposições nos AC:

- a) não deve haver padrão inicial de distribuição da população que condicione que a mesma possa crescer infinitamente;
- b) deve haver um padrão inicial de distribuição da população que aparentemente provoque um crescimento sem limites;
- c) deve haver padrões iniciais de distribuição da população, que, após um longo período de tempo, venham a estancar seu crescimento, em três possíveis situações: desaparecendo completamente (por superlotação ou isolamento); fixando-se em uma configuração inalterada e estável; ou, entrando em uma fase de oscilação de padrão dentro de um ciclo interminável.

John Conway pretendia que no Jogo da Vida houvesse ocorrência de padrões estáveis, ou seja, não ocorressem mais mortes e nascimentos de células, ou, se ocorressem, se desse de forma cíclica (GARDNER, 1970). Para tanto, ele premiaria a quem pudesse descobrir uma configuração inicial de células em um espaço finito, cujas regras de transição pudessem levar a um crescimento cíclico (infinito). Bill Gosper, na década 1970, conseguiu desenvolver uma matriz de células que atendeu tal objetivo, sendo denominada *Gosper glider gun*. Nesta matriz as regras do Jogo da Vida foram aplicadas em períodos discretos para cada célula de uma grade e atuam conforme a situação de suas células vizinhas. Cada célula possui oito vizinhos, quatro ortogonais e quatro horizontais (vizinhança de Moore). As regras foram as seguintes:

- a) uma célula viva com dois ou três vizinhos vivos continua viva no próximo passo;
- b) uma célula morre por solidão quando tiver menos de dois vizinhos vivos, ou por superpopulação, quando tiver mais de três vizinhos vivos;
- c) uma célula morta torna-se viva quando tiver exatamente três vizinhos vivos.

A Figura 2.9 apresenta a estrutura inicial necessária para que haja perpetuação infinita. Esta configuração é conhecida como “arma”, pelo fato de que sua estrutura produz a propagação contínua de novas formações em uma determinada direção da grade celular, semelhante ao lançamento de munição por uma arma. Na estrutura da “arma”, foi possível detectar algumas formações que são comuns no Jogo da Vida. As mesmas são conhecidas como padrões espaciais, no caso da “arma” se dividem em três categorias: vidas paradas, osciladores e naves espaciais.

Com o trabalho de Stephen Wolfram (1984) também houve grandes avanços no ramo de AC, propiciando o desenvolvimento de trabalhos relacionados à

complexidade, como teoria do caos, fractais e criticalidade auto-organizável (ALMEIDA, 2003). O trabalho de Wolfram tem como característica o estudo de padrões reconhecíveis na natureza, tais como flocos de neve e pigmentação de conchas (regra de 30). Defende a posição que toda estrutura complexa nada mais é que o efeito cooperativo de muitos dispositivos simples (WOLFRAM, 1998). A partir de estudos empíricos, percebeu-se que o uso de autômatos celulares pode gerar estruturas com basicamente quatro padrões resultantes: (a) o desaparecimento com o tempo; (b) padrões com uma área fixa ao longo do tempo; (c) crescimento indefinido a uma velocidade fixa; (d) crescimento e contração de forma irregular (WOLFRAM, 1998). A formação de estruturas

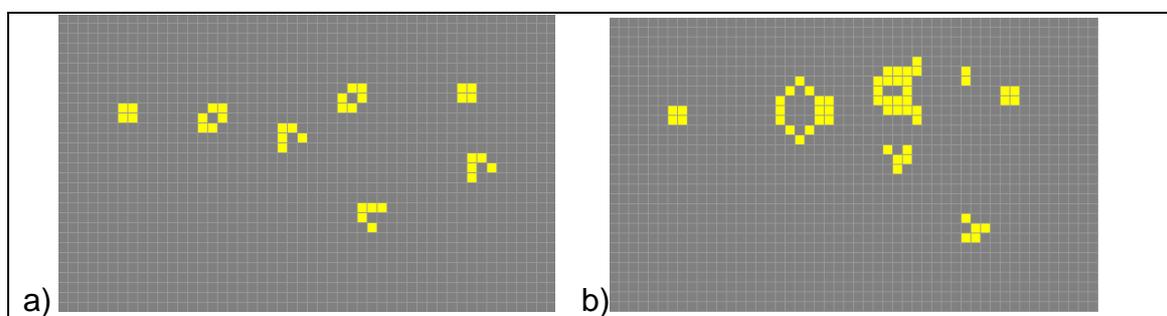


Figura 2.9 – a) Estrutura inicial necessária para que haja perpetuação infinita e b) formações que se perpetuam infinitamente.

maiores a partir do padrão “c” pode formar padrões emergentes, não sendo possível distinguir o padrão original que o formou. Trata-se de padrões emergentes com auto-organização, caracterizando a formação de fractais (WOLFRAM, 1998). Neste sentido, além da regra adotada no AC, a estrutura resultante também é sensível ao estado da configuração inicial das células, gerando diferentes padrões emergentes. Desta forma, quando são introduzidos ruídos na evolução inicial de sistemas de AC, dependendo do sistema, pode tender à desordem, ou, na maioria dos casos, levam a estruturas com padrões que lembram a estrutura sem introdução de ruídos (AGUIAR et al., 2004). Cada vez mais, métodos têm contribuído para o refinamento de modelos de AC,

principalmente ferramentas de ajuste de padrões por redes neurais e aprendizagem evolucionária (ALMEIDA, 2003).

Atualmente, pode-se afirmar que a maioria dos modelos exploratórios e preditivos de uso e cobertura da terra trabalha com autômatos celulares. Este fato se deve a que estes modelos são operacionais, gerando dinâmicas pelas quais resultam em processos tradicionais de mudança, mas que, também, pode resultar em processos complexos gerando estruturas não esperadas ou novas, emergentes (ALMEIDA et al., 2003). Além disso, pelo fato de abarcarem uma estrutura celular, possuem compatibilidade com os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) atuais e com informações extraídas de imagens de sensoriamento remoto, sendo a estrutura matricial a base para operacionalização destes dados (WHITE et al., 2000). A área de AC revela que há uma infinidade de padrões espaciais possíveis e possui inclusive implicações práticas para a modelagem dinâmica espacial nas Geociências. Macal e North (2006) destacam que os ACs contribuem para esclarecer propriedades que também se aplicam a este tipo de modelagem:

- a) padrões sustentáveis ou mais complexos podem ser originados de sistemas baseados em regras simples locais (emergência), e;
- b) os padrões atuais e futuros são fundamentalmente sensíveis às condições iniciais do sistema.

Modelos de uso e cobertura da terra geralmente utilizam um modelo espacialmente explícito, com ou sem utilização de AC, junto com um modelo auxiliar para fornecer as taxas de conversão, ou então, utilizam-se de taxas conhecidas para alimentar esta dinâmica. A primeira opção de modelos será abordada junto com os modelos baseados em processo. A segunda alternativa é tratada como uma das opções dentro da estrutura do programa, como no DinâmicaEGO (Soares-Filho et al., 2002), ou é realizada como única alternativa, como no BASS II (CLARKE et al., 1997). O BASS II é um programa de modelagem de área urbana por AC que opera seguindo cinco passos:

compilação do modelo, preparação dos dados de entrada, calibração, predição e saída dos resultados (RAFIEE, et al., 2009). Para tanto, são necessários os seguintes mapas de entrada: declividade, uso da terra, zonas nulas de crescimento, extensão espacial urbana, rede de transporte e altimetria (SANGAWONGSE et al., 2005) Há cinco tipos de calibração das regras que controlam os AC, sendo regulados no intervalo de 0 a 100: difusão, nucleação, espalhamento, resistência à declividade e gravidade de estradas. A difusão representa a quantidade total de pixels que farão parte da expansão de área urbana a cada iteração, a nucleação informa o crescimento em forma de ilhas, o espalhamento define o crescimento em áreas já existentes, a resistência à declividade define o grau de crescimento urbano sobre áreas mais declivosas, e a gravidade de estradas informa o grau de atração do crescimento urbano ao longo das estradas existentes (RAFIEE, et al., 2009). Vale destacar que este modelo, apesar de ser dirigido somente à dinâmica urbana entre os diferentes mapas citados, considera que o meio urbano contém diferentes usos e, portanto, pode acarretar em diferentes dinâmicas setoriais (ALMEIDA et al., 2003).

2.3.2 Modelos baseados em processo

Os modelos baseados em processo possuem duas estruturas interligadas, uma delas é referente ao modelo espacialmente explícito, sendo constituída de uma grade de células, como opção à abordagem por AC. Neste modelo, ficam contidos os dados de uso e cobertura da terra, por exemplo. A segunda estrutura corresponde a um modelo não-espacial, geralmente de dinâmica de sistemas (DS). Cada célula é alimentada por um dado de saída do modelo de DS e pelas informações das suas células vizinhas (SOARES-FILHO et al., 2002; COSTANZA; MAXWELL, 1991), conforme Figura 2.10.

Esta classe de modelo foi desenvolvida primeiramente por Sklar et al. (1985). Eles elaboraram um modelo exploratório e preditivo que tinha como objetivo

analisar a sucessão de ecossistemas costeiros em uma área de estuário do rio Mississippi. Apesar de não ter sido utilizada abordagem por AC, houve troca de informações em nível de células vizinhas considerando questões hidrológicas. A elaboração deste modelo representa um esforço para unir modelos dinâmicos com a informação espacial, apesar de se constituir em uma dificuldade computacional e, ao mesmo tempo, uma abordagem valiosa nas

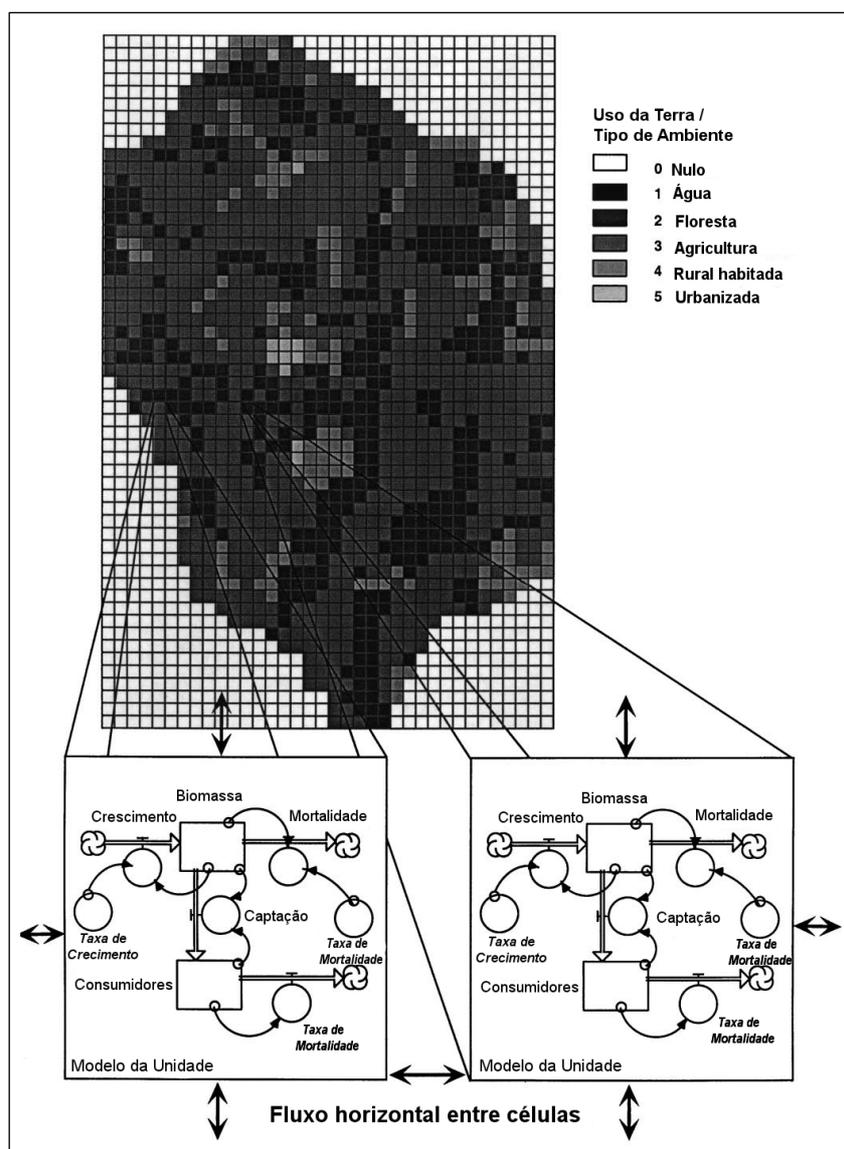


Figura 2.10 - Esquema de modelagem dinâmica espacial baseada em processo com abordagem *tight-coupling*.
 Fonte: Modificado de Voinov et al. (1999).

análises ecológicas. Este trabalho foi aprofundado com a implementação do modelo de Simulação Espacial da Paisagem de Ecologia Costeira (CELSS) por Costanza et al. (1990).

Cada célula representava um quilômetro no terreno, onde cada uma continha um modelo dinâmico e não-linear de Dinâmica de Sistemas construído na plataforma STELLA. O modelo de DS continha sete variáveis de estoque: nitrogênio, volume de água, altimetria, salinidade, detritos, biomassa e volume de sementes. No modelo celular, poderia haver trocas entre água e certos materiais sólidos, os quais eram determinados por critérios de adjacência e estoque de água disponível das células envolvidas. Haveria sucessão de ecossistemas quando os valores de variáveis ambientais não atingissem limites toleráveis para sustentar um determinado ecossistema. A célula que representaria um ecossistema passaria para outro mais bem adaptado. O modelo representou 90% de acerto na validação e 79% na validação preditiva, nos anos seguintes. Voinov et al. (1999) apresentaram um modelo semelhante ao citado, de abordagem ecológica, porém, agregando componentes econômicos e cuja predição era o padrão do uso da terra. As alterações do uso da terra eram atualizadas tanto pelo modelo de DS como pelo modelo celular. As alterações baseadas em DS eram controladas pelos valores de probabilidade e do custo desta conversão. O modelo celular fornecia valores de pressão de crescimento de ocupações vizinhas, que também determinavam as conversões de uso da terra. Esta característica de alimentação de dados, que é realizada de forma bidirecional entre a estrutura celular e a estrutura de DS, é conhecida como abordagem *tight-coupling* (FIGURA 2.10). Tanto o modelo de Voinov et al. (1999) como o de Sklar et al. (1995) e Costanza et al. (1990) são operados sob esta lógica.

Outro modelo deste segmento e que é amplamente conhecido na literatura foi o desenvolvido por Engelen et al. (1995), o SimLucia. Este modelo teve como objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre o meio físico e sócioeconômico até 2030 na ilha de Santa Lucia no Caribe. O SimLucia

consiste em duas estruturas que foram denominadas de macroescala e microescala. A microescala se refere à representação do terreno em termos de uso e cobertura em uma estrutura celular, operada sob a lógica de AC. A macroescala se refere ao modelo operado sob DS, abarcando três subsistemas: natural, social e econômico. O submodelo natural considera as mudanças do nível do mar e temperatura, e seus efeitos na perda de área seca, na precipitação, frequência de tempestades e demandas externas por serviços e produção. O submodelo social considerou a demografia, resultante das taxas de nascimento, mortalidade e migração. O submodelo econômico teve grande dependência dos outros dois submodelos, relacionando o grau de riqueza e demanda de habitação e demandas externas, além de ser abastecido e abastecer o modelo de microescala em relação às possibilidades e taxas de ocupação, respectivamente. Desta forma, mudanças em atividades econômicas e na demografia no modelo macro implicariam no montante de área necessária para suprir tais atividades no modelo espacial. Por sua vez, mudanças na produtividade ou nível de densidade populacional por setor, acarretariam novas demandas de área para o modelo macro (ENGELEN et al., 1995; WHITE et al., 2000). Outras aplicações e modelos podem ser citados na abordagem *tight-coupling*, tais como: Fitz et al. (1996) utilizando uma vertente do CELSS, He et al. (2004), Ahmad e Simonovic (2004), e Fearnside et al. (2009) utilizando o programa Dinamica EGO.

Em relação aos modelos baseados em regras que não mantêm alimentação de dados de forma unidirecional entre a estrutura celular e a estrutura de DS são conhecidos como *loose-coupling*. Geralmente, estes modelos utilizam a estrutura de DS de forma top-down, ou seja, esta estrutura somente possui saídas para a estrutura celular, cujos dados não alimenta a estrutura de DS. Um dos modelos mais conhecidos neste segmento é desenvolvido por Verburg et al. (2002), denominado (Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent) CLUE-S. Trata-se de um modelo desenvolvido a partir de seu antecessor CLUE, cujos parâmetros eram aplicados para regiões de grande

extensão, com pixels de grandeza superior a 1 x 1 km (VERBURG et al., 2002). O módulo não espacial está relacionado às demandas do uso da terra, cujo cálculo é realizado por DS conforme cada caso de estudo e cenário (VERBURG; VELDKAMP, 2004). O módulo espacial é estocástico e trata da transição de cada pixel de uma classe para outra. Para tanto, é necessário a definição pelo usuário acerca das possibilidades de conversão de uso e cobertura da terra. A execução do cálculo da probabilidade total da classe i para a classe u ($TROP_{i,u}$) refere-se à soma da probabilidade de mudança de classe calculada por regressão logística ($P_{i,u}$), pela elasticidade de conversão de classe ($ELAS_u$) e pela variável iterativa ($ITER_u$) (Equação 2.1). A $ELAS_u$ é ajustada pelo usuário e significa o grau de impedimento de ocorrer uma alteração de uma classe para outra classe, varia de 1 (maior impedimento) a 0 (sem impedimento). A $ITER_u$ trata-se de um ajuste que é realizado pelo próprio modelo para atualizar a quantidade de demanda de conversão para cada classe em cada unidade de tempo, até que seja atendida toda a demanda de conversão que deve ser alocada para o módulo espacial.

$$TROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u \quad (2.1)$$

Luo et al. (2009) utilizaram o CLUE-S na modelagem do uso e cobertura da terra para uma área de grandes propriedades rurais na bacia hidrografia do rio Songong na China até o ano de 2030. O modelo de DS, elaborado pelo programa VENSIM, foi separado em duas partes, forças de tendência socioeconômicas e usos da terra. Somente os dados de uso da terra das datas que foram mapeados por sensoriamento remoto é que foram considerados para o modelo de DS. O modelo de DS procurou representar todos os fenômenos de demandas entre as variáveis disponíveis. Por exemplo: população demanda por alimentos, residência e transporte, estes por sua vez demandam por tipos de usos da terra específicos, ocorrendo uma diferença entre suprimento e demanda entre terras agricultáveis, residenciais e industriais que, por sua vez, informa dados de retorno ao estoque de população

(aumento ou diminuição da mesma). O modelo por DS foi calibrado entre os anos de 1987 e 1998 e validado com os dados de 2004. A partir da validação realizada no modelo de DS, os autores consideraram três tipos de cenários para ano de 2030. O primeiro cenário considerou altas taxas de crescimento populacional, produto interno bruto, ajuste de mercado e progresso tecnológico (Cenário Econômico). O segundo cenário considerou condições semelhantes ao intervalo entre 2000 e 2004 (Cenário de Referência). E o terceiro cenário considerou condições moderadas de desenvolvimento econômico e populacional (Cenário Sustentável). Outras aplicações e modelos podem ser citados na abordagem *loose-coupling*, tais como: Verburg et al. (1999), Brown et al. (2000) e Soares-filho et al. (2004) utilizando o programa Dinamica EGO.

De acordo com Verburg e Overmars (2009) existem particularidades inerentes ao utilizar os modelos *tight-coupling* ou *loose-coupling*. A abordagem *loose-coupling* utilizando alimentação *top-down* é apropriada para usos da terra em que a demanda é determinada principalmente por questões exógenas à distribuição de seus usos, como, por exemplo, áreas agrícolas. Para dinâmicas de uso e cobertura da terra com áreas naturais (ou seminaturais), a abordagem *top-down* dificilmente irá determinar uma dinâmica coerente, haja vista que existe uma dinâmica mais intensa em nível local (ou celular), principalmente no caso de regeneração da vegetação natural. O resultado desta dinâmica, portanto, deve reabastecer o modelo de macroescala, ou de DS. Deve-se ter em conta que o modelo de DS *top-down* pode ser mais flexível em termos de atribuições de variáveis extrínsecas ao modelo, podendo ter maior manejo quando o objetivo é estabelecer diferentes cenários, enquanto que na abordagem *bottom-up* o modelo de DS será regulado constantemente por estoques oriundos do modelo celular, o qual deve responder de uma forma adequada a um tipo de cenário esperado, uma vez que irá abastecer o modelo de DS nas sucessivas iterações.

Um dos programas de modelagem que mais tem sido desenvolvido e com diversas aplicações para a modelagem do uso e cobertura da terra no Brasil é

o Dinamica EGO. Ele possui uma abordagem estocástica por autômatos celulares com possibilidade de ser operado por modelagem baseada em processo.

2.3.3 Dinamica EGO

O programa Dinamica EGO, de download gratuito, foi desenvolvido em C++em seu núcleo, e a sua interface gráfica em JAVA, pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR – UFMG). Este programa, se comparado a outros programas de modelagem, é de fácil manuseio pelo fato de ter em seu ambiente de trabalho a presença de *functors* e *containers*, conforme Rodrigues et al. (2007). O seu intuito inicial foi o de modelar o desmatamento da Amazônia, e, para tanto, foram desenvolvidas rotinas para simular a construção de estradas secundárias e AC que deflagrassem os focos de desmatamento (SOARES-FILHO et al., 2002, XIMENES et al., 2008). Entretanto a sua utilização tem passado por diferentes áreas de aplicação: urbana (ALMEIDA et al., 2003), agricultura (MAEDA et al., 2011; MACEDO et al., 2013), conservação de unidades de conservação (ARCOVERDE et al., 2011), uso do solo em terras indígenas (VITEL et al., 2013), propagação do fogo (SILVESTRINI et al., 2009), entre tantos outros. A modelagem neste programa é exploratória e preditiva e é realizada com base no método bayesiano de pesos de evidência, AC e considerando funções estocásticas de alocação de transição.

O processo de modelagem no Dinamica EGO pode ser dividido em três etapas, além dos ajustes e entrada dos mapas: parametrização, calibração e validação, que, por sua vez, podem ser subdivididas em seis etapas (SOARES-FILHO, et al., 2002; SOARES-FILHO et al., 2009). A etapa de parametrização consiste em:

- a) gerar as matrizes de transição entre o mapa inicial (tempo 0) e o mapa final (tempo 1). São geradas a transição global (única) e a de transição para cada passo de tempo (multitemporal), dentre as

respectivas classes de uso e cobertura da terra, para obter o quantitativo anual de mudanças de área. Nesta etapa, existem trabalhos que têm utilizado modelos de DS para este tipo de cálculo (FEARNSIDE et al. 2009; SOARES-FILHO et al. 2004);

- b) conversão de variáveis estáticas contínuas para categóricas através de fatiamentos das mesmas (skeletons);
- c) cálculo dos pesos de evidência ($W+$) para cada evento e evidências sobre a estrutura dos skeletons.

A etapa de calibração consiste em:

- a) geração dos coeficientes de Cramer e Joint Information Uncertainty (JIU) para avaliação da interdependência entre variáveis, e;
- b) ajuste dos algoritmos de transição disponíveis no Dinamica EGO, *expander* e *patcher*. O *expander* considera o crescimento de áreas contínuas, enquanto o *patcher* considera o crescimento de área por ilhas.

A etapa de validação consiste em comparar a simulação com o mapa real do tempo 1. A simulação é gerada em 10 vezes, para que a particularidade aleatória do modelo seja verificada nos mapas simulados. Os dez modelos gerados são avaliados segundo o critério de validação pelo cálculo do Índice de Similaridade *Fuzzy* (SOARES-FILHO et al. 2002). A seguir, serão detalhadas estas etapas.

O programa Dinamica EGO, em seu processamento padrão, parte do pressuposto de que existe a tendência de estacionariedade das taxas de transição de uso e cobertura da terra para cada tempo individual. Assim, é gerada uma matriz estacionária para cada tempo discreto de simulação - matriz de transição multitemporal. Tais taxas são extraídas de matrizes de transição entre mapas conhecidos final e inicial - matriz de transição global. Estas taxas

podem ser consideradas como probabilidades de transição de um período, independentemente de probabilidades anteriores, e atendem aos requisitos de discretização e estocasticidade. Estas características reunidas viabilizam a utilização de modelos de cadeia de Markov de primeira ordem para uso e cobertura da terra (BAKER, 1989; LAMBIN, 1994). O Dinamica EGO considera, em seu processamento padrão, um modelo markoviano com o pressuposto da estacionariedade de transição ou homogeneidade temporal (cadeia de Markov ergódica). Portanto, no cálculo das matrizes multitemporais, utiliza-se do cálculo de Bell e Hinojosa (1977), os quais trataram o estado da cadeia de Markov em um equilíbrio hipotético futuro por um método associado a principais componentes (ALMEIDA, 2003). Neste cálculo, a matriz de transição multitemporal (MT) é igual ao produto dos autovetores da matriz global (H) pelos autovalores da matriz global (V) elevado à $1/n$ passos de tempo de simulação e pela matriz inversa dos autovetores da matriz global (H^{-1}), conforme a Equação 2.2:

$$MT = H * V^{\frac{1}{n}} * H^{-1} \quad (2.2)$$

O programa Dinamica EGO, além de operar com os mapas de uso e cobertura da terra, denominados mapas dinâmicos, também possibilita a entrada de mapas auxiliares que contribuem no cálculo dos pesos de evidência, configurando parte das variáveis exógenas neste cálculo (ou variáveis explicativas). Estes mapas são denominados mapas estáticos e se dividem em mapas discretos e contínuos. Os mapas estáticos discretos se referem a situações em que exista um tipo de restrição ou permissão do uso e cobertura da terra, conforme legislação ou características naturais do sítio. São exemplos deste tipo de mapas: mapa de solos, Unidades de Conservação, Áreas de Preservação Permanente, entre outros. Os mapas estáticos contínuos retratam variáveis que têm por sua própria natureza um gradiente de valores contínuos ou o cálculo de sua distância denota uma força gravitacional de atração ou

retração em relação às classes de uso e cobertura envolvidas. São exemplos deste tipo de mapas: declividade, altimetria, distância a estradas, distância a infraestruturas, distância às classes de uso e cobertura, entre outros. Especificamente, o mapa de distância às classes de uso e cobertura é atualizado pelo programa Dinamica EGO a cada iteração do crescimento simulado destas classes, não havendo necessidade de que o usuário o gere como variável exógena ao modelo. Este mapa pode ser denominado como mapa dinâmico de distâncias e é tratado como uma variável explicativa. Esta atualização a cada iteração traz o benefício de que as previsões acompanhem a própria evolução das classes envolvidas. A Figura 2.11 apresenta um esboço da entrada destes mapas visando gerar o mapa de probabilidade de transição relativo a uma determinada mudança.

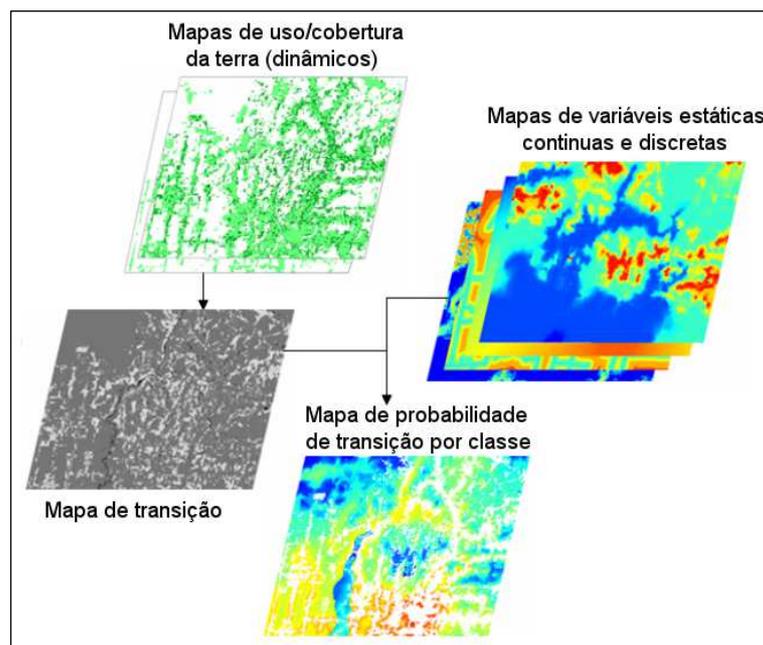


Figura 2.11 - Esboço dos mapas de entrada para gerar o mapa de probabilidade de transição de uma determinada classe.

Fonte: Modificado de SOARES-FILHO et al. (2009).

Para a geração do cálculo dos pesos de evidência, é preciso que todos os mapas envolvidos sejam discretos. Para tanto, é necessário que os mapas

estáticos e dinâmicos contínuos sejam fatiados conforme seus respectivos intervalos de valores. Para este processo, a Dinâmica EGO se baseia na técnica de Agterbeger e Bonham-Carter (1990). Este procedimento realiza o fatiamento das variáveis contínuas para cada transição de classes ou evento (D). O fatiamento é realizado a partir de um incremento constante no eixo x do histograma de cada mapa contínuo (FIGURA 2.12). Geralmente, adota-se a resolução espacial no caso de variáveis de distâncias e valores quaisquer para outro tipo de variável, por exemplo, declividade (NOVAES, 2010). Para cada incremento, há representação de um buffer (N_x), por exemplo, de 0 a 15 m, em que consta a quantidade de pixels da variável contínua (A_n) e um número de pixels da ocorrência da transição ou evento (dn). As quantidades de A_n e dn são obtidas através da sequência ordenada de buffers $N(x_{\text{mínimo}} + nDx)$. Para cada buffer, são calculados os pesos de evidência positivos, cujo cálculo será explicado mais adiante. No eixo y , plota-se, para cada número acumulativo de pixels (A_n) por incremento, um Y_n que corresponde ao produto entre A_n e o produto do número de Euler pela exponenciação do peso positivo e^{w^+} dentro do correspondente buffer. A Figura 2.12 apresenta uma sequência de buffers plotada sobre A_n e outra por $A_n \cdot e^{w^+}$. Para cada Dx (distância entre dois pontos no eixo x) um novo ponto de quebra será atribuído toda vez que um ângulo entre a reta v e v' (dois vetores que ligam o ponto atual ao último ponto, e o último ponto a seu antecedente, respectivamente) ultrapasse o ângulo de tolerância ft . Se atribuirmos um ft maior, diminui-se o número de intervalos e, conseqüentemente, o mapa da variável contínua para uma determinada transição será menos fatiado. O resultado desta etapa na Dinâmica EGO é conhecida como *skeletons*.

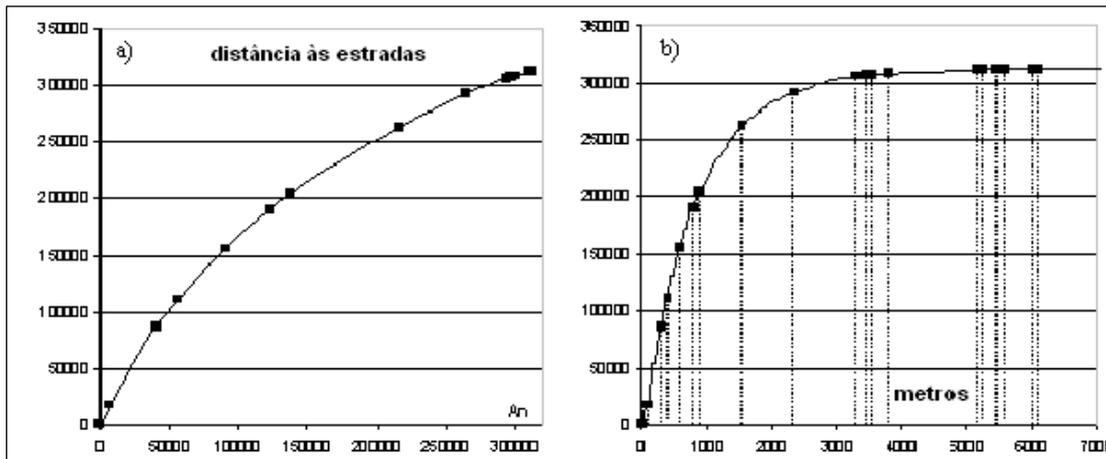


Figura 2.12 - Histograma de uma variável contínua plotada com An (à esquerda) e com $An \cdot e^{w^+}$ (à direita).
 Fonte: Modificado de SOARES-FILHO et al. (2009).

Uma vez fatiados os mapas contínuos, calculam-se pesos de evidência para cada intervalo discreto dos mapas de variáveis em uma dada transição, representando as áreas mais favoráveis para que uma mudança ocorra. O peso de evidência decorre do método bayesiano (Bonham-Carter, 1994; ALMEIDA, 2003) o qual foi desenvolvido para explicar a probabilidade de que um evento possa acontecer dada a presença de uma evidência, como, por exemplo, o evento da transição pastagem para cana-de-açúcar (evento “C”) acontecer dada a proximidade de uma estrada (variável explicativa “d”), se daria conforme a Equação (2.3), a qual também poderia também ser formulada conforme a Equação 2.4.

$$P(C/d) = \frac{P(C \cap d)}{P(d)} \quad (2.3)$$

$$P(C/d) = \frac{P(C) \cdot P(d/C)}{P(d)} \quad (2.4)$$

Os algoritmos dos pesos de evidência, apesar de seguirem o teorema de Bayes, utilizam o conceito de odds. Odds é a probabilidade de um evento

ocorrer pela razão do mesmo não ocorrer, configurando a seguinte Equação 2.5, no caso da probabilidade “C” e evidência “D”:

$$\frac{P(C/d)}{P(\overline{C}/d)} = \frac{P(C) \cdot P(d/C)}{P(\overline{C}) \cdot P(d/\overline{C})} \quad (2.5)$$

Se substituirmos odds na Equação 2.5, segue o seguinte resultado na Equação 2.6:

$$O(C/d) = O(C) \cdot \frac{P(d/C)}{P(d/\overline{C})} \quad (2.6)$$

No método dos pesos de evidência, é aplicado o logaritmo natural em ambos os lados da Equação 5, sendo que o peso de evidência é conhecido como o logaritmo do termo da razão da Equação 2.7, ficando:

$$\text{logit}(C/d) = \text{logit}(C) + W^+ \quad (2.7)$$

Considerando que W^+ é o Peso de Evidência da ocorrência do evento C , dada uma evidência d , a probabilidade a posteriori de uma transição t_1 para t_2 , dado um conjunto de evidências (d, e, f, \dots, n) , é expressa conforme a Equação 2.8 (SOARES-FILHO et al., 2009):

$$P(t_1 \rightarrow t_2 / d \cap e \cap f \dots \cap n) = \frac{e^{\sum w_n^+}}{1 + e^{\sum w_n^+}} \quad (2.8)$$

Conforme o teorema de Bayes, para a alocação dos pesos de evidência em cada transição de classes e em suas respectivas evidências (ou faixas de variáveis), deve-se considerar que as evidências sejam independentes entre si.

O primeiro procedimento na fase de calibração do modelo é analisar se existe alguma variável que apresente associação ou dependência espacial em relação à outra, haja vista que no método bayesiano pressupõe-se que as

variáveis sejam independentes. No caso de existir, deve-se eliminar uma das variáveis ou combinar com uma terceira (GODOY; SOARES-FILHO, 2007). O Dinamica EGO faz uso de métodos de análise de interdependências entre as variáveis, dentre eles: o Índice de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (Joint Information Uncertainty – JIU), de acordo com Bonhan-Carter (1994). O índice de Cramer considera medidas absolutas de área das classes e a JIU considera valores percentuais e constitui-se em uma medida do grupo das entropias de correlação entre as variáveis (ALMEIDA, 2003).

A geração dos cálculos, de ambos os índices citados, são baseados nos valores de área resultante da tabulação cruzada entre os pares de mapas de variáveis, ou seja, matriz T com elementos T_{ij} . Os totais marginais de T são definidos como T_i para a soma da i -ésima linha, T_j para a soma da j -ésima coluna, e $T_{..}$ para o grande somatório de linhas e colunas.

O desenvolvimento do índice de Cramer parte da premissa de que os mapas serão mais independentes entre si quando os valores de T_{ij} forem mais próximos aos valores de área esperada em cada categoria de sobreposição (T_{ij}^*), que é dado pelo produto entre os totais marginais, dividido pelo somatório total, conforme Equação 2.9:

$$T_{ij}^* = \frac{T_i \cdot T_j}{T_{..}} \quad (2.9)$$

O valor esperado pode ser comparado com o valor observado, de forma a avaliar o grau de independência entre os mapas. A expressão $(\text{observado} - \text{esperado})^2 / \text{esperado}$ cumpre este papel e é traduzida pela Equação 2.10, do coeficiente do qui-quadrado (χ^2):

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(T_{ij} - T_{ij}^*)^2}{T_{ij}^*} \quad (2.10)$$

Contudo, quando as áreas observadas tornam-se cada vez mais diferentes das esperadas, a equação do qui-quadrado cresce e possui limites superiores variáveis. O Índice de Cramer (V) pode controlar esta situação e é então definido por (BONHAM-CARTER, 1994), conforme Equação 2.11.

$$Cramer(V) = \sqrt{\frac{x^2}{T_{..} \cdot M}} \quad , \quad (2.11)$$

em que M é o mínimo do menor número de linhas ou colunas, subtraído de 1 grau de liberdade.

Por outro lado, o cálculo do Índice de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty – JIU*) é baseado nas proporções de área p , o que faz com que este índice tenha vantagem sobre os índices baseados no coeficiente do qui-quadrado, uma vez que não é afetado pelas unidades de medida de área (BONHAM-CARTER, 1994). Assim, as proporções unitárias resultam em $p_{ij} = T_{ij} / T_{..}$, e as proporções marginais são iguais a $p_i = T_i / T_{..}$ e $p_j = T_j / T_{..}$. Recordando, o índice JIU faz parte das medidas de entropia. A entropia para cada mapa A e B será dada conforme as Equações 2.12 e 2.13, respectivamente:

$$H(A) = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln p_i \quad (2.12)$$

$$H(B) = - \sum_{j=1}^m p_j \cdot \ln p_j \quad (2.13)$$

Sendo \ln o logaritmo natural, se combinarmos as duas entropias, $H(A,B)$, a entropia conjunta se dá conforme a Equação 2.14.

$$H(A, B) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (2.14)$$

As equações de entropia citadas fazem parte da equação do JIU entre A e B, que se dá conforme a Equação 2.15:

$$JIU(A, B) = 2 \cdot \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A, B)}{H(A) + H(B)} \right] \quad (2.15)$$

Ambos os índices variam de 0 a 1, sendo que valores mais próximos a 1 denotam maior interdependência entre duas variáveis. Valores menores do que 0,5 podem ser considerados de interdependência desprezível (Bonhan-Carter, 1994). Mediante tais resultados, é possível a exclusão das variáveis interdependentes. Uma vez realizado este procedimento, os passos de parametrização devem ser realizados novamente com as variáveis independentes.

O segundo passo na Calibração é o ajuste das funções *patcher* e *expander*, as quais caracterizam as funções de transição do Dinamica EGO. A função *expander* corresponde à expansão (ou contração) de manchas previamente existentes de uma certa classe de uso ou cobertura da terra (ALMEIDA, 2003), enquanto que a função *patcher* corresponde à expansão (ou contração) de manchas em áreas ainda não existentes de uma certa classe de uso e cobertura da terra. Desta forma, para cada transição, deve-se atribuir um percentual de *expander* e *patcher*, tendo em vista que eles são complementares (SOARES-FILHO et al., 2002). Ambas as funções utilizam um mecanismo estocástico na escolha de pixels a serem convertidos de uma classe a outra (SOARES-FILHO et al., 2002). Este método consiste, para cada transição de classes, na seleção de uma quantidade de pixels de maior

probabilidade. Estes pixels são arranjados em um vetor de forma decrescente, onde ocorre uma seleção aleatória dos pixels que terão transição de classe, dentro de um grau de aleatoriedade pré-estabelecido. Este procedimento é uma forma que o programa adota para que não haja distorções regionais na transição entre classes, tendo em vista que a seleção dos pixels de maior probabilidade é realizada de forma sequencial a partir do canto superior esquerdo até o canto inferior direito da matriz do mapa. Para que ocorra de fato a transição de classe de um pixel, também é verificado se o mesmo atende ao critério da função *expand*. A cada iteração, se sobraem pixels que não atendam a este critério, os pixels seguintes deverão ser selecionados, seguindo-se a sequência pré-estabelecida pela função *patch*. Este procedimento é realizado por iterações até que todos os pixels de uma determinada transição sejam convertidos, segundo o montante de área definido pela matriz de transição e considerando-se as respectivas proporções de *expand* e *patch* (SOARES-FILHO et al., 2002, ALMEIDA, 2003). A função *expand* é realizada em uma janela 3 x 3 células, em que, no caso da ocorrência de pelo menos 4 células de uma célula da classe j a sua probabilidade inicial $P(ij)(xy)$ será conservada, caso contrário, sua probabilidade final $P'(ij)(xy)$ sofrerá uma redução pelo produto da quantidade de células da classe j dividido por 4, conforme a Equação 2.16 (SOARES-FILHO et al., 2002). Este procedimento garante que em pelo menos 50% das células vizinhas de uma classe j possa ocorrer transição (Figura 2.13).

$$\text{If } n_j > 3 \text{ então } P'(ij)(xy) = P(ij)(xy) ,$$

$$\text{se não } P'(ij)(xy) = P(ij)(xy) \cdot \frac{n_j}{4} \quad (2.16)$$

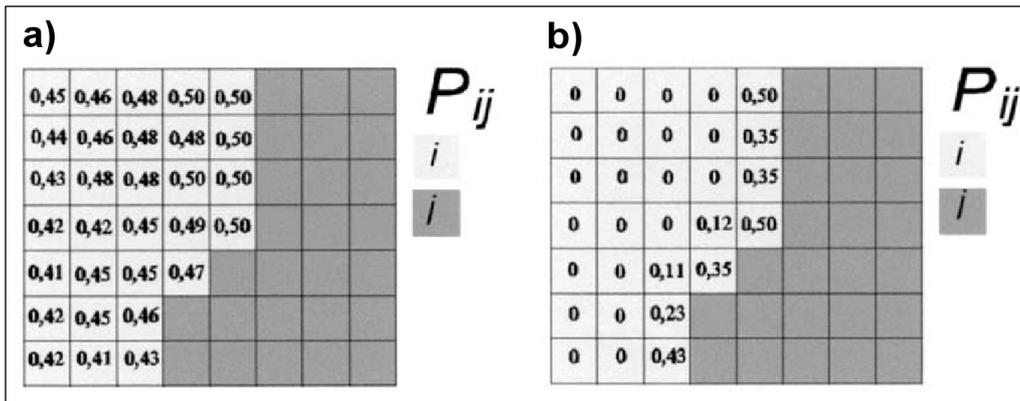


Figura 2.13 - Matriz de probabilidades antes da convolução pelo Expander (a). e após a convolução pelo Expander (b).
 Fonte: Modificado de SOARES-FILHO et al. (2002).

A função patcher consiste, primeiramente, na seleção dos pixels de uma classe com alta probabilidade de transição, segundo o procedimento estocástico, e sem nenhum outro vizinho desta mesma classe em uma vizinhança 3 x 3 (pixel núcleo). Dada esta ocorrência, os pixels vizinhos com maior probabilidade serão escolhidos para terem transição de classe (SOARES-FILHO et al., 2002) (FIGURA 2.14). A formação de novas manchas no Dinamica EGO obedece a critérios de isometria, tamanho e variância, os quais são definidos pelo usuário. Quanto maior for o valor da isometria, isto é, próximo a 2, maior será a coesão das manchas resultantes. O tamanho das novas manchas e franjas de expansão são definidos considerando-se uma distribuição de probabilidade lognormal, cujos parâmetros são determinados em função do tamanho médio e variância de cada tipo de mancha e franja de transição (SOARES-FILHO et al., 2009).

A validação de um modelo deve se basear em um contexto de vizinhança espacial. Existe o princípio de que há padrões similares e de concordância espacial nas proximidades de uma célula entre um mapa modelado e um mapa de referência (SOARES-FILHO et al., 2009). Há vários tipos de métodos de validação na literatura, como, por exemplo:

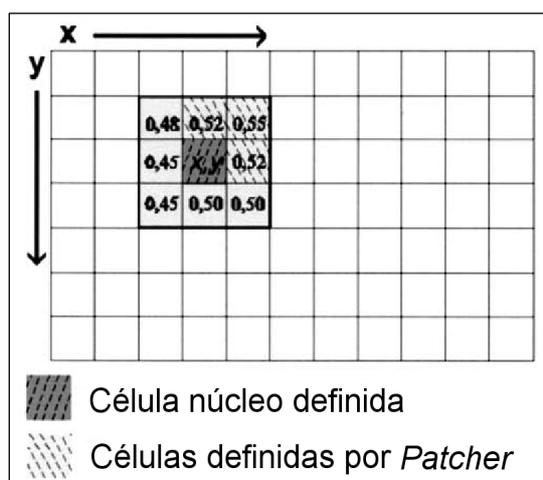


Figura 2.14 - Seleção de célula núcleo e as células vizinhas definidas de acordo com a função patcher.
 Fonte: Modificado de SOARES-FILHO et al. (2002).

Costanza (1989), Pontius (2002), Power et al. (2001), Hagen (2003). Ahmed et al. (2013) avaliaram diferentes formas de validação em 3 tipos de modelagem do uso e cobertura da terra e concluíram que a validação utilizando similaridade *fuzzy* apresentou a melhor capacidade em paisagens complexas e na distinção de erros gerais, em áreas menores e maiores. O Dinamica EGO utiliza um método de similaridade *fuzzy* (Hagen, 2003) modificado. Este método utiliza uma função de decaimento constante ou exponencial com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central (SOARES-FILHO, et al., 2009). Para tanto, primeiramente, os mapas simulado e o final são subtraídos do mapa inicial, resultando em dois mapas de diferença. Cada mapa resultante passará por uma filtragem de convolução. O cálculo do índice de similaridade *fuzzy* modificado ou adaptado utiliza janelas de filtragem múltiplas de 3x3 pixels (FIGURA 2.15) até 13x13 pixels. Neste método, um vetor exato é associado a cada pixel no mapa e possui tantos elementos quantos forem as classes de cobertura da terra dos mapas, assumindo 1 para a categoria = i, e 0 para categorias diferentes de i, no caso de decaimento constante. No método de decaimento exponencial, em que as categorias = i estejam em posições

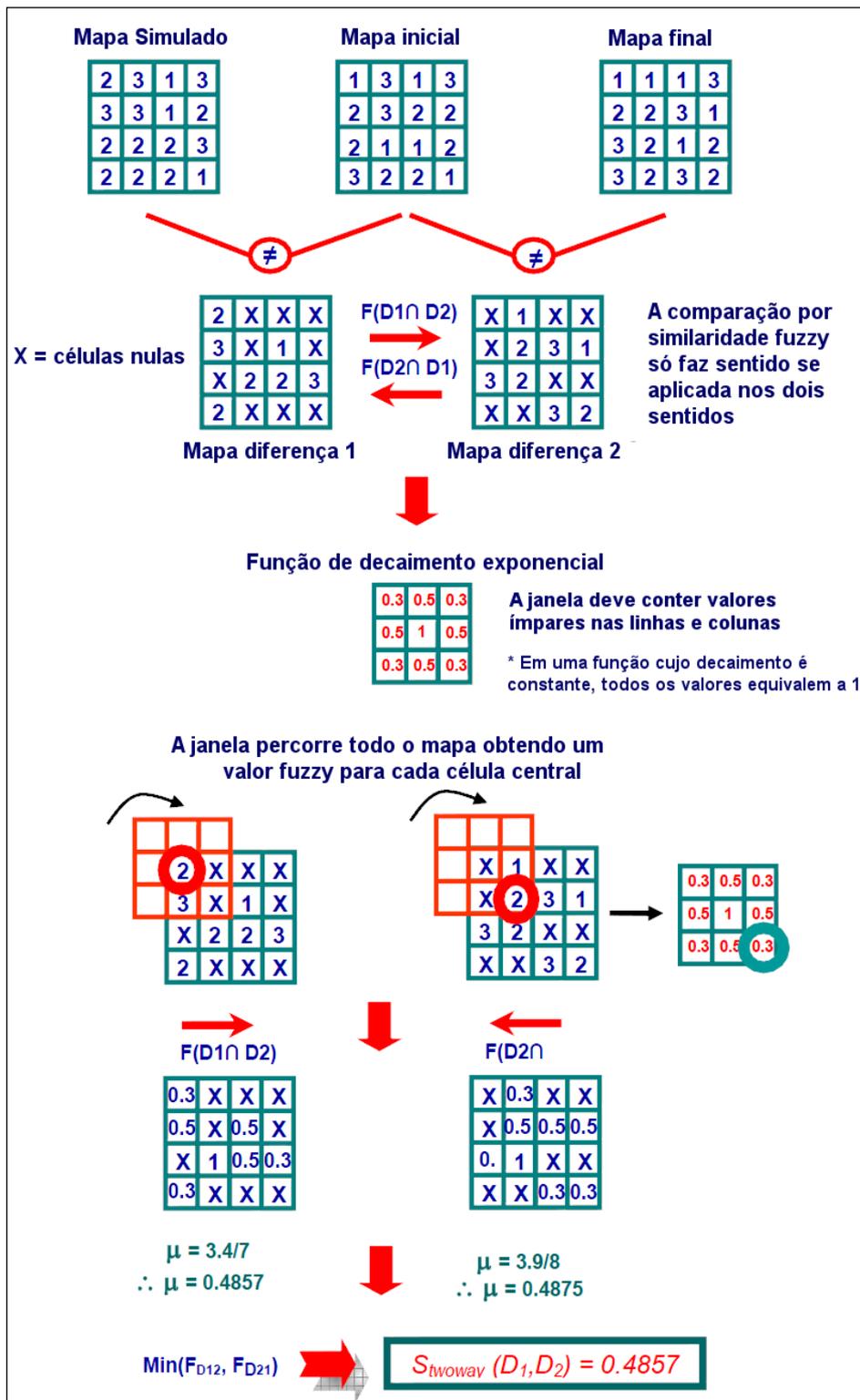


Figura 2.15 - Esquema da convolução pela janela 3 x 3 e do cálculo do índice de similaridade fuzzy adaptado, com decaimento exponencial.

Fonte: Modificado de SOARES-FILHO et al. (2009).

diferentes do centro da janela, devem ter seus valores atribuídos para $2^{-d/2}$, em que d é a distância em unidade de células de centroide a centroide, $d = 1$ para células na horizontal e vertical, e, na diagonal, $d = \sqrt{2}$ (NOVAES, 2010). O vetor *fuzzy* de vizinhança para cada pixel segue conforme Equação 2.17 e 2.18.

$$V_{vizinhança} = \begin{bmatrix} \mu_{vizinhança1} \\ \mu_{vizinhança2} \\ \vdots \\ \mu_{vizinhança_n} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\mu_{vizinhança_i} = \left| \mu_{crisp(i,1)} * m_1, \mu_{crisp(i,2)} * m_2, \dots, \mu_{crisp(i,n)} * m_n \right|_{Max} \quad (2.18)$$

Em que:

$\mu_{vizinhança_i}$ significa a pertinência para a categoria i dentro de uma vizinhança de N pixels (normalmente $N=n^2$)

$\mu_{crisp(i,1)}$ é a pertinência da categoria i para o pixel vizinho j , assumindo-se no vetor $crisp_i$ 1 para i , e 0 para categorias diferentes de $i (i \in C)$;

m_j é a pertinência baseada na distância do pixel vizinho j , em que m refere-se a uma função de decaimento da distância, que pode ser constante ou exponencial.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O critério de escolha da área de estudo foi delimitar uma região em que houvesse alta transição de classes de uso e cobertura da terra, sobretudo a da cana-de-açúcar. Aliado a este fator, o ideal seria que o levantamento contivesse um detalhamento maior da geometria dos talhões e um maior número de classes detectáveis por sensoriamento remoto. Considerando estes fatores, a área de estudo deveria ser de pouca extensão, além de estar situada em uma área de fronteira agrícola da cana-de-açúcar. O município de Quirinópolis, no estado de Goiás, compreende tais características, e, portanto, deu-se seguimento do trabalho neste município. Conforme a Figura 2.5 e a Tabela 2.2, do capítulo anterior, Quirinópolis apresentou a 3ª maior taxa de expansão da cana-de-açúcar do Brasil entre os anos de 2000 a 2011, com 11,34%; atrás do município de Conceição de Alagoas, em Minas Gérias, com 18,57%, e do município de Rio Brilhante, no Mato Grosso do Sul, com 15,51%. Contudo, Quirinópolis foi o que obteve maior expansão em um menor intervalo de tempo. De 2006 a 2011 foram registrados 48.000 hectares de área de cana-de-açúcar conforme o IBGE, sendo que antes deste período sequer havia plantio de cana-de-açúcar neste município.

Considerando que a modelagem dinâmica espacial do uso e cobertura da terra emprega o fator topológico de vizinhança de células e de mapas de probabilidades considerando distâncias, o ideal é que toda que vez que se trabalhe com tal técnica seja agregada uma área de contorno externa em torno da área de estudo a ser modelada (*buffer*). Este procedimento evita que a modelagem não sofra influência dos valores nulos limítrofes à área de interesse de estudo. No caso deste estudo, este *buffer* compreendeu uma faixa de 20 km em relação ao limite do município de Quirinópolis. Em termos de área, o município de Quirinópolis possui 378.475 hectares, que, somando-se à faixa de *buffer*, totaliza 1.108.486 hectares. Esta área total foi considerada como área

de estudo para todos os efeitos da metodologia, porém, para a apresentação dos resultados, a área de estudo compreendeu somente a área do município de Quirinópolis. A área de estudo está situada à sudeste do estado de Goiás, fazendo fronteira com o estado de Minas Gerais conforme Figura 3.1.

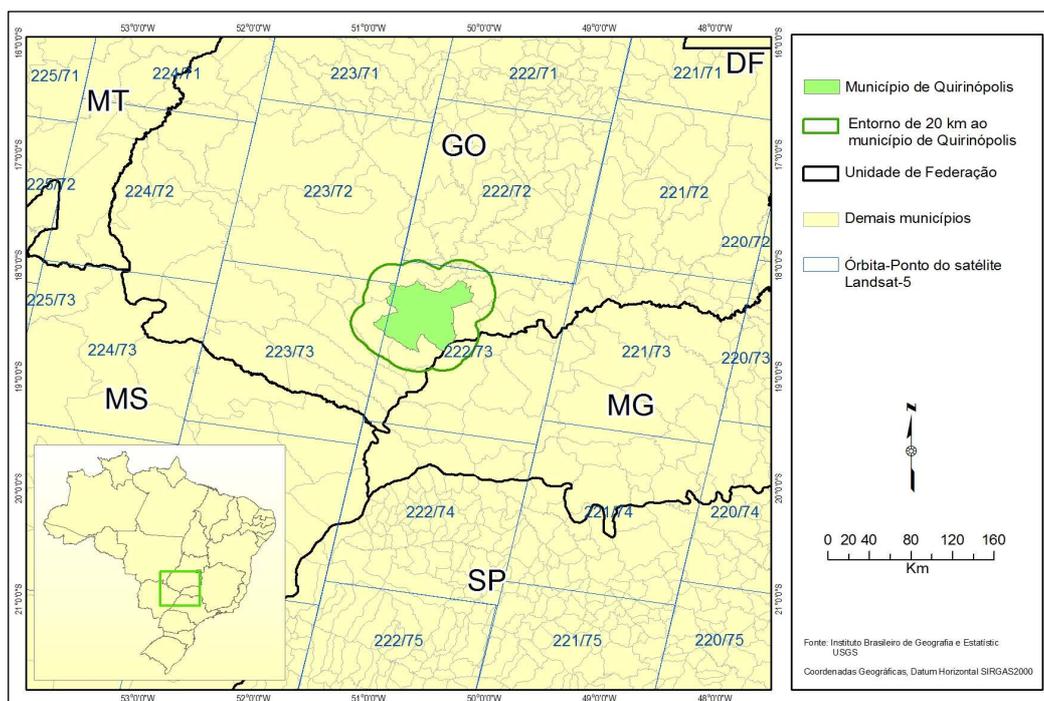


Figura 3.1 - Localização da área de estudo no país.

Na maior parte da área de estudo, predominam os Latossolos Vermelhos distroféricos em relevo plano a suave ondulado, Latossolos Vermelho-Amarelos em relevo suave-ondulado, e a oeste, há ocorrências de Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos (IBGE, 2001). Estes solos são propícios e amplamente utilizados para o plantio da cana-de-açúcar. De acordo com dados do INMET (2009), a área de estudo possui uma precipitação acumulada que varia de 1.650 mm a 1.850 mm ao ano, sendo que no período de estiagem, de maio a agosto, a precipitação média acumulada é de 120 mm. As temperaturas neste período variam entre 20 °C e 24 °C, o que está um pouco além do recomendado para o plantio da cana-de-açúcar (RODRIGUES, 1995). Conforme os dados de declividade, extraídos das imagens de altimetria do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da área de estudo, 98,1 % das

terras agricultáveis são passíveis de mecanização (até 12% de declividade). A partir destes dados, pode-se dizer que a área de estudo tem condições físicas de expansão da cana-de-açúcar.

Em relação à capacidade de moagem de cana-de-açúcar na área de estudo (inclusive com o *buffer* de 20 km), até o ano de 2011 havia duas usinas, a usina Boa Vista, do grupo São Martinho e Petrobrás, e a usina São Francisco, do grupo USJ e Cargil (CRUZ; ANTUNES, 2011). Entretanto, outras usinas também têm exercido influência na expansão da cana-de-açúcar na área de estudo, sendo as principais: Vale do Verdão, Panorama, Rio Claro e Vale do São Simão, conforme a Tabela 3.1 e a Figura 3.2. Conforme esta tabela, a capacidade de moagem média das usinas vão de 2 a 4,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar ao ano, sendo que a usina Boa Vista tem a perspectiva de se tornar a maior usina de processamento em etanol de cana-de-açúcar no ano de 2015, quando alcançaria 7 milhões de toneladas ao ano (MAGOSSO, 2012). Vale salientar que no estado de Goiás, no ano safra 2010/2011, do total da cana-de-açúcar processada nas usinas, quase 20% destas foram provenientes de terceiros (CONAB, 2013), sendo que esta proporção na safra 2007/2008 era menor que 9% (CONAB, 2008). Entretanto, este dado destoa em relação aos dados do estudo que Filho e Marin (2012) realizaram no município de Quirinópolis, cujo percentual da cana-de-açúcar proveniente de fornecedores foi de 50%, o que é um numero bem significativo. De qualquer forma, a informação explícita em ambos os estudos é a participação crescente de fornecedores de cana-de-açúcar no município de Quirinópolis.

Atualmente, os modais de escoamento de cana-de-açúcar, etanol e açúcar na área de estudo são rodovias e hidrovia. As rodovias que cortam a área de estudo são a BR-483, GO-164, GO-206, BR-364, GO-501, BR-452, GO-410. Estas rodovias são pavimentadas e responsáveis pelo acesso aos canaviais, às usinas e pelo escoamento do etanol anidro e hidratado às distribuidoras.

Tabela 3.1 – Relação de usinas de moagem e processamento de cana-de-açúcar na área de estudo.

| Usina | Ano de Operação | Município | Capacidade média de operação (mil ton/ano) | Fonte |
|--|-----------------|--------------------|--|---|
| Vale do Verdão (Vale do Verdão) | 1982 | Turvelândia (GO) | 3500 | Franco e Assunção (2011) UDOP (2008) |
| São Francisco (USJ e Cargil) | 2007 | Quirinópolis (GO) | 4500 | USJ (2013) |
| Panorama (Vale do Verdão) | 2007 | Itumbiara (GO) | 2300 | Lima (2010) |
| Boa Vista (São Martinho e Petrobrás) | 2008 | Quirinópolis (GO) | 4000 | Ricci (2013) |
| Rio Claro (ETH) | 2009 | Caçu (GO) | 3000 | Magossi (2009) |
| Cia Energética Vale do Simão (Andrade) | 2010 | Santa Vitória (MG) | 2000 | Informativo (2010) |

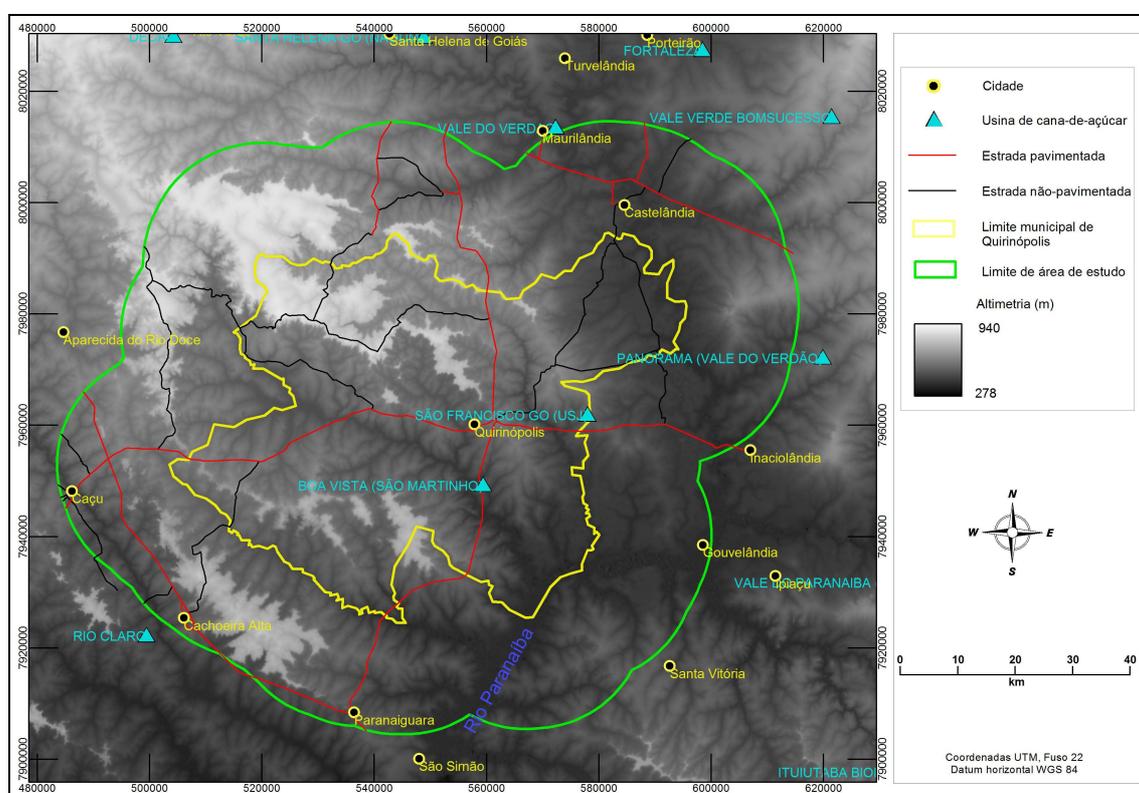


Figura 3.2 – Área de estudo.

A hidrovía Tietê-Paraná localiza-se próxima à área de estudo, no rio Paranaíba, fazendo divisa entre os estados de Goiás e Minas Gerais. Esta hidrovía tem início no terminal fluvial de São Simão, à jusante da barragem da hidroelétrica São Simão, com acesso à cidade de Quirinópolis pela rodovia BR-483. A hidrovía tem sido utilizada para o escoamento da produção de açúcar. Ainda, existe a construção de modal ferroviário que irá cruzar a área de estudo de

norte a sul, com pátios de carregamento nos municípios de Santa Helena e São Simão, ao norte e ao sul da área de estudo (VALEC, 2013). Trata-se do trecho ferroviário EF-151 vinculado ao plano de construção da Ferrovia Norte-Sul, do Programa de Aceleração do Crescimento 2 (PAC 2), conforme sanção da Lei nº 11.772 de 2008. Considerando os fatores expostos, a área de estudo delimitada possui fatores físicos, históricos, estratégicos e logísticos favoráveis à dinâmica de expansão da cana-de-açúcar.

3.2 Material

Este trabalho realizou a modelagem dinâmica espacial a partir do programa de modelagem Dinamica EGO. Para tanto, foi necessário a geração de mapas de uso e cobertura da terra e de mapas de variáveis estáticas, contínuas ou discretas, visando à geração das transições de uso e cobertura da terra e dos mapas de probabilidade. Para tanto, foram escolhidas datas de referência para a geração de tais informações. Neste estudo, foram escolhidas três datas de referência, 2005, 2008 e 2011. Considerando que o foco do estudo é a agricultura, os anos civis citados foram transformados para os seguintes anos-safra, respectivamente: 2004/2005, 2007/2008 e 2010/2011. Consideradas tais referências, foram tratados dois períodos de transição: 2005 a 2008, e 2008 a 2011.

A geração dos mapas de uso e cobertura da terra foi obtida a partir de classificações utilizando, dentre outros, imagens de sensoriamento remoto. Considerando que o eixo temático do trabalho foi a agricultura, foram utilizadas imagens de um sensor com alta repetitividade e histórico de imageamento e, associado a estes fatores, que contivesse uma resolução espacial média. Desta forma, optou-se por utilizar as imagens do sensor TM, a bordo do satélite Landsat 5, com lançamento desde o ano de 1984, repetitividade de imageamento a cada 16 dias e resolução espacial de 30 m. Conforme a Figura 3.1, apresentada acima, a área de estudo englobou 4 órbitas/ponto de imageamento deste satélite: 223/072, 222/072, 222/073 e 223/073. As imagens

foram escolhidas e coletadas no catálogo de imagens de sensoriamento remoto da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>). A escolha das datas das imagens foi baseada em critérios em que pudessem ser deflagradas diferentes situações de cobertura, tipicamente característica a uma determinada cultura agrícola em um talhão agrícola. Portanto, este estudo considerou que seria mais apropriado que fossem coletadas imagens dos seguintes períodos para cada ano civil de referência: período de estiagem do ano civil anterior (seco), período variando de chuvoso a seco do ano civil de referência (chuvoso-seco) e período de estiagem do ano civil de referência (seco). Foram coletadas as imagens que tivessem o mínimo de nebulosidade possível dentro destes períodos. A Tabela 3.2 apresenta as imagens utilizadas com suas respectivas órbitas/ponto, data de imageamento e ano de referência ao qual fazem parte. O ano de referência mais prejudicado em relação à disponibilidade de imagens sem nebulosidade foi do período chuvoso-seco no ano de 2008.

Tabela 3.2 – Relação de imagens do sensor TM/Landsat-5 utilizadas no estudo, conforme anos de referência e períodos segundo pluviosidade.

| Ano Referênci a | Período | Órbita/Ponto Landsat 5 | | | |
|--------------------|---------------------|------------------------|---------|---------|---------|
| | | 222/072 | 222/073 | 223/072 | 223/073 |
| 2005 | 2004 (seco) | 13/set | 13/set | 04/set | 04/set |
| | 2005 (chuvoso-seco) | 09/abr | 09/abr | 02/mai | 11/fev |
| | 2005 (seco) | 16/set | 16/set | 22/ago | 22/ago |
| 2008 | 2007 (seco) | 22/set | 22/set | 13/set | 13/set |
| | 2008 (chuvoso-seco) | 19/mai | 04/jun | 24/abr | 24/abr |
| | 2008 (seco) | 24/set | 24/set | 14/ago | 14/ago |
| 2011 | 2010 (seco) | 29/ago | 29/ago | 05/set | 20/ago |
| | 2011 (chuvoso-seco) | 21/fev | 21/fev | 17/abr | 17/abr |
| | 2011 (seco) | 17/set | 01/set | 08/set | 08/set |

Com a finalidade de que a classificação do uso e cobertura da terra pudesse ser gerada sobre pixels com uma resolução espacial superior aos disponíveis nas imagens brutas do sensor TM/Landsat-5, obtendo, desta forma, maior detalhe geométrico, as imagens utilizadas foram reamostradas para 15 m de

resolução espacial. Esta reamostragem foi realizada através de método de restauração e interpolação, conforme Fonseca et al. (1993). Após este procedimento, foi realizado o registro destas imagens tomando como base as imagens já registradas disponíveis na Interface de dados de ciências da terra da *Global Land Cover Facility* da Universidade de Maryland (<http://glcf.umd.edu/>). Para tal tarefa, foi utilizado o polinômio de primeiro grau e interpolação pelo vizinho mais próximo, sendo utilizados no mínimo 12 pontos para o registro. Os registros foram gerados na tentativa de alcançar um resíduo médio quadrático inferior a 0,5 pixels. O sistema de coordenadas e datum horizontal para todas as imagens de saída foi, respectivamente, o Universal Transversa de Mercator (UTM), Fuso 22, e, WGS84. Após este procedimento, foi realizado mosaico entre as imagens das 4 órbitas-ponto que abrangem a área de estudo (considerando o *buffer*). Em seguida, foi aplicada máscara referente à área de estudo com *buffer*. Os pixels fora desta máscara foram considerados como nulos em todos os processos neste estudo, o que resultou em 49.225.726 pixels válidos, em um quadrante de 8.799 colunas por 7.334 linhas de pixels.

Além das imagens de satélite, para a classificação do uso e cobertura da terra, outros dados foram necessários para a geração dos mapas de variáveis estáticas, contínuas ou discretas, de forma que fosse viabilizada a modelagem dinâmica espacial. A geração do dado de Classificação, objetivo deste estudo, produz o dado de entrada para a modelagem, e portanto, será abordada na parte metodológica e de resultados. Os demais dados serviram como dado de processamento primário, para fim de geração dos mapas de variáveis. A Tabela 3.3 apresenta os dados que foram necessários para a geração dos mapas de entrada no programa Dinamica EGO.

A Tabela 3.3 – Relação dos dados utilizados para a elaboração do uso e cobertura da terra e para os mapas de variáveis estáticas para a entrada no programa Dinamica EGO.

| Dado Processado | Representação inicial | Base Primária | Fonte |
|-----------------|-----------------------|---------------|-------|
|-----------------|-----------------------|---------------|-------|

| | | | |
|---|---------------------|---|---|
| Classificação da cana-de-açúcar para cada ano de referência | Matricial | Mapeamento da cana-de-açúcar (Canasat) | Rudorf et al. (2010) |
| Classificação de outros usos e coberturas da terra para cada ano de referência (elaboração própria) | Matricial | Imagens TM/Landsat-5 e EVI-MODIS a partir do Laboratório Virtual de Sensoriamento Remoto (LVSR) | INPE (2013) e Freitas et al. (2011) |
| Localização de usinas de cana-de-açúcar existentes para cada ano de referência | Vetorial (ponto) | Localização de usinas de cana-de-açúcar ao redor de 150 km da cidade de Quirinópolis | ÚNICA e Canasat, e investigação própria |
| Mapa de solos | Vetorial (polígono) | Mapa de Solos (Escala 1:1.000.000 e 5.000.000) | RADAMBRASIL (1983), GOIÁS (2012) |
| Altimetria | Matricial | Modelo Digital do Terreno (TOPODATA) | Valeriano et al. (2009) |
| Declividade em percentual | Matricial | Modelo Digital do Terreno (TOPODATA) | Valeriano et al. (2009) |
| Hidrografia | Vetorial | Imagens TM/Landsat-5 e Modelo Digital do Terreno (TOPODATA) | INPE (2013) e Valeriano et al. (2004) |
| Estradas pavimentadas para cada ano de referência (investigação própria) | Vetorial (linha) | Imagens TM/Landsat-5 e imagens Google Earth | INPE (2013) e Google (2013) |
| Estradas não pavimentadas para cada ano de referência (investigação própria) | Vetorial (linha) | Imagens TM/Landsat-5 e imagens Google Earth | INPE (2013) e Google (2013) |

A localização das usinas de moagem e processamento da cana-de-açúcar foi editada em SIG a partir dos dados fornecidos pela Unica e Canasat, e com revisão e investigação própria em consulta a fontes de páginas WEB e imagens do Google Earth. Foram investigadas na internet todas as usinas em um raio de 150 km ao redor da cidade de Quirinópolis, sendo levantada a data de operação e localização das mesmas. O mapa de solos foi elaborado a partir do dado vetorial disponibilizado pelo Sistema de Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG) (GOIÁS, 2012), que compreende o levantamento do RADAMBRASIL (1983) junto com a parte do dado vetorial disponibilizado pelo IBGE (2001), contemplando a parte de Minas Gerais. O dado de altimetria foi atribuído diretamente à matriz do dado de Modelo Digital do Terreno (MDT) elaborado por Valeriano (2004) e disponibilizado na página (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>). O dado de declividade foi gerado no ArcGIS a partir do MDT, sendo apresentado em porcentagem. O dado de hidrografia foi gerado no programa Quantum GIS e Global Mapper. Tal execução foi realizada por edição vetorial a partir de interpretação das imagens TM/Landsat-5, cuja

quantidade de cursos editados tomou como parâmetro a malha hidrográfica resultante do Modelo Digital do Terreno (MDT), com resolução de 30 m, por Valeriano (2004). Esta malha foi gerada a partir do mapa de fluxo hidrológico do MDT, no ambiente do programa Global Mapper. Os cursos hidrográficos foram obtidos a partir do corte de 7.000 pixels (ou 21 hectares) como número máximo de pixels pertencentes a uma bacia hidrográfica para gerar um curso hidrográfico. As estradas pavimentadas e não pavimentadas foram editadas em conformidade com a geometria das imagens do Google Earth e conforme a informação temporal das imagens do sensor TM/Landsat. Cada data de referência do estudo detém seu quantitativo de estradas pavimentadas e não pavimentadas.

A parte metodológica deste estudo foi separada em duas partes, conforme os resultados, métodos para a geração da classificação de uso e cobertura da terra e métodos para a geração, entrada e processamento dos dados no Dinamica EGO.

3.3 Métodos para classificação de uso e cobertura da terra

Considera-se que toda escala possui um erro médio de representação no terreno. Este erro é igual ao produto da sua escala por um fator de erro padrão admissível (IBGE, 2013a). Tendo em vista estas premissas, e considerando que o menor comprimento gráfico que pode ser representado em um desenho é de 0,2 mm (erro padrão admissível) e o erro médio no terreno das imagens TM/Landsat-5 restauradas é o seu próprio valor de pixel, 15 m a escala máxima que podem ser enquadradas as classificações geradas neste estudo é de 1:75.000.

Considerando o foco deste estudo, foram levantadas as seguintes classes de uso e cobertura, para cada ano de referência, com as respectivas explicações e ressalvas:

- a) Cana-de-Açúcar: correspondendo à cana-de-açúcar expansão, soca, em reforma, e ,reformada;
- b) Cultura Anual: Talhões cujo principal uso é para cultura agrícola anual temporária de verão, com plantio nos meses de estiagem e desenvolvimento nos meses chuvosos;
- c) Cultura Irrigada: cultura agrícola sob irrigação por pivô central;
- d) Vegetação Florestal: trata-se de cobertura da terra com vegetação de porte arbóreo preservado, formando um conjunto de dossel contínuo;
- e) Corpo Hídrico: cursos de água, lagos, reservatórios ou lagoas;
- f) Pastagem/Outros: Trata-se de uma classe que possui uma mistura de coberturas de vegetação sub-arbórea, cujo uso principal está associado ao pastoreio de uso extensivo ou intensivo.
- g) Área Urbana: compreende a mancha urbana contínua referente a cidades, aglomerados rurais ou sede de distritos;
- h) Cultura Permanente: compreende o plantio da agricultura perene, conforme IBGE (2006), de espécies arbóreas para fim extrativista. Na área de estudo, há somente um tipo de ocorrência, a da seringueira para a produção de látex.

A classificação da área de estudo, nos seus respectivos anos de referência, foi realizada de forma híbrida, por etapas e obedecendo a uma hierarquia relativa às classes, ou seja, os conjuntos de pixels ou segmentos que fossem atribuídos a uma determinada classe não passariam para análise na etapa seguinte, e assim sucessivamente. A classificação seguiu a seguinte ordem de análise: 1ª: “Cana-de-Açúcar”, 2ª: “Área Urbana”; 3ª: “Corpos Hídricos”; 4ª: “Cultura Anual”, “Cultura Irrigada” e “Cultura Permanente”; 5ª: “Vegetação Florestal”, 6ª “Pastagem/Outros.

A 1ª ordem de classificação, referente às classes “Cana-de-Açúcar” foi realizada mediante a importação dos dados de classificação disponibilizados

pelo Projeto Canasat (RUDORFF et al., 2010). Os dados do Canasat, processados com resolução de 30 m, foram reamostrados para a resolução espacial das imagens deste estudo (15 m), procedendo-se aos ajustes necessários de borda, tendo em vista a nova informação das imagens restauradas.

Na 2ª ordem de classificação, delimitou-se a classe “Área Urbana por digitalização em tela através de fotointerpretação de imagens do período seco das respectivas datas de referência.

A 3ª ordem de classificação, relativa à classe “Corpo Hídrico”, foi executada mediante o auxílio de um fatiamento de imagem gerada pelo Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalised Difference Water Index* - NDWI, conforme Equação 3.1 (GAO, 1996). Considerando as bandas espectrais do sensor TM/Landsat-5 em relação aos comprimentos de onda estabelecidos no NDWI, as mais próximas a este índice, e que foram aplicadas neste estudo, são a banda 4 e a banda 5, com centro em $0,83 \mu m$ e $0,165 \mu m$, respectivamente. Desta forma, a banda 4 representou o comprimento de $0,86 \mu m$ e a banda 5 representou o comprimento de $1,24 \mu m$.

$$NDWI = \frac{\rho(0,86 \mu m) - \rho(1,24 \mu m)}{\rho(0,86 \mu m) + \rho(1,24 \mu m)} \quad (3.1)$$

Esse procedimento foi realizado na imagem de 2011 do período chuvoso-seco, pelo fato de haver maior ocupação de corpos hídricos naquele período em relação aos demais. Essa classe foi considerada para cada um dos anos de referência. Conforme definido na equação do NDWI, as imagens tiveram que ser transformadas para reflectância de superfície. Para tanto, escolheu-se as imagens correspondentes a data de passagem 21 de fevereiro de 2011, de órbitas-ponto 222/072 e 222/073, para serem convertidas para reflectância em nível de superfície. Tal tarefa foi realizada a partir de transformação por modelo de correção de transferência radiativa, utilizando o modelo “6S” (Second

Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum), conforme Vermote et al., (1997). As demais imagens, de órbita ponto 223/072 e 223/073, foram convertidas para reflectância aparente e retificadas radiometricamente em relação às imagens de reflectância de superfície, conforme a técnica proposta por Hall et al. (1991). Após o fatiamento da imagem produto do NDWI, foram realizados ajustes para manchas deste mapeamento tivesse uma área mínima de 1 hectare. Para tanto, o resultado da imagem fatiada foi passado por filtragem por convolução mediana, com janela de 5 x 5, e ajustes por edição matricial.

A 4ª ordem de classificação, correspondente às classes “Cultura Anual”, “Cultura Irrigada” e “Cultura Permanente”, foi realizada por meio de dois tipos de interpretação: (a) pela interpretação de imagens TM/Landsat-5 nas diferentes datas, e, (b) pela interpretação da série temporal do índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (HUETE et al., 1997), produto MOD 13Q1 do sensor MODIS a bordo do satélite TERRA, conforme consulta ao Laboratório Virtual de Sensoriamento Remoto (LVSR) (Freitas et al., 2011).

A interpretação de imagens TM/Landsat-5 foi realizada através da observação das mesmas em diferentes datas. Esse método conduz a um somatório de indícios que auxilia a tomada de decisão na identificação de culturas anuais, de irrigação (de inverno) e de cultura permanente, conforme cada período: (a) imagens do período de estiagem do ano anterior ao do ano civil de referência: apresentam talhões com preparo de solo ou presença de palhada, sendo um indício para a entrada de cultivos agrícolas anuais (pré-plantio); (b) imagens após o período de precipitação mais intenso (chuvoso-seco) do ano civil de referência: apresentam talhões em estágio de senescência de cultivos da safra principal ou de cultivos “safrinhas” (culturas anuais), sendo representados pela alta resposta na banda do infravermelho médio (*short-wave infrared* - SWIR) e do infravermelho próximo, respectivamente; (c) imagens do período de estiagem do ano de referência civil: apresentam talhões com palhada e talhões com presença de alto desenvolvimento vegetativo de forma localizada, apresentando, respectivamente, a colheita das culturas agrícolas “safrinhas” e

a presença de culturas agrícolas sob irrigação no referido ano. Em todas as imagens dos períodos citados, as áreas que se mostram com alta resposta na banda do infravermelho próximo, com aspectos de forma e textura característicos à cobertura de dossel arbóreo homogênea, levam ao indício de que nas mesmas ocorre a prática da cultura permanente.

A segunda interpretação, através do histograma histórico do índice EVI no LVSR, conduziu à revisão da classificação das culturas agrícolas anuais e irrigadas da primeira interpretação e, também, à verificação da permanência dos cultivos anuais. O critério de permanência de culturais anuais tem como justificativa o fato de que a introdução destas pode ser decorrente do manejo de gramíneas com o consórcio de leguminosas. Tanto no caso da cana-de-açúcar como das pastagens, sendo gramíneas, é comum o manejo com plantio de leguminosas durante uma safra para enriquecer o solo em nitrogênio. Sendo assim, não faria sentido classificar o manejo com leguminosas com ciclo de uma safra como uma classe de cultura agrícola anual, uma vez que essa classificação poderia ocultar o principal propósito de uso do talhão: o plantio de cana-de-açúcar ou a continuidade da pastagem (Adami et al., 2012). Sendo assim, adotou-se que uma cultura agrícola anual de verão somente poderia ser considerada como tal, caso a mesma estivesse presente por pelo menos duas safras anteriores ou posteriores em um determinado talhão, conforme Figura 3.3. Deve-se salientar que no último ano de referência deste estudo, 2011, a análise de permanência para safras posteriores a tal ano não foi possível, pelo fato de que o processamento dos dados do histograma de EVI no LVSR foi executado até 2011, exatamente durante a fase de realização deste estudo.

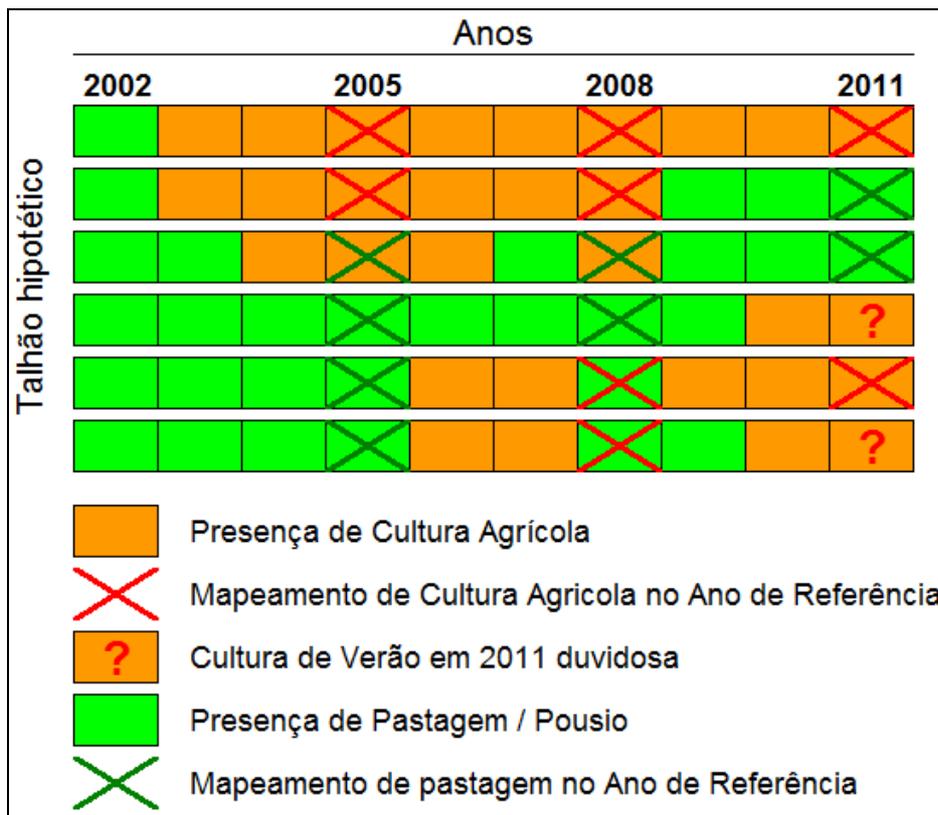


Figura 3.3 – Regra de decisão para classificação de “Cultura Anual”, segundo o critério de permanência.

A 5ª ordem de classificação, relativa às classes “Vegetação Florestal”, foi conduzida por meio de geração de imagem de subpixel probabilística (denominado mapa de regras). A geração do mapa de regras foi decorrente da coleta de amostras de treinamento de vegetação florestal natural nas imagens TM/Landsat-5. Foi escolhido o ano de 2005, isoladamente, como referência para geração desta classe. Esta escolha deveu-se a que as formações florestais praticamente não tiveram aumento de área na área de estudo durante a época abordada. Para tanto, o mapa de regras foi elaborado pela probabilidade de Bayes, sendo a imagem resultante quantificada em 8 bits, e, portanto, normalizada de 0 a 255 níveis de cinza. A classe resultante foi decorrente de fatiamento dos maiores valores do mapa de regras elaborado. Da mesma forma que na classificação de corpos hídricos, a classificação

resultante passou por processo de filtragem por convolução mediana, com janela de 5 x 5, e ajustes por edição matricial.

A 6ª ordem de classificação, correspondendo à classe “Pastagem/Outros”, foi resultado da subtração de todas as demais classes delimitadas, da 1ª à 5ª ordem. A classe “Pastagem/Outros”, portanto, não passou por um processo de delimitação específico, mas foi delimitada a medida que as demais foram conseguidas.

3.4 Entrada e processamento dos dados no Dinamica EGO

Conforme exposto na Fundamentação Teórica, o processamento da modelagem dinâmica espacial no Dinamica GO passa pelas seguintes etapas: **parametrização, calibração e validação**. A primeira etapa da parametrização, geração das matrizes de transição, foi resultante das classificações de uso e cobertura da terra, conforme capítulo anterior. Para que o programa Dinamica EGO pudesse gerar as variáveis dinâmicas de distância para as respectivas classes de uso e cobertura da terra, foi preciso que os mapas de classificação fossem salvos na extensão do programa Ermapper (.ers) sob a tipo de dado Signed 32 Bit Integer. As matrizes de transição foram obtidas pela tabulação cruzada dos mapas de uso e cobertura da terra entre as datas de referência, conforme cada período de estudo. Portanto, tal tarefa foi realizada para os intervalos de datas, 2008 e 2005, e, 2011 e 2008, na interface do programa Idrisi Taiga. A partir do cruzamento destes mapas, foram obtidas as taxas de conversão de uso e cobertura da terra global e multitemporal (a cada ano).

Ainda na parte da parametrização, foram escolhidos e gerados mapas de variáveis estáticas, contínuas ou discretas, que pudessem contribuir de melhor forma na geração dos pesos de evidência. A escolha destas variáveis explicativas é fundamental para o sucesso da modelagem (XIMENES et al., 2008). Cada variável representa uma situação que em teoria pode propiciar

uma dada transição de uso e cobertura da terra. Como já informado, nesta etapa também houve participação dos mapas de distância dinâmica em relação às classes de uso e cobertura da terra para cada ano de referência. Este procedimento é realizado de forma automática no Dinamica EGO. Para tal escolha das variáveis, algumas inferências devem ser realizadas em relação à transição de uso e cobertura da terra a partir das supostas variáveis, por exemplo: a conversão de pastagem para cana-de-açúcar é mais propícia de ocorrer próximo à usinas, estradas pavimentadas, em latossolos vermelhos, em talhões próximos aos de outras culturas agrícolas, em declividades de até 12%, mais longe da cidade de Quirinópolis, e em áreas onde não ocorrem APP de hidrografia.

A partir do exemplo da inferência citado e dos dados extraídos e processados conforme Tabela 3.3, foram gerados os seguintes mapas estáticos contínuos (FIGURA 3.4): altimetria (em metros), declividade (em porcentagem), distância a estradas pavimentadas, distância a estradas não pavimentadas, distância à usinas de cana-de-açúcar e distância à hidrografia (corpos hídricos lineares e laminares). Como mapas estáticos discretos, foram considerados o mapa de solos e o mapa de Áreas de Preservação Permanente (APP) em relação a corpos hídricos, conforme Lei nº 12.651/2012.

Os mapas estáticos contínuos foram agregados em arquivo de cubo de variáveis na extensão do programa Ermapper (.ers) e armazenados sob a tipo de dado Signed 32 Bit Integer, igualmente aos mapas de uso e cobertura da terra. Vale salientar que, pelo fato de que o mapa porcentagem de declividade detêm valores concentrados e de muitas casas decimais, e para que tal informação não fosse perdida ao aplicar a configuração de dados Signed 32 Bit Integer, optou-se por multiplicar seus valores originais por 100 para que as casas centesimais fossem consideradas na mapa de declividade.

Os mapas estáticos discretos foram agregados em cubo de variáveis na extensão “.ers”, com a diferença de que neste caso utilizou-se o formato de

dado Unsigned 8 Bit Integer. Neste tipo de dado os valores variam de 0 a 255 níveis, cujo valor nulo considerado foi o 0.

A calibração do modelo foi realizada gerando os coeficientes Cramer e Joint Information Uncertainty (JIU) entre cada dupla de variáveis explicativas. No caso de ocorrência de valores iguais ou maiores a 0,5 entre algum dos dois coeficientes, a eliminação de uma das variáveis foi realizada para o respectivo tipo de transição. A variável, cujos pesos de evidência em relação à uma das transições, exercesse menor ajuste em relação à esta transição, seria a escolhida para a eliminação.

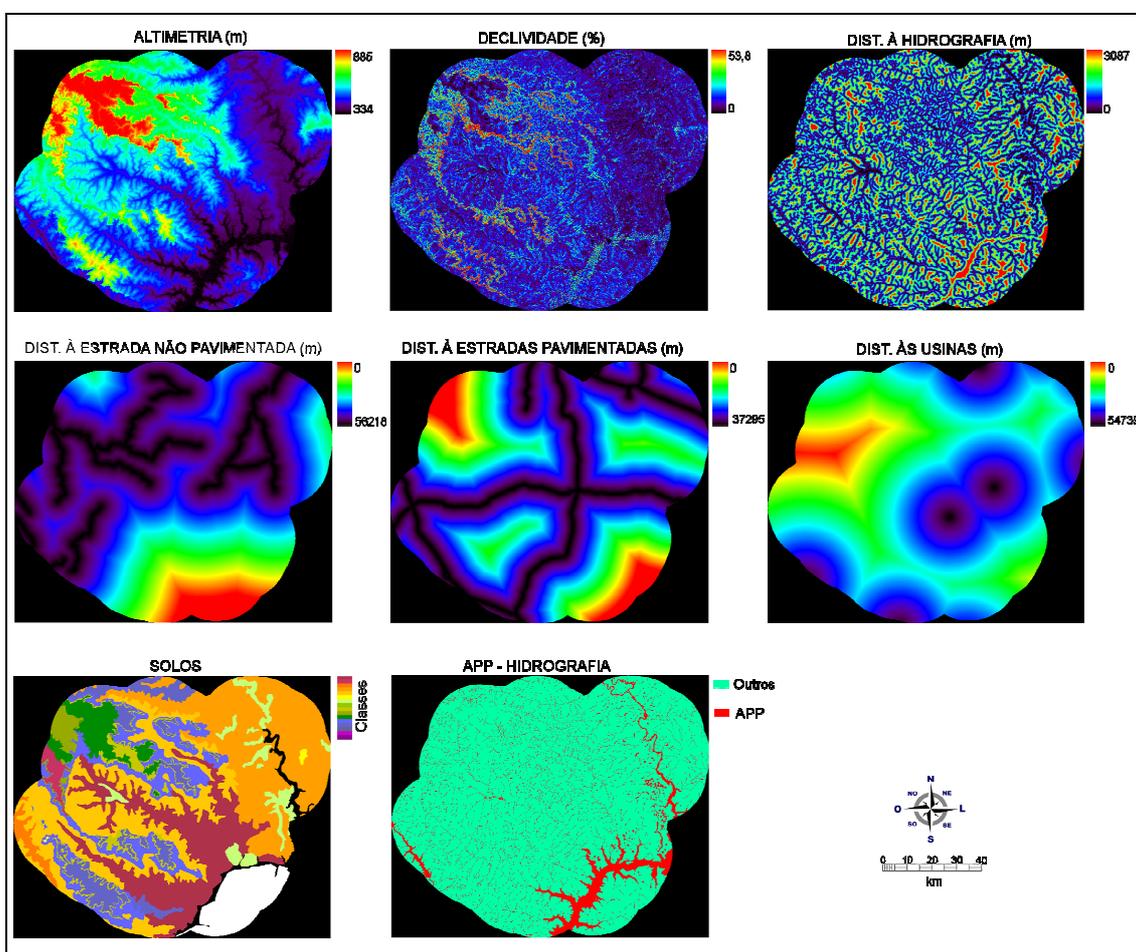


Figura 3.4 - Mapas definidos como variáveis estáticas e contínuas para entrada na modelagem.

O ajuste dos algoritmos de autômatos celulares, *expander* e *patcher* foi realizado a cada transição de classes em termos percentuais entre cada um destes. Além deste tipo de ajuste, o Dinamica EGO utiliza valores de média, variância e isometria entre as transições. A geração dos valores de média e variância foram obtidos a partir da estatística descritiva dos polígonos resultantes das respectivas transições classe a classe. Os ajustes de isometria e porcentagem entre *expander* e *patcher* foi realizado empiricamente em observância ao mapa de uso e cobertura simulado.

Os mapas de probabilidades resultantes do processamento dos pesos de evidência são gerados, normalmente, para cada ano de iteração. Neste estudo, foi analisado o terceiro mapa de probabilidades. Este mapa corresponde ao mapa de probabilidades final, o qual é utilizado para gerar a simulação referente ao mapa do ano final da modelagem dentro de um período. No caso deste estudo, os anos finais foram 2008 e 2011, para os respectivos períodos 2005 a 2008, e, 2008 a 2011.

A etapa de validação foi realizada através do Cálculo de Similaridade Recíproca, com função de decaimento constante e exponencial. Para tanto, foram utilizadas janelas de filtragem de 3x3 a 11x11 pixels. Aliado aos índices de similaridade recíproca, os mapas simulados foram comparados aos classificados através de valores percentuais de classe. O valor percentual foi extraído a partir de quadriculas sobrepostas aos mapas classificados (de referência) e simulados. O tamanho das quadriculas se deu conforme o tamanho da janela em que os índices de similaridade recíproca estivessem próximos à estabilidade. Tal comparação visou a comparabilidade entre os mapas dentro de uma vizinhança razoavelmente estável segundo os índices de similaridade recíproca.

3.4.1 Métodos para a simulação para o ano de 2020

Para a simulação do modelo para o ano de 2020 foi escolhido o período mais recente, o de 2008-2011, visto que a tendência em transições de cobertura e uso da terra é sempre reproduzir padrões de mudança mais recentes. Para o cálculo do montante de área para cada classe e ano, prevendo a simulação em 2020, não se partiu do cálculo direto das matrizes de transição, seguindo um modelo estacionário simples. Para tal tarefa, no entanto, foram utilizados os montantes de área em Unica (2012) e Lima et al. (2013), visando os cenários prospectivos. A cana-de-açúcar colhida (CL) é o principal objeto da modelagem deste estudo, no entanto, o montante de CL alcançado em Lima et al. (2013) não foi utilizado diretamente neste estudo. Tendo em vista que os dados de cana-de-açúcar colhida (CO) da Unica (2012) foram produtos de dois cenários diferenciados, optou-se por utilizar destes resultados para gerar os montantes de CL, partindo-se do princípio que existe uma proporção que é aceita de CO no total de CL. Em consulta a especialista, a CO é composta de proporcionalidades de CL, cana-de-açúcar reforma (R) e cana-de-açúcar bisada (B) que devem se manter até 2020. Podemos citar algumas destas relações:

- a) Cana reforma (R) = 7% da cana cultivada (CL);
- b) Cana bisada (B) = 2% (Cana cultivada (CL) - "R");
- c) Cana colhida (CO) = cana crua (Cr) + cana queima (Q);
- d) Cana não-colhida (N-CO) = R + B
- e) Cana cultivada = CO + R + B

A partir das relações apresentadas, podemos obter uma relação entre CL e CO, conforme desenvolvimento da Equação 3.2:

$$\begin{aligned}
CL &= CO + R + B \\
CL &= CO + \{0,07CL + [0,02(CL - 0,07CL)]\} \\
CL &= CO + \{0,07CL + 0,02CL - 0,0014CL\} \\
CL - 0,0886CL &= CO \\
CL &= \frac{CO}{0,9114}
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

Considerando a citada equação e os dois cenários de “CO” da Única (2012), pode-se considerar que os dados para cana-de-açúcar “CL” para o ano de 2020 são 13.934.606 de hectares, e, 10.610.050 de hectares, nos cenários de “expansão” e “base”, respectivamente. Estes montantes de área, possuem um desvio em relação aos dados de Lima et al. (2013), que foi de 14.295.776 de hectares para a região Centro-Sul.

A área de estudo total (município de Quirinópolis com *buffer*) possui 1.108.486 hectares e está compreendida na região Centro-Sul, portanto, contemplada no estudo de Lima et al. (2013). De forma que os cenários da Unica (2012) fossem contemplados na área de estudo total, empregou-se uma proporcionalidade entre a área de CL da região Centro-Sul com as CL de cada cenário.

De posse dos montantes de área de CL para cada cenário, o seguinte procedimento foi a alocação de área para as classes restantes em 2020. Esta tarefa foi amparada pela observação do grau de incremento ou decréscimo de área nas mesmas no período de 2008 a 2011, sendo atribuídos valores qualitativos de incremento (ou decréscimo) para cada classe, considerando uma proporcionalidade semelhante histórica entre as classes. Não obstante, os valores de área atribuídos tiveram que se adequar de forma empírica de forma que o valor total da área de estudo (com *buffer*) não fosse alterado, em ambos os cenários.

De posse destes totais de área por classe, os mesmos foram alocados na matriz de transição global 2011 x 2020. Para esta tarefa foi adotado o critério

de proporcionalidade entre as transições de origem e final dentre os anos 2008 e 2011. Os valores de área atribuídos para 2020 e para cada classe foram ser respeitados, de forma que se mantivessem inalterados. Uma vez confeccionada a matriz de transição global 2011 x 2020 para cada um dos cenários, foi preciso gerar a matriz multitemporal, de forma que fosse contemplados os nove anos da simulação do modelo (2011 a 2020). Para esta tarefa foi considerada a equação de Bell e Hinojosa (1977), a qual foi executada no programa S-PLUS com linguagem em "R". Apesar da adaptação dos valores de transição, a simulação dos cenários para 2020 (prospectivos) utilizou os demais valores de parametrização dentre as modelagens de melhor desempenho de validação, 2005 a 2008, ou, 2008 a 2011.

Com o objetivo de resumir todas as etapas metodológicas descritas, a Figura 3.5 apresenta um fluxograma destes principais passos.

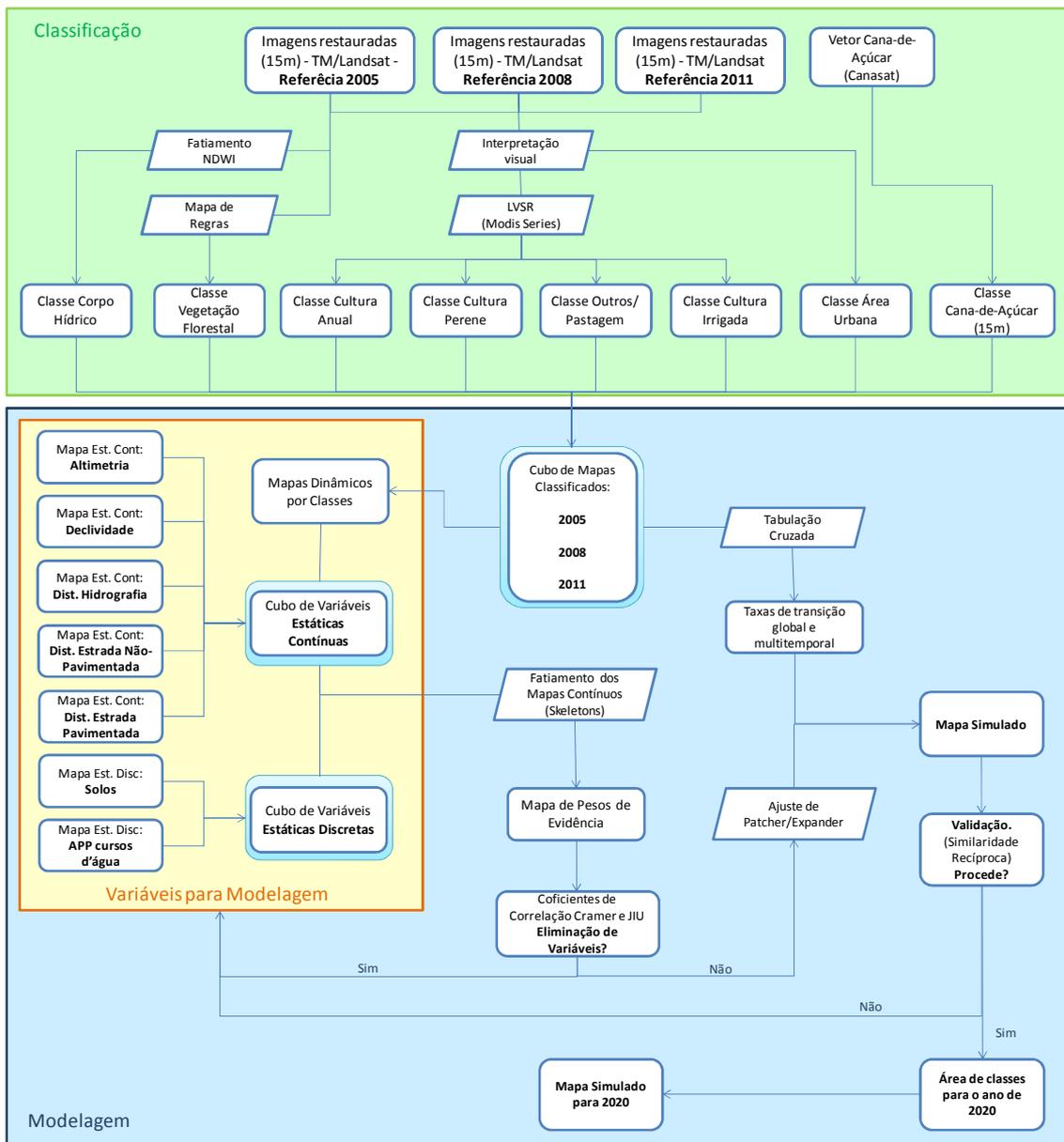


Figura 3.5 – Fluxograma das etapas metodológicas do estudo

4 RESULTADOS

Esta seção, conforme os objetivos deste estudo, foi dividida em resultados da classificação de uso e cobertura da terra e resultados da modelagem dinâmica espacial.

4.1 Resultados da classificação do uso e cobertura da terra

A restauração das imagens de resolução original para resolução de 15 metros resultou em maiores detalhes em relação à textura e geometria dos talhões agrícolas, assim como a identificação de vias de acesso, conforme Figura 4.1. Os tópicos seguintes serão apresentados segundo as ordens de mapeamento e, em seguida, para a situação da evolução da dinâmica espacial dos diferentes usos da terra.

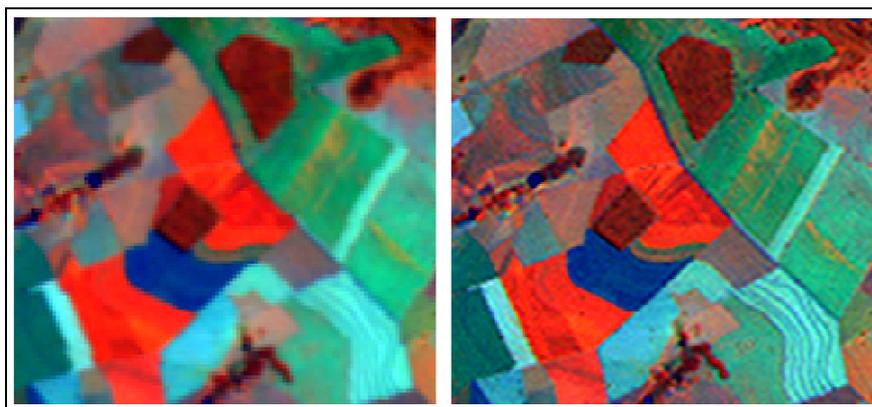


Figura 4.1 – Recorte de imagens do sensor TM/Landsat-5 (composição 4R, 5G 3B): sem restauração, à esquerda, e restaurada, à direita.

A figura 4.2 apresenta uma amostra do resultado do mapeamento da 1ª ordem, especificamente da “Cana-de-açúcar”. Em azul está a classe original, mapeada sobre imagens de resolução de 30 metros, e em vermelho está a mesma classe reamostrada para a resolução de 15 metros das imagens restauradas. É possível notar a melhora no detalhamento geométrico dos talhões. A delimitação da classe “Área urbana” segue conforme amostra da Figura 4.3. Em relação à classificação da classe “Corpos hídricos”, foi considerado como

corpos hídricos o intervalo de NDWI superior a 0,2 com as devidas retificações de polígonos residuais. Uma amostra deste resultado junto com o resultado da classificação de 1ª ordem é apresentado na Figura 4.4.

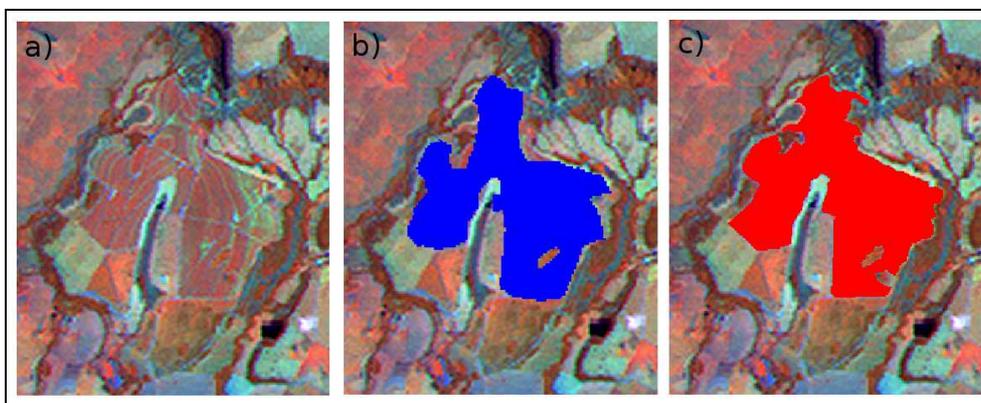


Figura 4.2 - Recorte de imagens do sensor TM/Landsat (composição R4 G5 B3), ano de referência 2011 e período pós-chuvoso: (a) imagem sem classificação; (b) imagem com classe “Cana-de-açúcar” com 30 metros de resolução; (c) imagem com classe “Cana-de-açúcar” com 15 metros de resolução.

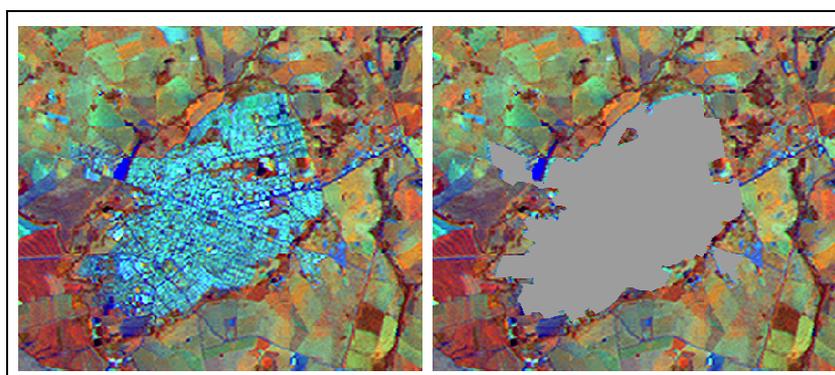


Figura 4.3 – Recorte de imagens do sensor TM/Landsat (composição R4 G5 B3) do ano 2011, período pós-chuvoso, sendo: à esquerda, imagem da mancha urbana de Quirinópolis sem classificação; à direita, imagem com a classe “Área urbana”.

Em relação à 4ª ordem de mapeamento, classes “Cultura anual”, “Cultura irrigada” e “Cultura permanente”, seguem amostras de situações particulares de classificação conforme Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8. A Figura 4.5 apresenta observações do mapeamento da “Cultura permanente”, em uma região limite da área de estudo. Observa-se que nos diferentes períodos do ano de referên-

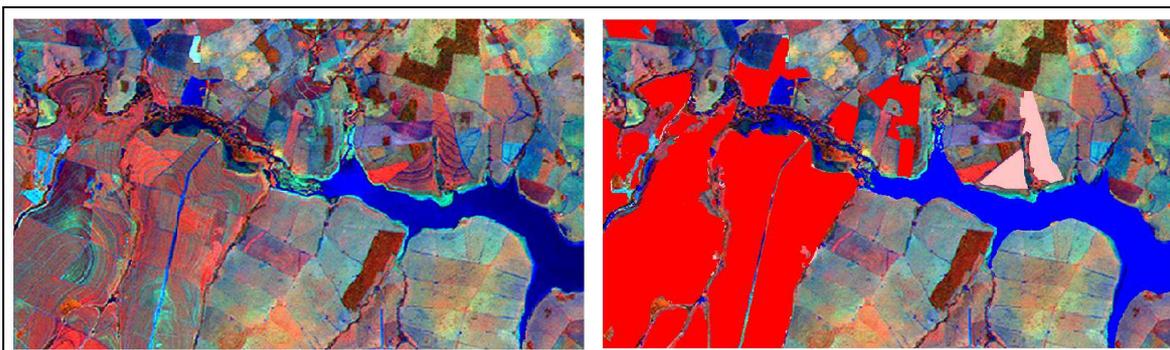


Figura 4.4 – Recorte de imagens do sensor TM/Landsat (composição R4 G5 B3), ano de referência 2011 e período pós-chuvoso: à esquerda, imagem sem classificação; à direita, imagem com sobreposição da classe “Cana-de-açúcar” (em vermelho), “Cana-de-Açúcar Expansão” (em rosa) e “Corpo hídrico” (em azul).

-cia de 2008, há presença de cobertura florestal sobre o ícone de referência (em azul). Contudo, o seu padrão de textura é homogêneo se comparado às coberturas florestais das matas ciliares nas imagens do sensor TM/Landsat-5. A resposta do histograma do EVI-2 para esta classe é semelhante à uma cobertura florestal e se mantêm desta forma até o ano de 2010, quando há conversão para uma cultura anual. As pequenas oscilações deste índice na presença de silvicultura ocorrem apenas na sazonalidade da precipitação. Desta forma, a interpretação das imagens do sensor TM/Landsat-5 foram preponderantes para o mapeamento desta classe devido à informação de textura e cor.

A Figura 4.6 apresenta uma situação onde uma área com pastagem passa ser cultivada com cultura agrícola anual na safra 2007/2008, a qual permanece somente naquele ano, em conformidade com o histograma do EVI-2 e com a presença de palhada nas imagens do sensor TM/Landsat-5. Nos anos de 2009 a 2010, começa o cultivo de cana-de-açúcar planta de ano-e-meio. No ano de 2011, a área foi mapeada como cana-de-açúcar soca. Sendo assim, a cultura anual no ano de 2008 foi considerada como de trato de manejo para enriquecimento do solo com a finalidade do plantio da cana-de-açúcar, e, portanto, não foi mapeada para cultura anual no ano de 2008.

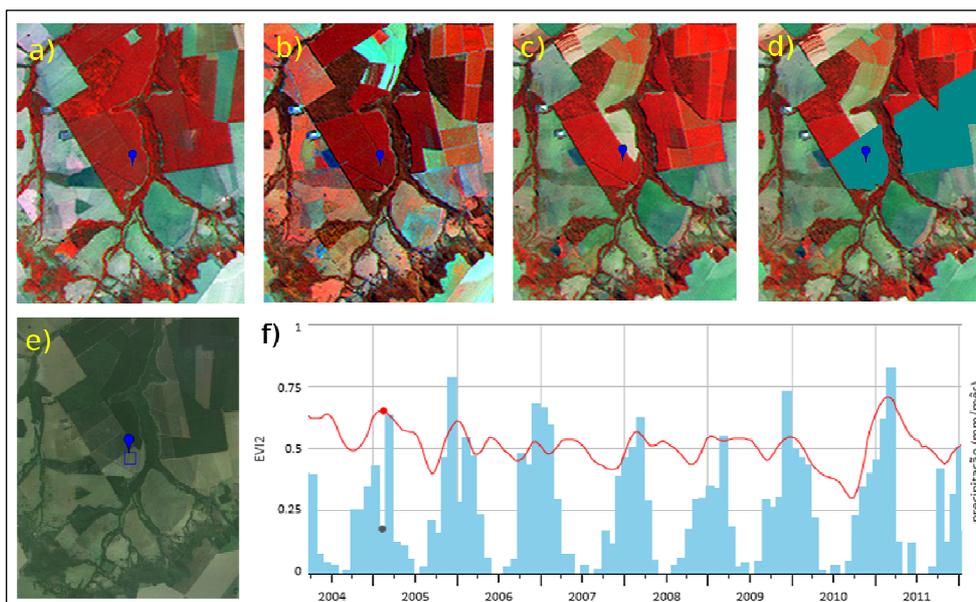


Figura 4.5 – Acompanhamento da classificação de “Cultura permanente” no ano de referência 2008 com ícone azul, sendo (a) “período seco de 2007”, (b) período “pós-chuvoso de 2008”, (c) no período “seco de 2008”, (d) classificação da classe “Cultura Permente” no limite da área de estudo, (e) imagem de alta resolução do Google Earth, e, (f) histograma de EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSR.

A Figura 4.7 apresenta situação onde um talhão é classificado como “Cultura Anual” no ano de 2005 devido a seu histórico de cultivo com este tipo de uso. Logo após o ano de 2005, o talhão passa a ser utilizado para pastagem, haja vista o comportamento do histórico do EVI-2 nos anos seguintes, de acordo com o LVSR. No ano de 2008, a área tem cultivo com alguma cultura agrícola anual, conforme EVI-2 e imagem do período pós-chuvoso de 2008. No entanto, logo nos anos ulteriores esta mesma área volta a ter resposta de EVI-2 característicos de pastagem. Desta forma, a cultura agrícola no ano de 2008 tratou-se de manejo em área de pastagem, possivelmente com algum plantio de leguminosa naquele ano para enriquecimento do solo. Desta forma, no ano de 2008, tal talhão não foi classificado como “Cultura Anual” mas permaneceu na classe de “Pastagem/Outros”.

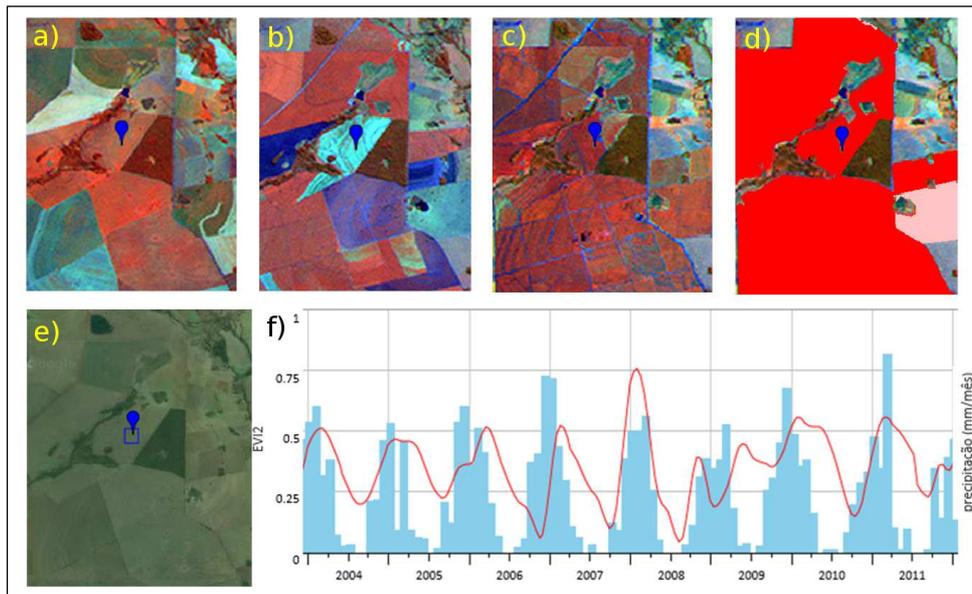
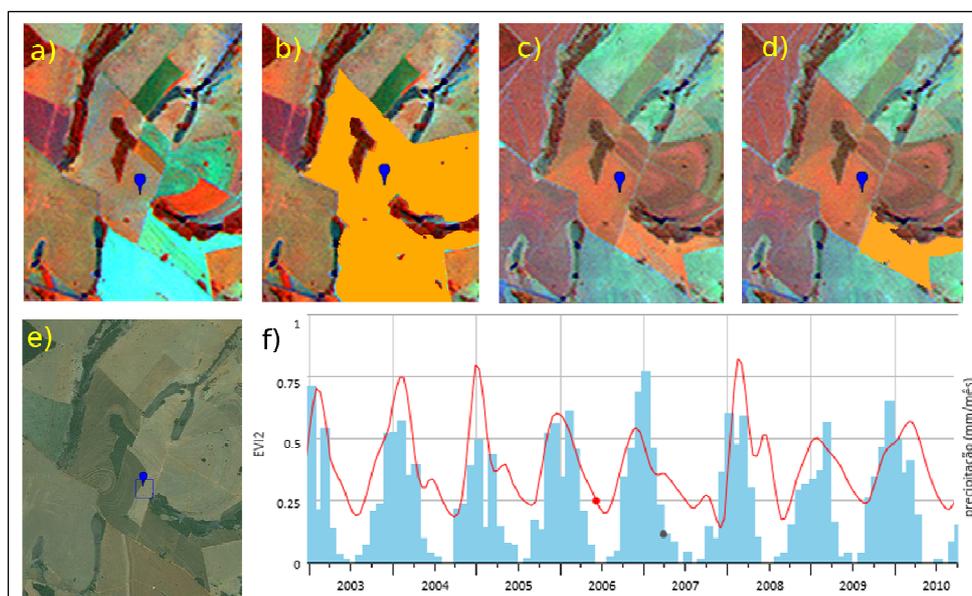


Figura 4.6 - Acompanhamento de talhão sobre ícone azul em diferentes datas, sendo a) talhão com pastagem na imagem TM/Landsat-5 do período seco de 2007; b) talhão com palhada na imagem TM/Landsat-5 do período pós-chuvoso de 2008; c) talhão com presença de cana-de-açúcar no período seco do ano 2008; d) talhão classificado com “Cana-de-Açúcar” e “Cana-de-Açúcar Expansão” em 2011; e) Imagem Google Earth no LVSR, e; f) histograma histórico do EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSR.

A Figura 4.8 apresenta a dinâmica da transição de uma área com uso típico de culturas agrícolas anuais de verão até o ano de 2008, quando, a partir da época de estiagem daquele ano, dá-se início à produção agrícola por pivô central. Tal área, desta forma, passa a ser classificada por “Cultura Irrigada”. Esta constatação tanto é factível pelo padrão das imagens TM/Landsat-5 do período seco de 2008, como pelo histograma histórico de EVI-2.

Nas imagens do sensor TM/Landsat esta conversão é evidenciada pelo padrão circular apresentado na imagem do período seco de 2008, além de que ser possível constatar a presença de plantio ou sua recente colheita. Não foi descartada a hipótese de que nestes pivôs também tenham sido utilizados para culturas agrícolas anuais de verão, porém, neste caso, os mesmos foram

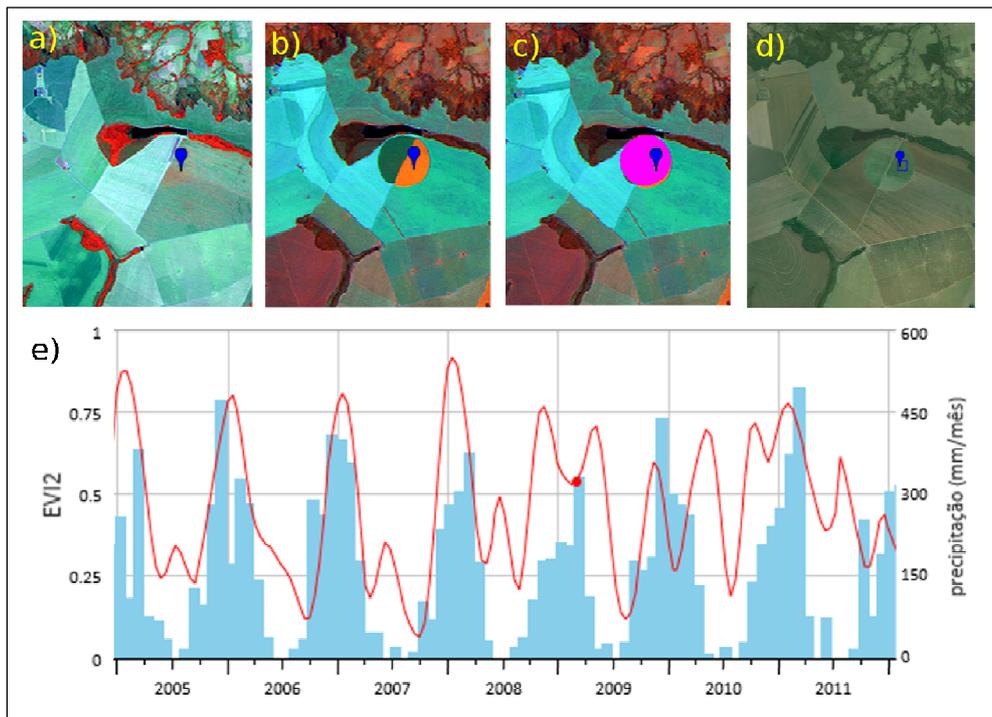
mapeados com o seu propósito principal, de cultura agrícola irrigada. Este tipo de uso ocorre no período de estiagem do ano de referência e muito provavelmente com culturas agrícolas de finalidade alimentar. Acrescentando a estes fatos, o histograma de EVI-2 deflagra que nestes pivôs ocorre evolução vegetativa intensa e em curto espaço de tempo, geralmente mais de uma vez ao ano, ficando evidente que nestas áreas ocorre tanto o plantio por irrigação como por sequeiro.



A Figura 4.7 - Dinâmica de uma talhão sob o ícone azul, sendo a) presença de pastagem no período pós-chuvoso do ano 2005; b) classificação da área com “Cultura Anual” em 2005; c) presença de alguma cultura agrícola anual de verão no ano de 2008; d) área sem classificação para “Cultura Anual” em 2008, permanecendo seu status de “Pastagem plantada”; e) Imagem Google Earth no LVSR, e; f) histograma histórico do EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSR.

Em relação à delimitação da classe “Vegetação Florestal”, observou-se que as imagens do período seco de referência detinham maior separabilidade entre formações florestais com outros tipos de vegetação natural ou pastagens. Desta forma, foram escolhidas as imagens do período seco do ano de 2005,

sendo consideradas as bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landsat-5. A Figura 4.9 apresenta uma amostra de região de treinamento e o mapa de regras de “Vegetação Florestal”.



A Figura 4.8 - Dinâmica de uma área sob o ícone azul, sendo a) presença de cultura agrícola anual no período pós chuvoso do ano de 2008; b) presença de cultura irrigada no período seco do ano de 2008; c) classificação da área com “Cultura agrícola irrigada” no ano de 2008; d) Imagem Google Earth no LVSR, e; e) histograma histórico do EVI-2 e precipitação correspondente à localidade do ícone no ambiente do LVSR.

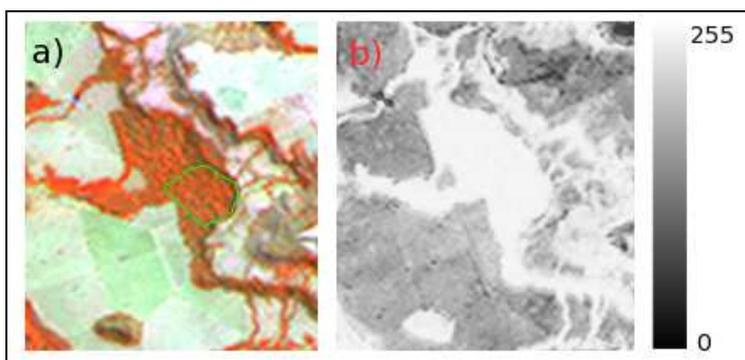


Figura 4.9 - Amostra de região de treinamento (a) e respectivo mapa de regras de “Vegetação Florestal” (b).

Considerando a delimitação das classes citadas, a classe “Pastagem/Outros” foi resultante da exclusão das classes anteriores, para cada ano de referência. O resultado das classificações para a área de estudo mais *buffer* e para cada ano de referência segue conforme a Figura 4.10. O resultado dos valores absolutos das áreas das classes para cada ano de referência e na área de estudo do município de Quirinópolis é apresentado conforme Tabela 4.1.

À primeira vista, é possível perceber a presença da cana-de-açúcar no município a partir do ano de 2008 e com continuidade em 2011. Apesar desta continuidade, proporcionalmente, este incremento foi inferior ao do período 2005 a 2008, considerando à área de estudo com *buffer*, de 376,96% no primeiro anterior e de 195,89% entre 2008 e 2011. Fato pelo qual demonstra a consolidação da cana-de-açúcar em Quirinópolis e entorno. Este avanço acontece principalmente no sentido nordeste a sudoeste. Ao longo dos anos, ocorre decréscimo de área agrícola de “Cultura Anual”, sobretudo no ano de 2008. Também ocorre decréscimos de área da classe “Pastagem/Outros”, principalmente no ano de 2011, com redução de 8,73% em relação à 2008. A classe “Cultura Irrigada”, ao contrário, sofre redução em 2008 (-42,03%) e volta a crescer em 2011 (+58,14%), não apresentando retorno da área existente em 2005. A classe “Área Urbana” apresenta maior crescimento em 2011 do que em relação a 2008. No ano de 2011 a classe “Cultura Permanente” começa a

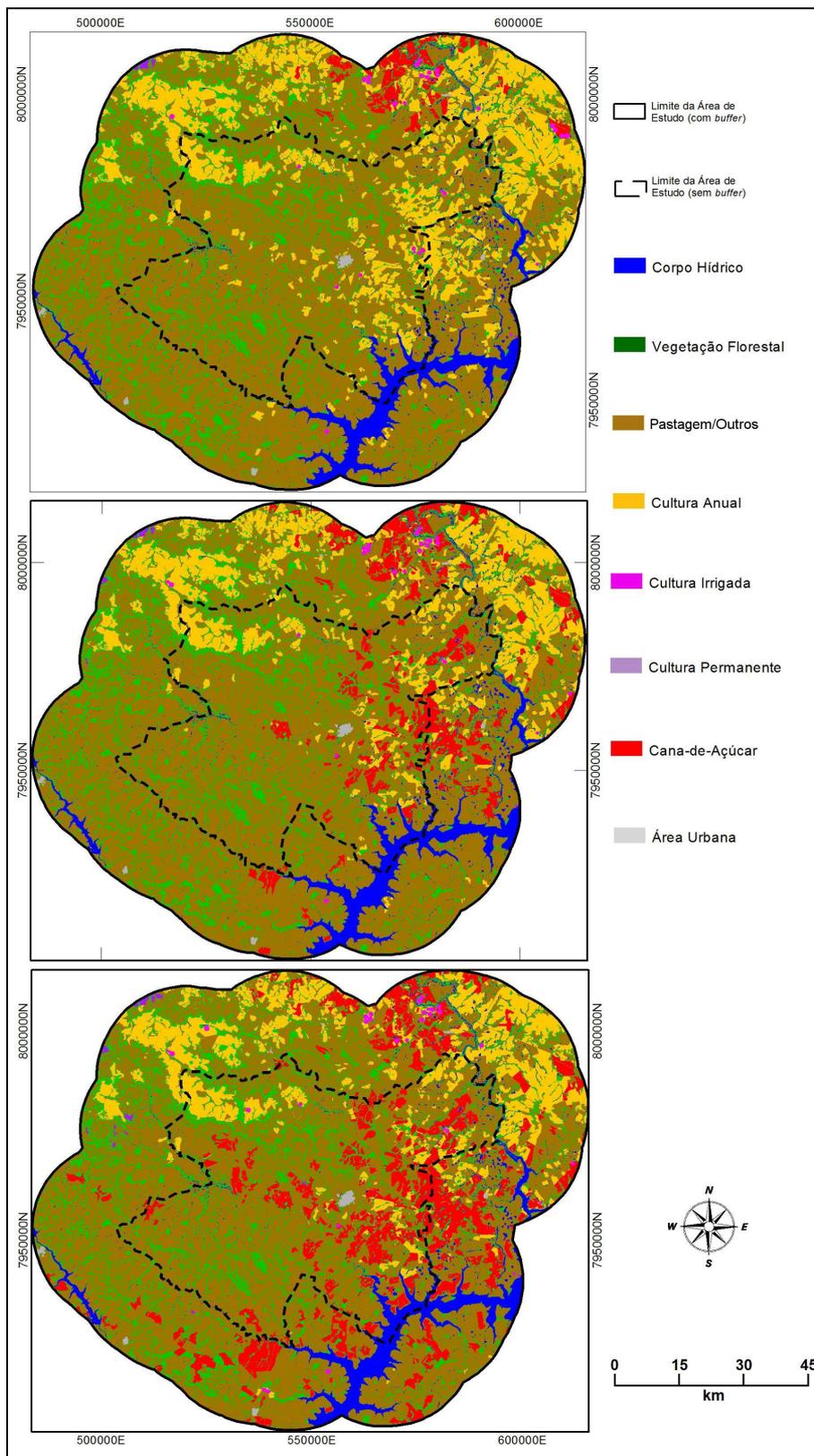


Figura 4.10 – Classificações geradas para cada ano de referência.

ser ocupada no município. A classe “Vegetação Florestal” apresenta pequenas reduções, sendo maior no ano de 2011 do que em relação a 2005. Em suma, percebe-se que não existe um padrão uniforme da dinâmica de uso e cobertura da terra dentre os períodos analisados, 2005 a 2008, e, 2008 a 2011. A tabela 4.1 apresenta os valores absolutos em hectares da dinâmica entre os anos estudados no município de Quirinópolis. Nesta é possível observar que a “Cultura Anual” apresenta uma diminuição brusca em 2008 e retorna parte de sua área em 2011, correspondendo a -40,12% e -14,40%, respectivamente.

Tabela 4.1 - Evolução da área ocupada para cada classe de uso/cobertura da terra em Quirinópolis de 2005 a 2011.

| Classes/Ano (hectares) | 2005 | 2008 | 2011 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Cana-de-Açúcar | 0,00 | 22380,75 | 50034,71 |
| Cultura Anual | 52055,68 | 31169,43 | 26679,62 |
| Cultura Irrigada | 613,39 | 257,8275 | 356,67 |
| Cultura Permanente | 0,00 | 0,00 | 63,38 |
| Pastagem/Outros | 258409,82 | 257821,34 | 235310,15 |
| Vegetação Florestal | 57906,05 | 57343,12 | 56345,38 |
| Área Urbana | 825,03 | 837,52 | 1020,26 |

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os gráficos das proporções das conversões dentre as classes, na dinâmica 2005 a 2008, e, 2008 a 2011, respectivamente. Ao verificar estas proporções, os padrões entre de cada período torna-se ainda mais evidente. No período 2005 a 2008, percebe-se que o avanço da “Cana-de-Açúcar” ocorre de forma bem equitativa sobre “Pastagem/Outros” e “Cultura Anual”. Neste processo também ocorre participação das classes “Cultura irrigada” e “Vegetação Florestal”, que somadas contribuiriam com 2,55% das

conversões totais de cana-de-açúcar. Neste período a “Área Urbana” avança somente sobre “Pastagem/Outros”, sendo 1,49% da área urbana total em 2008. As classes “Pastagem/Outros” e “Cultura Anual” apesar de sofrerem redução de área, sofrem deslocamentos entre si, na faixa de 5 a 10% de suas respectivas áreas. Em suma, a principal conversão de uso dentre as classes no período foi para cana-de-açúcar. Considerando a proporção da conversão para a cana-de-açúcar dentre o total de conversões por classe, este tipo de conversão resulta em valores altos, sendo 94%, 81,63%, 40,79%, 40,18%, para as classes de origem “Cultura Irrigada”, “Pastagem/Outros”, “Cultura Anual” e “Vegetação Florestal”, respectivamente. Especificamente, nota-se, que a classe “Cultura Irrigada” teve praticamente todas as suas conversões para a “Cana-de-Açúcar”. Não obstante, mantiveram-se ainda 42,03 % da área existente em 2005, ou 257,82 hectares dos 613,39 hectares. Pode-se dizer que a principal

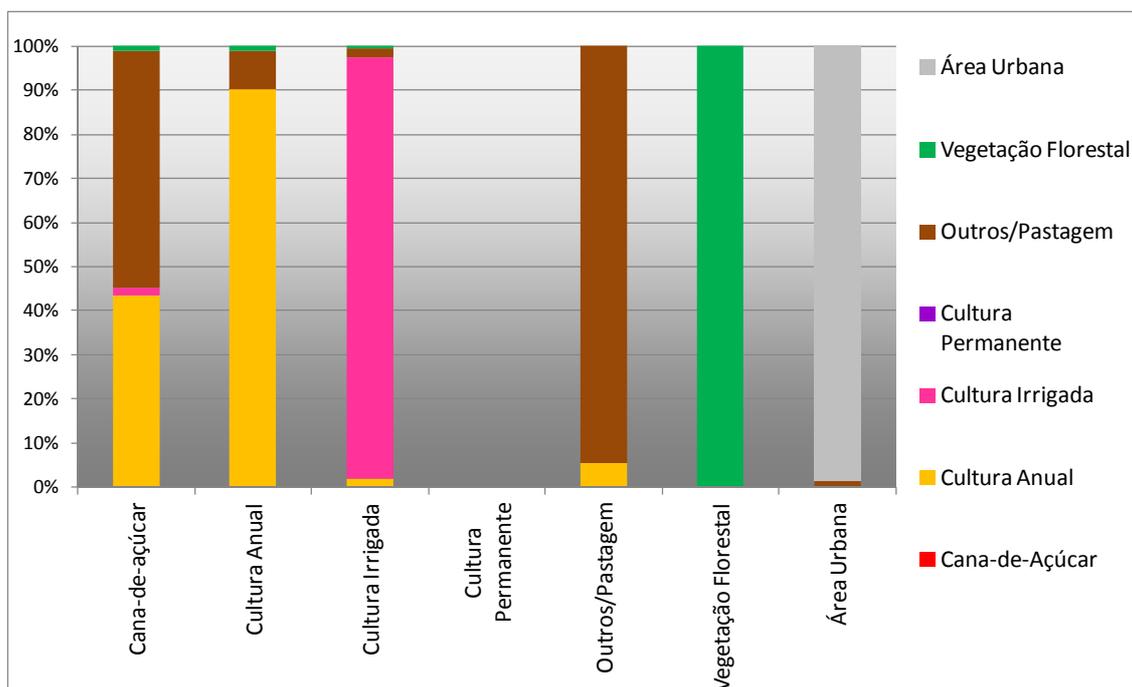


Figura 4.11 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2005 a 2008.

característica deste período, em relação à expansão da cana-de-açúcar, é a considerável participação de culturas agrícolas nesta conversão, de sequeiro ou de irrigação.

Se observarmos o gráfico da Figura 4.12, no período 2008 a 2011 a conversão para cana-de-açúcar a partir da “Cultura Anual” diminui consideravelmente. Neste período, a transição para a cana-de-açúcar sobrecarrega sobre um tipo de situação de uso e cobertura de origem, a da classe “Pastagem/Outros”. Este tipo de transição representou 85% em relação a todos os casos de transição para cana-de-açúcar. A transição oriunda de “Cultura Anual”, que no período anterior representou 43,6% das transições, entre 2008 e 2011, esta taxa foi de apenas 6,57%.

A área de “Cultura Anual” continua a diminuir entre 2008 e 2011, porém com taxa bem menor, 13,2% frente aos 40,6% do período anterior, sendo a cana-de-açúcar ainda a principal causa desta redução. A retomada da “Cultura Anual” ocorre, principalmente, sobre “Pastagem/Outros”, com 14,88% do total desta cultura em 2011, representando 92,43% do total de suas conversões no período. Entre 2008 e 2011, ocorre o retorno das áreas de “Cultura irrigada”, sendo que quase totalmente sobre áreas de “Cultura Anual”, com 28,85% do total de “Cultura Irrigada” em 2011, ou, 95,81% do total das conversões ocorridas no período. A classe “Área Urbana” passa a ter um avanço maior, em que, além de ocorrer sobre “Pastagem/Outros”, também ocorre “Vegetação Florestal”, sendo 95,3% e 4,7%, das conversões, respectivamente. Este fato pode ser resultado do avanço imobiliário decorrente do avanço do agronegócio provocado pela cana-de-açúcar na região. O aparecimento da “Cultura Perene” em Quirinópolis ocorre neste período, e se dá totalmente sobre a classe “Pastagem/Outros”. Este evento, vale salientar, ocorre distante da região que comumente tem tido crescimento, na região noroeste da área de estudo com *buffer*, no município de Rio Verde.

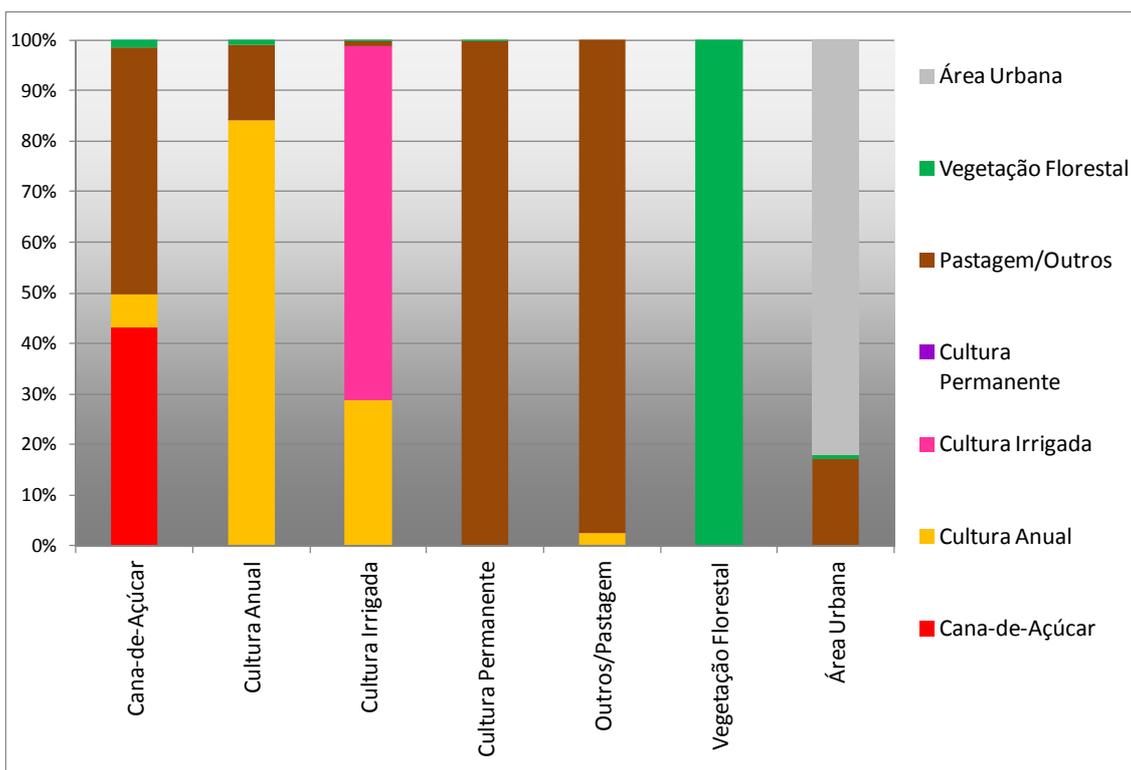


Figura 4.12 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2008 a 2011.

De forma geral, as classes “Pastagem/Outros” e “Vegetação Florestal” passam a ter maior participação nas conversões no segundo período, principalmente para a cana-de-açúcar. No período anterior, a classe “Vegetação Florestal” contribuiu com 1,01% das conversões para cana-de-açúcar, no segundo período este número alcançou 2,57%. Este fato, aliado à maior expansão da cana-de-açúcar sobre pastagens no segundo período, comprova que neste período a expansão da cana-de-açúcar foi além das áreas tipicamente agrícolas da área de estudo, com menor antropização e infraestrutura. Esta situação também é comprovada pelo fato de que a expansão da cana-de-açúcar reduz drasticamente sobre áreas agrícolas. Entre 2008 e 2011, as proporções da conversão para a cana-de-açúcar dentre o total de conversões por classe, foram as seguintes: 20,21%, 85,27%, 37,42% e 73,32%, para as classes de origem “Cultura Irrigada”, “Pastagem/Outros”, “Cultura Anual” e

“Vegetação Florestal, respectivamente. Estes dados denotam uma das principais diferenças do segundo período em relação ao primeiro período, a diminuição da participação da “Cultura Irrigada” e o aumento da “Vegetação Florestal” para a expansão da cana-de-açúcar

Os dados expostos comprovam, novamente, a diferenciação de padrões de ocupação do solo e cobertura da terra na área de estudo. A cultura da cana-de-açúcar, pode-se afirmar, que é a grande impulsionadora das dinâmicas de ocupação ocorridas no campo e também na expansão urbana. Tal avanço ocorreu principalmente em direção às áreas próximas às rodovias que dão acesso à usina de Rio Claro, no município de Caçu, e à usina Vale do Simão, no município de Santa Vitória, no estado de Minas Gerais. Essa expansão compreende as partes sudeste, sul e sudoeste da área de estudo. Cabe salientar que a lógica de expansão da cana-de-açúcar, primeiro em áreas já agrícolas e posteriormente em pastagens, segue a mesma lógica de implantação cronológica das usinas, que também foi realizada desta maneira na área de estudo.

O padrão de conversão para cana-de-açúcar encontrado neste estudo corrobora com o padrão encontrado de conversão em Adami et al. (2012), em que a fronteira da expansão da cana-de-açúcar ocorre primeiramente em áreas agrícolas, para, em seguida, adentrar-se nas áreas de pastagem. Não obstante, apesar de esses autores terem justificado, em parte, de que tal fenômeno pudesse ser explicado pelo fato de que as culturas agrícolas corresponderiam, na realidade, a um tipo de manejo para a entrada da cana-de-açúcar planta, neste estudo, porém, esta hipótese deve ser descartada. A classificação neste estudo foi realizada desconsiderando esse tipo de manejo, como mencionado na metodologia do estudo. Sendo assim, tendo em vista as condições e resultados deste estudo, há o indício de que a expansão da cana-de-açúcar de fato ocorra prioritariamente em áreas já ocupadas pela agricultura e, em um segundo momento, nas áreas de pastagem.

Apesar de o início da crise do setor sucroalcooleiro ser perceptível no período de 2008 a 2011, com a diminuição proporcional da expansão da cana-de-açúcar, a mancha urbana de Quirinópolis aumentou mais nesse período do que no período anterior. A constatação de tal fato pode ser explicada pelo aumento do agronegócio na região e pelo tempo de latência comum para o setor imobiliário se desenvolver. O setor do agronegócio vem propiciando o aumento de serviços e empregos nas cidades. Especificamente em Quirinópolis, o município aumentou sua qualidade de vida, de 39º lugar para o 6º lugar e, o número de empresas aumentou 250%, no período de 2005 a 2011 (BRASILAGRO, 2011). Junto a este fato, elevou-se o valor das propriedades tanto no meio urbano como no rural. Desde 2006, um alqueire no município valorizou de R\$ 30 mil para R\$ 70 mil (BORGES et al., 2011). Todo este processo desencadeou uma crescente especialização na região de estudo para a produção da cana-de-açúcar por grandes companhias (REZENDE, PASQUALI, 2012). Outro aspecto, constatado neste estudo, é que a expansão da cana-de-açúcar tem ocorrido próximo a áreas urbanas, em até 260 metros em relação à cidade de Quirinópolis no intervalo analisado no estudo. Este fato pode ser enaltecido haja vista que o estado de Goiás ainda não possui um protocolo que possa gerenciar a diminuição da colheita com queima e estabelecer uma distância mínima de plantio à área urbana.

O plantio de seringueiras -“Cultura Perene” - apesar de ter maior presença no município vizinho a oeste, Rio Verde, passa a ter sua exploração em Quirinópolis no ano de 2011. Este avanço exprime o tendência de crescimento da produção de látex no país, sendo o estado de Goiás o 3º da federação com melhor aptidão para o cultivo da seringueira, ficando atrás de São Paulo e Minas Gerais. Apesar de o Brasil responder por cerca de apenas 1% da produção de látex mundial (OMINE; MORAES, 2006), desde o ano de 1991 a área plantada por seringueiras vem aumentando ininterruptamente. No período de 2000 a 2009 a área ocupada por seringueiras aumentou 60% no Brasil, alcançando 154.509 hectares (IBGE, 2013b). Na área de estudo com buffer tal

expansão ocorreu prioritariamente sobre culturas agrícolas de verão, seguida de pastagens.

Ao analisar a cana-de-açúcar, a pastagem e culturas agrícolas temporárias (classes “Cultura Anual” e “Cultura Irrigada”) no município de Quirinópolis com os dados do IBGE (2013b) é possível verificar boa coerência dos resultados, conforme gráfico da Figura 4.13. A área de pastagem apresentada pelos dados do IBGE foi calculada com base na quantidade de cabeças de gado no município nas datas de referência. Este dado foi extrapolado para alcançar o valor de área ocupada por pastagens, considerando a informação de que no Censo Agropecuário do IBGE mais recente, 2006, no estado de Goiás haviam 1,07 cabeças de gado por hectare.

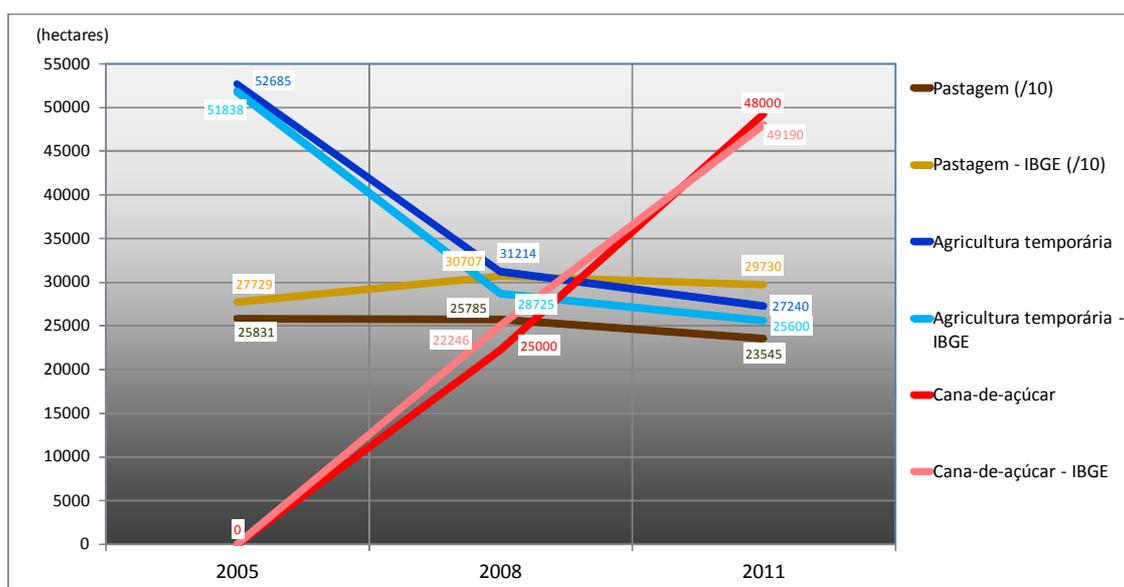


Figura 4.13 – Comparação dos resultados deste estudo com os do IBGE (2013b).

Em suma, pode-se elencar alguns motivos para as diferenças na dinâmica da cana-de-açúcar em relação às demais classes no período de 2008 a 2011 em relação ao período anterior: (a) o aparecimento das novas usinas no período de 2008 a 2011 ocorreu na direção sul da área de estudo, onde há predomínio de pastagens em relação a culturas agrícolas temporárias, inclusive com maior presença de pastagens ; (b) grande parte das pastagens no Brasil se encontra

em estágio de degradação, o que condiciona que a primeira exploração das terras seja realizada sobre áreas com alguma cultura, para a redução de custos no trato agrícola; (c) no período de 2008 a 2011, dá-se o início da crise do setor de etanol, que também é percebido na região; (d) o aumento contínuo de fornecedores da matéria-prima na produção da cana-de-açúcar pode ter levado à escolha mais imediata do retorno de áreas agrícolas temporárias, irrigadas ou de sequeiro. Por outro lado, outro motivo pode ter contribuído para com que a redução da expansão da cana-de-açúcar não fosse maior na área de estudo. Uma das maiores usinas da região, Boa Vista, instalada em Quirinópolis, tem consórcio de produção com a Petrobrás Biocombustível, o que favorece uma maior continuidade do processamento da cana-de-açúcar, em função da produção do etanol anidro para a composição da gasolina.

4.2 Resultados da modelagem dinâmica espacial

Conforme a metodologia da modelagem, os resultados são apresentados primeiramente seguindo os passos da geração do modelo, de parametrização, calibração e validação do modelo. Em seguida serão apresentados os resultados dos cenários preditivos.

A matriz de transição entre cada período (global), 2005 a 2008 e, 2008 a 2011, segue conforme Tabelas 4.1 e 4.2. Vale recordar que a modelagem foi realizada para a Área de Estudo mais *buffer*, portanto, tais valores apresentam algumas variações em relação aos resultados apresentados na seção anterior. Este explicação tem justificativa, principalmente, devido a que no ano de 2005 a Área de estudo mais *buffer* estiveram contidas as Classes “Cana-de-Açúcar” e “Cultura Permanente”, o que não ocorreu na Área de estudo de forma isolada.

Tabela 4.2 - Matriz de Transição global entre os períodos 2005 e 2008 na Área de Estudo mais *buffer*.

| | | 2008 | | | | | | | |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | Pastagem /Outros (1) | Veget. Florestal (2) | Cultura Anual (3) | Cultura Irrigada (4) | Cultura Perm. (5) | Área Urbana (6) | Cana-de-Açúcar (7) | Corpo Hídrico (8) |
| 2005 | Pastagem/Outros (1) | 0,948883 | | 0,016534 | 0,000175 | 0,000098 | 0,000067 | 0,034244 | X |
| | Veget. Florestal (2) | | 0,986214 | 0,008779 | | 0,000223 | | 0,004784 | X |
| | Cultura Anual (3) | 0,201641 | | 0,659891 | 0,001913 | 0,000823 | | 0,135731 | X |
| | Cultura Irrigada (4) | 0,068390 | | | 0,629086 | | | 0,302524 | X |
| | Cultura Perm. (5) | 0,152907 | | | | 0,847093 | | | X |
| | Área Urbana (6) | | | | | | 1,000000 | | X |
| | Cana-de-Açúcar (7) | 0,099045 | | 0,040511 | | | | 0,860444 | X |
| | Corpo Hídrico (8) | X | X | X | X | X | X | X | 1,000000 |

Tabela 4.3 - Matriz de Transição global entre os períodos 2008 e 2011 na Área de Estudo mais *buffer*.

| | | 2011 | | | | | | | |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | Pastagem /Outros (1) | Veget. Florestal (2) | Cultura Anual (3) | Cultura Irrigada (4) | Cultura Perm. (5) | Área Urbana (6) | Cana-de-Açúcar (7) | Corpo Hídrico (8) |
| 2008 | Pastagem/Outros (1) | 0,894187 | | 0,017987 | 0,000489 | 0,000600 | 0,000385 | 0,086352 | X |
| | Veget. Florestal (2) | | 0,983321 | 0,005934 | | 0,000186 | 0,000144 | 0,010415 | X |
| | Cultura Anual (3) | 0,117908 | | 0,809480 | 0,001796 | 0,002615 | | 0,068200 | X |
| | Cultura Irrigada (4) | | | 0,020811 | 0,979189 | | | | X |
| | Cultura Perm. (5) | | | | | 1,000000 | | | X |
| | Área Urbana (6) | 0,000818 | | | | | 0,999182 | | X |
| | Cana-de-Açúcar (7) | | | 0,042542 | | | | 0,957458 | X |
| | Corpo Hídrico (8) | X | X | X | X | X | X | X | 1,00000 |

Após a geração das matrizes de transição, foi realizado o fatiamento das variáveis para formato discreto e a geração pesos de evidência para cada intervalo. Este resultado foi analisado para cada variável explicativa, verificando as interdependências entre as mesmas, conforme os índices Cramer e JIU, nas Tabelas 4.3 e 4.4. Considerando a grande quantidade de transições e variáveis aqui não será exposta a tabela com os resultados de todos estes índices. Para cada combinação, a escolha da variável para ser excluída considerou aquela que apresentasse pior ajuste em relação à transição, tendo em vista os seus pesos de evidência. Percebe-se que a maior interdependência acontece com a variável explicativa “Distância a Estradas Pavimentadas”, dentre as classes “Cultura Anual”, “Pastagem/Outros” e “Cultura Permanente”. Apesar de estarem envolvidas as variáveis explicativas “Declividade” e “Distância a Estradas Não Pavimentadas”, foi constatado que, estas, em relação às demais variáveis explicativas, detiveram menor grau de interdependência, se comparado à “Distância a Estradas Pavimentadas”. Desta forma, optou-se por excluir esta variável explicativa nas transições “Cultura Anual” para “Pastagem/Outros” no primeiro período, e “Cultura Anual” para “Cultura Permanente” em ambos os períodos.

Tabela 4.4 – Maiores índices de Cramer e JIU para o período 2005 a 2008 (em vermelho as variáveis excluídas para a correspondente transição).

| Transição 2005-2008 | Variável 1 | Variável 2 | Cramer | JIU |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------|------------|
| Cultura Anual -> Pastagem/Outros | Distância à Estradas Pavimentadas | Declividade | 0,5771 | 0,5939 |
| Cultura Anual -> Cultura Permanente | Distância à Estradas Pavimentadas | Distância à Estradas Não Pavimentadas | 0,6939 | 0,6793 |

Tabela 4.5 – Maiores índices de Cramer e JIU para o período 2008 a 2011 (em vermelho as variáveis excluídas para a correspondente transição).

| Transição 2005-2008 | Variável 1 | Variável 2 | Cramer | JIU |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------|------------|
| Cultura Anual -> Cultura Permanente | Distância à Estradas Pavimentadas | Declividade | 0,5002 | 0,5329 |

A partir da exclusão das citadas variáveis no processamento do modelo, para cada tipo de transição correspondente, foi possível constatar que o valor médio de JIU diminuiu, conforme Figura 4.14. A transição de uso e cobertura mais beneficiada com este procedimento foi a “Cultura Anual” para “Cultura Permanente”, período 2008 a 2011, com redução de 18,15% de JIU médio, considerando todas variáveis explicativas nesta transição. A transição que menos apresentou redução de JIU foi a transição “Cultura Anual” para “Pastagem/Outros”, período 2005 a 2008, com redução de 14,64%.

Com a exclusão das variáveis interdependentes citadas, novamente foram realizados os passos de fatiamento e geração de pesos de evidência para o novo conjunto de variáveis explicativas, possibilitando que fossem gerados novos fatiamentos e pesos de evidência. De forma que pudessem ser analisados os ajustes de pesos de evidência para todas as transições e variáveis explicativas, foi adotado um procedimento de avaliação qualitativa nos mesmos, para cada período. As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os cruza-

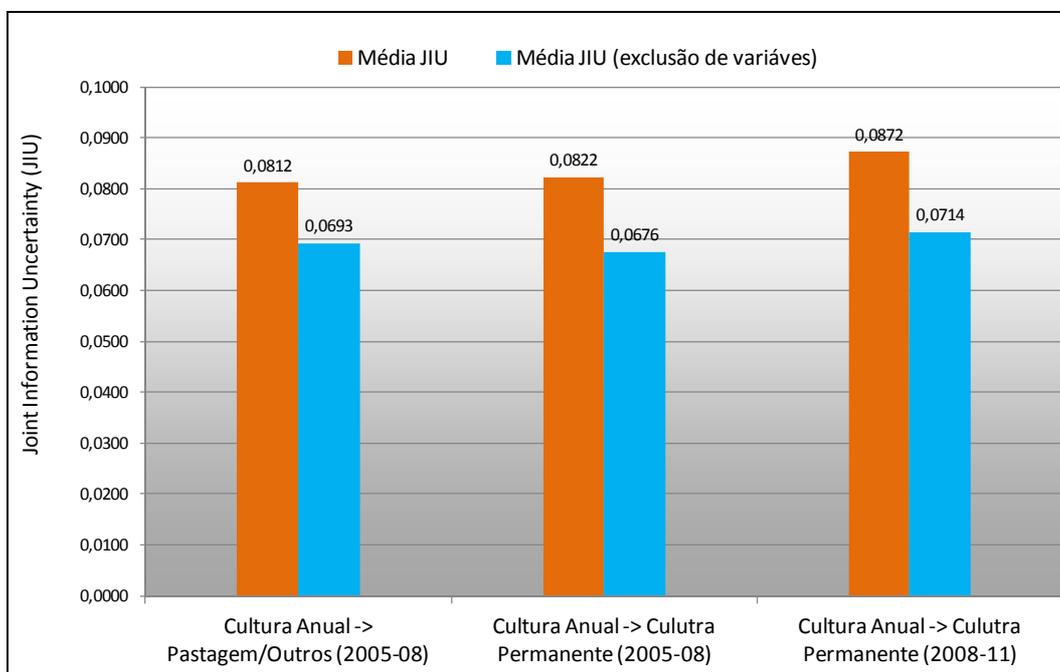


Figura 4.14 - Comparação dos valores médios de JIU nas transições que ocorreram exclusão de variáveis devido à interdependência.

-mentos para os dois períodos com os respectivos valores de avaliação. A formulação dos conceitos de avaliação constituiu em atribuir, primeiramente se os melhores ajustes de pesos de evidência teriam como característica preponderante a repulsão ou atração, ou seja, maior concentração de pesos de evidência menores que “-1”, ou maior concentração de pesos de evidência maiores que “1”, respectivamente. Neste último caso, foi atribuído o símbolo “+”, e no caso da repulsão, foi atribuído o símbolo “-“. A segunda categoria de análise consistiu em atribuir 3 tipos de notas de acordo com o melhor ajuste dos pesos de evidência em relação ao fenômeno. Foi considerado como melhor ajuste quando a configuração dos pesos de evidência obtiveram valores superiores a “1” ou inferiores a “-1”, e estivessem de forma concentrada em determinados intervalos de valores da variável explicativa, sem demasiados ruídos ao longo dos intervalos. O melhor ajuste foi atribuído à letra “A”, intermediário, “B”, e, ajuste fraco, “C”. Uma terceira categoria foi relacionada aos valores das variáveis explicativas compreendidos segundo os intervalos que correspondessem ao melhor ajuste. A ocorrência de intervalos sob os menores valores da variável explicativa atribuíram-se o índice “(1)”, sob valores medianos, “(2)”, e, sob valores altos, “(3)”. Subentende-se que no caso de variáveis explicativas de distâncias, os valores baixos compreendem as áreas mais próximas da classe de uso da terra, enquanto os valores mais altos, as áreas mais distantes. Destes conceitos, as classes de pior ajuste, “C”, não foram avaliadas para a primeira e terceira categorias. Em relação às variáveis explicativas categóricas, APP e Solos, dadas as suas especificidades, foram analisadas diferentemente. A classe APP, teve sua terceira categoria modificada. O melhor ajuste, neste caso, foi atribuído para a maior desigualdade entre os valores dos pesos de evidência entre as opções da variável explicativa, pertencente à APP, ou não pertencente à APP. No caso de os valores de ajustes estarem prioritariamente contidos na APP, foi adicionado o índice “(s)” e, no caso destes valores não estarem contidos na APP, adicionou-se o índice “(n)”. Na variável Solos somente foi atribuída à segunda

categoria, sendo que o melhor ajuste, neste caso, foi dado à menor quantidade de solos associada a um valor alto ou baixo de peso de evidência.

Para a redução das Tabelas 4.5 e 4.6, as classes foram definidas de 1 a 8, sendo, “Pastagem/Outros”, “Vegetação Florestal”, “Cultura Anual”, “Cultura Irrigada”, “Cultura Permanente”, “Área Urbana”, “Cana-de-Açúcar” e “Corpo Hídrico” (neste caso, sem transições), respectivamente. E as variáveis explicativas foram abreviadas, sendo, Distância às classes de uso e cobertura da terra, Área de Preservação Permanente aos cursos d’água, Solos, Declividade, Estradas Pavimentadas, Estradas Não Pavimentadas, Distância à Hidrografia, Distância às Usinas e Altimetria por Modelo Digital do Terreno, ficaram como, Dist. (respectivo número da classe), APP, Solos, Dec, Est. Pav., Est n-Pav, Dist Hidro, Dist Quiri, Dist Usina e MDT . A seguir serão abordadas algumas situações mais relevantes para a cana-de-açúcar ou situações particulares.

Na maioria das transições, em ambos os períodos da análise, os melhores ajustes dos pesos de evidência ocorreram para as variáveis de distância dinâmica dos usos e coberturas da terra. No caso das variáveis de distância dinâmica aos usos e coberturas da terra, os maiores valores de pesos de evidência concentraram-se nos valores mais baixos de distância, havendo decréscimo a medida que o valor distância aumentava da classe de destino, conforme exemplo da Figura 4.15. Isto significa dizer que a maior parte das transições possui uma característica de expansão em direção às classes de destino, sendo que, quanto mais próximas a estas maior é a atração a elas. Portanto, a heurística do algoritmo *expander* do Dinamica EGO deve-se ser prioritária para a fase seguinte. Por outro lado, no caso das conversões para “Cana-de-Açúcar” a variável de distância a usinas representou ajustes de pesos de evidência positivos bem significativos, conforme exemplo nas Figuras 4.16 e Figura 4.17.

Tabela 4.6 - Cruzamento de transições e variáveis explicativas com respectivos conceitos de ajuste de pesos de evidência, período 2005 a 2008.

| Transição/ Variáveis | Dist 1 | Dist 2 | Dist 3 | Dist 4 | Dist 5 | Dist 6 | Dist 7 | Dist 8 | APP | Solos | Dec | Est Pav | Est n-Pav | Dist Hidro | Dist Usina | MDT | |
|-------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|-------|---------|---------|-----------|------------|------------|---------|---------|
| 2005 - 2008 | 1->3 | - | -A(1) | +A(1) | +B(2) | C | C | +B(1) | -A(1) | -A(s) | C | -B(2,3) | C | C | +A(3) | C | +B(3) |
| | 1->4 | - | -A(1) | +B(1) | +A(1) | C | C | +B(1) | -B(1) | -A(s) | A | -A(2) | C | C | +B(2) | C | C |
| | 1->5 | - | +B(1) | +A(1,3) | C | C | C | C | +A(3) | -A(s) | B | +A(2) | C | C | +A(3) | C | +B(1,3) |
| | 1->6 | - | C | C | C | C | +A(1) | C | C | -A(s) | A | -A(1) | +A(1) | C | +B(2) | C | C |
| | 1->7 | - | -A(1) | -B(2) | +A(1) | C | C | +A(1) | -A(1) | -A(s) | B | -B(2,3) | +A(1) | C | -A(1) | +A(1) | +B(2) |
| | 2->3 | +A(3) | - | +A(1) | C | C | C | C | +B(2) | -B(s) | C | -B(2,3) | C | +B(1) | +B(2) | C | C |
| | 2->5 | +A(3) | - | C | C | C | C | C | C | C | A | +B(2) | C | C | C | C | C |
| | 2->7 | +A(3) | - | +A(1) | +A(1) | C | C | +A(1) | +B(2) | -B(s) | C | -A(2,3) | C | C | +B(3) | +A(1) | +B(2) |
| | 3->1 | -A(2,3) | +B(1) | - | +B(1) | C | C | +B(1) | +A(1) | +A(s) | C | +B(2) | - | C | -B(3) | +A(1) | +B(1) |
| | 3->4 | -A(1) | -A(1) | - | +A(1) | C | C | C | C | -A(s) | B | -A(2,3) | C | C | -A(1) | C | C |
| | 3->5 | -B(2,3) | -B(3) | - | +B(2) | +B(2) | +A(3) | +B(2) | -A(1,3) | C | A | +B(2) | - | +A(2) | -A(1) | +B(2) | +A(3) |
| | 3->7 | +B(2) | +B(3) | - | +B(1) | C | C | +A(1) | C | -B(s) | C | -A(2,3) | +A(1) | -A(1,2) | C | +A(1) | C |
| | 4->1 | C | C | -B(2,3) | - | C | C | C | C | -A(s) | A | -B(2) | C | +B(2) | -A(1) | +B(2) | +B(1) |
| | 4->7 | C | +A(3) | C | - | C | C | -B(2,3) | +B(2,3) | C | A | +B(2,3) | C | C | -A(1) | +B(1) | +B(3) |
| | 5->1 | +A(1) | +B(1) | C | +B(1) | - | C | C | +B(1) | C | A | +B(2,3) | C | C | C | +B(1) | +B(1) |
| 7->1 | C | -A(3) | +B(1) | C | C | C | - | -B(2) | C | B | -A(2,3) | +B(2,3) | C | C | C | +B(1,2) | |
| 7->3 | C | +B(2) | -A(2) | C | C | +B(1) | - | C | -A(s) | B | -B(2) | C | C | -A(1) | C | C | |

Tabela 4.7 - Cruzamento de transições e variáveis explicativas com respectivos conceitos de ajuste de pesos de evidência, período 2008 a 2011.

| Transição/ Variáveis | Dist 1 | Dist 2 | Dist 3 | Dist 4 | Dist 5 | Dist 6 | Dist 7 | Dist 8 | APP | Solos | Dec | Est Pav | Est n-Pav | Dist Hidro | Dist Usina | MDT | | |
|-------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|-------|-------|---------|---------|-----------|------------|------------|---------|---------|---|
| 2008 - 2011 | 1->3 | - | -A(1) | +A(1) | +A(1) | C | C | C | -A(1) | -A(s) | C | -B(2,3) | -B(1) | C | -A(1) | C | +B(3) | |
| | 1->4 | - | -A(1) | C | +A(1) | C | C | C | +B(2) | -A(s) | B | -A(2) | C | C | -A(1) | C | C | |
| | 1->5 | - | C | C | C | +A(1) | C | C | -A(1) | -A(s) | C | +A(2) | C | +B(1) | -A(1) | C | +B(1,3) | |
| | 1->6 | - | C | C | C | C | +A(1) | C | +B(2) | -A(s) | B | -B(2,3) | +A(1) | +B(1) | C | C | B | |
| | 1->7 | - | -A(1) | C | C | C | C | +B(1) | -A(1) | -A(s) | C | -B(2,3) | +A(1) | C | -A(1) | +B(1,2) | C | |
| | 2->3 | -A(2,3) | - | +A(1) | C | C | C | C | C | -B(s) | C | -B(2,3) | C | C | C | C | C | C |
| | 2->5 | C | - | +B(1) | C | +A(1,3) | C | C | C | C | B | C | C | C | -A(1) | C | C | |
| | 2->6 | -A(2,3) | | C | C | C | +A(1) | C | +B(2) | -A(s) | B | -A(2,3) | +A(1,2) | +A(1) | C | C | C | |
| | 2->7 | -A(2,3) | - | C | C | C | C | +A(1) | -A(3) | -A(s) | C | +A(1) | C | C | -A(1) | +B(1,2) | C | |
| | 3->1 | -A(2) | -A(3) | - | C | C | C | C | -A(3) | C | C | +B(2) | C | C | +B(1) | C | C | |
| | 3->4 | -A(1) | -A(1) | - | C | C | +B(2) | +B(2) | -A(1) | C | A | -A(2,3) | +B(2) | C | -A(1) | C | +B(3) | |
| | 3->5 | -A(2,3) | +B(3) | - | C | +A(1) | C | C | +A(3) | -A(s) | A | +A(2,3) | - | +B(2) | -A(1) | C | +B(3) | |
| | 3->7 | -A(2,3) | -A(1) | - | C | C | C | C | -A(1) | -B(s) | B | -A(2,3) | +B(1) | C | -A(1) | C | C | |
| | 4->3 | -A(1) | -A(1) | +A(1) | - | +B(2) | +A(2,3) | +A(2,3) | -A(1) | C | A | C | +A(2,3) | +B(2) | -A(1) | +B(2) | +A(3) | |
| 7->1 | C | -A(3) | C | C | C | C | - | +A(1,3) | +A(s) | B | -B(2) | C | C | -B(2) | C | +B(3) | | |
| 7->3 | C | -A(1) | +A(1) | C | C | C | - | C | -A(s) | C | -B(2,3) | C | C | -A(1) | C | C | | |

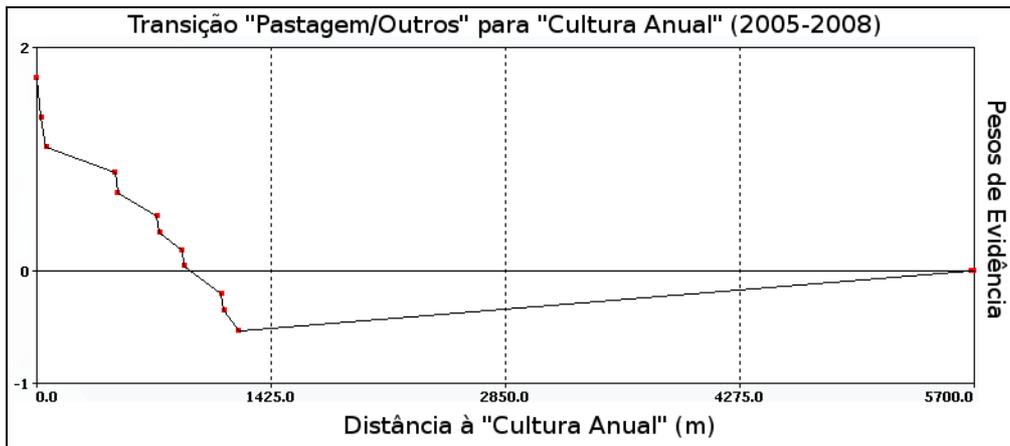


Figura 4.15 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Anual”, período 2005 a 2008, na variável de distância dinâmica à classe “Cultura Anual”.

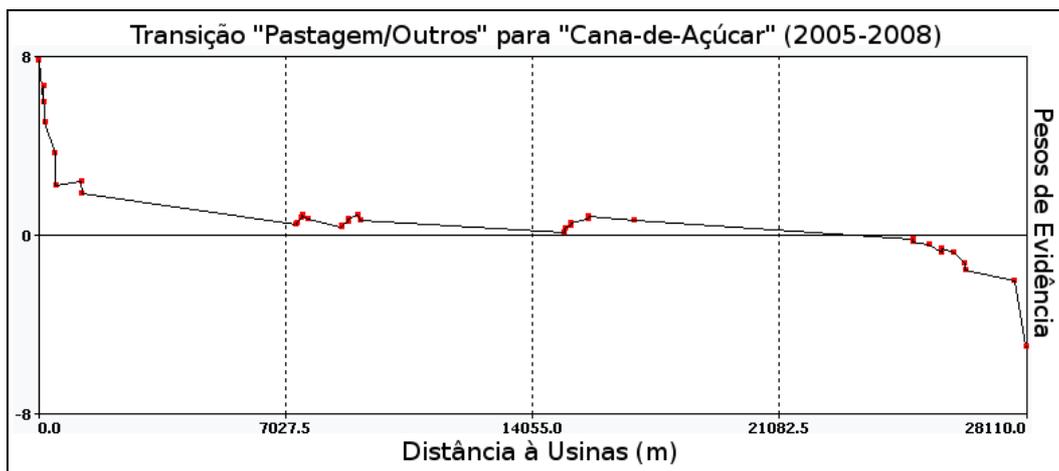


Figura 4.16 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cana-de-Açúcar”, período 2005 a 2008, na variável de distância à Usinas (2005-2008)

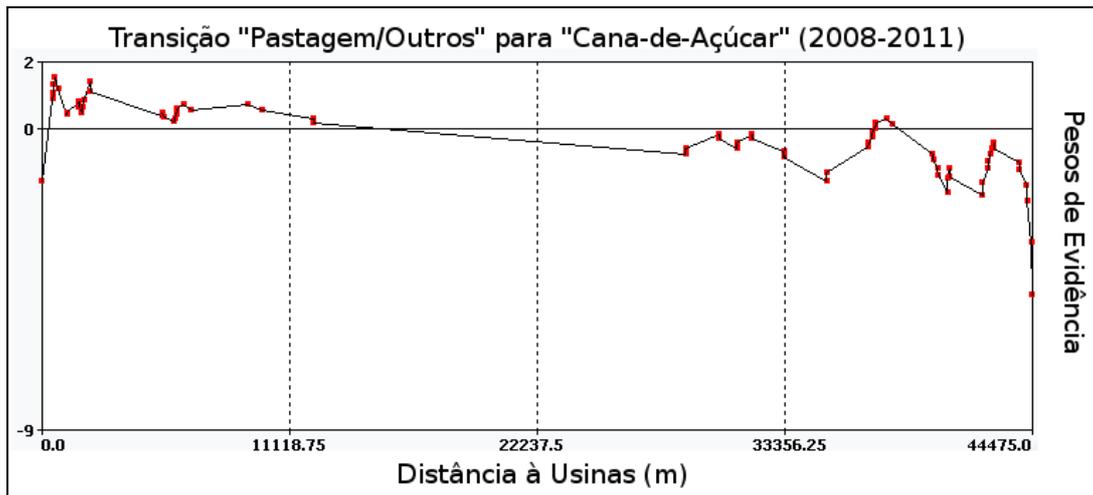


Figura 4.17 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cana-de-Açúcar”, período 2008 a 2011, na variável de distância à Usinas (2008-2011)

Conforme as Figuras 4.16 e 4.17, percebe-se a maior atratividade das usinas em relação à expansão da “Cana-de-Açúcar” sobre “Pastagem/Outros” no primeiro período. A menor atratividade das usinas no segundo período calculado pelo Dinâmica EGO pode ser explicada pelo fato de que o crescimento da cana-de-açúcar neste período ocorreu sobre áreas de menor custo ou antropismo, possibilitando que esta expansão ocorresse de forma mais arbitrária que no período anterior. Outra observação importante referente ao segundo período, em relação à transição “Pastagem/Outros” para “Cana-de-Açúcar”, é que a proximidade desta classe, de destino, passa a ter pesos de evidência menores em relação ao período anterior. Fato justificado devido a que, ocorrendo expansão cada vez mais longe de áreas já estabelecidas com “Cana-de-Açúcar”, a importância desta proximidade diminui.

Por outro lado, houve alguns casos mais isolados, em que a atratividade das classes ou variáveis explicativas saíram do padrão em que foi constatado de forma geral. Por exemplo, a classe “Vegetação Florestal”, que na maioria dos casos exerceu um papel de repulsão à conversão de classes, no caso da transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Permanente”, o seu papel ocorre de

forma contrária, conforme Figura 4.18. Esta resposta tem como justificativa a proximidade em que a “Cultura Permanente” se encontra à “Vegetação Florestal”, exercendo conseqüentemente uma atração à suas conversões. O plantio de “Culturas Perenes”, com predominância da seringueira, é menos vulnerável à terrenos mais declivosos, conforme pesos de evidência na Figura 4.19, que por sua vez abriga a maior concentração de formações florestais nativas. No entanto, este comportamento é mais evidente no período de 2005 a 2008, possivelmente pelo fato de que tal tipo conversão tenha sido mais concentrada naquele período.

A constatação da atratividade da “Vegetação Florestal” também foi encontrada em outras situações, sendo todas situadas no primeiro período. Foram elas, a transição “Cultura Permanente” para “Pastagem/Outros” e transição “Cultura Anual” para “Pastagem/Outros”. O primeiro caso segue a mesma lógica demonstrada acima, em que a “Vegetação Florestal” possui uma inerente proximidade à “Cultura Permanente”. Neste caso, a declividade também não é um fator limitante até certo ponto. No segundo caso, por outro lado, responde a uma evasão das culturas agrícolas anuais em áreas em que anteriormente

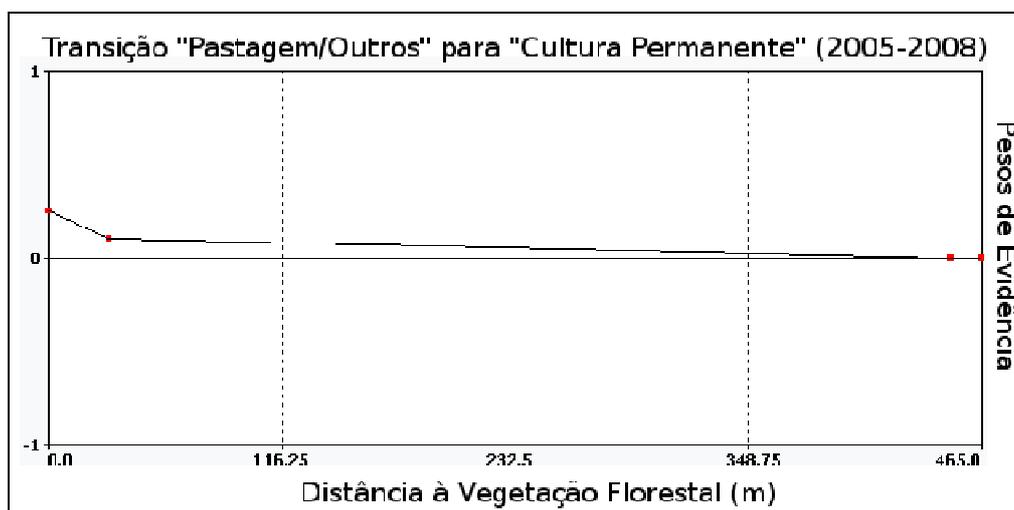


Figura 4.18 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Permanente”, período 2005 a 2008, na variável de distância à “Vegetação Florestal”.

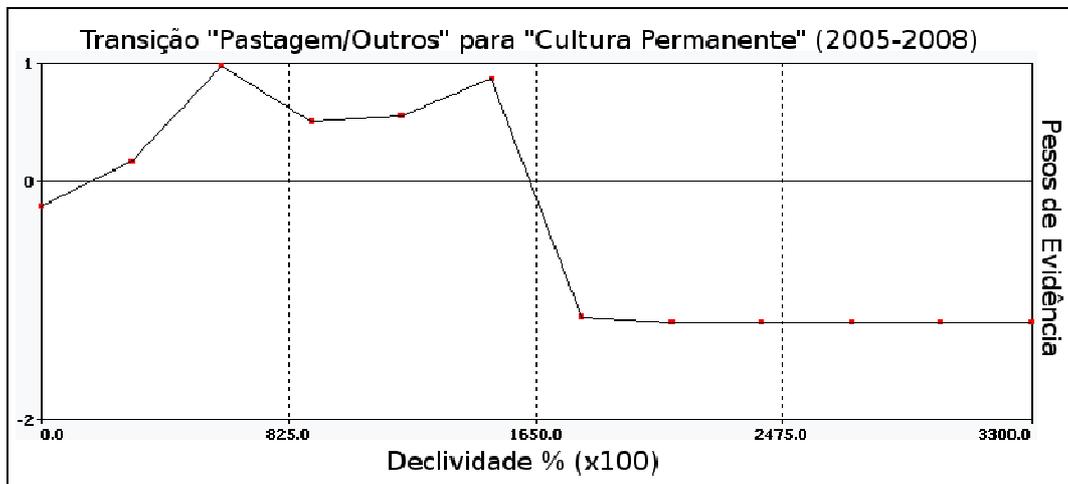


Figura 4.19 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Permanente”, período 2005 a 2008, na variável Declividade.

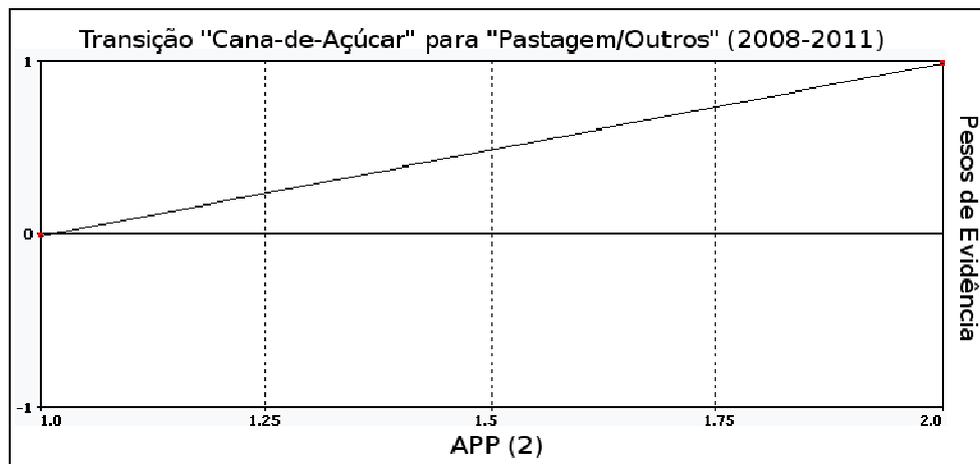


Figura 4.20 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cana-de-Açúcar” para “Pastagem/Outros”, período 2008 a 2011, na variável discreta “APP”.

eram ocupadas por formações florestais. Esta afirmação é ainda reforçada pelo fato de que ocorreu peso de evidência positivo em APP nesta transição e no mesmo período. Esta constatação pode ter ocorrido em decorrência da expansão da “Cana-de-Açúcar” sobre “Cultura Anual” prioritariamente no

primeiro período, cuja substituição deve ter tido maior obediência com relação ao Código Florestal. Possivelmente, visando a implantação de reservas legais. Outro fato que reforça a hipótese levantada é que a transição de “Cana-de-Açúcar para “Pastagem/Outros”, no segundo período, ocorre sobre peso de evidência positivo em áreas de APP, conforme Figura 4.20.

A variável de distância a estradas pavimentadas obteve significado diferenciado em relação à variável de distância a estradas não-pavimentadas, como percebe-se nas Tabelas 4.5 e 4.6, acima. A distância a estradas pavimentadas obteve maior atratividade no período de 2005 a 2008, quando houve maiores pesos de evidência a menores distâncias desta variável explicativa, conforme comparabilidade entre os dois períodos na Figura 4.21. Esta resposta é uma constatação de que no primeiro período a expansão da cana-de-açúcar, mesmo sobre áreas de “Pastagem/Outros” ocorreu próxima a áreas de maior infra-estrutura, de talhões agrícolas já historicamente estabelecidos e conseqüentemente, com maior proximidade de estradas já pavimentadas. Em contrapartida, a expansão da cana-de-açúcar no segundo período ocorreu principalmente nas áreas mais ao sul e sudoeste da área de estudo, que são áreas com uso mais extensivo, onde ocorre prioritariamente o pastoreio sob pastagem plantada e pastagem nativa.

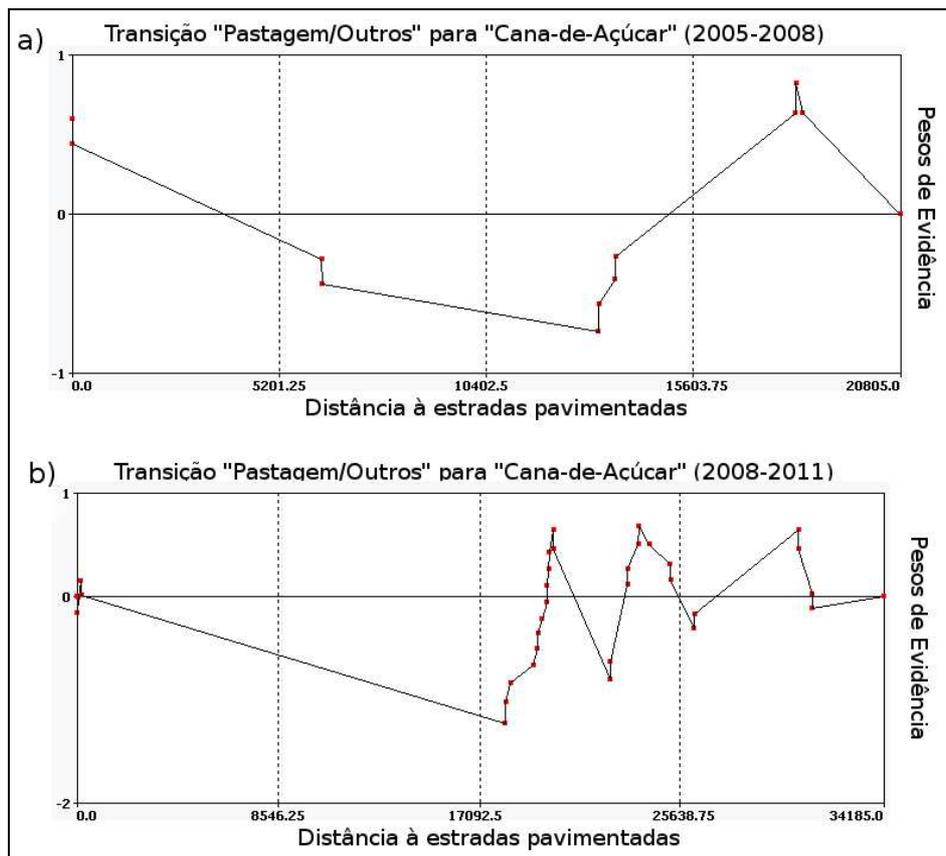


Figura 4.21 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cana-de-Açúcar” para “Pastagem/Outros”, período 2005 a 2008 (a) e 2008 a 2011 (b), em relação à variável distância a estradas pavimentadas.

A mesma transição citada em relação a distância à estradas não-pavimentadas, os pesos de evidência não se mostraram tão bem ajustados quanto às distâncias a estradas pavimentadas. Contudo, o período de 2008 a 2011 apresenta um comportamento contínuo de pesos de evidência positivos a distâncias médias a este tipo de estradas. Isto reflete um sensível maior significado em relação a estas variáveis explicativas, tendo em vista que a expansão da cana-de-açúcar no segundo período acontece em áreas com rede viária menos densa e de padrão de ocupação homogêneo, predominando a pastagem. Tais características elevaram a importância das estradas não-pavimentadas no segundo período, conforme Figura 4.22.

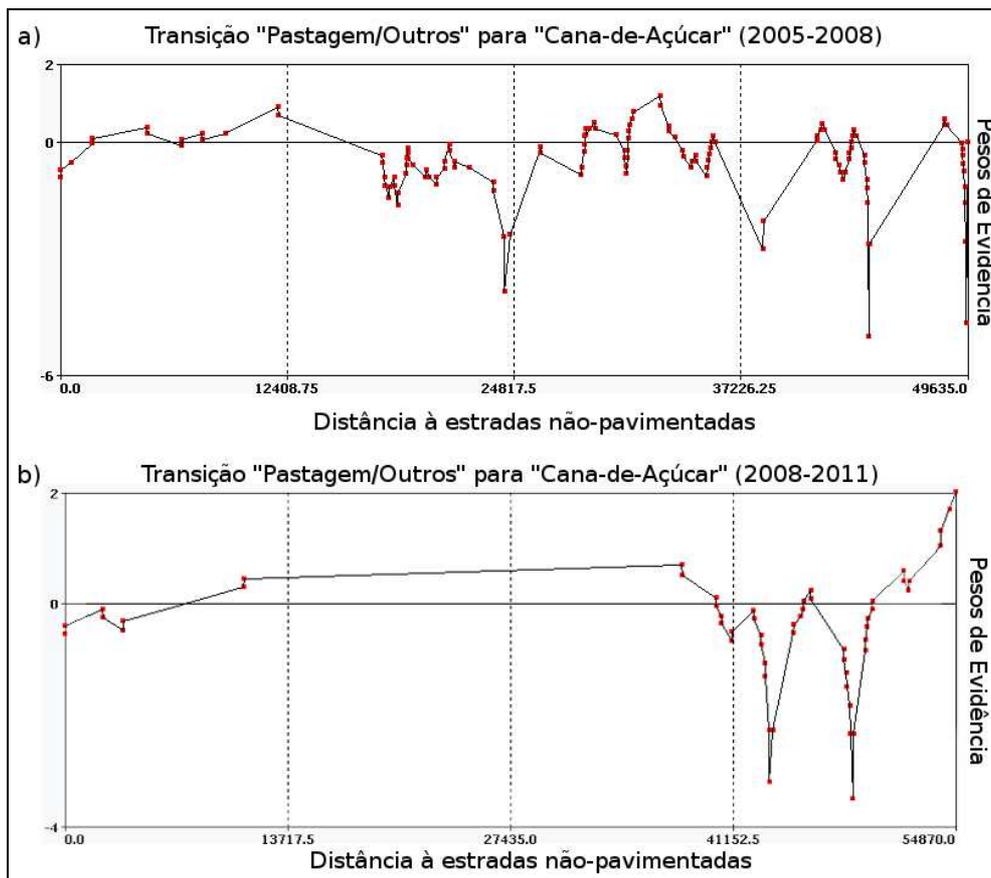


Figura 4.22 - Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cana-de-Açúcar” para “Pastagem/Outros”, período 2005 a 2008 (a) e 2008 a 2011 (b), em relação à variável distância a estradas não-pavimentadas.

Ao verificarmos a transição “Cultura Anual” para “Cana-de-Açúcar”, podemos chegar a um outro ponto de vista do avanço da cana-de-açúcar. No período de 2005 a 2008, onde a expansão da cana-de-açúcar ocorreu com grande intensidade sobre áreas já agrícolas, os pesos de evidência em relação à distância às estradas pavimentadas se apresentaram com valores menores que no período posterior, porém mantendo-se positivos a maiores distâncias. Entre 2008 e 2011, o comportamento dos pesos de evidência se apresenta em um padrão contrário ao período anterior. No primeiro período, devido à maior intensidade de conversões de “Cultura Anual” para “Cana-de-Açúcar”, tal evento não é conduzido necessariamente pela proximidade às estradas pavimentadas. No segundo período, quando há certo retorno de “Cultura

Anual” sobre “Cana-de-Açúcar” e um avanço mais modesto na transição contrária, esta última transição apresenta-se sensivelmente mais seletiva no quesito proximidade às estradas pavimentadas. Desta observação pode-se inferir que o critério de proximidade a estradas, apesar de ser relevante, acontece de forma secundária quando a expansão é acentuada sobre outra classe agrícola. A Figura 4.23 apresenta estes dois comportamentos.

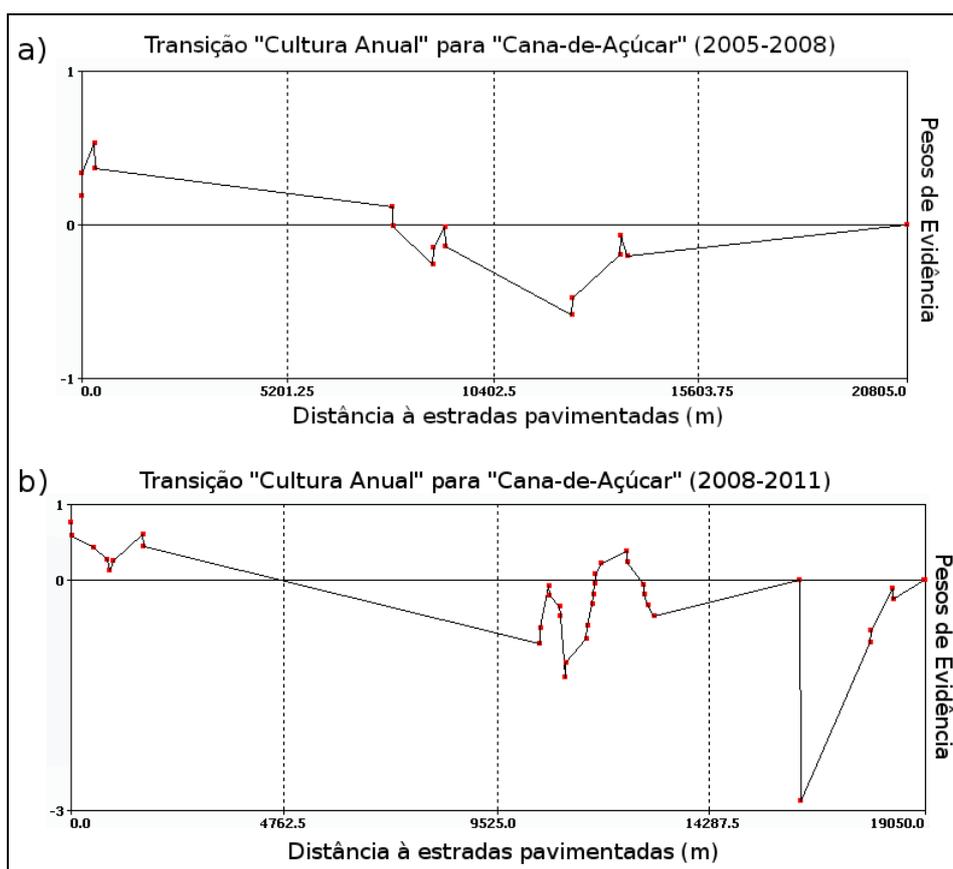


Figura 4.23 – Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cultura Anual” para “Cana-de-Açúcar”, período 2005 a 2008 (a) e 2008 a 2011 (b), em relação à variável distância a estradas pavimentadas.

As variáveis “Altimetria” e “Solos” apresentaram altos e baixos pesos de evidência conforme a localização de cada classe de uso e cobertura da terra inicial. Este fato fez com que estas variáveis mantivessem uma certa dependência espacial às classes de uso e cobertura da terra. Especificamente

em relação a variável “Solos” a mesma foi pouco determinante para a expansão da cana-de-açúcar, principalmente no segundo período (2008 a 2011), haja vista a grande expansão da cana-de-açúcar em tal período. Pelo fato de esta variável advir de um dado de pequena escala (1:1.000.000), classes mais concentradas ou de pouca representação de área foram cultivadas em poucos tipos de solos, o que, teoricamente, apresentou um ajuste melhor à a variável explicativa de solos. Caso semelhante, porém menos evidente, aconteceu com a “Altimetria”. Considerando esta explicação, os melhores ajustes a estas variáveis explicativas ocorrem em transições com presença das classes “Cultura Irrigada” ou “Cultura Permanente”, como exemplo da Figura 4.24. No entanto, cabe salientar que classes com abrangência mais pontual, como “Cultura Irrigada” e “Cultura “Permanente” na área de estudo, são mais sensíveis a determinadas faixas de valores de distâncias, as quais, por sua vez, possuem um intervalo que coincide com a localização da mancha de boa parte de uma destas classes, mas não que necessariamente deflagram uma rela situação de atratividade.

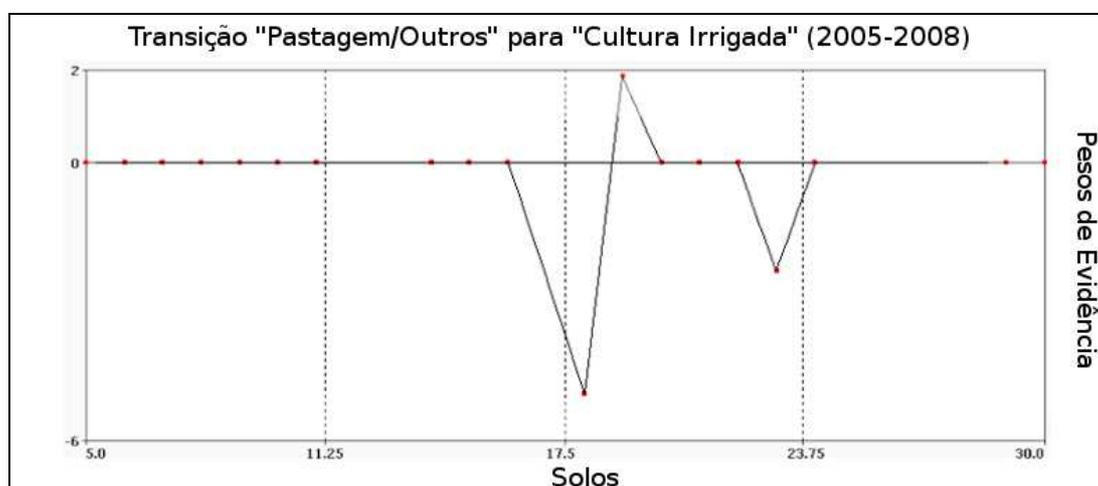


Figura 4.24 – Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Pastagem/Outros” para “Cultura Irrigada”, período 2005 a 2008 em relação à variável solos.

Especificamente, a transição “Cultura Irrigada” para “Cana-de-Açúcar” não apresentou uma variável com grande representatividade neste evento. Considerando que a distância a usinas foi a que mais influenciou à conversões para a “Cana-de-Açúcar”, esta variável explicativa, indiretamente, também influenciou na classe de origem “Cultura Irrigada” para a “Cana-de-Açúcar”. Este evento somente acontece no primeiro período e apresentou o padrão conforme Figura 4.25.

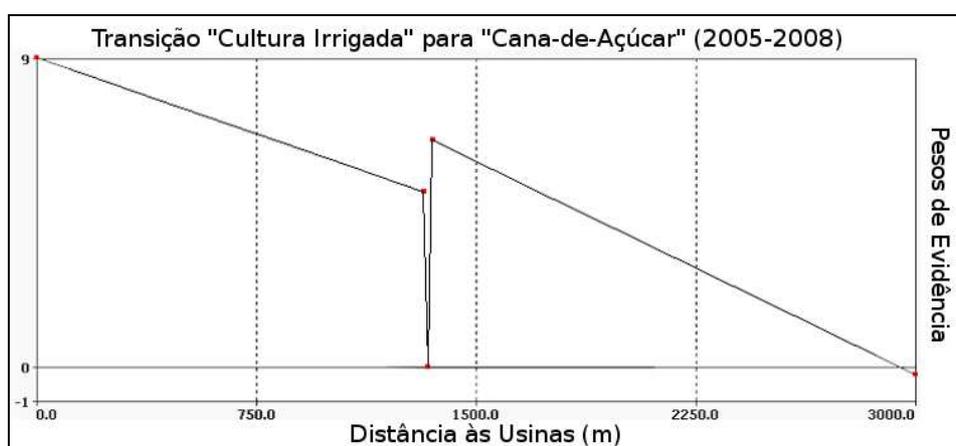


Figura 4.25 – Comportamento dos Pesos de evidência na transição “Cultura Irrigada” para “Cana-de-Açúcar”, período 2005 a 2008 em relação à variável distância às usinas.

Após a geração dos pesos de evidência foi realizada a etapa de calibração. Nesta foram analisados, entre cada transição, valores de percentual do algoritmo de *expander* (complementar ao *patcher*), e dos seguintes valores pertinentes aos fragmentos de área que ocorreu mudanças: área média, variância média e isometria. Para os ajustes dos valores de percentual de *expander* e isometria, foi necessário o processamento de mapas simulados com diferentes valores associados a fim de que pudessem ser constatadas as respostas da calibração. As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam tais valores para os períodos 2005 a 2008, e, 2008 a 2011.

Para o período de 2005 a 2008, os valores médios de área e variância dos fragmentos foram 16,1429 (ha) e 3203,1562 (ha), respectivamente. Enquanto

que no período de 2008 a 2011 estes valores foram de 27,3845 (ha) e 3404,6263 (ha). Os maiores valores no segundo período são coerentes às transições daquele período, sendo em maiores fragmentos e mais diversificados em termos de área. A maior diferença de área entre os dois períodos se deu na conversão da “Cultura Anual” para “Cultura Irrigada”, com maior proporção no segundo período, com 1669% de acréscimo desta transição, ou 114,4 hectares. Trata-se do retorno de pivôs centrais da “Cultura Irrigada” frente à sua diminuição no primeiro período, com a expansão da cana-de-açúcar. Em relação ao percentual de *expand*, percebe-se que esta é preponderante em todas as transições de uso e cobertura da terra.

Em média, os valores de *expand* foram atribuídos em 82 % e 80 % para o primeiro período e para o segundo período, respectivamente. A alta proporção atribuída de *expand* deve-se a característica da dinâmica do uso da terra típico da região, a agricultura. Este tipo de uso se dá em forma de talhões, os quais, em média, são de no mínimo algumas dezenas de hectares na região Centro-Sul (LUIZ; EPIPHANIO, 2001), cuja dinâmica ocorre de forma compacta e em áreas próximas a outras. Esta característica é um tanto diferenciada ao fenômeno de desflorestamento da Amazônia, o qual foi o propósito inicial do programa Dinamica EGO. O desflorestamento na Amazônia ocorre de diferentes formas, dependendo da região analisada, havendo áreas em que a característica do *patcher* é dominante (ALVES, 2002). Em relação à isometria, quase todos os valores foram mantidos a “2”, sendo que as transições envolvendo “Vegetação Florestal” foram ajustados para “1,5” com a intenção de que nesta conversão fossem formados padrões menos compactos. Considerando tais calibrações, foram gerados mapas de probabilidades de transição e de simulação compreendendo os três anos de iteração para cada período analisado.

Tabela 4.8 - Valores de Calibração adotados para o modelo no período 2005 a 2008.

| Classe Origem | Classe Destino | Área média (ha) | Variância (ha) | Expandir (%) | Isometria |
|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|
| Cana-de-Açúcar | Cultura Anual | 18,2575 | 1805,6281 | 90 | 2 |
| Cana-de-Açúcar | Pastagem/Outros | 55,6601 | 3982,7455 | 80 | 2 |
| Cultura Anual | Cultura Permanente | 38,6212 | 5950,1940 | 100 | 2 |
| Cultura Anual | Cana-de-Açúcar | 37,5014 | 31767,3940 | 90 | 2 |
| Cultura Anual | Pastagem/Outros | 2,5960 | 577,1518 | 80 | 2 |
| Cultura Anual | Cultura Irrigada | 6,4670 | 353,9528 | 60 | 2 |
| Cultura Irrigada | Cana-de-Açúcar | 27,9165 | 4673,6685 | 95 | 2 |
| Cultura Irrigada | Pastagem/Outros | 67,6238 | 1461,6473 | 80 | 2 |
| Cultura Permanente | Pastagem/Outros | 2,8549 | 93,8996 | 100 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cana-de-Açúcar | 10,3410 | 3150,9882 | 90 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cultura Anual | 2,8823 | 523,9839 | 80 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cultura Permanente | 1,6367 | 71,9222 | 80 | 2 |
| Pastagem/Outros | Área Urbana | 0,1730 | 0,1082 | 80 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cultura Irrigada | 1,1192 | 38,7711 | 60 | 2 |
| Vegetação Florestal | Cultura Permanente | 0,4737 | 0,8100 | 100 | 1,5 |
| Vegetação Florestal | Cana-de-Açúcar | 0,2334 | 0,6875 | 90 | 1,5 |
| Vegetação Florestal | Cultura Anual | 0,0719 | 0,1024 | 40 | 1,5 |

Tabela 4.9 - Valores de Calibração adotados para o modelo no período 2008 a 2011.

| Origem | Destino | Área média (ha) | Variância (ha) | Expandir (%) | Isometria |
|---------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|
| Cana-de-Açúcar | Pastagem/Outros | 32,5325 | 4904,9211 | 90 | 2 |
| Cana-de-Açúcar | Cultura Anual | 4,0085 | 569,3264 | 80 | 2 |
| Cultura Anual | Cultura Permanente | 88,8300 | 11222,3566 | 95 | 2 |
| Cultura Anual | Pastagem/Outros | 72,0601 | 11465,8105 | 90 | 2 |
| Cultura Anual | Cana-de-Açúcar | 67,7398 | 11799,6372 | 90 | 2 |
| Cultura Anual | Cultura Irrigada | 114,4125 | 315,2560 | 80 | 2 |
| Cultura Irrigada | Cultura Anual | 13,5000 | 0,0000 | 100 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cultura Permanente | 9,7398 | 356,0939 | 100 | 2 |
| Pastagem/Outros | Área Urbana | 1,2938 | 61,7983 | 95 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cultura Irrigada | 2,9105 | 337,6728 | 90 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cana-de-Açúcar | 20,0634 | 12565,4595 | 80 | 2 |
| Pastagem/Outros | Cultura Anual | 10,2193 | 873,3024 | 70 | 2 |
| Vegetação Florestal | Cultura Permanente | 0,3463 | 1,8364 | 100 | 1,5 |
| Vegetação Florestal | Área Urbana | 0,1482 | 0,0594 | 80 | 1,5 |
| Vegetação Florestal | Cultura Anual | 0,0739 | 0,1834 | 20 | 1,5 |
| Vegetação Florestal | Cana-de-Açúcar | 0,2740 | 1,2673 | 20 | 1,5 |

Em relação aos mapas de probabilidade final, para fins de apresentação neste estudo, foi realizado um processamento para extrair as maiores probabilidades dentre o conjunto de classes de origem para cada classe de destino. Estes mapas foram denominados mapas de probabilidades máximas, conforme figuras 4.26 e 4.27. As probabilidades máximas do período 2005 a 2008 tiveram diferenças perceptíveis em relação ao período 2008 a 2011. Ao serem comparados os dois períodos, a maioria dos mapas de probabilidade concentraram seus valores no sentido norte a sul da área de estudo, haja vista que as maiores áreas agrícolas e de dinâmica espaço-temporal avançaram neste sentido, sobretudo a cana-de-açúcar. Pelo mesmo motivo, no período de 2005 a 2008 houve menor distribuição total das probabilidades de transição que em relação à 2008 a 2011. A classe “Pastagem/Outros” por ser a que deteve maior área apresentou associação espacial com as maiores transições ao longo dos dois períodos. Especialmente, a “Cultura Anual” obteve maior contribuição nas probabilidades para a transição de “Pastagem/Outros”, principalmente no primeiro período. É neste período em que há um possível abandono da “Cultura Anual” para a entrada da “Cana-de-Açúcar”, deflagrando a classe “Pastagem/Outros, tendo em vista o critério adotado de classificação neste interstício de tempo. Este fato, também é amparado constatação de que as maiores probabilidades estarem concentradas no eixo leste centro da área de estudo, justamente, onde ocorre maior expansão da “Cana-de-Açúcar em 2008.

Em relação às probabilidades para “Cultura Anual”, no período de 2005 a 2008 é possível perceber que as maiores probabilidades de mudança ocorrem de forma mais fragmentada que em relação ao período seguinte. No primeiro período há grande perda de área de “Cultura Anual”, ocorrendo algumas conversões de área para esta classe de forma fragmentada. No segundo período, a “Cultura Anual” também segue com perda de área, porém bem menor em relação ao período anterior, não ocorrendo deslocamentos significativos de área. Tal fato ocasiona uma concentração desta classe na

porção nordeste, o que acarreta, necessariamente, maiores probabilidades nesta porção.

A “Cultura Irrigada” apresentou probabilidades bem distribuídas, igualmente à presença desta classe. Esta característica é plausível, uma vez que classes que compreendem pequenas áreas em relação ao todo, podem apresentar baixos pesos de evidência, ou, quando altos, por vezes expressa um padrão que aconteceu pontualmente, mas sem necessariamente ter um significado a nível global. De qualquer forma, a proximidade da “Cultura Anual”, de forma geral, esteve mais associada ao evento de transição para a “Cultura irrigada”. De fato é a principal classe neste tipo de transição, tanto como de destino ou de origem. Certas probabilidades que se apresentam ao sul ou sudoeste, tem como principal origem a classe “Pastagem/Outros”. Este tipo de transição evidenciou probabilidades onde raramente poderia acontecer “Cultura irrigada”, ou seja, fora das concentrações de estradas e infraestruturas já estabelecidas. Esta alta distribuição foi mais bem constatada no primeiro período, onde ocorre redução de “Cultura Irrigada” para “Cana-de-Açúcar” e “Pastagem/Outros”, em que apenas ocorrem deslocamento de novas áreas para “Cultura Anual” e “Pastagem Outros”. O retorno de seu crescimento, no segundo período, apresenta-se praticamente sobre “Cultura Anual”, a qual possui uma característica mais concentrada, e, portanto, reportando a probabilidades também mais concentradas.

A “Cultura Permanente”, igualmente à “Cultura Irrigada” também apresenta pouca área em relação ao restante da aera de estudo, levando consigo características semelhantes. Porém, esta classe apresenta-se mais concentrada em relação a “Cultura Irrigada”. Esta concentração ficou sendo constatada a noroeste, e sua expansão acontece a oeste da área de estudo. Esta, porém acontece de forma mais fragmentada. Nestas porções, há maior presença de “Vegetação Florestal” e os terrenos mais declivosos da área de estudo. As classes de origem “Vegetação Florestal” e Pastagem/Outros” não possuem qualquer concentração, o que leva a que as probabilidades de

conversão para “Cultura Permanente” a partir destas classes possa ocorrer em localizações nem sempre próximas às áreas mais próximas da ocorrência da “Cultura Permanente”. Também, aliado a tal fato, a partir destas classes de origem, foram gerados altos pesos de evidência em médias e grandes distâncias na maioria das variáveis explicativas, levando a que ocorresse alta probabilidade de transição em áreas mais isoladas. Por outro lado, a “Cultura Anual”, que é concentrada, possui proximidade à classe “Cultura Permanente”, permitindo que ocorressem maiores probabilidades de transição próximas as áreas de “Cultura Anual”. Este fato ficou mais evidente no segundo período, quando ocorre maior expansão da “Cultura Permanente”, inclusive, ocorrendo contribuição da classe “Cultura Anual” nesta conversão, na área de estudo com *buffer*.

A classe “Área Urbana” detentora, também, de pequenas áreas, porém sendo bem coesas. Sua expansão, ocorre quase que totalmente em áreas contíguas das áreas já existentes. No primeiro período sua expansão ocorre totalmente a partir de “Pastagem/Outros”, e, por este fato, foram geradas probabilidades mais dispersas, onde é possível constatar, na maior parte das variáveis explicativas, o fator de repulsão, em vez da atração, igualmente, porém em menor medida, às classes “Cultura Permanente” e “Cultura Irrigada”. Este fato gera probabilidades onde ocorre menor participação das demais classes e variáveis explicativas. Portanto, é possível constatar áreas a sudoeste com altas probabilidades de conversão para a “Área Urbana”. Contudo, no segundo período, quando ocorre participação de “Vegetação Florestal” para “Área Urbana”, as probabilidades se concentraram mais proeminentemente nos arredores da cidade de Quirinópolis. É importante notar que no caso da “Cana-de-Açúcar” (ambos períodos) e da “Cultura Anual” (período 2008 a 2011) não ocorreu uma grande diminuição das respectivas probabilidades em direção às áreas urbanas. Tal fato deve-se a que as áreas urbanas estão cercadas por atividades primárias e que não há um protocolo ou zoneamento específico de determine uma área mínima de distanciamento de áreas agrícolas e urbanas.

A classe “Cana-de-Açúcar” possui grandes áreas de probabilidade nos dois períodos. No primeiro período as probabilidades se limitam prioritariamente até a parte centro-sul da área de estudo mais *buffer*, enquanto que, no segundo período, estas alcançam as porções sudoeste, sul e sudeste (no município de Santa Vitória). Como foi observado com os pesos de evidencia, no primeiro período, a expansão da cana-de-açúcar possuiu uma associação maior com as estradas e demais classes e variáveis explicativas, contudo, no segundo período, os fatores de proximidade para tal expansão diminuem suas devidas importâncias, levando a que ocorresse altas probabilidades em uma maior extensão de área. Também, é possível constatar que, no segundo período, as mais altas probabilidades não estão mais concentradas na porção noroeste, como ainda é possível notar no primeiro período, mas sim concentradas nas faixas de fronteira na direção sul.

Os resultados dos mapas simulados finais, para cada período, são apresentados conforme a Figura 4.28. A primeira vista, observa-se que as simulações acompanharam a maior parte das direções do avanço da cana-de-açúcar das classificações obtidas. Este resultado, porém, ocorreu de forma bem fragmentada, ainda que com atribuição de altos valores de percentuais de *expand* nas diferentes transições. No caso do período final 2008, a simulação das classes “Cultura Anual” e “Cana-de-Açúcar” tiveram grande disputa de área, onde percebe-se maior mistura entre estas classes que em relação à 2011. Em contrapartida, a expansão da “Cana-de-Açúcar” em 2011, que foi prioritariamente sob “Pastagem/Outros”, também se apresenta sob aspecto fragmentado, com “Pastagem/Outros”. A diminuição do avanço da cana-de-açúcar sobre a “Cultura Anual” produziu uma exatidão maior do mapa simulado no ano de 2011. Em ambos os mapas simulados são apresentados círculos pretos, onde foram constatadas as maiores inconsistências entre as duas

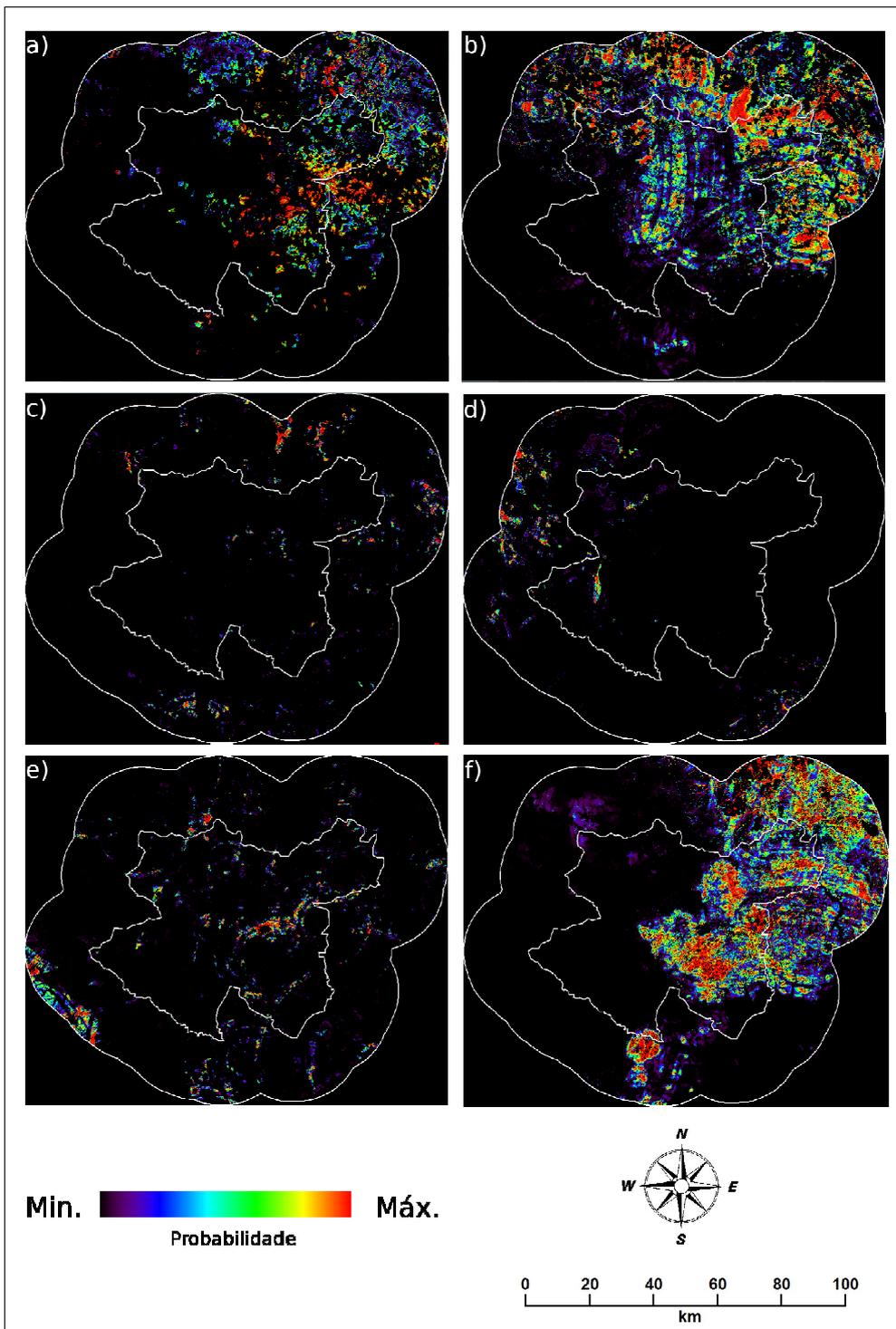


Figura 4.26 - Mapas de probabilidades máximas do período 2005 a 2008, sendo as transições de destino: a) “Pastagem Plantada/Outros”, b) “Cultura Anual”, c) “Cultura Irrigada”, d) “Cultura Permanente”, e) “Área Urbana”, e, f) “Cana-de-Açúcar”.

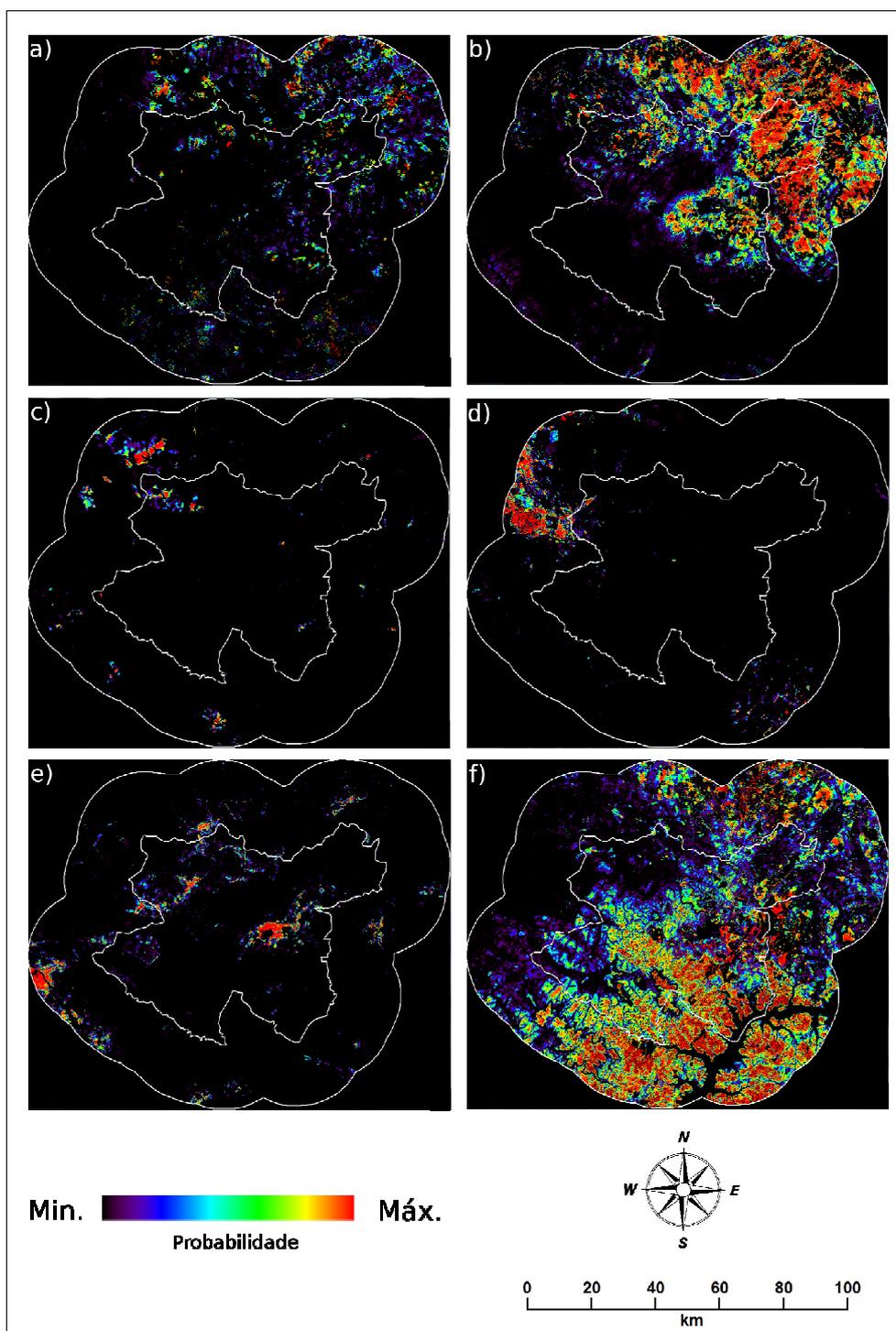


Figura 4.27 - Mapas de probabilidades máximas do período 2008 a 2011, sendo as transições de destino: a) "Pastagem Plantada/Outros", b) "Cultura Anual", c) "Cultura Irrigada", d) "Cultura Permanente, e) "Área Urbana", e, f) "Cana-de-Açúcar".

simulações. Percebe-se que não há um padrão de inconsistência, ocorrendo erros de omissão e comissão.

As “Áreas urbanas” simuladas tiveram boa aderência às classificações, ainda que com baixa simetria na sua expansão simulada. Em ambas simulações foram mantidas as expansões de agrícolas a certa distância da cidade de Quirinópolis. A classe “Cultura Irrigada” apesar de ser uma cultura pontual, a sua modelagem se apresentou satisfatória em ambos períodos, haja vista que houve acerto nos pivôs abandonados e naqueles acrescentados entre os períodos. Em contrapartida, a classe “Cultura Permanente” obteve um baixo desempenho, cujo aparecimento desta classe na simulação para 2011 se deu a noroeste, ao contrário do que acontece na classificação no município de Quirinópolis, a qual apareceu isolada a 7,7 km a oeste da cidade de Quirinópolis. Tal resultado, em parte, é justificado pelo fato de que os fragmentos de “Cultura Permanente” se encontravam quase que totalmente aglutinados no município vizinho, a oeste e noroeste de Quirinópolis, Rio Verde. Deve-se recordar que a intenção da modelagem dinâmica espacial não é o de acertar exatamente o local da transição ocorrida, mas de deflagrar as tendências espaço-temporais e analisar os fatores que podem impulsionar um determinado comportamento de uso e cobertura da terra. espacial. O Dinamica EGO realiza modelagem com componente estocástico, o qual traduz as possíveis variações de uma ocupação da terra, mesmo sobre uma alta probabilidade de ocupação.

De forma geral, visualmente, o segundo período apresentou maiores acertos na simulação. Isto tem uma justificativa pelo fato de que houve maior desconcentração na ocorrência de classes, característica favorecida pela expansão da cana-de-açúcar, principalmente nas áreas ao sul da área de estudo. No primeiro período há muitas áreas de “Pastagem Plantada”, a qual,

praticamente, se apresenta como “plano de fundo” às demais transições, dada a sua grande área ocupada.

Ao analisarmos as proporções de expansão e contração de área de cada classe dos mapas simulados em relação às classes das classificações (mapas de referência) é possível sintetizar os erros em relação a cada período, conforme Figura 4.29. A classe com maior erro apresentado foi a Cultura Permanente na simulação para 2011. Como informado acima, o surgimento no município de Quirinópolis desta classe, no ano de 2011, aconteceu em um área

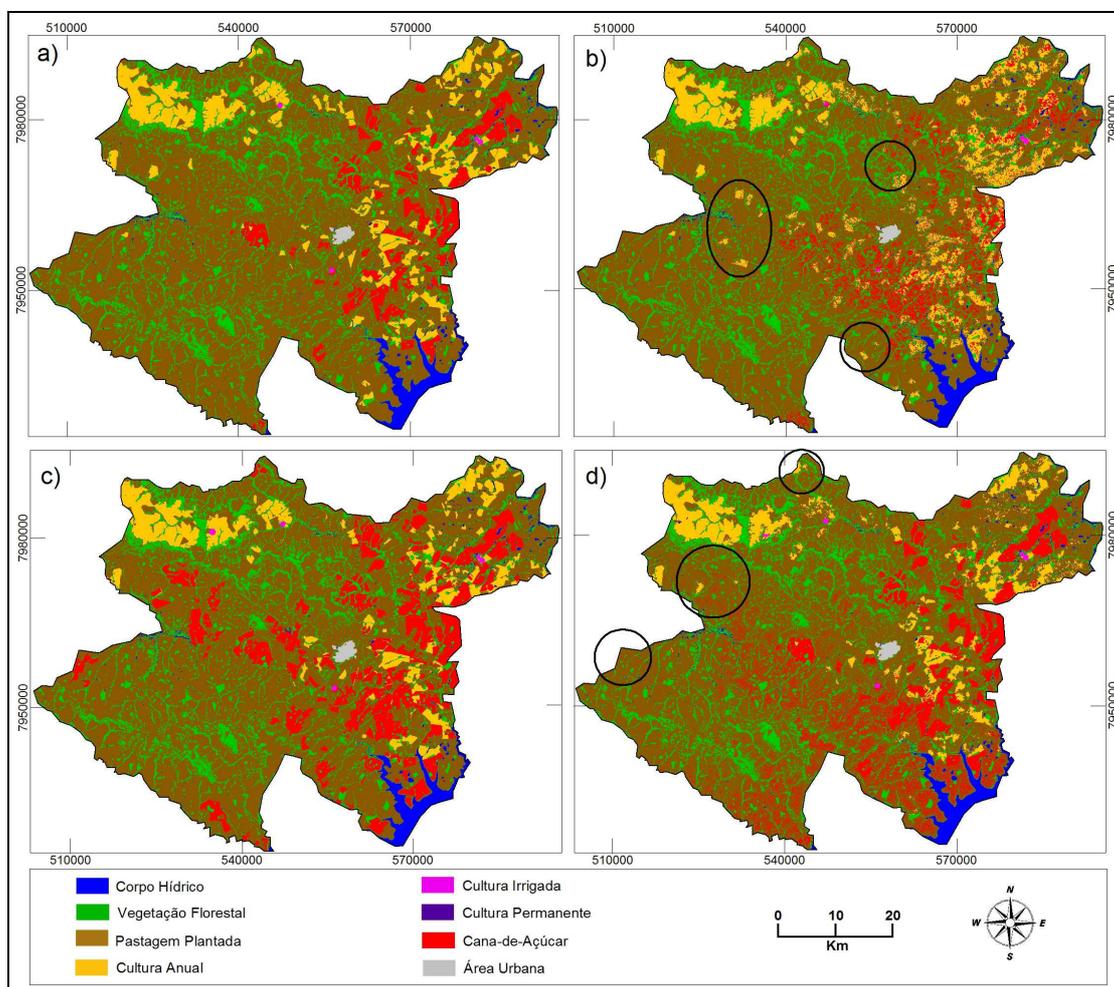


Figura 4.28 - Comparação dos mapas simulados com as Classificações (observados) para cada período: a) Classificação de 2008; b) Mapa simulado de 2008; c) Classificação de 2011; d) Mapa simulado de 2011. Sob os círculos constam os principais erros verificados.

diferente do padrão de ocupação que vinha ocorrendo nos últimos anos. Além deste fato, como é possível constatar no gráfico, a área que é simulada em 2011 para esta classe é inferior em 33,83% da área de referência. A “Cultura Anual” e a “Cultura Irrigada”, do ano de 2008, foram as classes que mais apresentaram erros em comparação ao ano de 2011. A “Cultura Irrigada”, devido a possuir pouca área, principalmente em 2008, qualquer diferença entre o mapa classificado e o simulado, em termos proporcionais, resultaria em um erro mais elevado. Por outro lado, esta observação a nível absoluto e em relação à proximidade às classes de referência, constata-se de que não se trata de erro acentuado. A “Cultura Anual” apresentou uma superestimativa de 11,49% e a “Cultura Irrigada” uma subestimativa de 20,25%. A “Área Urbana”, depois da “Cultura Permanente”, foi a classe que apresentou maior erro no ano de 2011, em termos comparativos a 2008. esta classe apresentou subestimativa de 9,81%. A “Cana-de-Açúcar” apresentou em ambos os anos

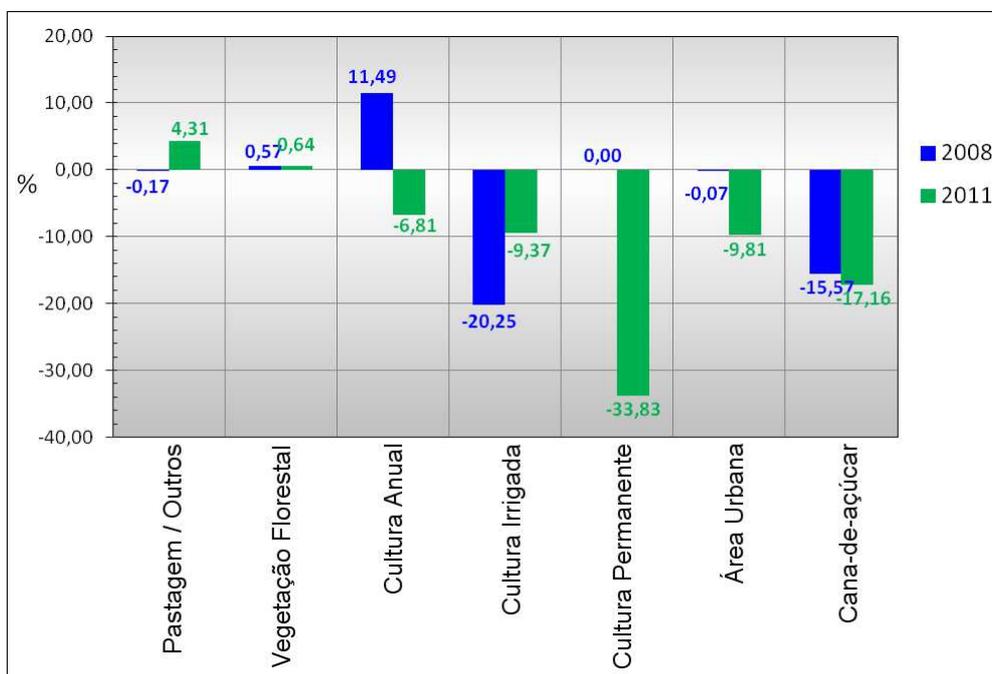


Figura 4.29 - Diferenças percentuais de área entre os mapas simulados com as Classificações (observados) para cada período.

simulados, subestimativas. O padrão resultante da simulação das classes, “picotado”, levou com que na maioria dos casos ocorresse subestimativa das áreas das classes. Neste aspecto o ano de 2011 apresentou um desempenho ligeiramente melhor em relação ao ano de 2008.

De acordo com as validações das simulações, 2008 e 2011 apresentadas nas Figuras 4.30 e 4.31, ambos os períodos apresentaram-se um pouco abaixo do satisfatório, uma vez que os índices de similaridade recíproca com decaimento exponencial máximos nas janelas 7x7 foram inferiores que 0,45. As validações com e sem decaimento exponencial da simulação de 2011 apresentaram valores inferiores em relação à simulação de 2008. Tal fato, no entanto é contestável, se analisarmos o gráfico da Figura 4.28 e visualmente os mapas simulados, onde a mapa de 2011 apresenta classes menos fragmentadas. Na janela com 11 pixels e com decaimento exponencial, os valores de média mínima apresentaram acerto de 33,09% e 26,54%, para as simulações de 2008 e 2011, respectivamente. Enquanto que estes valores sem decaimento exponencial apresentaram acerto de 37,98% e 29,11, para as simulações de 2008 e 2011, respectivamente.

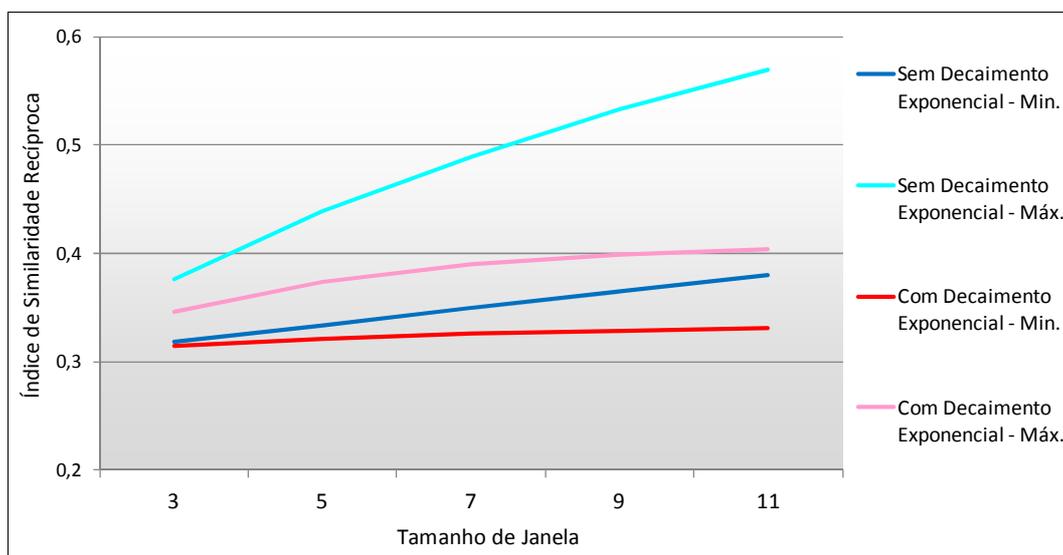


Figura 4.30 - Comportamento do Índice de Similaridade Recíproca para o mapa simulado de 2008.

Considerando que a janela de 11 x 11 pixels foi a que mais representou uma estabilidade dos valores de similaridade recíproca, foi esta a dimensão da quadrícula escolhida para a extração dos percentuais de cada classe. Para a comparabilidade entre os valores percentuais de classes foram gerados mapas de dispersão. A Figura 4.32 apresenta os gráficos de dispersão dos valores percentuais para a classe “Cultura Anual” para os anos 2008 e 2011, respectivamente. Percebe-se que em ambos os períodos foram obtidos bons ajustes de concordância, com coeficientes de determinação superiores a 0,8. Apesar de que os valores fracionados terem apresentado grande concordância,

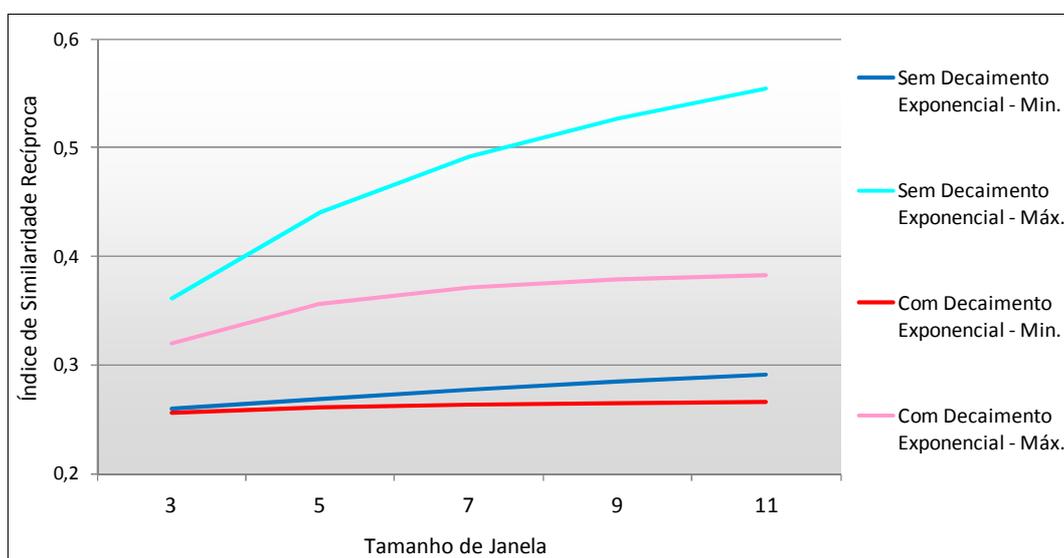


Figura 4.31 - Comportamento do Índice de Similaridade Recíproca para o mapa simulado de 2011.

o ângulo da reta diminuiu pelo fato de que quadriculas com a maioria das ocupações em 100% de “Cultura Anual” na mapa classificado, representaram 80% nas quadriculas no mapa simulado. Também é possível perceber que, nos valores fracionários, os maiores erros foram de comissão (falsos positivos) principalmente para 2011.

Os mapas de “Cana-de-Açúcar”, neste tipo de análise, apresentaram baixa concordância, sobretudo para o ano de 2008, conforme Figura 4.33. No ano de 2008, a principal observação é houve muitos erros falsos negativos e positivos do mapa simulado. No mapa de 2011, houve uma pequena melhora, com visível ajuste na reta para percentuais fracionados e certo aumento nos acertos nas quadriculas onde havia totalidade de classes no mapa classificado. No entanto, a quantidade de falsos positivos e negativos foram evidentes. Deve-se salientar, por outro lado, que pelo fato de a “Cana-de-açúcar” ter apresentado o maior avanço de área dentre as demais classes, maior é a chance de erro entre a comparação dentre os mapas, haja vista que maior foi a área simulada.

Em relação à classe “Cultura Irrigada”, houve grande ajuste entre o mapa simulado e o classificado em ambos as datas simuladas, conforme a Figura 4.34. A simulação de 2011 obteve sensível maior aderência ao mapa classificado. Percebe-se que nesta classe há poucos valores absolutos de ocupação nas quadriculas. Tal fato se deve à pequena dimensão dos talhões, gerando maior quantidade de valores fracionários nas quadriculas. Os valores fracionários, via de regra, apresentaram melhor ajuste em todas as comparações dos mapas simulados.

Em relação à classe “Pastagem/Outros” (FIGURA 4.35) obteve-se boa aderência ao mapa classificado em ambas as datas. Os principais erros apresentados foram de omissão no mapa simulado, principalmente para valores altos de porcentagem de classe no mapa classificado.

Percebe-se que em todos os mapas os valores fracionários e absolutos possuem padrões de erros diferenciados. Na maioria dos casos, mapas classificados com quadriculas com 0% de classe, foram apresentados diferentes dimensões de ocupação no mapa simulado. Em contrapartida, mapas classificados com quadriculas com 100% de classe apresentaram, de forma geral, menos erros. Os valores fracionários do mapa simulado, de forma geral, apresentaram melhor aderência ao mapa classificado.

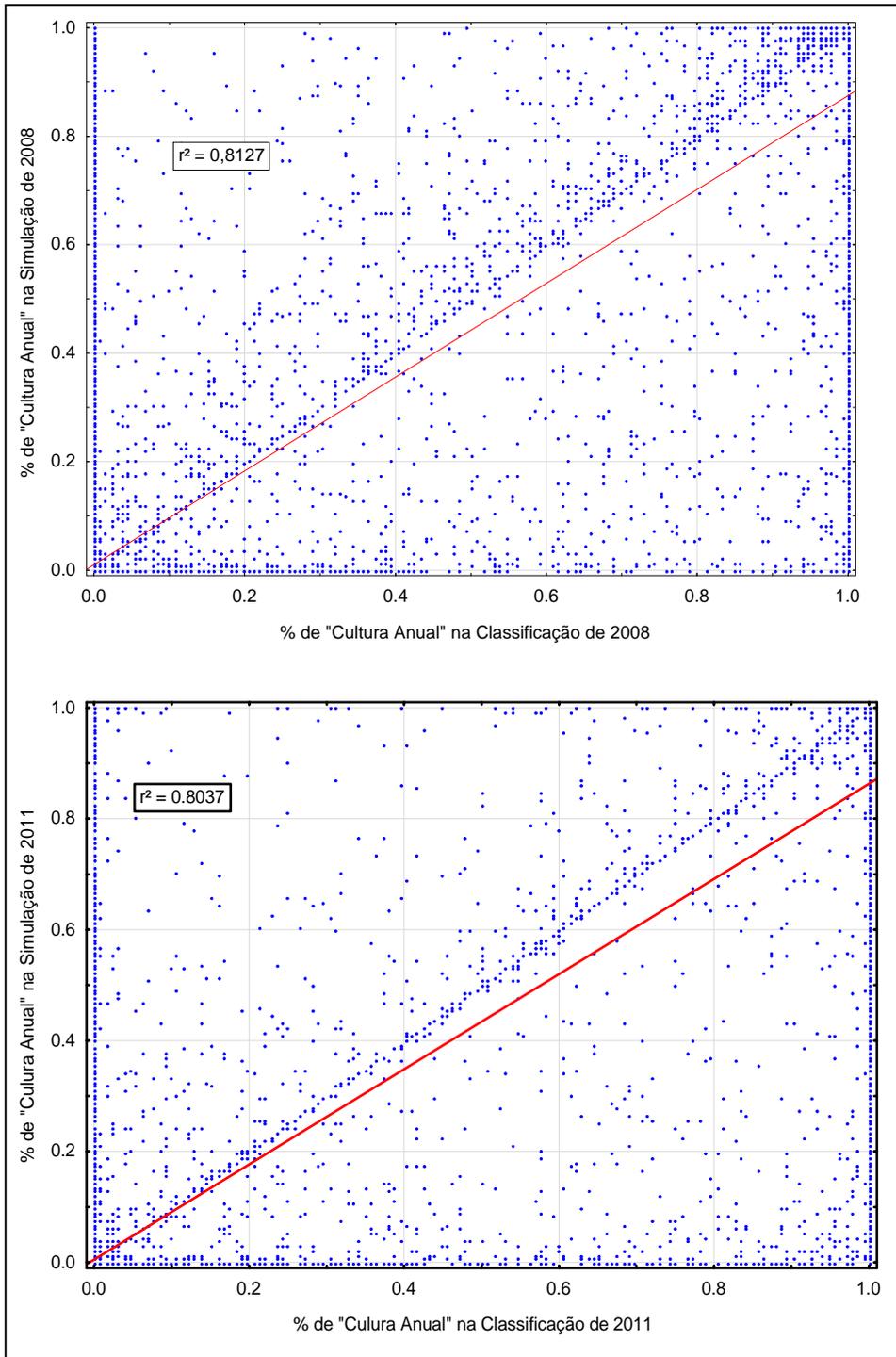


Figura 4.32 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Cultura Anual” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011.

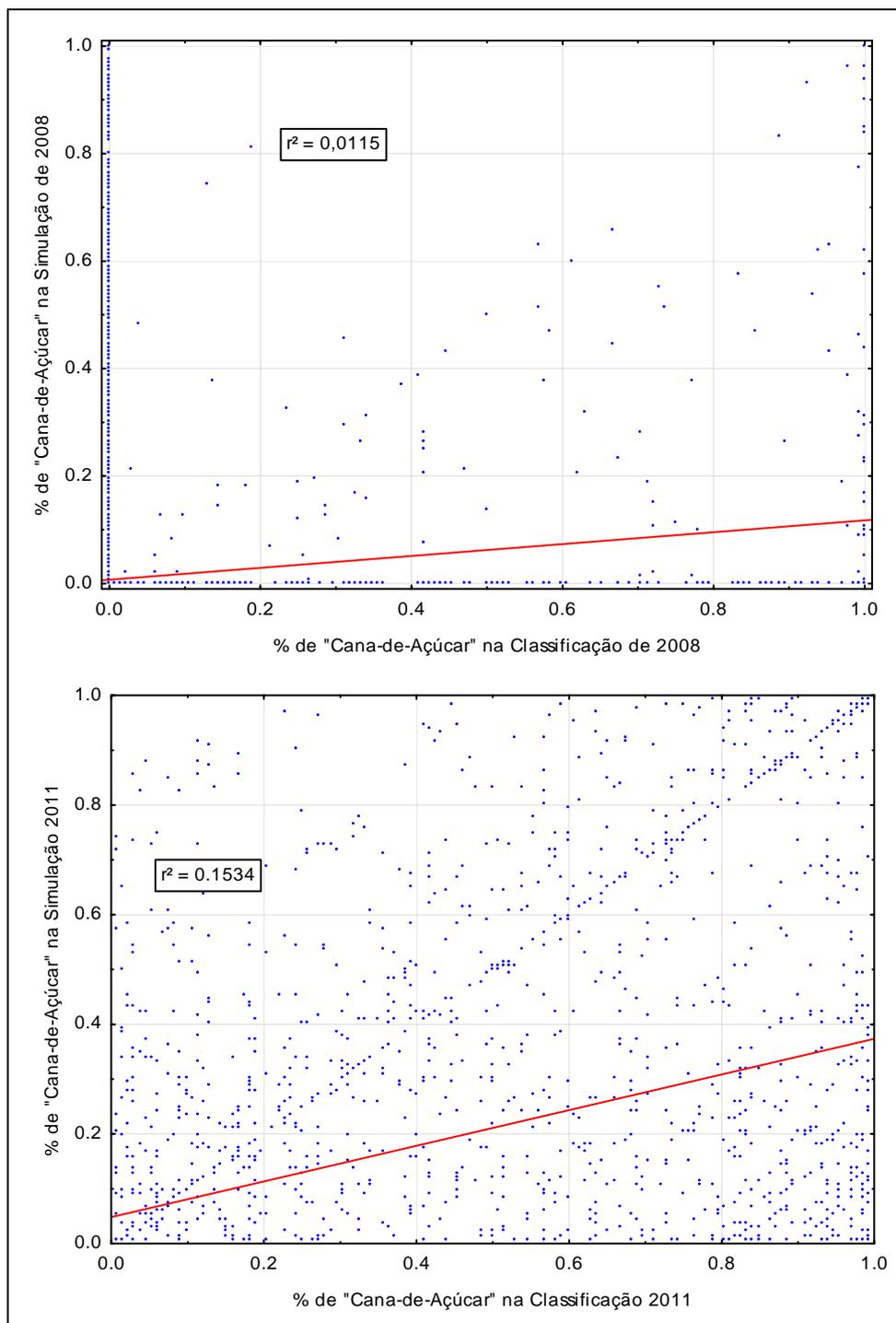


Figura 4.33 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Cana-de-Açúcar” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011.

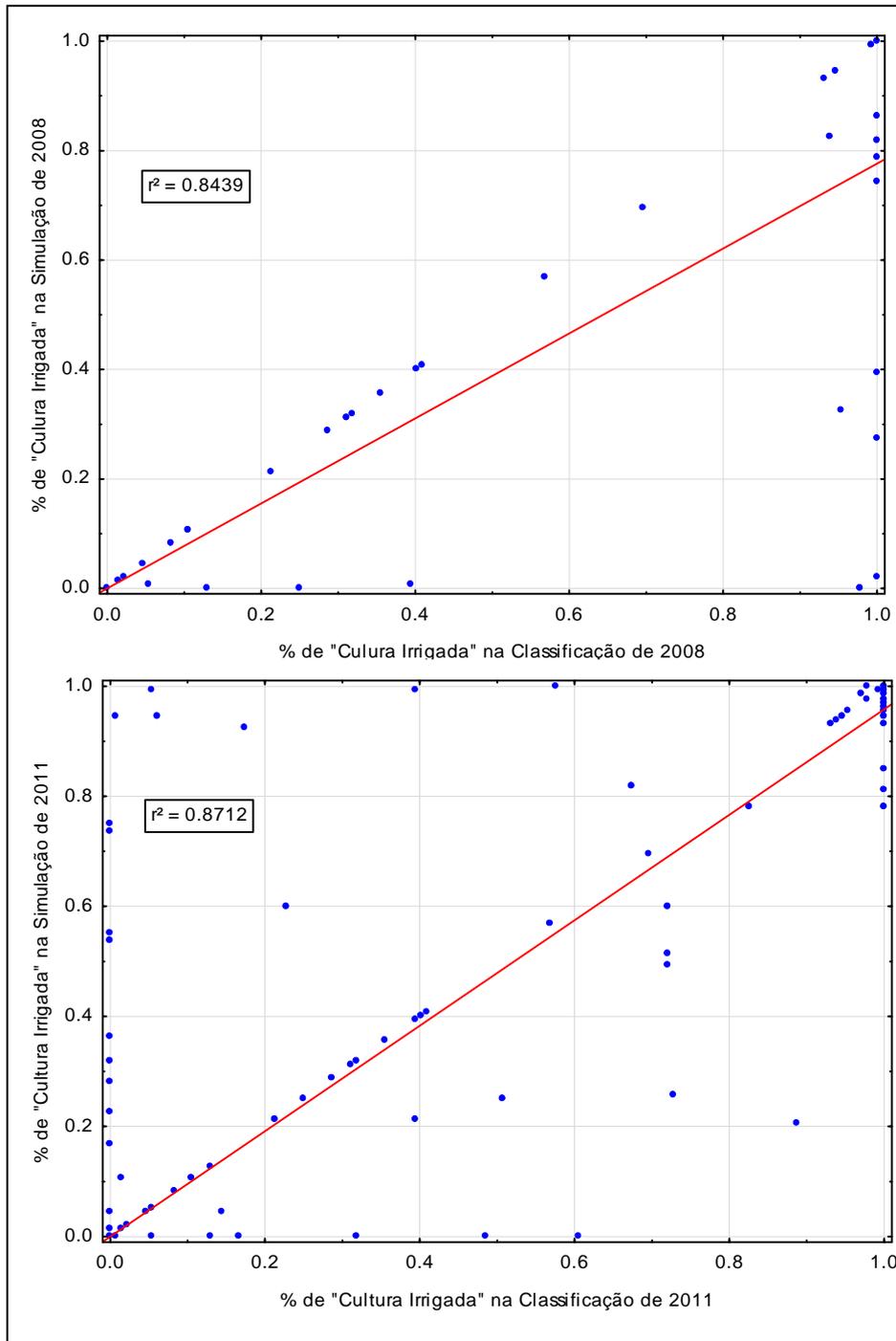


Figura 4.34 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Cultuar Irrigada” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011.

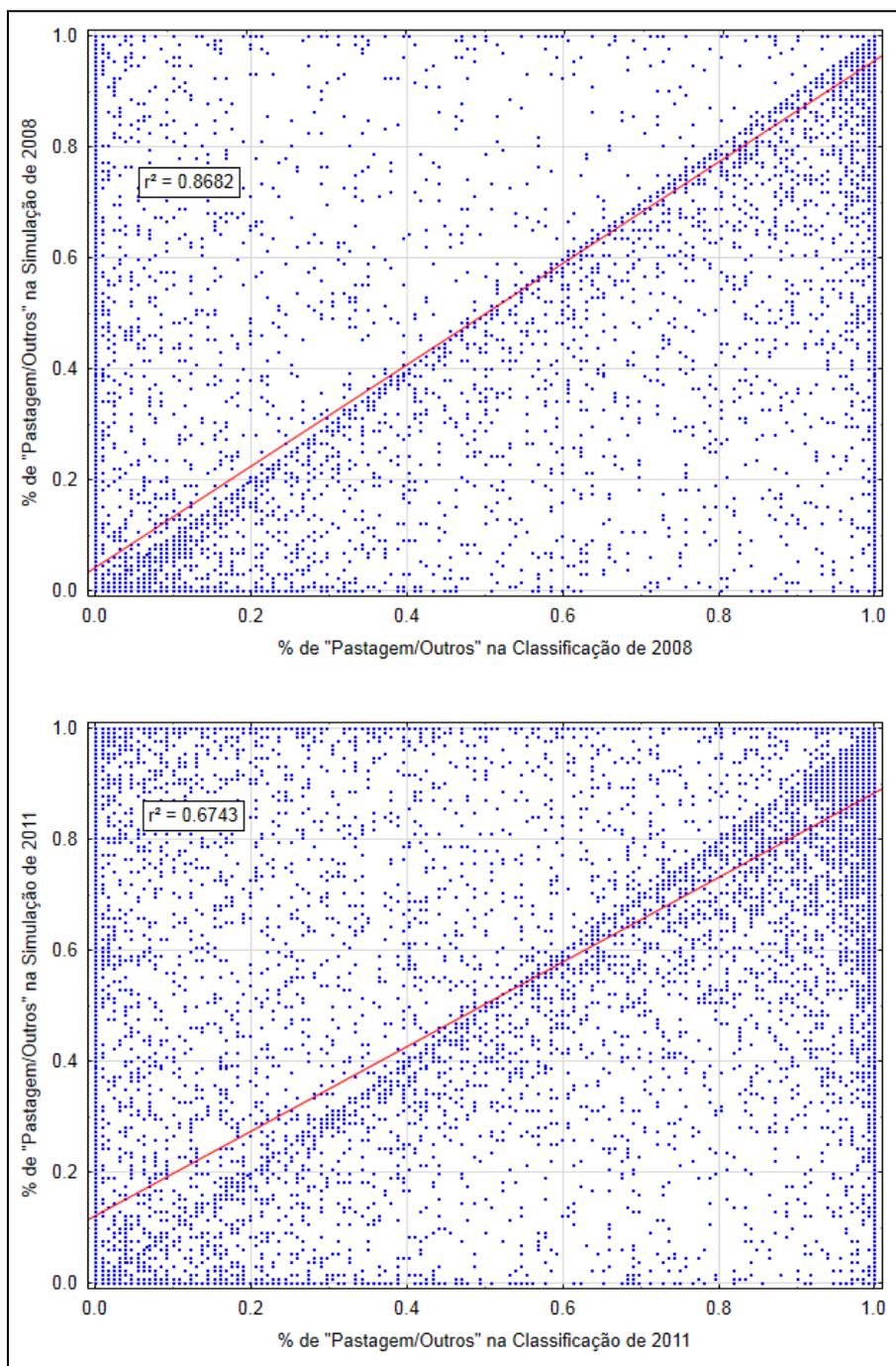


Figura 4.35 - Gráficos de dispersão dos percentuais de ocupação de “Pastagem/Outros” entre o mapa simulado e classificado (grade de 11 x 11 pixels), sendo, gráfico acima para o ano de 2008 e abaixo para o ano de 2011.

4.2.1 Resultados das simulações para o ano de 2020

Conforme metodologia, o período de 2008 a 2011 foi escolhido para gerar as simulações para o ano de 2020. Foram aproveitados os dados de Cana-de-açúcar colhida ("CO") da Unica (2012) para os cenários expansão e base, e os dados de Cana-de-açúcar cultivada ("CL") da região Centro-Sul (LIMA et al., 2014), visando a delimitação de "CL" por cenário na Área de Estudo. Conforme os dados das Equações 4.1 e 4.2, foram delimitados 355.047,55 hectares e 270.339,35 hectares de Cana-de-açúcar cultivada ("CL") para os cenários expansão e base na Área de estudo mais buffer, respectivamente.

$$\frac{14.295.776 \text{ ("CL" Lima et al., 2013)}}{13.934.606 \text{ ("CL" Cen. exp. Unica, 2012)}} = \frac{364.250 \text{ ("CL" Lima et al., 2013)}}{x \text{ ("CL" Cen. exp. Área Estudo)}}$$

$$x = 355.047,55 \text{ (ha)}$$

(4.1)

$$\frac{9.670.000 \text{ ("CO" Cen. base Unica, 2012)}}{12.700.000 \text{ ("CO" Cen. exp. Unica, 2012)}} = \frac{x \text{ ("CL" Cen. base Área Estudo)}}{355.047,55 \text{ ("CL" Cen. exp. Área Estudo)}}$$

$$x = 270.339,35 \text{ (ha)}$$

(4.2)

A partir destes montantes, e, em observação aos períodos históricos deste estudo, foram estipulados, para cada classe de destino, gradações de dinâmica de transição visando a atribuição da proporcionalidade dentre as classes para a simulação de 2020. As classes "Pastagem/Outros", "Vegetação Florestal", "Cultura Anual", Cultura Irrigada", Cultura Permanente", "Área Urbana", e,", foram atribuídos os seguintes graus de dinâmica de transição: "bastante", "quase nada", "quase nada", "um pouco", "quase nada", "sobe à mesma taxa", e, "razoavelmente", respectivamente. Com resultado, a Figura 4.36 apresenta a comparabilidade dentre as proporções de classes para a Área de estudo (com

buffer) no ano de 2011 e os demais cenários do ano de 2020, expansão e base.

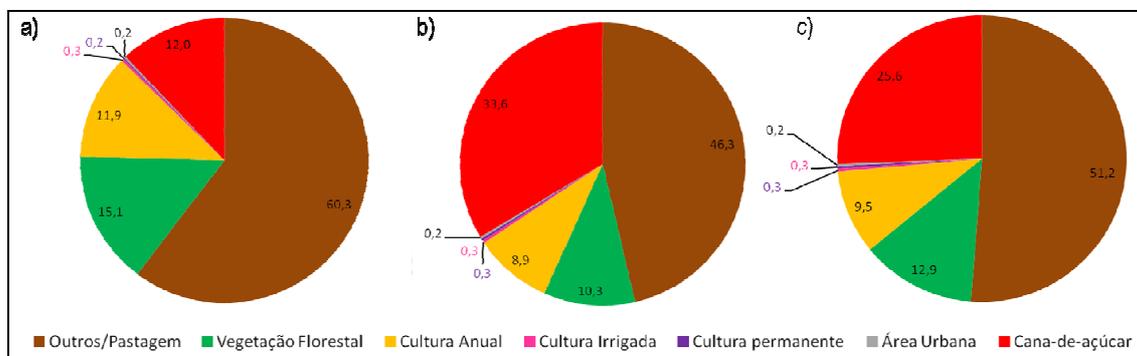


Figura 4.36 – Comparabilidade de proporção de classes de uso e cobertura da terra do ano de 2011 (a) com as geradas para os cenários de 2020, expansão (b) e base (c).

Com os valores alocados com critérios de proporcionalidade para cada classe nos cenários de 2020, foram geradas as matrizes de transição globais entre os anos de 2011 e 2020 para o cenário de expansão e base, conforme Tabelas 4.9 e 4.10, respectivamente. A partir de tais tabelas foi possível gerar as matrizes de transição multitemporais, conforme Bell e Hinojosa (1977), para nove tempos, de 2011 até 2020. A partir das mesmas e pesos de evidência do mapa simulado de 2011 foram geradas as simulações de 2020 para o município de Quirinópolis.

A Figura 4.37 apresenta o mapa classificado de 2011 e o mapa simulado de 2020 segundo o cenário de expansão. A primeira vista percebe-se a preponderância da ocupação com cana-de-açúcar no município prevista para aquele ano. Esta expansão deve ocorrer, sobretudo, no arco sul-oeste, onde há predomínio de “Pastagem/Outros” e menor proximidade às demais classes agrícolas. Esta é uma das características apresentadas na modelagem do período 2008-2011. De acordo com os pesos de evidência dos anos de 2008 e 2011, as transições com origem em “Pastagem/Outros” foram as mais significativas. Além disso, as variáveis explicativas de Distâncias às Usinas e Distância à Estradas Pavimentadas passam a ter uma importância relativa menor em

Tabela 4.10 – Matriz de transição global entre 2011 e 2020 (Cenário Expansão).

| | | 2020 (Expansão) | | | | | | | |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | Pastagem /Outros (1) | Veget. Florestal (2) | Cultura Anual (3) | Cultura Irrigada (4) | Cultura Perm. (5) | Área Urbana (6) | Cana-de-Açúcar (7) | Corpo Hídrico (8) |
| 2011 | Pastagem/Outros (1) | 0,74881 | | 0,01690 | 0,00039 | 0,00082 | 0,00028 | 0,23281 | X |
| | Veget. Florestal (2) | | 0,68371 | 0,01024 | | 0,00138 | 0,00054 | 0,30413 | X |
| | Cultura Anual (3) | 0,06383 | | 0,62764 | 0,00135 | 0,00368 | | 0,30351 | X |
| | Cultura Irrigada (4) | | | 0,00683 | 0,99317 | | | | X |
| | Cultura Perm. (5) | | | | | 1,00000 | | | X |
| | Área Urbana (6) | | | | | | 1,00000 | | X |
| | Cana-de-Açúcar (7) | 0,03438 | | 0,02325 | | | | 0,94238 | X |
| | Corpo Hídrico (8) | X | X | X | X | X | X | X | 1,00000 |

Tabela 4.11 – Matriz de transição global entre 2011 e 2020 (Cenário Base).

| | | 2020 (Expansão) | | | | | | | |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| | | Pastagem /Outros (1) | Veget. Florestal (2) | Cultura Anual (3) | Cultura Irrigada (4) | Cultura Perm. (5) | Área Urbana (6) | Cana-de-Açúcar (7) | Corpo Hídrico (8) |
| 2011 | Pastagem/Outros (1) | 0,83594 | | 0,03888 | 0,00094 | 0,00124 | 0,00018 | 0,12281 | X |
| | Veget. Florestal (2) | | 0,85029 | 0,01024 | | 0,00138 | 0,00091 | 0,13717 | X |
| | Cultura Anual (3) | 0,06383 | | 0,56395 | 0,00135 | 0,00365 | | 0,36723 | X |
| | Cultura Irrigada (4) | | | 0,03121 | 0,96879 | | | | X |
| | Cultura Perm. (5) | | | | | 1,00000 | | | X |
| | Área Urbana (6) | | | | | | 1,00000 | | X |
| | Cana-de-Açúcar (7) | 0,00195 | | 0,02325 | | | | 0,97480 | X |
| | Corpo Hídrico (8) | X | X | X | X | X | X | X | 1,00000 |

relação ao período anterior. Tais características levam a que a expansão da “Cana-de-Açúcar” pudesse ocorrer a oeste da área de estudo. Esta área compreende uma grande área de expansão, com presença majoritária da classe “Pastagem/Outros”, porém, com probabilidades menores e não tão bem concentradas.

A Figura 4.38 apresenta a simulação da expansão sob o cenário Base. Percebe-se, obviamente, uma menor expansão da cana-de-açúcar em relação ao cenário Expansão. A dinâmica no cenário Base se concentra mais ao sul, com menor inserção a oeste. Também é predominante a expansão sobre áreas de “Pastagem/Outros”. Ainda que tenha maior ocorrência de “Vegetação Florestal” na porção sul, a “Cana-de-Açúcar” não apresentou conversões significativas sobre estas formações em ambos cenários.

No cenário de expansão foram atribuídas na matriz de transição maiores áreas totais para “Cana-de-Açúcar” e menores áreas totais para “Pastagem/Outros” e “Cultura Anual”, ocorrendo atribuições inversas no cenário base. Ainda assim, curiosamente, apesar de ter sido atribuída maior quantidade de área na transição “Cana-de-Açúcar” para “Cultura Anual” no cenário base, houve uma quantidade total de “Cultura Anual” menor no cenário base, compreendida no município de Quirinópolis. Tal fato pode ser justificado devido a que houve maior dissipação de área alocada para a “Cultura Anual” entre as demais classes no cenário base, conforme Matrizes de Transição, associada à maior pressão em termos de área da cana-de-açúcar sobre as áreas de “Cultura Anual” neste cenário (base), o que levou à diminuição da área total da “Cultura Anual” representada no município de Quirinópolis. No cenário de expansão, ocorre o contrário, em Quirinópolis a simulação apresenta maior quantidade de área total para “Cultura Anual” apesar de na matriz de transição ter sido alocada menor área total. Os resultados do comportamento em termos proporcionais da “Cultura Anual” sobre as outras classes no município de Quirinópolis de forma geral condizem com os apresentados na matriz de transição global em ambos cenários.

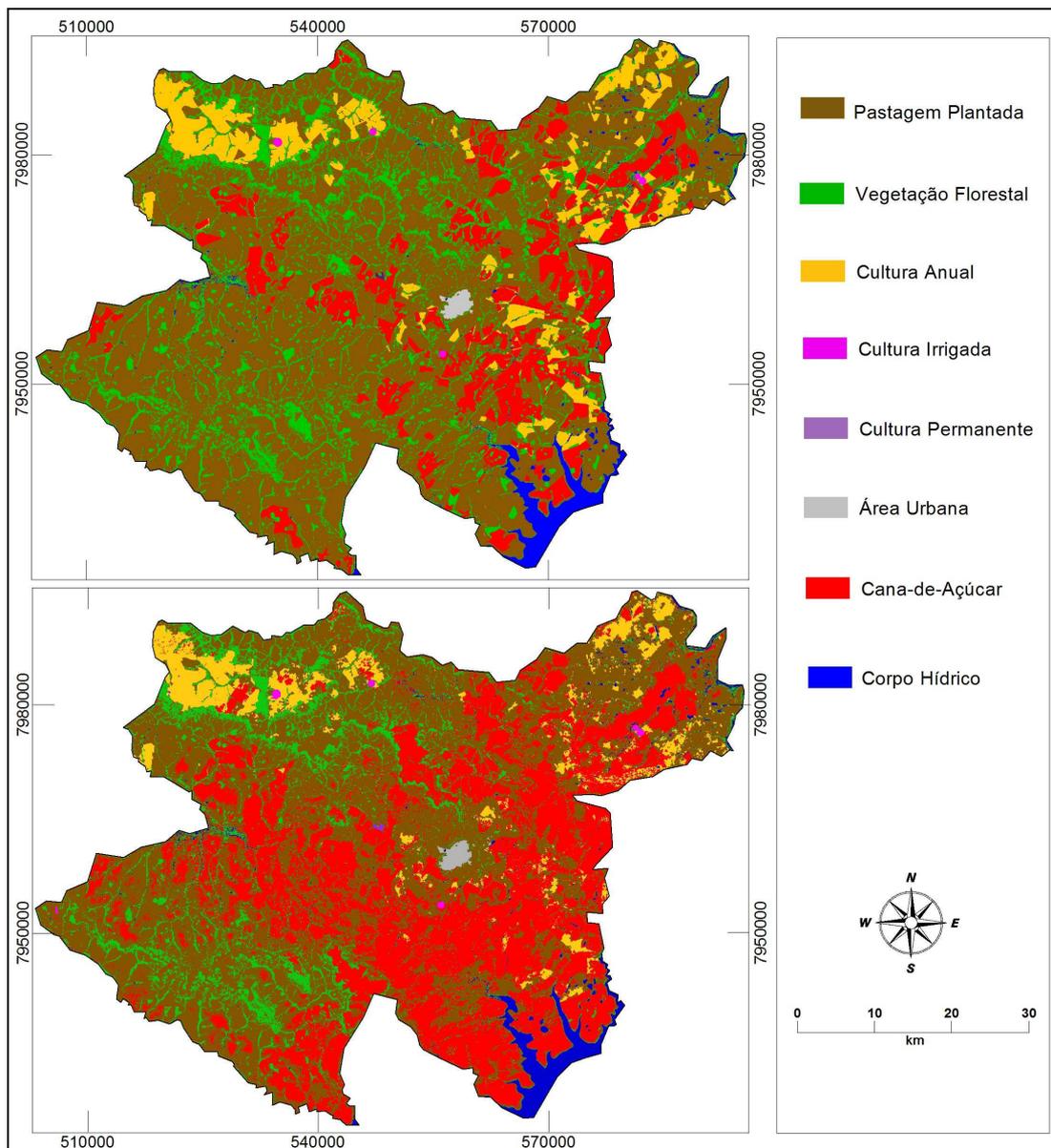


Figura 4.37 - Mapa classificado do ano de 2011 (acima) e Mapa gerado pela simulação para 2020 no cenário de expansão (abaixo).

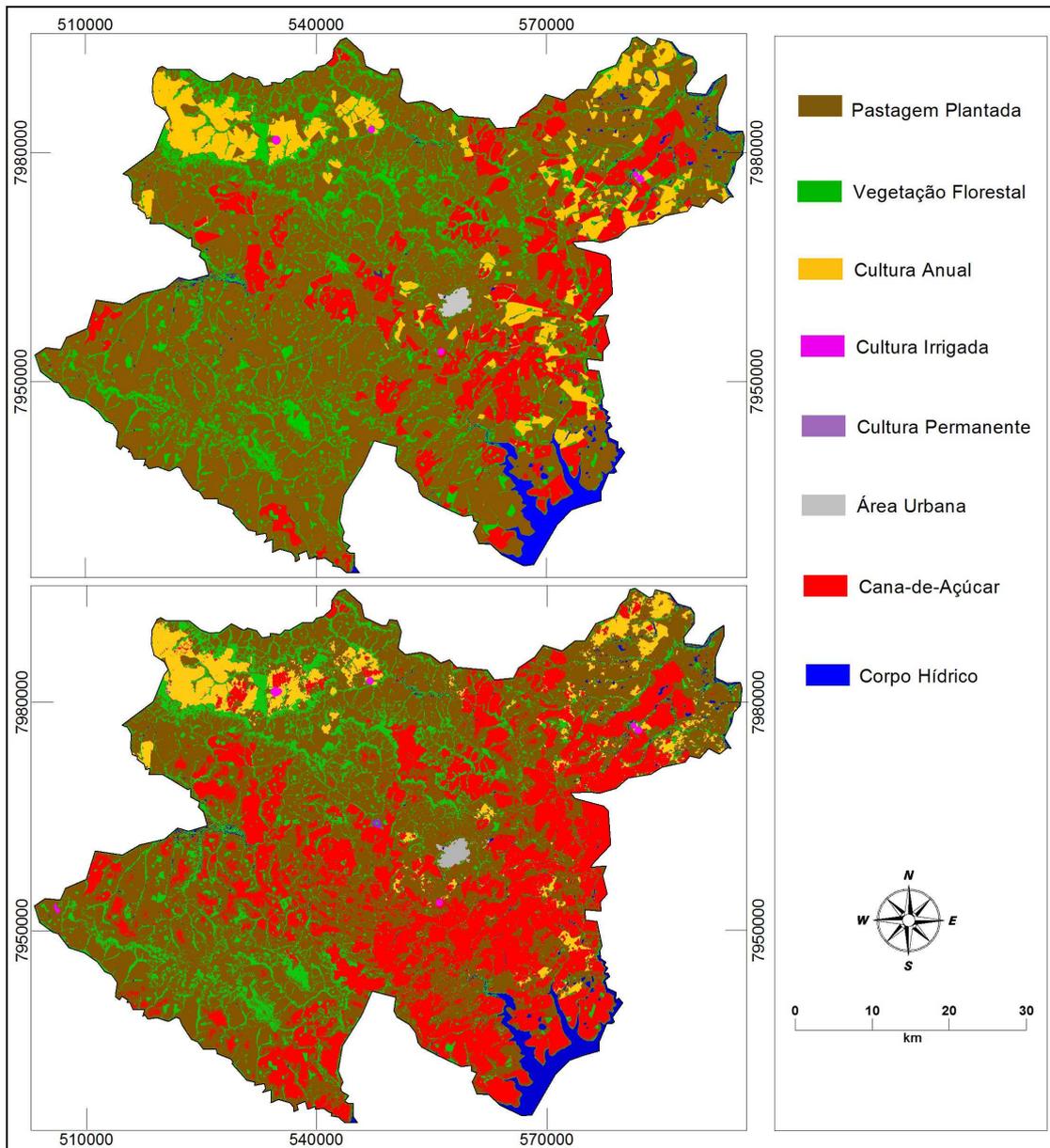


Figura 4.38 - Mapa classificado do ano de 2011 (acima) e Mapa gerado pela simulação para 2020 no cenário de expansão (abaixo).

Estes diferentes padrões de ocupação são semelhantes aos padrões de ocupação nos períodos 2005 a 2008, e, 2008 a 2011. No período 2005 a 2008, quando surge a expansão da cana-de-açúcar, há maior competição por área, pois ainda há pouca área de cana-de-açúcar e o seu surgimento se concentra

onde há maior infra-estrutura. No período de 2008 a 2011, ocorre menor competição por área, pois sua área ocupada é bem maior, fazendo fronteira com áreas de menor competitividade, típicas da classe “Pastagem/Outros”, permitindo maior expansão apesar de menor infraestrutura.

De qualquer forma, em ambos os cenários, a expansão da cana-de-açúcar é exercida pela grande influência da proximidade às usinas. Esta atratividade é compartilhada, em menor parte, com as distâncias às estradas pavimentadas e não pavimentadas, principalmente ao longo das rodovias GO-206 e GO-164, contribuindo no direcionamento da expansão da cana-de-açúcar. Podem ser destacadas três usinas que vêm impulsionando a expansão da cana-de-açúcar: a usina Boa Vista (município de Quirinópolis), Rio Claro (municípios de Caçu, Goiás) e Vale do Simão (município de Santa Vitória, Minas Gerais). Esta usina, inaugurada sua operação no ano de 2010, apesar de não constar na área de estudo com *buffer*, a sua distância foi computada na mesma. Localiza-se próxima à Hidroelétrica de São Simão, portanto, muito próxima à área de estudo e exercendo influência na porção sul desta. Contudo, a usina que pode propiciar maior expansão nesta direção deve ser a Boa Vista, pelos fatores de proximidade, melhor acesso e alta capacidade de moagem para os próximos anos. A usina Rio Claro encontra-se a uma distância maior, tendo acesso mais próximo por estrada não asfaltada e possui menor capacidade de moagem.

Considerando que o montante de área cana-de-açúcar na área de estudo corresponda ao calculado neste estudo, existe grande possibilidade que, esta expansão ocorra ao sul e oeste do município de Quirinópolis. Neste caso, o acesso às áreas mais distantes, em ambos cenários, apontam a necessidade de instalação de novas usinas e de maior infraestrutura viária à oeste do município. Nesta porção do município há somente uma estrada asfaltada (GO-206), onde a distância de 25 quilômetros, que é comumente utilizada como de tolerância ao plantio da cana-de-açúcar à usina, é ultrapassada.

A expansão da cana-de-açúcar na porção centro-norte, onde há maior quantidade de classes de uso da terra, ainda que sob forte influência das usinas Vale do Verdão e São Francisco, no municípios de Turvelândia e Quirinópolis, respectivamente, tal expansão no município de Quirinópolis seria menor, em ambos cenários. Tal fato justifica-se pela maior participação de terras já ocupadas com outros cultivos agrícolas. O uso de terras já agrícolas diminui maiores investimentos na preparação do solo para a entrada de um novo cultivo, no entanto, é constatada uma maior participação de agentes gerando uma maior competição por estas terras. Por outro lado, áreas de pastagens geralmente tem seu uso subutilizado (AGUIAR, 2013) e o valor por terras já agrícolas elenca um maior custo monetário na aquisição de terras para cultivo. Este último fator, de certa forma, na área de estudo, é minimizado pelo fator do crescente emprego de terceiros (fornecedores) para o cultivo de cana-de-açúcar. Uma abordagem de modelagem que poderia contemplar esta problemática seria a baseada por agentes ou a baseada em processos, contudo, o tipo de modelagem utilizado não viabiliza este nível de sistemática.

Deve-se salientar que a distância às usinas, além do alto fator de atratividade a curtas distâncias, por volta da distância de 25 quilômetros, existe um fator inerente que deveria responder à repulsão da expansão da cana-de-açúcar na realidade. A partir da citada distância pode ocorrer maior tempo de entrega da cana-de-açúcar, recém colhida, para a moagem, inviabilizando o cultivo da cana-de-açúcar. Este limiar parece não ter exercido a aderência necessária na modelagem, haja vista que ocorreu presença de “Cana-de-Açúcar” em áreas no extremo oeste da área de estudo, principalmente no cenário de expansão. As classes de declividade inibiram pontualmente a expansão da “Cana-de-Açúcar”, enquanto que a “Vegetação Florestal” produziu contornos de algumas dezenas de metros de repulsão à expansão da “Cana-de-Açúcar”. Desta forma, conclui-se que a expansão espacial da “Cana-de-Açúcar” ocorreu de forma pouco padronizada, considerando a existência de usinas e infraestruturas necessárias para a ocorrência de tal evento.

Sendo assim, podem ser pontuadas algumas hipóteses em que a expansão da “Cana-de-Açúcar” poderia ocorrer de forma mais organizada, seguindo padrão espacial mais coerente com a realidade. A classe “Pastagem/Outros”, por exemplo, compreende uma junção classes de uso e coberturas da terra, indo de pastagem plantada a pastagem natural, sendo esta constituída de formações subarbóreas, campo cerrado ou capoeira. A separação de parte destas classes poderia melhorar a distribuição da expansão da “Cana-de-Açúcar”, uma vez que sua expansão ocorre de forma diferenciada sob os citaos usos e coberturas que formam a “Pastagem/Outros”. Áreas de pastagem com maior manejo, apesar de terem um maior valor de venda ou arrendamento, possuem menos custos no preparo da terra para fins agrícolas. Outra hipótese, que inclusive auxiliaria nas demais classes na modelagem, seria o uso das vaiáveis de distâncias em conformidade com os acessos existentes no terreno. O uso da distância euclidiana utilizada no estudo, pelo contrário, pode prejudicar na geração dos pesos de evidência, principalmente em eventos mais pontuais. Este fato é justificado quando altos valores de pesos de evidência são gerados em uma determinada faixa de distância e que repercutem em outras áreas, da mesma faixa de distância, que não condizem com a realidade no terreno ou do fenômeno, formando falsos positivos.

A proximidade à cidade de Quirinópolis é respeitada em ambos cenários, com exceção à sua porção sudoeste, como já vinha acontecendo desde 2011. O crescimento da cidade de Quirinópolis passa a acontecer com maior proporção sobre áreas com menor uso, “Vegetação Florestal” e “Pastagem/Outros Natural”, em ambos cenários. Tal fato, produto do agronegócio, pode ser justificado pela proximidade da área urbana a córregos, onde existem áreas mais preservadas.

Em ambos cenários, em relação à classe “Cultura Permanente”, além de ocorrer crescimento nos talhões pré-existentes, aparecem outros, à noroeste do município de Quirinópolis. Esta região está a uma menor distância aos maiores talhões de seringueiras da área de estudo mais *buffer*, no município de

Rio Verde. Nesta porção, tal conversão ocorreu sobre “Cultura Anual”. No entanto a maior diferença dentre os cenários ocorre no talhão que se encontra isolado próximo à cidade de Quirinópolis, deflagrado no ano e 2011. O crescimento deste talhão ocorreu em maior extensão no cenário base, possivelmente pelo fato de que neste cenário ser de menor competição com as probabilidades da “Cana-de-Açúcar”.

Na classe “Cultura Irrigada” houve sensível maior aumento no cenário base, concordando com a matriz de transição global. O crescimento de área detectado para esta classe acontece em forma de *expander* em um pivô a noroeste do município e em forma de *patcher* em uma área a sudoeste do município. Esta última área está rodeada por “Pastagem Plantada”, longe das demais áreas agrícolas. Tal constatação deflagra o critério estocástico do processo de modelagem utilizado, uma vez que dificilmente uma talhão de pivô central teria tal alocação.

Nos gráficos das Figuras 4.39 e 4.40 é possível perceber que a o avanço da cana-de-açúcar ocorre com maior proporção sobre “Vegetação Florestal” no cenário de expansão. Este fato confere com a matriz de transição global e é justificado pelo fato de que na porção sul e oeste estão concentradas maior quantidade de áreas de “Vegetação Florestal”. A conversão de “Vegetação Florestal” para “Cana-de-Açúcar” será mais proeminente em áreas de menor declividade. Aqueles que se encontrarem em áreas mais declivosas ou com proximidade à hidrográfica dificilmente ocorrerá a citada conversão.

A área de cana-de-açúcar englobada no município de Quirinópolis, nas simulações Base e Expansão, foram de 109.831 e 134.919 hectares, respectivamente. Considerando que 7% da área de cana-de-açúcar cultivada entra para reforma e que deste restante, 2% será cana-de-açúcar bisada, haverá aproximadamente 125.286 e 101.989 hectares com cana-de-açúcar para colheita nos cenários expansão e base, respectivamente, para o ano safra 2019/2020. Considerando que a média de produtividade da cana-de-açúcar foi

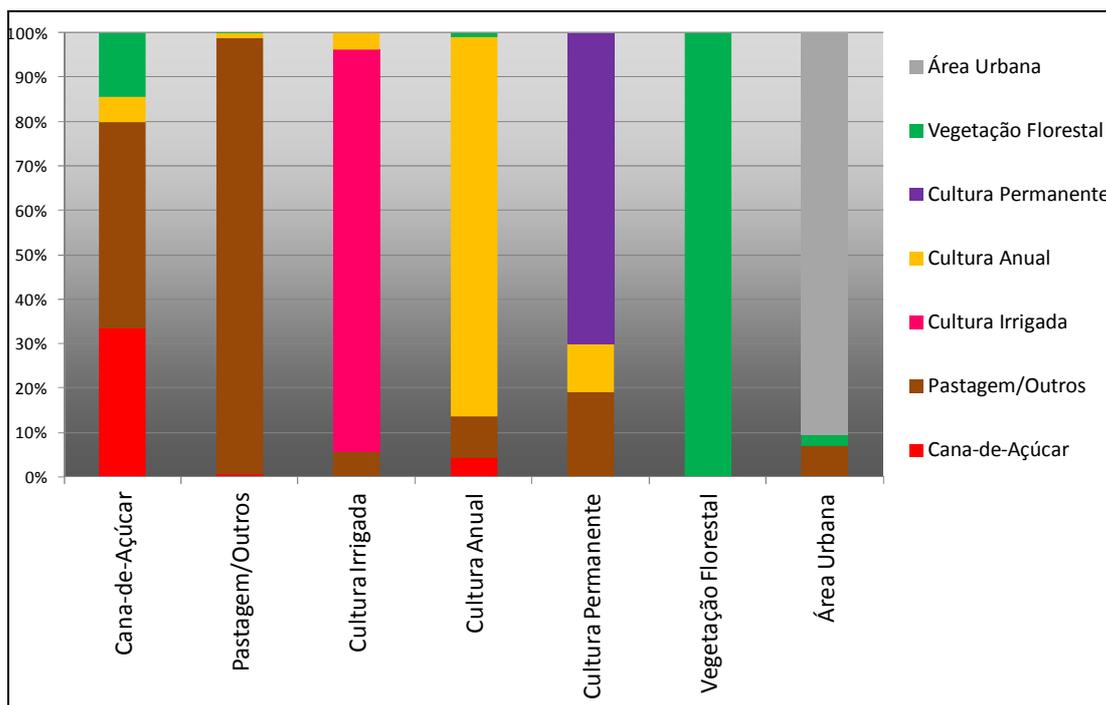


Figura 4.39 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2011 a 2020 (Cenário Expansão).

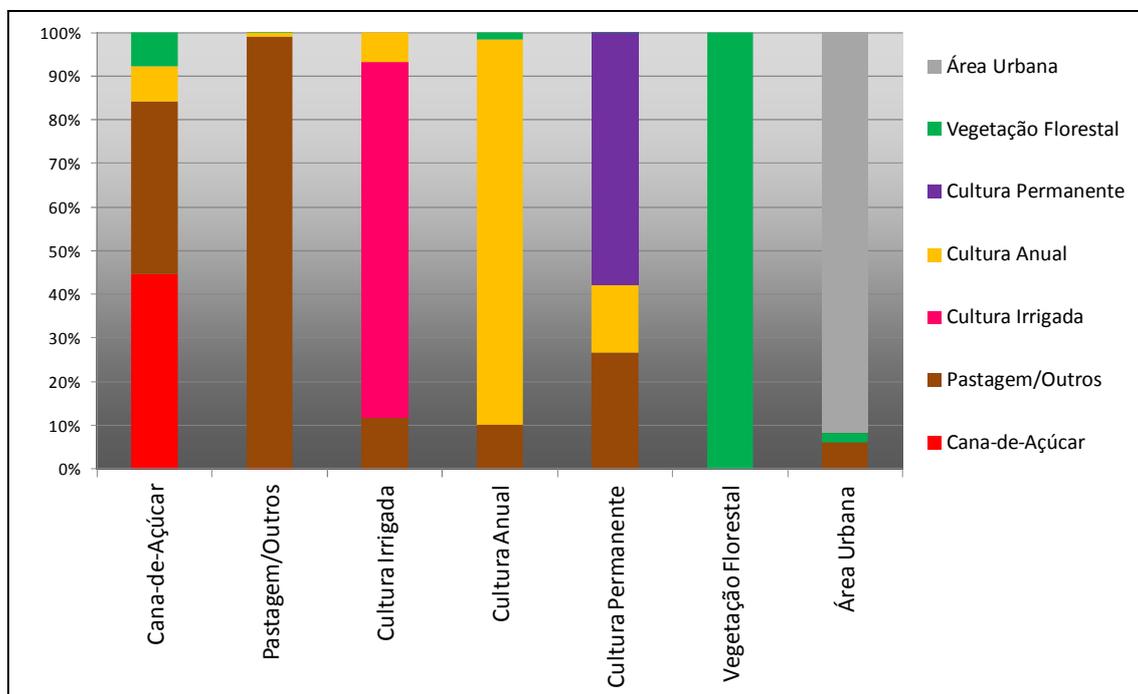


Figura 4.40 - Proporção de conversões para cada uso e cobertura da terra em Quirinópolis no período de 2011 a 2020 (Cenário Expansão).

de 90 toneladas por hectare no município de Quirinópolis, dentre os anos de 2006 a 2011 (IBGE, 2013b), e que 1 tonelada de cana-de-açúcar processada pode produzir 85 litros de etanol, pode haver potencial de produção de 958 e 780 milhões de litros de etanol por safra para os cenários expansão e base, respectivamente, considerando a área cultivada no município de Quirinópolis. Estes números não estão considerando a proporção de cana-de-açúcar atribuída para a produção de açúcar e a produção de segunda geração de etanol.

No ano de 2011 Quirinópolis detinha 50.034,71 hectares de cana-de-açúcar, destes, 46.462,23 hectares, aproximadamente, estavam aptos para a colheita. Sendo assim, foram processados aproximadamente 4.181.601 de toneladas de cana-de-açúcar. Na área de influência de Quirinópolis, existem 6 usinas, com potencial de processamento total de 19,3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Portanto, a área estudada, em termos de processamento de cana-de-açúcar, encontra-se em perfeitas condições.

Outra questão que pode ser analisada em uma região de intensa expansão da cana-de-açúcar, e que pode responder a possíveis intervenções ou fornecer subsídio à fiscalização ambiental, é como a dinâmica do uso e cobertura da terra pode ocorrer nas APP de curso d'água. A Figura 4.41 apresenta a distribuição das classes de uso e cobertura da terra nas APP do ano de 2011 e as resultantes dos dois cenários. Em 2011 a ocupação com cana-de-açúcar era de 2,9 por cento, com mínima contribuição da "Cana-de-Açúcar". No cenário expansão de 2020, a cana-de-açúcar apresentou mais de 15% das coberturas presentes nas APP. Esta proporção no cenário base, praticamente foi a metade do outro cenário, representando 7,96 % das coberturas presentes. Observa-se também que no cenário expansão o avanço da cana-de-açúcar ocorreu prioritariamente sobre vegetação florestal, diferentemente do cenário base, onde se deu, principalmente sobre pastagens plantadas. Ao analisarmos o histórico de ocupação com cana-de-açúcar em APP, o incremento de ocupação com cana-de-açúcar foi de 1,2 em três anos (0,4 ao ano). No cenário expansão

os incrementos anuais foram de 1,47 e no cenário base 0,55. Estes resultados demonstram que o cenário base apresentou maior coerência com a realidade regional.

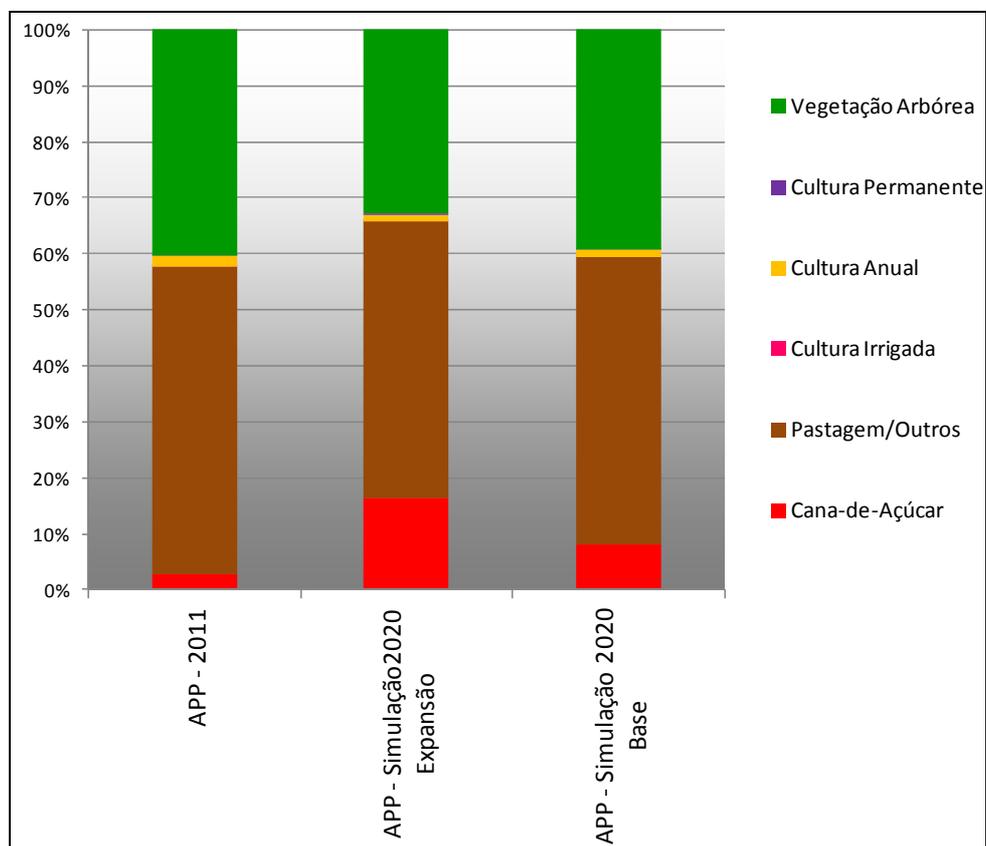


Figura 4.41 - Proporção de uso e cobertura da terra nas APP de cursos d'água ano de referência de 2011 e nas simulações de expansão e base par ao ano de 2020.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, as classificações do uso e cobertura da terra apresentaram resultados satisfatórios, tendo em vista os resultados próximos aos do IBGE. A restauração das imagens para 15 metros agregou melhora de limites e delineamentos de textura. O uso do critério de permanência dentre áreas sob culturas agrícolas anuais de verão, pastagens e cana-de-açúcar foi fundamental para que fossem evitadas falsas interpretações em relação ao uso efetivo de um talhão agrícola. Tal critério não teria sido possível sem o uso do LVSR.

A expansão da cana-de-açúcar na área de estudo escolhida compreende o mais rápido avanço dentre os municípios de fronteira agrícola. Apesar disso, tal fenômeno compreende diferenças de ocupação ao longo do tempo, o que foi possível constatar em dois períodos distintos neste estudo. O primeiro período, de 2005 a 2008, retrata a entrada da cana-de-açúcar no município de Quirinópolis. Tal avanço ocorreu de forma concomitante entre as áreas de culturas agrícolas temporárias e de “Pastagem/Outros”, havendo também participação de culturas agrícolas irrigadas. No período de 2008 a 2011, o avanço da cana-de-açúcar se concretiza, com grande avanço na porção centro e sul do município. Nesse período, a expansão ocorreu quase que totalmente sobre áreas de “Pastagem/Outros”, ficando em segundo plano as conversões para áreas com culturas agrícolas temporárias e não mais ocorrendo conversão sobre culturas agrícolas irrigadas. Também ocorre maior conversão sobre áreas florestais.

Classificações em estudos futuros deverão concentrar-se na maior separação das classes, incluindo novas classes, como, por exemplo, “Pastagem Natural”, “Pastagem Degradada”, “Cana-de-Açúcar em Reforma”, por exemplo. As duas primeiras classes poderão servir na melhor padronização das simulações da cana-de-açúcar, haja vista que a classe “Pastagem/Outros” trata-se de uma classe bem abrangente. A classe “Cana-de-Açúcar em reforma” poderá servir

como indicador na redução da área de cana-de-açúcar, uma vez que o aumento desta classe pode indicar abandono de áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Além disso, poderá ser elencado mais um período para análise, 2011 a 2014, quando ocorre a desaceleração do setor sucralcooleiro. Este período poderá indicar se houve substituição da cana-de-açúcar por outras culturas e por quais usos e coberturas a expansão tem se mantido.

Nas etapas de geração dos modelos dinâmicos e espaciais, na maioria das transições, em ambos os períodos da análise, os melhores ajustes dos pesos de evidência ocorreram para as variáveis de distância dinâmica aos usos e coberturas da terra, com os maiores pesos de evidência concentrados nas menores distâncias. Por outro lado, no caso das conversões para “Cana-de-Açúcar” a variável de distância a usinas representou ajustes de pesos de evidência ainda mais positivos. Na maioria dos casos, as variáveis de distância dinâmica das classes “Vegetação Florestal” e “Corpo Hídrico, e da variável discreta “APP”, representaram repulsão às conversões, com algumas exceções. A validação do modelo 2005 a 2008 apresentou melhor desempenho que em relação ao período 2008 a 2011. A análise por gráfico de dispersão das proporções entre classes de referência e simuladas, no entanto, apresentaram uma melhora para o modelo no intervalo 2008 a 2011 em relação à cana-de-açúcar. Tal desempenho pode ser justificado pela fase de consolidação da cana-de-açúcar no período de 2008 a 2011, na qual os padrões apresentados puderam ser mais bem determinados pelo modelo. Pelo fato de que a tendência em transições de cobertura e uso da terra é de reproduzir padrões de mudança mais recentes, foi escolhido o citado período para as simulações para o ano de 2020.

As simulações do uso e cobertura da terra para 2020 nos dois cenários, expansão e base, tiveram como padrão de expansão comum da cana-de-açúcar o arco sul-oeste do município de Quirinópolis, onde há predomínio de pastagens com maior proporção de núcleos florestais e menor proximidade às demais classes agrícolas. Como comportamento de variáveis explicativas que

reforçaram este padrão de expansão estão a curta distância à classe de “Pastagem/Outros”, a maior distância em relação às demais classes, a proximidades às usinas e em menor grau a distância a estradas pavimentadas e não pavimentadas. Tendo em vista a área de cana-de-açúcar que deverá ser ocupada no município de Quirinópolis em 2020, foi observado que, conforme a capacidade das usinas presentes atualmente, a região possui plenas condições para que haja expansão da cana-de-açúcar. No entanto, o cultivo de cana-de-açúcar no extremo oeste do município pode prejudicar a sua produtividade devido à que o seu plantio poderá alcançar mais de 25 quilômetros em relação à localização das usinas atuais.

O montante de área da classe “Cultura Anual” para 2020 apresentou forte dependência com a cana-de-açúcar. Apesar de ter sido alocada maior quantidade de área total para “Cultura Anual” no cenário base, em relação ao cenário expansão, houve redução global de área representada por “Cultura Anual” no município de Quirinópolis. Tal fato, no cenário de expansão, se apresenta exatamente o inverso. Tal característica reforça os padrões alocados na matriz de transição e fortalece a inferência de que a expansão inicial (ou de menor área) da cana-de-açúcar acontece também sobre áreas de “Culturas Anuais”. Porém, uma vez estabelecida, tal expansão passa a ser quase que totalmente sobre pastagens.

O crescimento da cidade de Quirinópolis passa a acontecer com maior proporção sobre áreas com menor uso, “Vegetação Florestal” e “Pastagem/Outros Natural”. A “Cultura Permanente” aparece no município de Quirinópolis em outra mancha e sobre “Cultura Anual. Tal mancha compreende a zona de influência da silvicultura do município de Rio Verde. A cultura irrigada acontece nas vizinhanças de pivôs pré-existentes e em uma área afastada das demais culturas temporais, deflagrando um fator de estocasticidade que dificilmente poderia acontecer na realidade.

O comportamento da ocupação sobre as APP de cursos d'água no estudo se deu com taxas bem diferenciadas em relação aos dois cenários. O cenário de expansão apresentou um aumento da taxa de ocupação maior do que vinha sido apresentado no histórico dos anos. Enquanto que no cenário base a taxa de ocupação nas APP apresentou-se coerente com os dados históricos. Por esta razão e tendo em vista que o cenário base apresentou maiores semelhanças com os dados que vinham sendo mostrados nos últimos anos, pode-se afirmar que o cenário base compreende um modelo de uso e cobertura da terra para Quirinópolis mais coerente para o ano de 2020.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v.4, p. 574-585, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro: ANP, 2012. 27 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro: ANP, 2013. ? p. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=67236&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebu st=1384648663518>>. Acesso em 20 out. 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Evolução do mercado de combustíveis e derivados 2000-2012**. Rio de Janeiro: ANP, 2013. 26 p.
- AGTERBERG, F. P; BONAHEM-CARTER, G. F. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the production of discrete events. In: AP-COM Symposium, 22, 1990, Berlin. **Proceedings...** Berlin: Tech. Univ. Berlin, 2009, p. 381-399.
- AGUIAR, D. **Séries temporais de imagens MODIS para avaliação de pastagens tropicais**. 2013. 167 p. (INPE-17280-TDI/2101). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.
- AGUIAR, M. S.; COSTA, F. A.; DIMURO, G. P.; COSTA, A. C. R. Modelos matemáticos baseados em autômatos celulares para geoprocessamento. In: ANDRADE, E. X. L.; SAMPAIO, R.; SILVA, G. N. **Notas em matemática aplicada**. São Carlos: Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC), 2004. 54 p.
- AHMAD, S.; SIMONOVIC, S. P. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 18, n. 4, 2004.
- AHMED, B.; AHMED, R.; ZHU, X. Evaluation of model validation techniques in Land Cover Dynamics. **ISPSR International Journal of Geo-Information**, v. 2, p. 577-597, 2013.

ALI, S. **Use of spectral and temporal unmixing for crop identification using multispectral data**. 2002. 63 p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Geoinformática) – International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Holanda, 2002. Disponível em: <http://www.itc.nl/library/papers/msc_2002/gfm/samia_ali.pdf>. Acesso em: 12 dez.2007.

ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento**: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2003. 321 p. (INPE-10567-TDI/942/A). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.

ALMEIDA, C. M. Modelos Celulares de Dinâmicas Espaço-Temporais: Aplicações em Estudos Urbanísticos. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática**: modelos e aplicações ambientais. [s.n.] 2007a. p. . em; preparação. ISBN 8573833867. (INPE--/). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2006/01.11.16.06>>. Acesso em: 9 out .2013.

ALMEIDA, C. M.; BATTY, M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, p. 481-509, 2003.

ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Perspectiva histórica de modelos de dinâmicas urbanas e regionais. In: _____. **Geoinformação em urbanismo**: cidade real x cidade virtual. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 254-285.

ALMEIDA, R. M.; MACAU, E. E. N.; FRANÇA, H.; RAMOS, F. M. CARNEIRO, T. G. S. Simulando padrões de incêndios no Parque Nacional das Emas, estado de Goiás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, 10, (GEOINFO), 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** São José dos Campos: GEOINFO, 2008.

ALONSO, W. A general theory of the urban land market. **Papers and Proceedings of the Regional Science Association**, v. 6, p. 149-158, 1960.

ALVES, D. S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.14, p. 2903-2908, 2002.

ALVES, E. Agroenergia: novo desafio para o Brasil. **Revista de Política Brasileira**, v.2, p.3, 2006.

AMBROSANO, E. J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; SACHS, R. C. C.; AZCÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M.L.; SHIMABUKURO, Y E; ARAI, E.; CARVALHO, O. A. **Sensor MODIS**: uma abordagem geral. São José dos Campos: INPE, 2003. 58 p.

ANDRADE, P. R.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; SANDRI, S. Games on cellular spaces: how mobility affects equilibrium. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 12, n. 15, p.?, 2009.

ARCOVERDE, G. F. B. **Estratificação espacial para estimativa da área de culturas agrícolas de verão com imagens de pré-plantio**. 2008. 180p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

ARCOVERDE, G. F. B.; ALMEIDA, C. M.; ARAÚJO, L. S. Modelagem da paisagem no Parque Estadual Carlos Botelho (SP) e entorno. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15 (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011, p.5777-5784.

ARNOTT, R. **Regional and urban economics**. 1. Amsterdam: Harwood Academic, 1996. 1223 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (Anfavea). **Anuário da indústria automobilística brasileira 2013**. São Paulo: Anfavea, 2013. 160 p. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em 16 ago 2013.

Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES); Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. 1ª Edição. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316 p. Disponível em: <<http://www.bioetanoldecana.org/>>. Acesso em: 16 jul. 2013.

BATTY, M. **Urban modelling**: algorithms, calibrations, predictions. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1976. 381 p.

BELL, E. J.; HINOJOSA, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. **Socio-Economic Planning Science**, v. 8, p. 13-17, 1977.

BERTALANFY, L. V. The history and status of general systems theory. **The Academy of Management Journal**, v. 15, n. 4. p. 407-426, 1972.

BOGGIONE, G. DE A.; FONSECA, L. M. G. Restoration of Landsat-7 Images. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT (ISRSE), 30., 2003, Hawai. **Proceedings...**, Honolulu: ISPSRE, 2003.

BONETTI, Eliseo. A teoria das localidades centrais, segundo W. Christaller e A. Losch. In: **Centralidade e regionalização: textos básicos**. 1. Rio de Janeiro: IPGH/Comissão de Geografia, 1968. 1-17p.

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

BORGES, V. M. S.; SILVA, A. A.; SANT'ANA, G. R. S.; CASTRO, S. S. Impactos socioambientais da expansão da cana-de-açúcar no sudoeste goiano: município de Quirinópolis - GO. In: Reunião Anual da SBPC, 63, 2011, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UFG, 2011.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. Lesvos, Greece. Tese (Doutorado em Geografia) - University of Aegean, 2000. Disponível em:

<<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>.

Acesso em: 28/10/02.

BROWN, D. G.; PIJANOWSKI, B. C.; DUH, J. D. Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. **Journal of Environmental Management**, v. 59, p. 247-263, 2000.

BUTLER, E. W. **Moving behavior and residential choice**. Washington, D.C.: Highway Research Board, 1969. 129 p.

CARROLL-JUNIOR, J. D. **Chicago área transportation study: volume III transportation plan**. Chicago: Illinois, 135 p.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfología e fisiologia da cana de açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMICA APLICADA (CEPEA). **PIB_Cepea_1994_2011.xls**. Piracicaba: CEPEA, 2013. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>>. Acesso em 23 ago. 2013>.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. Brasília: CGEE, 2009. 526 p. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/publicacoes/bioetanol2_2009.php>. Acesso em 27 mai. 2013.

CHHABRA, A.; GEIST, H.; HOUGHTON, R. A.; HABERL, H.; BRAIMOTH, A. K.; VLEK, P. L. G.; PATZ, J.; RAMANKUTTY, N.; COOMES, O.; LAMBIN, E. F. Multiple impacts of land-use/cover change. In: LAMBIN, E. F.; GEIST, H. **Land-use and land-cover change**. Berlin: Springer-Verlag. cap. 4. 2006 p.

CHOODARATHNAKARA, A. L.; KUMAR, T. A.; KOLIWAD, S.; PATIL, C. G. Mixed pixel: a challenge in remote sensing data classification for improving performance. In: INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH IN COMPUTER ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJARCET). 2012, ?. **Proceedings... ?**: IJARCET, 2012, p. 261-271.

CLARKE, K.; HOPPEN, S.; GADOS, L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 24, p.247-261, 1997.

COELHO, S. T.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O.; GUARDABASSI P. Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. **Energy for Sustainable Development**, v. 10, n. 2, p. 26-39, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2013/2014**, primeiro levantamento de intenção de plantio, outubro 2013. Brasília: Conab, 2013. 67 p.

COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M. O papel da tributação dos combustíveis no desenvolvimento econômico do estado de São Paulo. **Economia Aplicada**, v. 15, n. 3, p. 369-390, 2011.

COSTANZA, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**. v. 47, p. 199-215, 1989.

COSTANZA, R.; MAXWELL, T. Spatial ecosystem modelling using parallel processors. **Ecological Modelling**, v. 58, p. 159-183, 1991.

COSTANZA, R.; SKLAR, F. H.; WHITE, M. L. Modeling coastal landscape dynamics. **BioScience**, v. 40, p. 91-107, 1990.

CRESTANA, S. Matérias-primas para produção do biodiesel: priorizando alternativas. São Paulo: Embrapa, 2005. **Slides**. Disponível em: <http://ag20.cnptia.embrapa.br/Repositorio/matprima1_000gevvbauw02wx5ok0dnrsvx8drsue9.pdf>. Acesso em: 10 out. 2013.

CRUVINEL, P. E. Agronegócio e oportunidades para o desenvolvimento sustentável no Brasil. In: _____ (ed.) **Documentos 44**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 19 p.

CZAMANSKI, S. A method of forecasting metropolitan growth by means of distributed lags analysis. **Journal of Regional Science**, v. 6, p. 35-49, 1965.

D'ALGE, J. C. L.; GOODCHILD, M. F. Generalização Cartográfica, Representação do Conhecimento e SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 7., 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 147-151. Disponível em:<<http://www.dpi.inpe.br/~julio/arquivos/sbsr96.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2013.

DURÃES, F. O. M. Biocombustíveis: reais questões para a equação Brasil de desenvolvimento sustentável. **Revista de política agrícola**. n. 1, p. 129-131, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Bases do zoneamento de riscos climáticos da cana-de-açúcar no Brasil**. Campinas: Embrapa Cnptia, 2013. Disponível em: <<http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/etanol/projetos-componentes/pc4-zoneamento-e-modelagem/resultados/zoneamento-climatico/bases-do-zoneamento-de-riscos-climaticos-da-cana-de-acucar-no-brasil>>. Acesso em 13 set. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro**. 1. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de conjuntura dos biocombustíveis**: 2012. Brasília: EPE, 2013. 48 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de conjuntura dos biocombustíveis**: janeiro 2011 - dezembro 2011. Brasília: EPE, 2012. 40 p.
ENGELLEN, G.; WHITE, R.; ULJEE, I.; DRAZAN, P. Using cellular automata for integrated modelling of socio-environmental systems. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 34, p. 203-214, 1995.

EXELISVIS. **ENVI feature extraction module user's guide**. ??:2008. 78 p. Disponível em: <http://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/Feature_Extraction_Module.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2013.

FEARNSIDE, P. M.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W. H.; MALDONADO, F. D.; BARBOSA, R. I.; NOGUEIRA, E. M. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, p. 208-233, 2009.

FICARELLI, T. R. A de.; RIBEIRO, H. Dinâmica do arrendamento de terras para o setor sucroalcooleiro: estudo de casos no estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, v.40, n.1, p .44-54, 2010.

FIGUEIREDO, P.; LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P.; SCARPARI, M. S.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A. O instituto agrônômico (IAC) e fatos históricos relacionados ao desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar até o fim do século XX. **Documentos IAC**, v. 103, p. 1-48, 2011. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/publicacoes_online/pdf/Doc_103_FINAL.pdf>. Acesso em: 08 ago 2013.

FILHO, A. F. P.; MARIN, J. O. B. Contratos de fornecimento de cana-de-açúcar: as simetrias de poder entre os agentes. **Interações**, v.13, n.2, p.191-202, 2012.

FITZ, H. C.; DEBELLEVUE, E. B.; COSTANZA, R.; BOUMANS, R.; MAXWELL, T.; WAINGER, L.; SKLAR, F. H. Development of a general ecosystem model for a range of scales and ecosystems. **Ecological Modelling**, v. 88, p. 263-295, 1996.

FONSECA, L. M. G.; PRASSAD, G. S. S. D.; MASCARENHAS N. D. A. Combined interpolation-restoration of landsat images through fir filter design techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 2547-2561, 1993.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Multiple frame agricultural surveys: current survey based on area and list sampling methods**. v. 1. Roma: IBGE, 1996. 119 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED STATES (FAO). **Planilha eletrônica**. EUA: FAO, 2013. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E>>. Acesso em 5 ago. 2013.

FORRESTER, J. W. Counterintuitive behavior of social systems. In: MEADOWS, D. L.; MEADOWS, D. H. **Global equilibrium: collect papers**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1973.

FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. **Journal of computational interdisciplinary sciences**, v. 2, n.1, p. 57-68, 2011.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Estudo econômico da atividade de transporte rodoviário de passageiros no município de São Paulo –**

Produto 1: estudo preliminar da alteração dos preços relativos nas alternativas de transporte rodoviário no município de São Paulo. São Paulo: FGV Projetos, 2013. 25 p. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/imprensa/6338422920328579439/para-unica-porcento2C-retomada-de-tributacao-diferenciada-entre-gasolina-e-etanol-traz-amplos-beneficios-e-reconhece-impactos-positivos-do-combustivel-renovavel>>. Acesso em: 10 out. 2013.

GAO, Y.; MAS, J. F. A comparison of the performance of pixel-based and object-based classifications over images with various spatial resolutions. In: HAY, G. J.; BLASCHKE, T.; MARCEAU, D. **Pixels, Objects, Intelligence: geographic object based image analysis for the 21st century**. Calgary (Canadá): ISPSR, 2008. vol. 23. p. 1-7.

GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life". **Scientific American**, v. 223, n. 4, p. 120-123, 1970.

GODOY, M. M. G; SOARES FILHO, B. S. Modelagem da dinamica intra-urbana no bairro Savassi, em Belo Horizonte. In: ALMEIDA, C. M.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. (org.) **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. Sao Paulo. Oficina de Textos. 2007, p. 286-304.

GOIÁS. **Base cartográfica e mapas temáticos do estado de Goiás.**

Sistema Estadual de Estatística e Informações Geográficas de Goiás.

Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acesso em: 15 out 2012.

GOLDEWIJK, K. K. Estimating global land use change over the past 300 years: the Hyde database. **Global Biogeochemical Cycles**. v.15, n.2, p.417-433, 2001.

GOLDEWIJK, K.; BATJES, J. J. A Hundred Year Database for Integrated Environmental Assessments (HYDE). 1. BILTHOVEN (HOLANDA): National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), 1997. ? P.

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

HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICKESON, J. E.; GOETZ, S. J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote sensing of Environment**, v. 35, p. 11-27, 1991.

HE, C.; PEIJIN, S.; LI, J.; PAN, Y.; CHEN, J. Scenarios simulation land use change in the northern China by system dynamic model. **Acta Geographica Sinica**, n. 4, p. 599-607, 2004.

HILL, D. M. A growth allocation model for the Boston region. **Journal of the American Institute for Planners**, v. 31, p. 111-120, 1965.

HUETE, A. R. et al. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote sensing of environment**, n.59, p.440-451, 1997.

INFORMATIVO. Ribeirão Preto: Grupo Andrade, n. 2, ed. 3, ago/set. 2010. 12 p. Disponível em:
<http://www.grupoandrade.com.br/Informativo_Grupo_Andrade_Web.pdf>.
Acesso em: 4 set. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de uso da terra**. 2. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. n.7, 91 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 1:5.000.000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Noções Básicas de Cartografia**. IBGE. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:
<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoos/represe ntacao.html>. Acesso em: 25 abr. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Previsão e acompanhamento de safras nos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina e no Distrito Federal: safras 1986/1987 a 1999/2000. In: _____. **Estatísticas básicas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. vol. 9. 213 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA: Tabela 1612-Área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da produção da lavoura temporária.xls**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em:
<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=18>>.
Acesso em 05 jul.2013.

INTERNATIONAL GEOSPHERE-BIOSPHERE PROGRAMME (IGBP). Land use and cover change. ? :IGBP,2013. Disponível em:
<<http://www.igbp.net/researchprojects/pastprojects/landuseandcoverchange.4.1b8ae20512db692f2a680009062.html>> . Acesso em: 12 ago. 2013.

JARZYNSKA, K. **Low income housing in the context of Jay Forrester's urban dynamics**: a lesson in framing. 2006. 59 p. Ensaio de Dissertação (Mestrado em Relações Públicas e Política) - University at Albany, Nova Iorque, 2006.

JUNIOR, G. T. C. **Influência do clima na produtividade da cana-de-açúcar.** 2011. 55 f. Monografia (Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis) - Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2011.

JUNIOR, H. R. J. P.; MEIRA, R. F. Ambiente e sustentabilidade. **Revista Complexus**, v. 4, p. 25-45, 2011. Disponível em : <http://engenho.info/revista/ed04/edartigos/artigo_02.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2013.

KEDHAM, R.; BELHADJ-AISSA, A.: Contextual classification of remotely sensed data using MAP approach and MRF. In: INTERNATIONAL CONGRESS SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ISPRS), 20. 2004, Instambul. **Proceedings...** Instambul: SPSRm 2004. p. 11-16.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H. J.; LEPERS, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**. v. 28, p. 205-241, 2003.

LAMBIN, E. F.; ROUNSEVELL, M. D. A.; GEIST, H. J. Area agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 82, p. 321-331, 2000.

LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; GEIST, H. J.; AGBOLA, S. B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J. W.; COOMES, O. T.; DIRZO, R.; FISHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P. S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X.; MORAN, E. F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P. S.; RICHARDS, J. F.; SKANES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G. D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T. A.; VOGEL, C.; XU, J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global environmental change**, v. 11, p.261-269, 2001.

LAMBIN, E.F. **Modeling deforestation processes:** a review. TREES tropical ecosystem environment observations by satellites. TREES SERIES B:Research report nº 1. Comissão Europeia: Luxemburgo. 115 p. 1994.

LAZZARINI, C. M. C.; SOBRINHO, L. N. O.; ROSA, U. L. Modelagem matemática do problema de otimização do transporte em usinas de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 20., 2012, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2012. p. 1-4. Disponível em: <<http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/20/PDF/Sezi-POSMEC20CamillaMiguelCarraraLAZZARINI.pdf>>. Acesso em: 3 out. 2013.

LIMA, C. M. G.; ALMEIDA, C. M.; NOVAES, M. R.; SALGADO, M. P. G.; AGUIAR, D. A.; SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; RUDORFF, B. F. Cenários Especializados de Expansão da Cana-de-Açúcar no Centro-Sul Brasileiro para 2020. In: RUDORFF, B. F. et al. **Impactos Ambientais e Socioeconômicos Associados à Produção e Consumo do Etanol de Cana-de-Açúcar no Centro-Sul do Brasil** (Programa BIOEN FAPESP-MCTI/CNPq-Pronex - Processo FAPESP nº 08/56252-0). Dados restritos. 2013.

LIMA, D. A. L. L. **Estrutura e expansão da agroindústria canavieira no sudoeste goiano: impactos no uso do solo e na estrutura fundiária a partir de 1990**. 2010. 248 p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Econômico) - Universidade de Campinas (Unicamp), Campinas. 2010.

LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**. v. 1, p. 105-109, 2011.

LOWRY, I. S. **A model of metropolis**. Santa Monica: RAND Corporation, 1964. 150 p. Disponível em: <http://www.prgs.edu/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2006/RM4035.pdf> .Acesso em: 21 jun. 2013.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍSIO, E.; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365-2407, 2004.

LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p.823-870, 2007.

LUIZ, A.J.B.; EPIPHANIO, J.C.N. Amostragem por pontos em imagens de sensoriamento remoto para estimativa de área plantada por município. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001.

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.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation part 2: how to model with agents. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE (WSC), 38., 2006, Monterey. **Proceedings...**, Monterey: IEEE, 2006.

MACEDO, R. C.; ALMEIDA, C. M.; SANTOS, J. R.; RUDORFF, B. F. T. Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 2, 2013.

MAEDA, E. E.; PELLIKKA, P. K. E.; CLARK, B. J. F.; SILJANDER, M. Prospective changes in irrigation water requirements caused by agricultural expansion and climate changes in the eastern arc mountains of Kenya. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 982-993, 2011.

MAGOSSO, E. ETH Bioenergia inaugura primeira usina em Goiás. **Abril**, São Paulo, ago. 2009. Disponível em: <<http://www.abril.com.br/noticias/economia/eth-bioenergia-inaugura-primeira-usina-goias-509081.shtml>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

MAGOSSO, E. Usina Boa Vista terá crédito de R\$ 360 milhões do BNDES. **O Estadão**, São Paulo, set. 2012. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,usina-boa-vista-tera-credito-de-r-360-milhoes-do-bndes-,935430,0.htm>> Acesso em: 28 set. 2013.

MARTÍNEZ, S.; MOLLICONE D. From land cover to land use: a methodology to assess land use from remote sensing data. **Remote Sensing**. n. 4, p. 1024-1045, 2012.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.

MCIVER, D. K.; FRIEDL, M. A. Using prior probabilities in decision tree classification of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 253-261, 2002.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS D. L.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. W.; **The limits to growth**. New York: Universe Books, 1972. 205 p.

MEADOWS, D. H; RANDERS, J.; MEADOWS, D. L. **The limits to growth: the 30-year update**. Vermont: Chelsea Green, 2004. 309 p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012. 266 p.

MESQUITA, O. V. **O modelo de von Thünen: uma discussão**. Revista Brasileira de Geografia. Rio de Janeiro, ano 40, v.2, p. 60-130, 1978.

MORAES, E. C. **Fundamentos de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2002. 22p. Apostila. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf>. Acesso em: 10 set. 2013.

MORSE, B. S. **Lecture 4: Thresholding**. Brigham Young University. Edimburgo: School of Informatics, University of Edimburg, 2000. Disponível em: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MORSE/threshold.pdf>. Acesso em: 15 ago 2007.

MUSSATTO, C. M. B.; OSHIMA, H. M. S.; COSTA, N. P.; VEECK, E. B. Análise por imagem digital dos níveis de cinza de fibras de reforço associadas a uma resina composta. **Revista Odonto Ciência**, v. 20, n.5, p. 209-307, 2005.

MUTH, R F. **Cities and housing**: the spatial pattern of urban residential land use. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1969. 355 p.

NASSAR, A.M.; Rudorff, B.F.T.; Antoniazzi, L.B.; Aguiar, D.A.; Bacchi, M.R.P.; Adami, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: ZUURBIER, P.; van de VOOREN, J. **Sugarcane ethanol**: contributions to climate change mitigation and the environment. Wageningen: Academic Publishers, 2008. p. 63-93.

NEUMANN, J. V.; BURKS, A. W. **Theory of Self-Reproducing Automata**. Urbana: University of Illinois Press, 1966. 87 p.

NOVA CANA. Evolução do programa nacional do álcool – Proálcool. Nova Cana. Curitiba: Nova Cana, 2013. Disponível em: <<http://www.novacana.com/nc/quem-somos/>>. Acesso em: 4 ago. 2013.

NOVAES, A. G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981. 290 p.

NOVAES, M. R. **Análise da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar por meio de modelagem dinâmica espacial**. 2010. 153 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010.

PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. (Ed.). **Climate Change 2007**: Synthesis Report. Cambridge, EUA: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

PAELINCK, J. H. P. Dynamic urban growth models, **Papers of the Regional Science Association**, v. 24, p. 25-37, 1970.

PANIGRAPHY, S.; SHARMA, S. A. Mapping of crop rotation multirate Indian remote sensing satellite digital data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)**, v. 52, p. 85-91, 1997.

PAPA, J. P. **Restauração das imagens do satélite CBERS-1 utilizando POCS**. 2005. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

PERRATON, J.; BAXTER, R. **Models, evaluations & information systems for planners Lancaster**: MTP Construction, 1974. 305 p.

PONTIUS, R.G. J. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 68, p. 1041-1049, 2002.

POWER, C; SIMMS, A.; WHITE R. Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of Land Use Maps. **Int. Journal of Geographical Information Science**, v. 15, p. 77-100, 2001.

RADAMBRASIL. **Folha SE.22 (Goiânia)**. Rio de Janeiro: 1983. Mapa pedológico. Escala 1:1.000.000.

RAFIEE, R.; MAHINY, A. S.; KHORASANI, N.; DARVISHSEFAT, A. A.; DANEKAR, A. Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). **Cities**, v. 26, p. 19-26, 2009.

REZENDE, N. A. P.; PASQUALI, R. M. A expansão da cultura canvieira e os novos elementos no cenário de Quirinópolis – GO: Poeira e Queimadas. **ENCONTRO NACIONAL DE GEOGRAFIA AGRÁRIA**, 21, 2012, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2012. p. 1 - 18.

RICCI, A. Usina Boa Vista moeu 2,7 milhões de toneladas na safra 2012/13. **Jornal Cana**, Ribeirão Preto, fev. 2013. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/noticia/Jornal-Cana/51910+Usina-Boa-Vista-moeu-2-7-milhoes-de-toneladas-na-safra-2012-13>>. Acesso em: 27 jul. 2013.

RODRIGUES, A. P. de. Etanol: Pádua Rodrigues volta a cobrar regras para que o setor possa se planejar. **Agência Estado**, São Paulo, out. 2013. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/unica-na-midia/40728229920332180623/etanol-por-cento3A-padua-rodrigues-volta-a-cobrar-regras-para-que-o-setor-possa-se-planejar/>>. Acesso em 17 ago. 2013.

RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13 (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 3089-3096.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista, 1995. 99p. Apostila. Disponível em:<<http://www.malavolta.com.br/pdf/1071.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2013.

RSI. **ENVI user's guide**. Boulder: RSI, 2004. 1150 p.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A. de.; SILVA, W. F. da.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, A.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo state (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

RUDORFF, C. M.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; VIEIRA, C. A. O. Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de área de soja no estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, n.1, p. 118-125, 2007.

SANGAWONGSE, S.; SUN, C. H.; TSAI, B. W. Urban growth and land cover change in Chiang Mai and Taipei: results from the SLEUTH model. In:INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELING AND SIMULATION (MODSIM), 2005, Melbourne. **Proceedings...** , Melbourne:Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2005. p. 2622-2628.

SCANDIFFIO, M. I. V. **Análise prospectiva do álcool combustível no Brasil: cenários 2004 - 2024**. 2005. 182 p. Tese(Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, 2005.

SCHOWENGERDT, R. A. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. 1 ed. Orlando, Florida: Academic Press, INC., 1983. p. 249.

SCHWANINGER, M.; RÍOS, J. P. System dynamics and cibernetics: a synergetic pair. **System Dynamics Review**, v. 24, n. 2, p. 145-174, 2008.

SHIKIDA, P. F. A.; PEROSA, B. B. Álcool combustível no Brasil e path dependence. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 50, n. 2, p. 243-262, 2012. 2012.

SHIMABUKURO, Y. E.; RUDORFF, B. F. T. Dados do sensor MODIS para o mapeamento e monitoramento da cobertura vegetal e uso da terra. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 1., 2006, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Embrapa Informática/INPE, 2006. p. 929-938.

SILVESTRINI, R. A.; SOARES-FILHO, B. S.; ALENCAR, A. A. C.; RODRIGUES, H. O.; ASSUNÇÃO, R. M.; MENDONZA, E. Modelo probabilístico de espalhamento de fogo: Aplicação para a região do Xingu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14 (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 5459-5466.

SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, p. 1484-1488, 1989.

SKLAR, F. H.; COSTANZA, R.; DAY JR., J. W. Dynamic spatial simulation modeling of coastal wetland habitat succession. **Ecological Modelling**, v. 29, p. 261-281, 1985.

SOARES-FILHO, B. S.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DIAZ, M. DEL C. V.; RIVERO, S.; SOLÓRZANOS, L.; VOLL, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarém–Cuiabá corridor. **Global Change Biology**. V. 10, p. 745–764, 2004.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in na Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v.154, p. 217-235, 2002.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. **Modelagem de dinâmica ambiental com Dinamica EGO**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2009. 116p. Manual. Disponível em: <http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_guia_pratico_portugues.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2013.

SOUSA, S. A. F. S. **Autómatos Celulares**. 2002. 96 p. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) - Faculdade de Ciências do Porto, Porto, 2002.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, C. C.; PICOLI, M. C. A.; ADAMI, M. Estimativa de produtividade de cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.) por meio de técnica de análise de regressão linear múltipla. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 21-26 abr. 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 435-442.

SZMRECSÁNYI, T; MOREIRA, E.P. O desenvolvimento da agroindústria canaveira do Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. **Estudos avançados**, v.5. n. 11, p.1-18, 1991.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 26, p. 234-240, 1970.

TOLMASQUIM, M.T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos Estudos**, v. 79, p.47-69, 2007.

TURNER, B. L.; MOSS, R. H.; SKOLE, D. L. **Relating land use and global land-cover change: a proposal for na IGBP-HDP cor project**. Estocolmo: Royal Swedish Academyf Sciences, 1993.? p.

TURNER, B. L.; SKOLE, D.; SANDERSON,; FISHER, G.; FRESCO, L.; LEEMANS, R. **Land-use and land-cover: science/research plan**. Estocolmo e Genebra: International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), 1995. n. 35, 132 p.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (Unica). **Cenários para a Expansão da Área Colhida de Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo**. Documento restrito. São Paulo: UNICA, 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (Unica). Para Unica, retomada de tributação diferenciada entre gasolina e etanol traz amplos benefícios e reconhece impactos positivos do combustível renovável. Única: São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/imprensa/6338422920328579439/para-unica-porcento2C-retomada-de-tributacao-diferenciada-entre-gasolina-e-etanol-traz-amplos-beneficios-e-reconhece-impactos-positivos-do-combustivel-renovavel>>. Acesso em 10 out. 2013.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA (UDOP). **Características agronômicas mais marcantes das principais variedades de cana na região Centro-Sul**. UDOP. Araçatuba: UDOP, 2013. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=caracteristicas>>. Acesso em: 15 jul. 2013.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA (UDOP). **Ranking de moagem de cana-de-açúcar 2007/2008**. UDOP. Araçatuba: UDOP, 2008. Disponível em: <http://www.udop.com.br/download/estatistica/ranking_producao_cana/cana_07_08.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2013.

USJ. **Nossos Negócios**. Grupo USJ. São Paulo: Grupo USJ, 2013. Disponível em: <<http://www.usj.com.br/nossos-negocios.html>>. Acesso em: 05

ago. 2013.

VALEC. **Trecho Ouro Verde(GO) – Estrela d'Oeste(SP) – Extensão Sul. VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias.** Brasília: Valec, 2013 .

Disponível em:

<<http://www.valec.gov.br/FerroviasFNSOuroVerde.php>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal, RN. **Anais...**, São José dos Campos, SP : INPE, 2009. p. 1-8.

VELDKAMP, A.; LAMBIN, E. F. Predicting land-use change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p. 1-6, 2001.

VELDKAMP, A.; VERBURG, P. H. Modelling land use change and environmental impact. **Journal of Environmental Management**, v. 72, n. 1-2, p. 1-3, 2004.

VERBURG, P. H.; KONING, G. H. J.; KOK, K.; VELDKAMP, A.; BOUMA, J. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. **Ecological Modelling**, v. 116, p. 45-61, 1999.

VERBURG, P. H.; OVERMARS, K. P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. **Landscape Ecology**, v. 24, p. 1167-1181, 2009.

VERBURG, P. H.; SOEPBOER, W.; VELDKAMP, A.; LIMPIADA, R.; ESPALDON, V.; MASTURA, 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.

VERBURG, P. H.; VELDKAMP, A. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. **Landscape Ecology**, v. 19, p. 77-98, 2004.

VITEL, C.S.M.N.; CARRERO, G.C.C.; CENAMO, M.C.; LEROY, M.; GRAÇA, P.M.L.A.; FEARNside, P.M. Land-use Change Modeling in a Brazilian Indigenous Reserve: Construction of a Reference Scenario for the Suruí REDD Project. Aceito pela revista Human Ecology. Acesso em: 10 out. 2013.

VOINOV, A.; COSTANZA, R.; WAINGER, L.; BOUMANS, R.; VILLA, F.; MAXWELL, T.; VOINOV, H. Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. **Environmental Modelling & Software**, v. 14, p. 473-491, 1999.

WALKER, R. Theorizing land-cover and land-use change: the case of tropical deforestation. **International Regional Science Reviews**. v. 24, n. 3, p. 247-270, 2004.

WEGENER, M.; FÜRST, F. **Land-use transport interaction: state of the art**. Dortmund: Universität Dortmund, 1999. 99 p.

WEGENER, M.; GNAD, F.; VANNAHME, M. The time escala of urban change. In: HUTCHINSON, B.; BATTY, M. ed. **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 175-197.

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. Modelling land use change with linked cellular automata and socio-economic models: a tool for exploring the impact of climate change on the island of St. Lucia. In: HILL, M.; ASPINALL, R. (Eds.). **Spatial Information for Land Use Management**. Londres: Gordon and Breach, 2000. p. 189–204.

WILSON, A. G. **Urban and Regional Models in Geography and Planning**. Nova Iorque: John Wiley, 1974. p ?.

WINGO, L. **Transportation and urban land**. Washington, D. C.: Resources for the Future Inc., 1961.

WOLFRAM, S. Cellular automata as model of complexity. In: LAM, L. **Nonlinear Physics for Beginners: fractals, chaos, solutions, pattern formation, cellular automata and complex systems**. Singapura: World Scientific Publishing, 1998. p. 197-204.

WOLFRAM, S. Universality and complexity in cellular automata. **Physica**, v. 10D, p. 1-35, 1984.

XIMENES, A. C.; ALMEIDA, C. M.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. A. Modelagem dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 3, Curitiba, p. 370-391. 2008.