

PAULA MADEIRA GOMES

**MODELAGEM DA DINÂMICA DO USO DA TERRA E
INSTRUMENTOS DE POLÍTICA AMBIENTAL: A EXPANSÃO DA
CANA-DE-AÇUCAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ/JACARÉ
(UGRHI 13)**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Montañó

São Carlos / SP

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G633m Gomes, Paula Madeira
Modelagem da Dinâmica do Uso da terra e
Instrumentos de Política Ambiental: A Expansão da
Cana-de-Açúcar na Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré
(UGRHI 13) / Paula Madeira Gomes; orientador Marcelo
Montaño. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Ciências da Engenharia Ambiental e Área de
Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2013.

1. Modelos de alteração de uso e ocupação do solo.
2. Cana-de-açúcar . 3. Planejamento Ambiental. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Licenciada **PAULA MADEIRA GOMES**.

Título da dissertação: "Modelagem da dinâmica do uso da terra e instrumentos de política ambiental: a expansão da cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Tiete/Jacaré (UGRHI 13)".

Data da defesa: 23/08/2013

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Marcelo Montaña (orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Dra. **Andréia Medinilha Pancher**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" UNESP- Rio Claro)

Prof. Dr. **Pedro Cabral**
(Universidade Nova de Lisboa)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:
Prof. Dr. **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Ao meu marido Thiago e a minha mãe,
por serem os alicerces da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida.

Ao meu orientador Marcelo Montañó, pelo apoio e paciência dispensados a mim durante o processo de orientação.

Ao Professor Pedro Cabral pela receptividade e ajuda durante o desenvolvimento do estágio de pesquisa em Lisboa.

Ao projeto CANASAT e ao Comitê de Bacia Hidrográfica da UGRHI 13 por disponibilizar material cartográfico para esta pesquisa.

A minha família pelo grande incentivo, em especial, a minha mãe que sempre está lá quando preciso.

Ao meu marido Thiago, por todos os momentos de força e amor compartilhados durante todo o período do mestrado.

À FAPESP (Processo nº 2011/04385-9) e a CAPES pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço à FAPESP pela bolsa de estágio e pesquisa no exterior (Processo nº 2012/10956-1) a qual me deu a oportunidade de estagiar na Universidade Nova de Lisboa.

Aos meus colegas de turma do PPGSEA 2011 pelas conversas esclarecedoras, pelo apoio e pelos momentos de descontração.

À Anne e ao Pimpon, por me socorrerem sempre que precisei.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

O horror visível tem menos poder sobre a alma do que o horror imaginado.
William Shakespeare

RESUMO

GOMES, P. M. **Modelagem da dinâmica do uso da terra e instrumentos de Política Ambiental: a expansão da cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do Tietê/Jacaré (UGRHI 13)**. 2013. 127p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2013.

A expansão da cana-de-açúcar tem ocorrido de maneira intensa no cenário brasileiro, especialmente no estado de São Paulo e região Centro-Oeste do Brasil, com potencial de causar significativos impactos destacando-se a degradação do solo, a poluição dos recursos hídricos, a pressão sobre outras culturas ou matas nativas, conflitos pelo uso do solo, entre outros. O objetivo dessa pesquisa é avaliar a aplicação de técnicas de modelagem do uso do solo em conjunto com instrumentos de política ambiental por meio da modelagem da expansão da cana-de-açúcar na bacia do Tietê/Jacaré (UGRHI 13). A bacia hidrográfica em questão caracteriza-se pela presença de regiões de alta vulnerabilidade ambiental, em termos da fragilidade do território e presença de atributos ambientais de significativo interesse, bem como pelo fato de suas principais atividades econômicas estarem vinculadas ao agronegócio. Para a consecução dos objetivos estabelecidos, o modelo GEOMOD presente na plataforma IDRISI foi aplicado para a projeção da expansão da cana-de-açúcar em 2019. De modo a verificar a aplicabilidade das informações geradas, a projeção gerada foi cotejada a dois instrumentos de planejamento regional: o Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro e o Plano de Bacia da UGRHI 13. Constatou-se que a aplicação de modelos de uso do solo para a projeção de alterações nos padrões de ocupação do território apresenta-se como prática promissora que pode ser integrada ao planejamento e gestão ambiental a nível regional, sendo, entretanto, necessário melhorar a performance do modelo elaborado a fim de gerar informações mais confiáveis para os tomadores de decisão.

Palavras-Chave: Modelos de alterações de uso e ocupação do solo; Cana-de-açúcar; Instrumentos de Política Ambiental; Bacia do Tietê/Jacaré (UGRHI 13).

ABSTRACT

GOMES, P.M. **Land use Modeling and Environmental Policy Instruments: sugarcane expansion at Tietê/Jacaré watershed (UGRHI 13)**. 2013. 127 p. MSc Dissertation. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2013.

Sugarcane expansion has been significant in Brazil, especially in São Paulo State and Midwest Region. This crop has potential of causing significant impacts, such as: soil degradation, pollution of water resources, pressure on other crops or native forests, conflicts regarding land use, among others. The purpose of this study is to verify the application of land use cover change models with environmental policy instruments by modeling sugarcane expansion in Tietê/Jacaré watershed (UGRHI 13). This water basin is characterized by high vulnerability environmental areas in terms of fragility territorial and presence of significant environmental attributes, as well as the fact that its main economic activities are linked to agribusiness. GEOMOD land use cover change model was applied to project sugarcane expansion in 2019. In order to verify the applicability of sugarcane projection, it was used in the context of the Sugarcane Agro-Industry Zoning and the Water Basin Plan. The results showed that land use cover change models application for sugarcane projection is presented as a promising practice that can be integrated to the regional environmental planning. However, it's necessary to improve the performance of the model in order to generate more reliable information to the decision makers.

Key-words: Land Use Cover Change Models; Sugarcane; Environmental Policy Instruments; Tietê/Jacaré watershed (UGRHI 13).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Área plantada de cana-de-açúcar e Taxa de Crescimento Anual no Estado de São Paulo (2000-2011).....	29
Figura 2	Panorama simplificado do processo de produção da cana-de-açúcar. Fonte:Smeets et. al (2006).....	31
Figura 3	Panorama simplificado da produção de etanol e açúcar. Fonte: Smeets et. al (2006).....	31
Figura 4	Localização da área de estudo.....	42
Figura 5	Principais etapas da pesquisa.....	46
Figura 6	Composição Colorida Landsat 7 RGB 543 da área de estudo em 2003.....	47
Figura 7	Procedimentos realizados para verificar a expansão da cana-de-açúcar em relação às variáveis selecionadas.....	49
Figura 8	Ilustração da técnica Combinação Linear Ponderada. Fonte: Sartori, Silva e Zimback (2012).....	51
Figura 9	Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar. Fonte: Manzatto et al (2009).....	61
Figura 10	Zoneamento Agroambiental do setor sucroalcooleiro para o estado de São Paulo. Fonte: SMA, (2008).....	62
Figura 11	Expansão da cana-de-açúcar em relação aos municípios da UGRHI 13 no período de 2003 até 2011.....	66
Figura 12	Expansão da cana-de-açúcar em relação aos empreendimentos sucroalcooleiros na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011.....	67
Figura 13	Empreendimentos sucroalcooleiros lotados na UGRHI 13.....	69
Figura 14	Expansão da cana-de-açúcar em relação ao sistema viário na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011.....	69
Figura 15	Expansão da cana-de-açúcar em relação à Pedologia na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011.....	69
Figura 16	Expansão da cana-de-açúcar em relação à Declividade na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011.....	70
Figura 17	Expansão da cana-de-açúcar em relação às Condições Edafoclimáticas na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011.....	70
Figura 18	Mapa do uso da terra na UGRHI 13 em 2003.....	71
Figura 19	Mapa do uso da terra na UGRHI 13 em 2011.....	71

Figura 20	Expansão da cana-de-açúcar em relação ao uso da terra na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011.....	72
Figura 21	Expansão da cana-de-açúcar em relação ao uso da terra na UGRHI 13 no período de 2005 até 2011 conforme dados fornecidos pelo Projeto CANASAT.....	72
Figura 22	Mapas representantes das variáveis padronizadas em uma mesma escala de aptidão: 0 = Aptidão Nula a 255 = Aptidão Máxima.....	75
Figura 23	Comparação entre os testes com maior FM utilizando uma variável e o mapa de 2011 real.....	77
Figura 24	Comparação entre o mapa com as plantações de cana-de-açúcar em 2011 real e o Teste 18 – Maior Figura de Mérito – e o Teste 12 o qual apresenta o maior Figura de Mérito na ausência da variável Uso da terra em seu mapa de probabilidades de transição.....	79
Figura 25	Comparação entre o mapa com as plantações de cana-de-açúcar em 2011 real e o Teste 63 – presença de todas as variáveis– e o Teste 60 o qual apresenta o maior Figura de Mérito de todos os testes realizados.....	81
Figura 26	Escala para a comparação par a par entre as variáveis. Fonte: Eastman (2009b).....	82
Figura 27	Comparação entre o mapa com as plantações de cana-de-açúcar em 2011 real e o Teste 64.....	85
Figura 28	Comparação entre os mapas de 2003 real, 2011 real e o Teste 60.....	88
Figura 29	Probabilidades de transição para 2019.....	92
Figura 30	Projeção da área plantada com cana-de-açúcar para 2019.....	92
Figura 31	Porcentagem de aumento da cana-de-açúcar em 2019 em relação à área plantada em 2011.....	93
Figura 32	Expansão da cana-de-açúcar x Uso da terra no período de 2011-2019.....	94
Figura 33	Expansão da cana-de-açúcar em relação às Áreas Urbanas.....	95
Figura 34	Expansão da cana-de-açúcar em relação às Unidade de Conservação.....	95
Figura 35	Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro na UGRHI 13.....	100
Figura 36	Área de cana-de-açúcar em 2019 em função das classes do Zoneamento Agroambiental para o Setor Sucroalcooleiro	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Projeções para a área plantada de cana-de-açúcar no Brasil.....	30
Tabela 2	Modelos de uso e ocupação do solo: características gerais	37
Tabela 3	Materiais utilizados durante o desenvolvimento dessa pesquisa	43
Tabela 4	Número de testes realizados de acordo com a quantidade de variáveis.....	52
Tabela 5	Descrição das Justificativas Locacionais encontradas nos Estudos de Impactos Ambientais (EIAs).....	63
Tabela 6	Variáveis Potenciais e Restritivas para a UGRHI 13.....	65
Tabela 7	Variáveis utilizadas na Calibração do GEOMOD.....	74
Tabela 8	Pesos Pedologia.....	74
Tabela 9	Pesos Uso da terra.....	75
Tabela 10	Pesos Classes Edafoclimáticas.....	75
Tabela 11	Matriz de Comparação das Variáveis Potenciais.....	83
Tabela 12	Pesos Gerados para cada variável.....	84
Tabela 13	Síntese dos testes com maior Figura de Mérito	86
Tabela 14	Figura de Mérito e seus parâmetros calculados para o Teste 60.....	87
Tabela 15	Diminuição da Resolução X Sucessos X Alarmes Falsos.....	89
Tabela 16	Dados utilizados para o cálculo da área projetada na UGRHI 13 para 2019..	90
Tabela 17	Suscetibilidade à erosão nos municípios da UGRHI 13.....	97
Tabela 18	Área plantada em 2019 em função do Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro.....	100

LISTA DE SIGLAS

APP – Área de Preservação Permanente

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

FM – Figura de Mérito

KM – Quilômetro

IAA – Instituto do Açúcar e Alcool

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MME – Ministério de Minas e Energia

NEPA – Núcleo de Estudos de Política Ambiental

PPGSEA – Programa de Pós Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar

SEADE - Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados

SIG – Sistema de Informação Geográfica

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UPI – Unidade de Proteção Integral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
2 OBJETIVOS.....	25
3 REFERENCIAL TEÓRICO	27
3.1 O Setor Sucroalcooleiro	27
3.2 Principais impactos do setor Sucroalcooleiro	31
3.3 Modelagem do Uso da terra	35
4 MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1 Caracterização da área de estudo	41
4.2 Materiais.....	43
4.3 Procedimentos Metodológicos	44
4.3.1 Mapeamento do Uso da terra na UGRHI 13	46
4.3.2 Calibração do Modelo GEOMOD.....	48
4.3.3 Escolha das variáveis e análise de seu comportamento no período de 2003 até 2011.....	48
4.3.4 Padronização das Variáveis Potenciais e Restritivas	50
4.3.5 Elaboração do Mapa de Probabilidades de Transição.....	51
4.3.6 Realização dos Testes.....	52
4.3.7 Validação do modelo.....	53
4.3.8 Projeções da área de cana-de-açúcar na UGRHI 13 para 2019.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1 Variáveis identificadas na literatura.....	57
5.2 Justificativas locais encontradas nos Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e escolha das variáveis potenciais e restritivas	63
5.3 Análises Espaciais Realizadas.....	66
5.4 Padronização das variáveis.....	73

5.5 Realização e Análise dos Testes	76
5.5.1 Apenas uma variável.....	76
5.5.2 Duas variáveis.....	78
5.5.3 Conjunto de variáveis: três a seis variáveis	80
5.5.4 Teste com variáveis potenciais com pesos diferentes.....	82
5.6 Validação do Modelo GEOMOD	87
5.7 Projeções da Área de Cana-de-Açúcar na UGRHI 13 para o ano de 2019	90
5.8 Aplicação de técnicas de modelagem para projeção de alterações no uso do solo como suporte ao Planejamento Ambiental	96
5.8.1 Plano de Bacia e a expansão da cana-de-açúcar em 2019	96
5.8.2 Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro e a expansão da cana-de-açúcar em 2019	100
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A - Características dos Empreendimentos dos Estudos de Impactos Ambientais utilizados nesta pesquisa	120
APÊNDICE B – Resultados dos testes realizados conforme o número de variáveis potenciais utilizadas e o índice Figura de Mérito Alcançado	121
APÊNDICE C – Taxa de expansão de cana-de-açúcar em relação à área plantada em 2011 nos municípios da UGRHI 13	126
APÊNDICE D – Expansão da cana-de-açúcar até 500 metros da área urbana dos municípios no período de 2011 a 2019.....	127

1 INTRODUÇÃO

Os impactos causados pelas alterações do uso da terra caracterizam-se como uma das principais preocupações do planejamento ambiental, uma vez que tem potencial para afetar significativamente o meio natural, não só na escala local, como também na regional e global (FOLEY et al., 2005).

Os processos que desencadeiam essas alterações são inúmeros e complexos (VERBURG et al., 2002). A descoberta do fogo e o surgimento da pecuária e da agricultura fomentaram o desmatamento de imensas áreas florestais ao longo do desenvolvimento das civilizações, além de ter criado uma demanda pelo uso do solo para a realização dessas atividades, transformando não só a terra em mercadoria como também causando inúmeros impactos ambientais (LAMBIN, GEIST e LEPERS, 2003).

Atualmente, a utilização de biocombustíveis é posta como alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Destaca-se, então, a atuação do Brasil como produtor e incentivador do etanol de cana-de-açúcar, através da criação de Programas como o Pró-Alcool e o incentivo para a criação de carros *flex fuel*, movidos tanto a gasolina quanto a etanol. Em decorrência de incentivos como esses, criou-se uma significativa demanda por este biocombustível acompanhada pelo aumento da área plantada de cana-de-açúcar para atender à necessidade de produção. Este fato preocupa cientistas e ambientalistas devido aos impactos ambientais negativos associados a esta cultura e a consequente degradação do meio natural.

Destaca-se nesse contexto o papel do estado de São Paulo como líder do setor sucroalcooleiro no Brasil, acomodando atualmente mais de 50% da área plantada no Brasil e ainda marcado por uma intensa movimentação das lavouras de cana-de-açúcar sobre seu território.

Neste contexto, evidencia-se a necessidade de um planejamento adequado diante da perspectiva de continuidade de tal modelo de expansão desta monocultura, que tenha como objetivo balancear as necessidades econômicas e ambientais (VERBURG et al., 2002). Neste sentido, a aplicação de modelos do uso do solo (*Land Use/Cover Change – LUCC Models*) acoplados ao ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) tem o potencial de dar suporte ao planejamento ambiental e territorial, oferecendo aos tomadores de decisão a

possibilidade de avaliar diferentes cenários e suas implicações. Segundo Montaña (2005), a utilização deste tipo de modelo abre novas perspectivas para discussões sobre o equacionamento do desenvolvimento com a manutenção/melhora da qualidade ambiental.

Sendo assim, o presente trabalho propõe a utilização de um modelo do uso do solo para a projeção da expansão da cana-de-açúcar a fim de avaliar sua aplicabilidade em conjunto com instrumentos de política ambiental. Entende-se que a aplicação deste tipo de modelo para a expansão da cana-de-açúcar pode fornecer informações relevantes, que contribuem para o planejamento do uso e ocupação do território inserindo a variável ambiental como um dos pilares na tomada de decisão.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a aplicabilidade de técnicas de modelagem para projeção de alterações no uso do solo em conjunto com instrumentos de política ambiental, por meio da modelagem da expansão da cana-de-açúcar na Bacia do Tietê/Jacaré (UGRHI 13).

Objetivos específicos:

- ✓ Aplicação de um modelo de projeção de uso/ocupação do solo para a geração da projeção da expansão da cana-de-açúcar na Bacia do Tietê/Jacaré (UGRHI 13) considerando um horizonte de 8 anos;
- ✓ Utilizar os resultados obtidos com a modelagem para avaliar os cenários futuros em consonância com o estabelecido para os instrumentos de política ambiental que se relacionam com a ocupação do território, considerando diferentes esferas de planejamento/tomada de decisão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A elaboração deste item focou nos temas pertinentes a esta pesquisa, como o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro, os principais impactos decorrentes deste setor e as aplicações de modelos do uso do solo com vistas a fornecer subsídios para melhor compreender estes temas para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 O Setor Sucroalcooleiro

A cana-de-açúcar figura no território e na economia brasileira desde o século XV. Primeiramente, o interesse principal residia na fabricação do açúcar, porém, a partir do século XX, passou-se a utilizar o álcool como combustível, caracterizando-se como a segunda produção em larga escala na qual as lavouras de cana-de-açúcar são a principal matéria-prima (VIEIRA; LIMA; BRAGA, 2007).

A década de 1970 pode ser considerada como um marco na história da cana-de-açúcar no cenário brasileiro. Nesta época, aconteceu a primeira crise do petróleo a nível mundial, desencadeando um aumento significativo no preço dos barris, passando de US\$ 2,70/barril para US\$ 11,50, pressionando os países a encontrarem alternativas para o uso de combustíveis fósseis (CERQUEIRA LEITE et al., 2009; MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999). Sendo assim, em 1975, o governo brasileiro criou o Programa Pró-Álcool, através do Decreto nº 76.593, com o objetivo de incentivar o uso de etanol e ao mesmo tempo favorecer o setor açucareiro em função do baixo preço do açúcar no mercado internacional (MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999). Como consequência do Pró-Álcool houve a substituição de 60% da gasolina em 1989 e o crescimento de lavouras de cana-de-açúcar no Paraná e na Região Centro-Oeste, cuja produção era praticamente nula antes do lançamento do Programa (VIEIRA; LIMA; BRAGA, 2007).

Entretanto, no início da década de 1990, o preço do barril do petróleo diminuiu enquanto que o preço do açúcar aumentou no mercado internacional, fomentando a produção deste produto em detrimento do etanol. Conseqüentemente, tanto a produção de etanol como o

progresso tecnológico foram reduzidos e o preço do etanol não atingiu um patamar competitivo com a gasolina (MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999; VIEIRA; LIMA; BRAGA, 2007). Ademais, a década de 1990 marcou a lenta desregulamentação do setor com o fim do Instituto do Açúcar e Alcool (IAA) e a liberação dos preços controlados pelo governo federal da cana-de-açúcar, açúcar e do etanol (BARROS e MORAES, 2002).

Moreira e Goldemberg (1999) teceram uma análise sobre a expansão da cana-de-açúcar e a adoção do etanol como alternativa viável à gasolina e evidenciam três razões para tal:

- A Petrobras garantiu a compra de uma grande parcela do etanol produzido no país;
- Os incentivos do governo na forma de subsídios e empréstimo aos produtores;
- O preço atrativo do etanol para o consumidor, o qual era vendido a 59% do preço da gasolina (isso só foi possível porque o governo brasileiro dobrou o preço da gasolina quando comparado aos Estados Unidos);

Em 2003, ocorreu o lançamento dos veículos *flex fuel*, que podem rodar tanto com gasolina quanto com etanol e que se tornaram um sucesso de vendas, representando 92,02% do total de automóveis (ciclo otto¹) vendidos no país em 2012 (UNICA, 2012 referenciando dados de ANFAVEA). Assim, a demanda pelo biocombustível etanol foi impulsionada, fomentando a realização de altos investimentos no setor e, conseqüentemente, a expansão dos canaviais (FREITAS e KANECO, 2011; GOLDEMBERG, COELHO e GUARDABASSI, 2008; LUO, VOET e HUPPES, 2009; TORQUATO e FRONZAGLIA, 2006; PIRES, 2011).

Neste cenário, o Brasil tornou-se o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, produzindo 53,3% a mais do que a Índia, país que ocupa a segunda posição na produção mundial de cana-de-açúcar (FAO, 2011). Em termos espaciais, a produção se concentra na região sudeste e centro-oeste do Brasil, destacando-se o papel do estado de São Paulo na produção de açúcar e etanol (UNICA, 2012).

Atualmente, São Paulo se mantém como o maior produtor de cana-de-açúcar e etanol do Brasil, tendo produzido 329.923 mil toneladas de cana-de-açúcar e 11.830 mil m³ de etanol na safra de 2012/2013, o que representa, respectivamente, 56,07% e 50,9% da produção nacional (UNICA, 2012). A configuração espacial da cana-de-açúcar em seu território caracteriza-se pela tradicional região de Ribeirão Preto e a nova frente de expansão de cana-de-açúcar na região oeste do Estado (RUDORFF et al., 2010).

¹ Ciclo otto não abrange os motores movidos a diesel (UNICA, 2012)

Neste sentido, Gomes, Montaño e Cabral (2013) confirmaram essa tendência através da análise da movimentação do centro de massa (centroide) das plantações de cana-de-açúcar do estado de São Paulo no período de 2003 até 2011. Observou-se que o centroide avança sempre para a direção noroeste do estado com saltos maiores nos anos que apresentaram as maiores taxas de expansão.

Para Rudorff et al. (2010), o estado de São Paulo atendeu rapidamente a demanda por etanol criada pelo lançamento dos carros *Flex*. Em termos espaciais, no período de 1990 a 2002, houve um aumento de 47% na área plantada, enquanto que de 2003 até 2011, a taxa aumentou para 85% (UNICA, 2011). Observando a Figura 1, nota-se que a partir de 2003 houve uma expansão contínua das plantações de cana-de-açúcar, tendo picos de 13,41% em 2006 e 16,79% no ano de 2008². Segundo dados do projeto CANASAT³ (INPE, 2012), a área total cultivada na safra de 2011/2012 foi de 5.400.823 hectares, o que representa 21,75% da área total do estado.

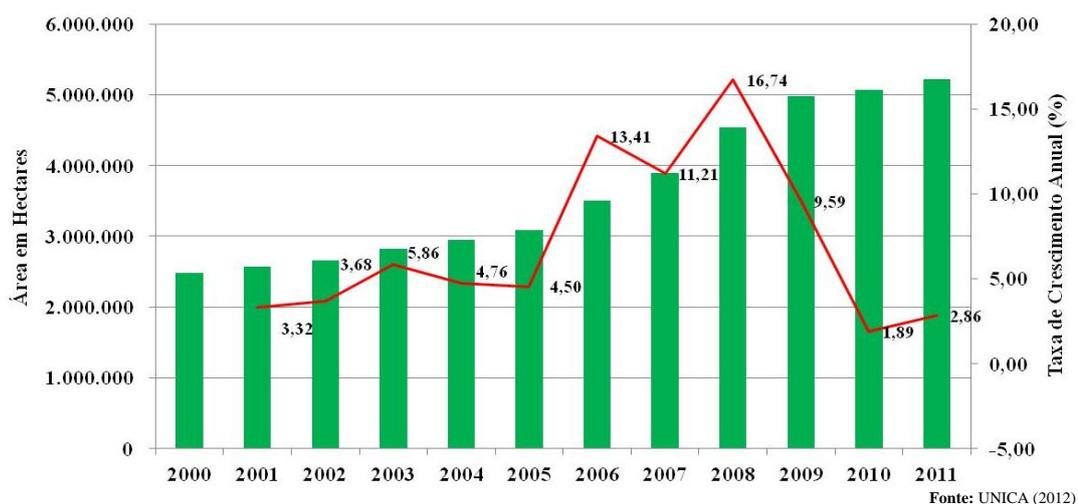


Figura 1 – Área plantada de cana-de-açúcar e Taxa de Crescimento Anual no Estado de São Paulo (2000-2011)

Apesar de todo o crescimento do setor, em 2008 uma série de fatores culminou em uma queda na expansão do complexo sucroalcooleiro, podendo-se citar como fatores provocadores dessa queda: a escassez de crédito e o baixo investimento no setor, nesse ano, em função da crise financeira mundial; os baixos preços do açúcar e do etanol praticados nas safras de 2007/2008 e 2008/2009; problemas relacionados ao clima, por exemplo, a ocorrência de chuvas na época da colheita (UNICA, 2009; JANK, 2009). As consequências

² Essa taxa expressa o crescimento da área plantada com cana-de-açúcar em relação ao ano anterior.

³ Projeto desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com o objetivo de monitorar a expansão da cana-de-açúcar na região sudeste. Os dados do projeto estão disponíveis em: <<http://www.dsr.inpe.br/canasat/>>.

foram o adiamento de metade dos projetos planejados para entrar em funcionamento, a ampliação das fusões e aquisições entre usinas, o fechamento de 40 usinas nos últimos cinco anos, além da significativa diminuição da expansão desta monocultura em 2009, como se pode ver na Figura 1 (GORDINHO, 2010).

Entretanto, a demanda pelos produtos fabricados a partir desta *comodity* é crescente, representada pelo próprio mercado interno que precisa ser abastecido com etanol, além das oportunidades de exportação de açúcar. Estas últimas são apontadas como promissoras devido a crescente demanda impulsionada por países emergentes, os quais têm cada vez mais acesso a produtos industrializados (FARINA, 2012). Outros fatores que justificam a crescente demanda por etanol é o elevado preço da gasolina e as preocupações com o excesso de CO₂ e suas possíveis consequências para o planeta (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008). Projeções realizadas por BRASIL-MME (2007) indicam que em 2030 a demanda por etanol deve chegar a 143.832 m³/dia, o que representa um aumento de 200% em relação a 2010. Devido ao aumento da demanda do etanol e do açúcar, a área plantada de cana-de-açúcar também tende a aumentar, conforme mostram as projeções apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Projeções para a área plantada de cana-de-açúcar no Brasil

Referência	Estimativa de área plantada de cana-de-açúcar	Estimativa de produção de cana-de-açúcar
PNE 2030 (BRASIL-MME, 2007)	10,6 milhões de hectares em 2020; 13,9 milhões de hectares em 2030;	1 bilhão e 140 milhões de toneladas em 2030;
PDE 2020 (BRASIL-MME, 2011)	14,4 milhões de hectares	1 bilhão e 126 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2020
UNICA (2008)	13,9 milhões de hectares em 2020	1 bilhão e 38 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2020

No cenário internacional, não se pode deixar de citar as Diretrizes de utilização de combustíveis e fontes de energia renovável da União Europeia, que têm como objetivo diminuir as emissões de gases do efeito estufa em 10% no setor de transportes até 2020 (PARLAMENTO EUROPEU, 2009a e 2009b). Inclusive, a UNICA não está medindo esforços para impedir a aprovação da proposta do Parlamento Europeu cujo objetivo é limitar a 5% a importação de biocombustíveis a partir de culturas consideradas alimentícias, como cana-de-açúcar, soja, entre outros, o que certamente reduziria significativamente o mercado de exportação do etanol brasileiro para a Europa (UNICA, 2013).

Em 2013, o governo brasileiro implementou diversas medidas para aumentar a competitividade do setor sucroalcooleiro, tais como aumento na mistura do etanol anidro na gasolina, incentivo fiscal e redução de taxas de juros para financiamento destinado à

renovação e expansão de novos canaviais (BRASIL, 2013). Essas medidas aliadas à crescente demanda pelos produtos fabricados pelo setor indicam que haverá um aumento na produção de cana-de-açúcar, que poderá ocorrer por meio da expansão da área plantada ou do aumento da produtividade deste insumo.

Assim, entende-se que há interesse econômico na expansão deste setor devido ao lucro gerado, entretanto, não se pode deixar de citar os impactos socioambientais causados pelo mesmo, os quais serão explorados no item a seguir.

3.2 Principais impactos do setor Sucroalcooleiro

Nas Figuras 2 e 3 pode-se observar o processo de produção da cana-de-açúcar e de seus produtos derivados etanol e açúcar:

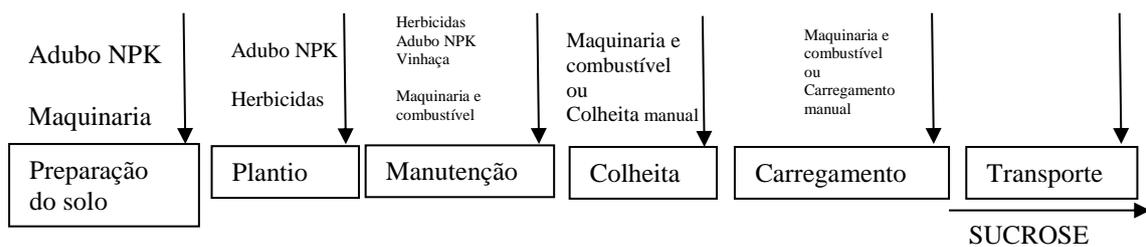


Figura 2 – Panorama simplificado do processo de produção da cana-de-açúcar.

Fonte: Smeets et. al (2006)

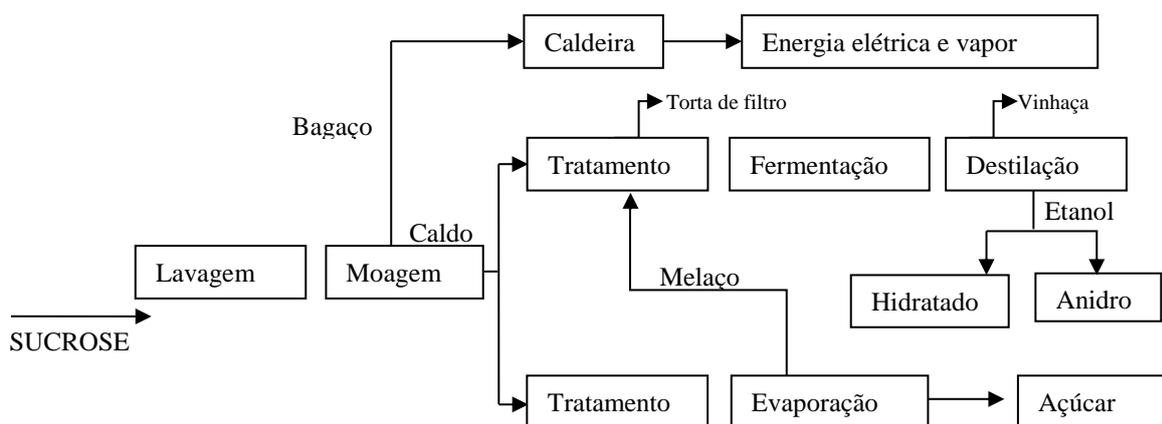


Figura 3 – Panorama simplificado da produção de etanol e açúcar.

Fonte: Smeets et. al (2006).

Ao longo da realização dessas etapas, foram identificadas diversas questões socioambientais que precisam entrar na pauta de discussão a fim de evitar grandes danos para a sociedade (JORDAO, 2011). Gallardo e Bond (2011) listam essas questões, que envolvem,

por exemplo: a poluição dos recursos hídricos, do solo e do ar; a diminuição da biodiversidade; a geração de resíduos; a redução da emissão de gases do efeito estufa; as mudanças no uso da terra; a segurança alimentar; as condições de trabalho inadequadas; a concentração de terra, entre outras.

A segurança alimentar vem sendo discutida desde a primeira crise do petróleo na década de 1970, porém, ainda não se chegou a um consenso sobre essa questão (GAUDER; GRAEFF-HÖNNINGER; CLAUPEIN, 2011). Há duas opções para a expansão das lavouras de cana-de-açúcar: o desmatamento de matas nativas ou a conversão de terras ocupadas com outros usos para plantações de cana-de-açúcar. Por exemplo, para substituir 5% da demanda mundial de gasolina com etanol em 2025, o Brasil precisaria triplicar sua área de plantações de cana-de-açúcar para 21 milhões de hectares, considerando a área de reserva legal prevista na legislação brasileira (CERQUEIRA LEITE et al., 2009). Se essa expansão ocorresse apenas em áreas de pastagens, ainda sobriam para o Brasil aproximadamente 70 milhões de hectares para essa atividade. Nesta análise Cerqueira Leite et al. (2009) não consideraram como adequadas áreas de preservação permanente e áreas ocupadas por outros tipos de culturas para evitar a competição por terras destinadas à produção de alimentos.

Deve-se considerar também a produtividade das terras brasileiras como um fator chave para a expansão da cana-de-açúcar. Por exemplo, considerando-se uma projeção até 2015, o Brasil precisará aumentar sua área em 50%, entretanto, se a expansão acontecer em terras de baixa produtividade desta cultura, será necessário sextuplicar a área de cana-de-açúcar (LAPOLA; PRIESS; BONDEAU, 2009). Sendo assim, nota-se a importância de um planejamento adequado para a expansão da mesma.

Gauder, Graeff-Honniner e Claupein (2011) também analisaram os impactos do setor sucroalcooleiro na produção de gêneros alimentícios no Brasil, concluindo que a disponibilidade de terra não é um fator limitante para o crescimento da produção de etanol, contrapondo Pimentel e Patzek (2007), que destacam a situação de insegurança alimentar criada pela utilização de biocombustíveis.

Em relação à vegetação, Coelho et al. (2007) apontam que a substituição de outras culturas por cana-de-açúcar acaba gerando pressão em áreas ocupadas por vegetação natural. Estas culturas tem que se realocar espacialmente propiciando condições para que áreas sejam desmatadas a fim de suprir essa demanda. Glehn (2008) observa que a imposição deste tipo de monocultura vem sendo realizada sobre áreas consideradas prioritárias para a conservação da biodiversidade, além de causar impactos diretos na biodiversidade local.

Outro ponto discutido em relação à produção de etanol refere-se à suposta sustentabilidade do mesmo. Luo, Van Der Voet e Huppes (2009) fazem uma comparação entre os impactos causados pela gasolina e pelo etanol, concluindo que o etanol é a melhor opção quando se trata de atenuar impactos como a diminuição da camada de ozônio e a emissão de gases do efeito estufa. Porém, em relação a impactos como ecotoxicidade, acidificação e eutrofização, a gasolina continua sendo uma alternativa mais segura.

Goldemberg, Coelho e Guardabassi (2008) teceram uma análise sobre a sustentabilidade do etanol analisando diversas questões socioambientais, como impactos na biodiversidade, solo, água ar, competição por terras e criação de empregos. Os autores apontam que a utilização de biocombustíveis contribui para a sustentabilidade dos recursos naturais e para o desenvolvimento rural de países em desenvolvimento. Já Pimentel e Patzek (2007) analisaram a sustentabilidade do etanol no Brasil e nos Estados Unidos, concluindo que em ambos os países a produção deste biocombustível não é sustentável, estimulando indiretamente o aumento do preço dos combustíveis fósseis, pois, segundo os autores, os países desenvolvidos teriam que aumentar o consumo de combustíveis fósseis para produzir os biocombustíveis, afetando os países em desenvolvimento cujo poder de compra seria limitado.

A produção da cana-de-açúcar tem impacto direto nos recursos hídricos onde as lavouras estão localizadas, não só porque consomem muita água, como também porque há o risco de contaminação hídrica. Os impactos relacionados ao uso da água para a produção de cana-de-açúcar ocorrem em dois momentos: na captação direta de mananciais e rios e no consumo desta água para produção de etanol e açúcar (CARMO, 2008; SMEETS et al, 2006). Por exemplo, para produzir 1 litro de etanol por tonelada de cana-de-açúcar, são necessários 2m³ de água por tonelada de cana-de-açúcar (CARMO, 2008).

Quanto à poluição dos recursos hídricos, Smeets et al. (2006) apontam que, em relação ao setor sucroalcooleiro, os dois tipos de poluentes mais importantes são os agroquímicos e orgânicos na produção de cana-de-açúcar e etanol, respectivamente. A contaminação de águas e rios pela vinhaça, por exemplo, não é incomum mesmo depois da adoção da prática da fertirrigação (MARTINELLI; FILOSO, 2008)

A degradação dos solos também é apontada como um impacto direto do setor. A compactação dos solos é resultado do maquinário intensivo utilizado nos canaviais para a plantação e a colheita (MARTINELLI; FILOSO, 2008). Esta facilita o processo de erosão, que já tende a ser alto uma vez que os solos permanecem expostos tanto no período de

preparação quanto na época da colheita, o que possibilita a ação da água e do vento no desenvolvimento de processos erosivos (MARTINELLI; FILOSO, 2008).

Também deve-se considerar os impactos que essa expansão terá em relação à população diretamente afetada pelos empreendimentos deste setor. Atualmente, pode-se colher a cana manualmente, o que requer a queimada prévia a fim de facilitar o trabalho dos cortadores, ou então colher de forma automatizada, porém, apenas em áreas com declividade inferior a 12%. Figueiredo e La Scala (2011) evidenciam que, caso a cana fosse colhida apenas de forma automatizada, as emissões de gases do efeito estufa diminuiriam de 3104 para 2793 CO₂ equiv e kg. ha⁻¹ y⁻¹.

Uriarte et al. (2009) fizeram uma análise da relação entre as queimadas e a ocorrência de problemas respiratórios em dois grupos (crianças e idosos) no estado de São Paulo e os resultados demonstraram que, para municípios com 50% de sua área coberta por cana-de-açúcar, a incidência de doenças respiratórias aumentou em 15% no grupo de idosos e 12% no grupo de crianças, resultando em aumento nos gastos públicos com o setor de saúde. Os autores enfatizam que esse tipo de informação deve ser considerado no planejamento do uso da terra.

Os empreendimentos sucroalcooleiros também se tornam um fator de atração de população para os municípios onde estão localizados devido à oferta de emprego, principalmente na época da colheita da lavoura. O município de Iacanga (SP), por exemplo, após a instalação da Usina Iacanga vivenciou um déficit habitacional e o preço do aluguel subiu acima dos padrões da cidade (IACANGA, 2010). Evidencia-se, então, o potencial do setor em causar rápidas alterações no uso do solo nos locais onde os empreendimentos são instalados.

As condições de trabalho dos cortadores de cana-de-açúcar durante a época da lavoura é uma das principais questões negativas atreladas ao setor. Em seu artigo sobre o assunto, Novaes (2007) expõe a degradante condição de trabalho e moradia desses trabalhadores, suscitando a seguinte questão: “[...] *reafirmar a conquista do ganho de produtividade do trabalho no corte manual da cana ou lutar para substituir essa forma de remuneração da produção pelo salário?*” (NOVAES, 2007, p. 174).

Entretanto, apesar de todos os impactos socioambientais negativos que a expansão da cana-de-açúcar acarreta, Martinelli et al. (2011) encontraram evidências de que, no estado de São Paulo, os municípios que possuem pelo menos uma usina tiveram um melhor desempenho em relação ao seu desenvolvimento socioeconômico quando comparados com municípios cujo uso da terra predominante são as pastagens. Porém, Camargo et al. (2008)

ênfatisam que a expansão de cana-de-açúcar, da forma como está acontecendo, fomenta a concentração da posse de terras, devido ao arrendamento e/ou a compra de terras de pequenos proprietários. Estes não conseguem retomar o uso da terra após o fim do arrendamento, devido à destruição das benfeitorias existentes e, no caso da venda, não conseguem voltar ao campo. Gallardo e Bond (2011) destacam que os impactos sociais da expansão da cana deveriam ser mais profundamente estudados pelo Poder Público a fim de incluir essa variável de maneira mais contundente na avaliação da viabilidade ambiental de empreendimentos desta tipologia.

3.3 Modelagem do Uso da terra

Um modelo é uma representação simplificada da realidade, de um sistema ou de um de seus componentes (NOVAES, 1981). Considerando que os fenômenos da realidade são por si só complexos, os modelos são elaborados apenas com aquelas variáveis que afetam diretamente o sistema, a fim de entender o comportamento de determinado fenômeno e, então, poder simular situações diversas (EPA, 2000).

O uso de modelos no âmbito do planejamento está relacionado, principalmente, com modelos que trabalham com transportes, alterações do uso do solo, economia e avaliação de impactos ambientais (EPA, 2000). A modelagem é uma ferramenta muito utilizada no gerenciamento e na pesquisa de questões ambientais em função da habilidade matemática de prever como diferentes cenários afetarão o meio natural de determinado local (SNOWLING; KRAMER, 2001).

Os modelos de alteração do uso do solo são úteis aos planejadores, pois possibilitam compreender a dinâmica das atividades humanas, verificar seus efeitos no presente e tentar prever seus impactos no futuro a fim de concentrar esforços nos pontos críticos, constituindo-se em uma ação preventiva (PONTIUS; CORNELL; HALL, 2001). A construção de políticas voltadas para a conservação do meio natural pode utilizar esta ferramenta visto que a mesma permite aos planejadores: ter uma visão global do ecossistema estudado, ultrapassando limites territoriais definidos pelo homem; identificar as variáveis-chaves que influenciam no processo de mudanças no uso do solo naquela localidade e criar mecanismos específicos para as

mesmas; além de facilitar a integração dos objetivos de planejamento no âmbito local e regional (MORAN-ORDONÉZ et al., 2011).

A dificuldade em acessar banco de dados espaciais e a falta de treinamento de técnicos dos órgãos governamentais, principalmente no âmbito local, são os principais obstáculos para a utilização deste tipo de modelo nos países em desenvolvimento (LAMBIN, GEIST e LEPERS, 2003; PONTIUS, CORNELL e HALL, 2001). Especificamente no caso brasileiro, pode-se citar o projeto “Cenários 2020” do estado de São Paulo, que considerou cenários qualitativos e estudos relacionados com o aquecimento global e suas consequências no país (SÃO PAULO, 2009a).

Diversos modelos já foram elaborados com o objetivo de prever as alterações do uso do solo, podendo-se citar o relatório publicado pela EPA (2000), o qual caracteriza 22 modelos de uso e ocupação do solo. Este relatório considera que a modelagem é um instrumento essencial para o desenvolvimento do planejamento ambiental e deve ser difundido na esfera pública, não ficando restrito ao meio acadêmico.

A escolha do modelo deve basear-se, principalmente, no propósito da modelagem, nas características do fenômeno simulado e nos dados espaciais disponíveis para realizar as diferentes fases que envolvem a utilização de modelos de uso do solo (PONTIUS; MALANSON, 2005). Por exemplo, considerando-se uma área de estudo onde várias classes estão em um processo dinâmico (ao invés de uma classe dominante na paisagem) e o planejador/cientista deseja modelar todas as classes, a escolha do modelo CA-MARKOV seria mais adequada quando comparado ao modelo GEOMOD, que só consegue simular as transições entre duas classes de uso da terra (PONTIUS; MALANSON, 2005). A Tabela 2 sintetiza as características de alguns modelos de uso do solo.

Tipicamente, a utilização de modelos de uso do solo requer a realização de três etapas: calibração, validação e projeção. Na etapa de calibração, são escolhidas as variáveis e a técnica de combinação das mesmas a fim de gerar as probabilidades de transição que alimentarão o modelo. A validação consiste na comparação entre um mapa simulado e um mapa real a fim de avaliar o desempenho do modelo em simular o fenômeno estudado, e, finalmente faz-se a projeção para o período estipulado.

Tabela 2 – Modelos de uso e ocupação do solo: características gerais

<i>Nome</i>	<i>Quantidade de mapas de uso do solo¹</i>	<i>Probabilidades de transição²</i>	<i>Quantidade de categorias de uso do solo³</i>	<i>Geração da área a ser projetada⁴</i>	<i>FONTE</i>
GEOMOD	Dois	Externa ou Regressão Logística	Duas	Externa	PONTIUS, CORNELL e HALL (2001)
<i>Land Change Modeler</i>	Três	Regressão Logística ou Redes Neurais	Mínimo duas	Cadeias de Markov ou Externa	EASTMAN (2009b)
MARKOV e CA-MARKOV	Três	Externa ou Autômatos celulares	Mínimo Duas	Cadeias de Markov	EASTMAN (2009b)
CLUE-S	Dois	Regressão Logística	Mínimo duas	Externa	VERBURG et al (2002)
SLEUTH	Quatro	Regressão logística ou Autômatos celulares	Duas	Parâmetros gerados na fase de calibração do modelo	SILVA e CLARK (2002)

¹ Quantidade de mapas de uso do solo necessários para a utilização do modelo, incluindo a etapa de validação;

² Técnica utilizada pelo modelo para a geração das probabilidades de transição: Externa significa que o modelo oferece a opção das probabilidades de transição serem geradas de forma externa ao modelo;

³ Quantidade de categorias de uso da terra que o modelo é capaz de projetar:

⁴ Técnica utilizada para a geração da área projetada: Externa significa que o modelo oferece a opção deste cálculo ser realizado de forma externa ao modelo;

Overmars, Verburg e Veldkamp (2007) compararam as abordagens dedutiva (ação em contexto) e indutiva (regressão logística) na construção de mapas de probabilidades de transição a fim de alimentar o modelo CLUE-S para gerar projeções para o noroeste da Ilha Luzon, nas Filipinas. Os autores apontam que a abordagem indutiva é facilmente reproduzida, consegue identificar locais com maior mudança de uso da terra e pode ser aplicada a grandes áreas rapidamente, se dados espaciais básicos estiverem disponíveis. Já a abordagem dedutiva é adequada para pequenas áreas, apresenta melhor desempenho para lidar com discontinuidades nos processos de uso da terra, sendo capaz de avaliar cenários diversos, incluindo novas categorias de uso da terra, apesar de precisar de trabalho de campo para ser implementada. Concluíram que ambas apresentam vantagens e desvantagens na construção deste tipo de mapa e, portanto, a escolha deverá ser baseada no objetivo do estudo.

Lima et al. (2013) fizeram uma análise comparativa para avaliar o desempenho dos modelos Dinamica EGO e *Land Change Modeler* (LCM) para simular o desmatamento na Amazônia. Os autores apontaram que a principal diferença entre os modelos está na forma de calcular as probabilidades de transição: no modelo LCM pode-se escolher entre técnicas como a regressão logística e as redes neurais, enquanto que no Dinamica EGO utiliza-se, geralmente, o operador bayesiano de pesos de evidência. Ambos os modelos apresentaram desempenho mediano na fase de validação, sendo o modelo LCM aquele com melhor performance nos índices *Kappa* calculados.

Trentin e Freitas (2010) utilizaram o modelo Dinamica EGO na simulação da expansão urbana no município de Americana (SP) para cenários de curto e médio prazo. As autoras indicam que os prognósticos gerados podem ser utilizados por planejadores para melhorar o ordenamento e crescimento urbano, com foco na distribuição da infraestrutura básica da cidade.

Paegelow, Olmedo e Toribio (2003) utilizaram as técnicas análise multicritério e cadeias de Markov a fim de fazer projeções para Alta Alpujarra (Espanha) e Garrotxe (França). A análise multicritério juntamente com as cadeias de Markov apresentaram resultados superiores quando comparadas as projeções realizadas somente com estas últimas e uma projeção estocástica. Conforme as autoras, a principal vantagem da avaliação multicritério é considerar o potencial da área para alocar determinado uso e não apenas a alocação pelo ritmo temporal dos usos do solo.

Com o objetivo de modelar as interações entre as mudanças do uso da terra e os processos geomorfológicos, Claessens et al. (2009) aplicaram os modelos CLUE-S e LAPSUS na região sul da Espanha. A metodologia foi delineada de forma que os resultados das projeções anuais dos modelos alimentassem um ao outro a fim de gerar *feedbacks* relativos a processos de sedimentação/erosão e as mudanças de uso da terra. Os autores concluem que focar na interação entre diferentes processos que ocorrem em um local ao invés de estudar apenas um processo, “eleva o entendimento e a capacidade de entender e simular as dinâmicas do uso da terra” (CLAESSENS et al, 2009, p. 169).

O modelo GEOMOD (PONTIUS; CORNELL; HALL, 2001), integrado ao SIG IDRISI, foi criado em 1994, na Universidade *Clark* localizada nos Estados Unidos, com o objetivo de simular processos de desmatamento e mensurar as alterações de emissões de dióxido de carbono. Atualmente, é considerado um modelo de simulação e previsão das alterações do uso do solo com aplicação em diversas escalas. Pode-se citar como casos de sucesso sua utilização em escala continental na África e América Latina, em escala nacional

na Índia e na Costa Rica e em escala local no Egito, Estados Unidos e em vários países da América Latina (PONTIUS; CHEN, 2006).

Suchant Paudel (2012) utilizou o modelo GEOMOD a fim de projetar o desmatamento na região *Twin Cities* em Minnessota (EUA). A metodologia incluiu o cálculo de índices de paisagem para quantificar as mudanças nos padrões espaciais e temporais dentro da área de estudo e a confecção de um mapa de probabilidades de transição a partir de múltiplas regras e do plano regional de desenvolvimento. O autor enfatiza o bom desempenho do modelo, sugerindo que planejadores utilizem esse tipo de modelo na confecção de cenários de desenvolvimento e avaliação de impacto ambiental.

Martins; Cabral; Sousa e Silva (2012) também aplicaram o modelo GEOMOD na projeção do crescimento urbano de Vila Franca do Campo em Portugal. As probabilidades de transição foram geradas a partir da análise multicritério, incluindo a aplicação de funções *fuzzy* a fim de padronizar as variáveis em uma mesma escala de pesos (0 a 255). Os autores sugerem que outros mapas de probabilidades de transição sejam utilizados na projeção da expansão urbana nesta área a fim de tentar melhorar o baixo desempenho apresentado pelo GEOMOD. Entretanto, apontam que o modelo forneceu informações relevantes sobre o processo de urbanização na área de estudo, possibilitando entender a influência e a eficiência de planos de uso do solo na dinâmica urbana e na exposição ao risco sísmico.

Também se pode citar a Rede Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental da Amazônia (GEOMA), que tem como um de seus objetivos desenvolver modelos capazes de “auxiliar a tomada de decisão nos níveis local, regional e nacional, ao fornecer ferramentas de simulação e modelagem” (BRASIL-MCT, 2002). Em relação a esse projeto, o trabalho de Moreira et al. (2009) apresentou a aplicação do *software* TerraME para fazer projeções do território da Amazônia dentro de um modelo multi-escala, a fim de responder a pergunta: em que grau políticas macro afetam a escala local?

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Tietê/Jacaré (UGRHI⁴13) é a área de estudo da presente pesquisa. Localiza-se na porção central do estado de São Paulo (Figura 4), ocupando uma área de aproximadamente 11.784 km², com uma população de 1.492.045 habitantes, e alta taxa de urbanização de 94% (CBH-TJ, 2012 referenciando Dados de SEADE). Em sua área de abrangência, estão localizados 37 municípios, sendo 34 com sede nesta UGRHI. Tal como em todo o estado de São Paulo, a cultura cafeeira e a expansão ferroviária no final do século XIX impulsionaram a ocupação efetiva da região, ou seja, conforme a produção do café crescia, a população aumentava e a vegetação nativa ia sendo desmatada (IPT-CBH-TJ, 2000). Porém, com a crise econômica de 1929, as plantações de café diminuíram cedendo lugar às lavouras de cana-de-açúcar (IPT-CBH-TJ, 2000).

As principais atividades econômicas desta UGRHI estão voltadas para o agronegócio caracterizado pela presença de pastagens, plantações de laranja e cana-de-açúcar, além de atividades de mineração, curtumes e fundições (IPT-CBH-TJ, 2000).

Com relação às características físico naturais, esta bacia localiza-se na Província Geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista e das Cuestas Basálticas (IPT-CBH-TJ, 2000). As unidades geológicas que constituem esta área são os sedimentos clásticos (majoritariamente arenosos e as rochas ígneas basálticas), rochas sedimentares do Grupo Bauru, sedimentos representantes da Formação Itaqueri e depósitos aluvionares (IPT-CBH-TJ, 2000).

Conforme IPT-CBH-TJ (2000), a pedologia da área de estudo é composta por seis grupos de solos, sendo eles: Planossolos, Litólicos e Cambissolos, Areias Quartzosas, Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto e não abrupto textura média, Latossolo Vermelho-Escuro textura média e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média e Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada. Em relação à cana-de-açúcar, os grupos Planossolos e Areias

⁴O estado de São Paulo é dividido em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), conforme o Plano Estadual de Recursos Hídricos – Lei nº 9034, de 27 de dezembro de 1994.

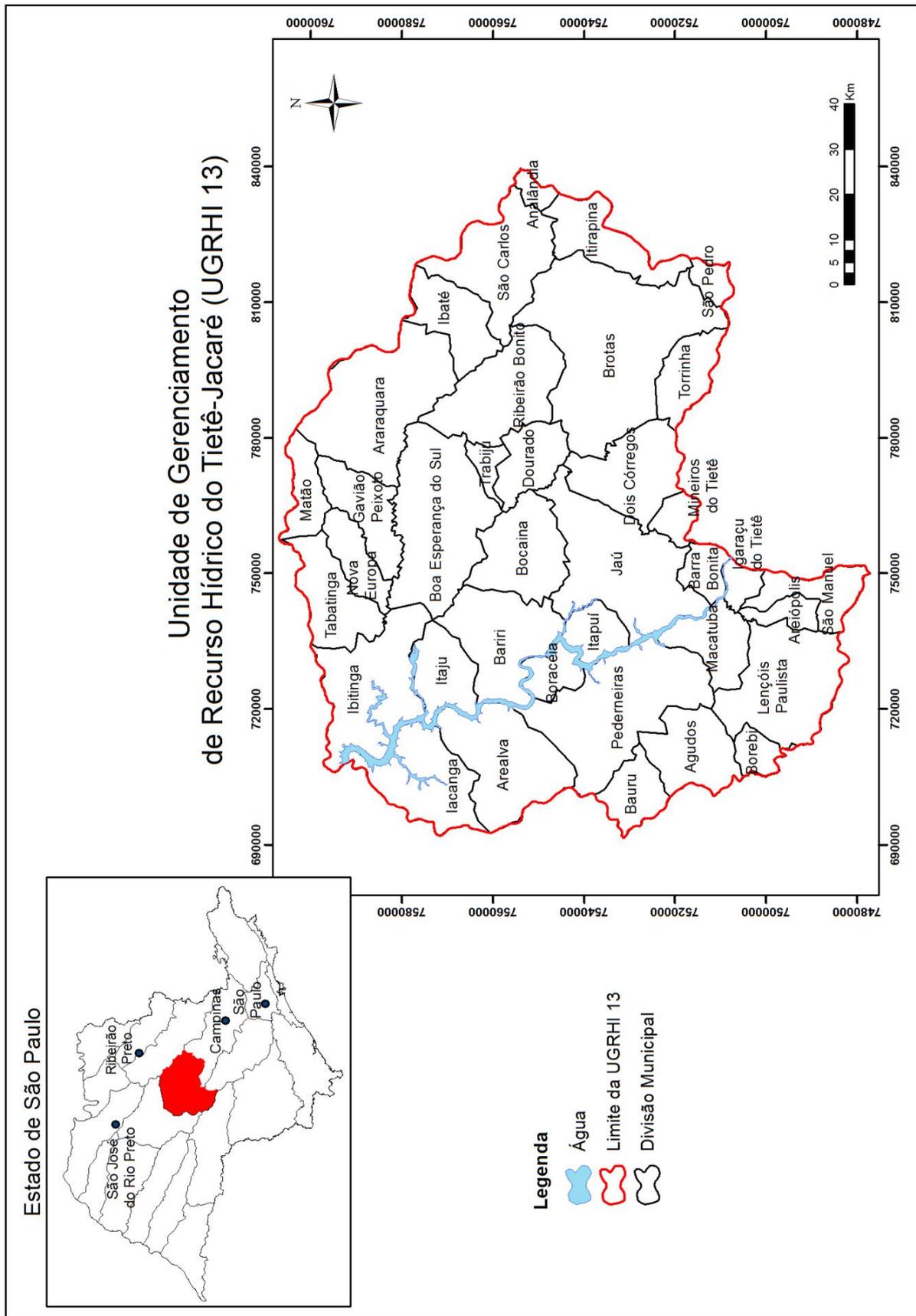


Figura 4 – Localização da área de estudo

Quartzosas são àqueles que apresentam menor potencial para a expansão desta monocultura (PRADO, 2005).

A cobertura natural vegetal da UGRHI 13 consiste principalmente na presença de Cerrados e matas ciliares (IPT-CBH-TJ,2000 e CPTI-CBH-TJ, 2008) e localizam-se majoritariamente em áreas de pouco aproveitamento agrícola (CPTI-CBH-TJ, 2008).

Já o clima é quente e úmido, caracterizando-se pelo inverno seco. Os índices pluviométricos registrados variam de 1200 a 1600 mm/ano, destacando-se a região de São Carlos que apresenta os maiores índices, devido à influência do relevo de Cuestas (CBH-TJ, 2009).

O território da UGRHI 13 apresenta alta suscetibilidade à erosão, sendo que 34,2% da área da bacia foi classificada como muito alta e alta, 43,2% como média suscetibilidade e 20% como baixa e muito baixo potencial à erosão (IPT-CBH-TJ, 2000). Esse fato aliado a pouca presença de vegetação nativa evidencia a necessidade de um planejamento ambiental adequado, ação esta que refletirá diretamente na preservação e conservação dos recursos naturais e na qualidade de vida da população.

4.2 Materiais

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados os materiais discriminados na Tabela 3:

Tabela 03 – Materiais utilizados durante o desenvolvimento dessa pesquisa

DADO	FORMATO	ESCALA	FONTE
Localização dos empreendimentos sucroalcooleiros do estado de São Paulo	Vetor - Ponto	----	Secretaria Estadual de Energia do Estado de São Paulo (2008).
Mapeamento da cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período de 2003 até 2011	Vetor - Polígono	1:50.000 (aproximada)	PROJETO CANASAT/INPE (2012). – Rudorff et al, (2010).
Unidades de Conservação Estaduais	Vetor - Polígono	----	Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (MADEIRA,2008).
Hidrografia, Pedologia, Vias principais e estradas e o Limite da UGRHI 13	Vetor – Linha e Polígono	1:250.000	Comitê de Bacia Hidrográfica (IPT-CBH-TJ, 2000)

Tabela 03 – Materiais utilizados durante o desenvolvimento dessa pesquisa

DADO	FORMATO	ESCALA	FONTE
Declividade	Matricial	Resolução: 30 metros	PROJETO TOPODATA (INPE, 2012)
Áreas urbanas, rodovias, reflorestamento e vegetação natural do estado de São Paulo	Vetor – Linha e Polígono	1:50.000	BIOTA/FAPESP
Condições Edafoclimáticas do estado de São Paulo	Vetor - Polígono	----	Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2009).
Divisão Municipal do estado de São Paulo	Vetor - Polígono	1:250.000	IBGE

---: Não há informação disponível a respeito da escala de mapeamento.

A projeção de trabalho escolhida foi a UTM Fuso 22 Sul, Datum WGS 1984, adotando-se a resolução de 50 x 50 metros.

Foram utilizados os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) IDRISI Taiga e ArcGis versão 10.

4.3 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos adotados nesta pesquisa tiveram como objetivo principal realizar a modelagem da expansão da cana-de-açúcar na UGRHI 13 para posteriormente discutir seus resultados junto a instrumentos de política ambiental. Para isso, empregou-se o modelo GEOMOD disponível no SIG IDRISI. A escolha deste modelo baseou-se nos resultados apresentados pelo mesmo em termos de abrangência de diferentes fenômenos, como por exemplo, expansão urbana e desmatamento, na experiência do laboratório onde essa pesquisa foi desenvolvida na utilização deste modelo (LABSIG/NEPA/PPGSEA) e na necessidade de poucos dados de entrada.

Comparando, por exemplo, o GEOMOD com os modelos *Land Change Modeler* e *CA_MARKOV*, estes últimos necessitam de no mínimo três mapas de uso do solo para simularem um determinado fenômeno enquanto que o GEOMOD exige apenas dois mapas representando o estado inicial e final do fenômeno estudado (Tabela 2). Este ponto é particularmente importante uma vez que a coleta de dados espaciais é uma etapa difícil, pois, estes muitas vezes não existem ou não estão disponíveis. A elaboração deste tipo de dado

também demanda muitos recursos, em especial se considerarmos a extensão da área de estudo desta pesquisa. Sendo assim, a necessidade de menos dados de entrada caracteriza-se como um ponto positivo que contribuiu para a escolha do GEOMOD.

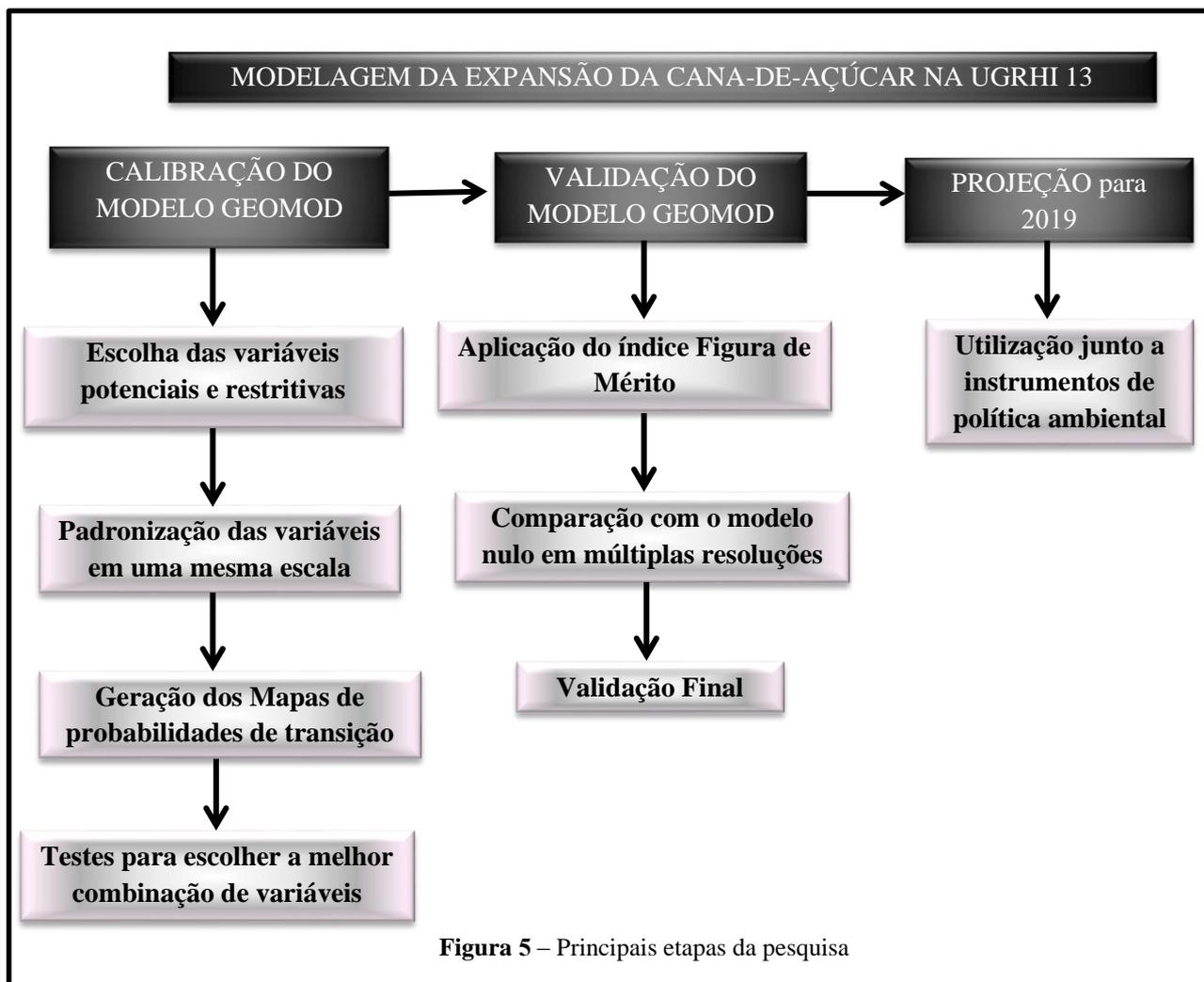
O modelo GEOMOD consegue simular a transição entre apenas dois estados de uso da terra, como, por exemplo, a transição entre áreas não urbanas para áreas urbanas. No caso da presente pesquisa, foi efetuada a modelagem para simular a transição entre área sem plantação de cana-de-açúcar para área com plantação de cana-de-açúcar.

Conforme Eastman (2009b), o modelo GEOMOD requer os seguintes dados de entrada e especificações para realizar a simulação:

- Uma imagem binária do instante t1, indicando a localização das classes 1 e 2;
- Determinação do instante inicial, final e do intervalo de tempo da simulação;
- Quantidade final de cada classe no instante t2;
- Um mapa contendo as probabilidades de transição da classe 1 para a classe 2;
- Deve-se determinar se a simulação utilizará o princípio do vizinho mais próximo, alocando preferencialmente as novas células do instante t2 na borda entre as classes 1 e 2;
- Opcionalmente, pode-se utilizar uma imagem para estratificar a área de estudo a fim de informar a quantidade de células alteradas em cada região (estrato);
- Opcionalmente, o usuário pode utilizar uma imagem para delimitar as áreas que estão dentro e fora da área de estudo;
- Também se pode criar uma imagem caracterizando tanto o impacto ambiental de cada instante da simulação quanto o impacto cumulativo do intervalo de tempo total.

O GEOMOD segue as fases típicas de um modelo de uso do solo, ou seja, calibração, validação e projeção. Na primeira, o modelo oferece a opção de produzir o mapa de probabilidades de transição dentro do próprio modelo ou inserir um mapa produzido externamente, sendo esta última opção adotada no presente trabalho.

A Figura 5 apresenta as etapas principais desta pesquisa:



4.3.1 Mapeamento do Uso da terra na UGRHI 13

O objetivo deste mapeamento foi gerar os dados de uso do solo necessários para a etapa de calibração do modelo GEOMOD.

Considerando que essa pesquisa utilizou como base projeções que se embasam na demanda por etanol como fator que impulsionará o aumento das plantações de cana-de-açúcar, optou-se por iniciar a modelagem a partir dos dados levantados para o intervalo entre os anos de 2003 e 2011, justificado pela intensificação na ocupação do território do estado de São Paulo pela cana, identificada nos dados coletados e explicada pela maior presença de veículos *flex fuel* no mercado brasileiro (Item 3.1 – O Setor Sucroalcooleiro).

Para a geração do mapa do ano de 2003, foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 7 órbitas-ponto 220_75, 220_76, 221_75, 221_76 datadas de fevereiro e março de 2003 (sensor ETM+, resolução espacial de 30 metros, com exceção da banda 8 que possui resolução espacial de 15 metros). As imagens foram processadas dentro do ambiente do SIG IDRISI TAIGA e do SIG ArcGis versão 10 a fim de gerar uma composição colorida (RGB 543) fusionada (banda 8)⁵, com resolução espacial de 15 metros (Figura 6).

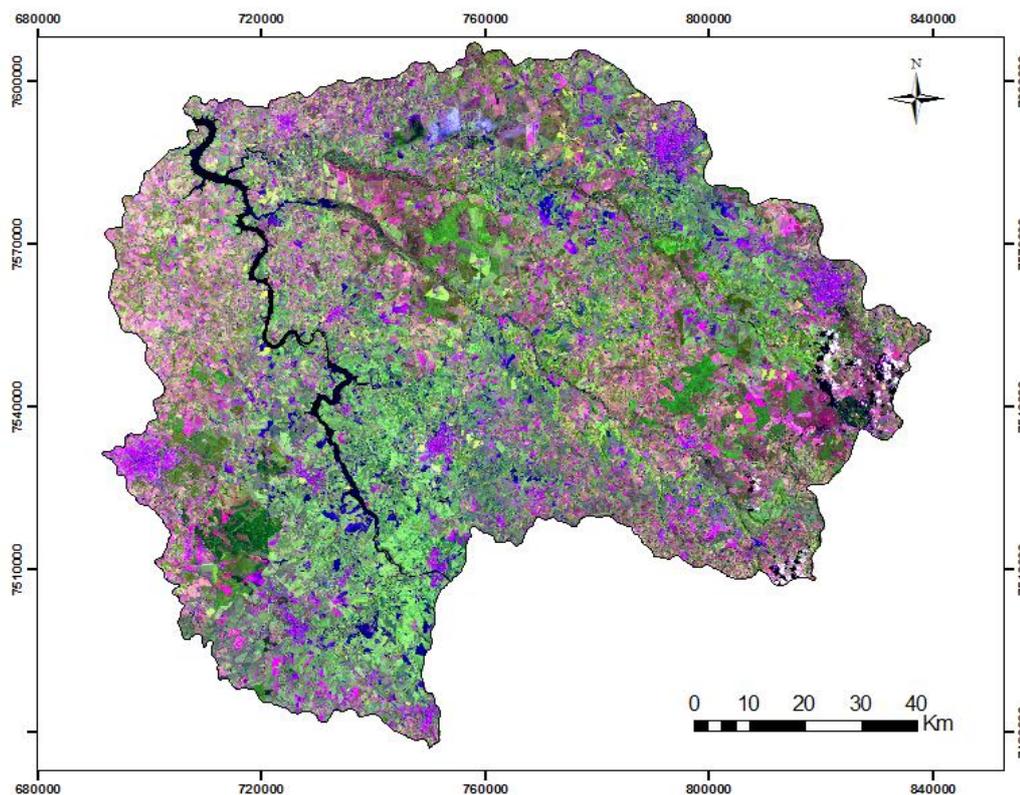


Figura 6 – Composição Colorida Landsat 7 RGB 543 da área de estudo em 2003

Para o mapeamento do ano de 2011, foi elaborada uma composição colorida (RGB 543) de imagens do satélite *Indian Remote Sensing Satellite (IRS)* órbitas-ponto 330_93, 330_94 datadas de agosto de 2010 e 329_93, 329_94 de janeiro de 2011 (resolução espacial 24 metros).

O mapeamento foi realizado por meio da interpretação manual das imagens em tela de computador. As classes escolhidas foram Área Urbana, Plantações de Laranja, Água, Reflorestamento e Mata. A interpretação das imagens pautou-se na utilização de dados já prontos para fazer o mapeamento, sendo a referência principal os *shapes* do Projeto Biota FAPESP relativos às classes Vegetação, Reflorestamento e Área Urbana, além de considerar a

⁵ A fusão das imagens Landsat foi realizada no SIG ArcGis, utilizando a ferramenta “*Create Pan-sharpened Raster Dataset*”.

forma, o tamanho, a tonalidade e o padrão espacial da vizinhança. Em relação à classe plantações de laranja, foram utilizados os dados de área fornecidos pelo IBGE a fim de auxiliar no mapeamento. Quando possível, foram consultadas as imagens do *Google Earth* para auxiliar na classificação do uso da terra.

4.3.2 Calibração do Modelo GEOMOD

Esta etapa compreende a escolha das variáveis potenciais e restritivas da transição de área não ocupada por cana-de-açúcar para área ocupada por cana-de-açúcar e a forma de combinação dessas variáveis com o objetivo de gerar um mapa de probabilidades de transição. As variáveis potenciais representam fatores que potencializam o crescimento do fenômeno enquanto que as restritivas caracterizam-se por restringir a expansão do fenômeno estudado.

Conforme Pinto (2008), a geração do mapa de probabilidades de transição pode ser feita através de abordagens dedutivas e indutivas, tais como avaliação multicritério (KAMUSOKO et al., 2009; MARTINS; CABRAL; SOUSA E SILVA, 2012) e regressão logística (MONTAÑO, 2005), respectivamente. Nesta pesquisa, optou-se por utilizar a avaliação multicritério para a geração deste mapa.

A principal função da avaliação multicritério é integrar diferentes critérios, possibilitando a avaliação de cenários diversos, a fim de facilitar a tomada de decisão (EASTMAN, 2009a; MALCZEWSKI, 2006). Para a sua operacionalização, deve-se definir os objetivos de sua aplicação, as variáveis potenciais e restritivas, a forma de padronização dessas variáveis e, por fim, a combinação dos mapas representantes de cada variável em um mapa síntese.

No caso deste trabalho, o objetivo da aplicação da avaliação multicritério foi a geração do mapa de probabilidades de transição para o uso cana-de-açúcar, o qual será utilizado pelo modelo GEOMOD para gerar as projeções nas etapas de validação e projeção para 2019.

4.3.3 Escolha das variáveis e análise de seu comportamento no período de 2003 até 2011

A escolha das variáveis potenciais e restritivas foi realizada por meio de revisão bibliográfica sobre a expansão da cana-de-açúcar e análise de Estudos de Impactos

Ambientais (EIA) de empreendimentos do setor. Nos EIAs analisou-se o item “Justificativa”, no qual geralmente são apresentadas as justificativas para a realização do empreendimento do ponto de vista econômico, social, tecnológico e locacional. Buscou-se, assim, identificar quais são as principais justificativas apresentadas para a escolha do local do empreendimento proposto ou sua ampliação, assumindo-se que tais argumentações podem subsidiar a escolha das variáveis nesta pesquisa.

Após a seleção das variáveis, foram feitas análises espaciais a fim de extrair tendências de expansão da cana-de-açúcar em relação às variáveis potenciais no período de 2003 até 2011.

Estas análises foram realizadas utilizando o mapeamento do Projeto CANASAT, o qual diferencia a área anual de expansão da cana-de-açúcar das plantações já consolidadas. As funções topológicas presentes em SIG tais como cálculo de distância, interseção de dados geográficos e extração de área, foram utilizadas tendo como arquivos base os polígonos localizados no território da UGRHI 13 classificados pelo CANASAT como Expansão e àqueles representantes das variáveis potenciais escolhidas nesta pesquisa. A Figura 7 ilustra os procedimentos desenvolvidos dentro dos SIGs ArcGis e IDRISI TAIGA.

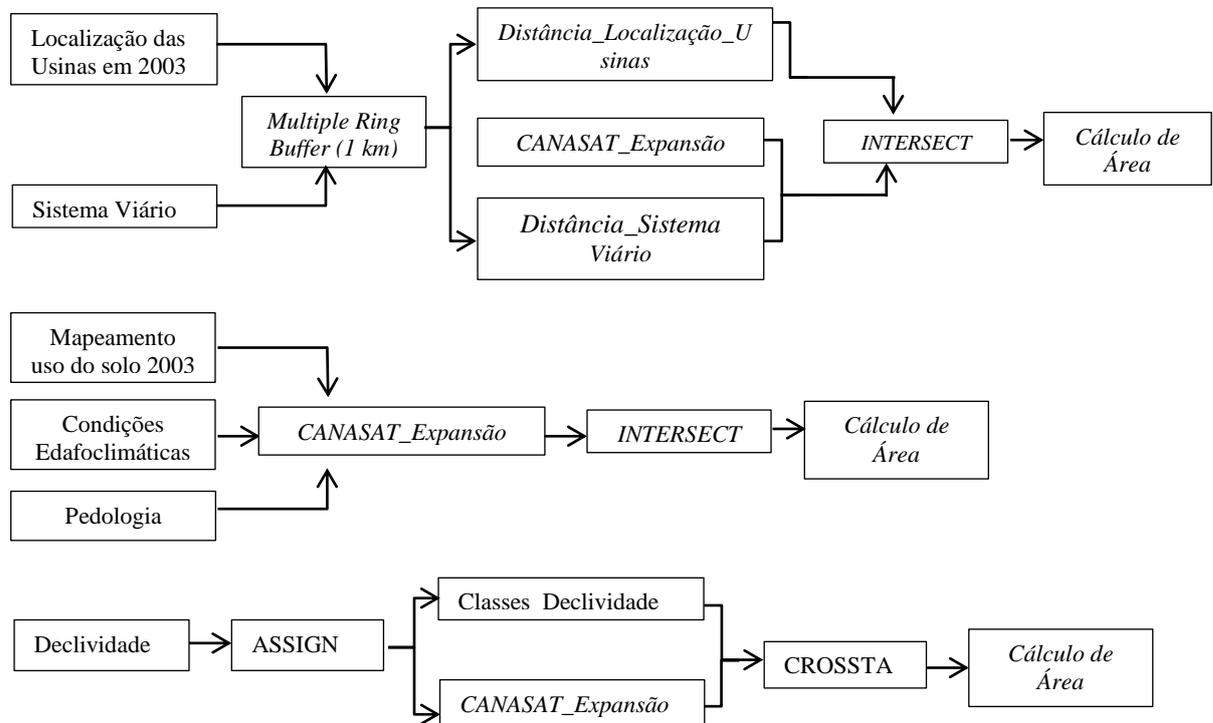


Figura 7 – Procedimentos realizados para verificar a expansão da cana-de-açúcar em relação às variáveis potenciais selecionadas no período de 2003 a 2011

Cabe ressaltar que em relação à variável Distância das Usinas, foram considerados não somente os empreendimentos que estavam dentro de seu território, mas também àqueles que se encontram a uma distância de 50 km do limite da UGRHI 13 (MITSUTANI, 2010).

Em seguida, a porcentagem das classes de cada variável foi calculada no *software* Excel e plotada na forma de gráficos.

4.3.4 Padronização das Variáveis Potenciais e Restritivas

As variáveis potenciais devem estar em uma mesma escala de pesos para que possam ser sobrepostas a fim de gerar um mapa síntese, no âmbito da avaliação multicritério. Este procedimento foi realizado através da utilização de funções *Fuzzy Membership* disponíveis no módulo *FUZZY* do SIG IDRISI TAIGA e na ponderação de pesos conforme a participação em termos de porcentagem de cada classe dentro de uma variável.

As variáveis Distância das Usinas, Distância do Sistema Viário e Declividade foram padronizadas através da aplicação das funções *Fuzzy Membership*. Este tipo de função expressa o quanto um determinado valor pertence ou não a um conjunto sendo que 0 significa não pertence e 255 significa Pertence Totalmente, utilizando como base a inserção de pontos de reflexão que determinam os valores que iniciam a aptidão máxima e mínima (EASTMAN, 2009b). A determinação destes pontos baseou-se nos histogramas gerados pelas análises espaciais realizadas anteriormente.

As variáveis Pedologia, Condições Edafoclimáticas e Uso do solo foram padronizadas utilizando a participação de cada classe dentro da variável estimada na etapa anterior. A aptidão máxima (255) foi atribuída à classe da variável com maior participação na expansão da cana-de-açúcar no período estudado e os pesos restantes foram derivados conforme a equação 1.

$$W = \frac{255 \times P}{PM}$$

Equação 1

Onde W é o Peso final da variável, P representa a participação da classe na expansão da cana-de-açúcar no período estudado, 255 é o peso máximo que pode ser atribuído para uma classe e PM é o valor da classe com maior participação no crescimento das lavouras no período estudado de uma determinada variável. Após o cálculo, os pesos foram atribuídos utilizando o módulo ASSIGN no SIG IDRISI TAIGA.

Os mapas representantes das variáveis restritivas foram transformados em mapas booleanos através do módulo ASSIGN, nos quais se atribuiu o valor 0 para as áreas restritivas e 1 para o restante do mapa.

4.3.5 Elaboração do Mapa de Probabilidades de Transição

A combinação das variáveis para a geração de um único mapa de probabilidades de transição foi realizada por meio da aplicação da técnica Combinação Linear Ponderada disponível no módulo *MCE* do SIG IDRISI TAIGA. Este método requer que sejam atribuídos pesos para cada variável conforme o seu grau de influência, ou seja, o valor atribuído é diretamente proporcional à influência do critério no mapa final.

Multiplica-se, então, o peso de cada variável pelo peso de suas classes e soma-se o resultado final, conforme ilustrado na Figura 8 (EASTMAN, 2009a). As variáveis restritivas são adicionadas posteriormente, multiplicando-se sua área por zero. Cabe ressaltar que a influência de uma variável no mapa final será proporcional ao seu peso atribuído.

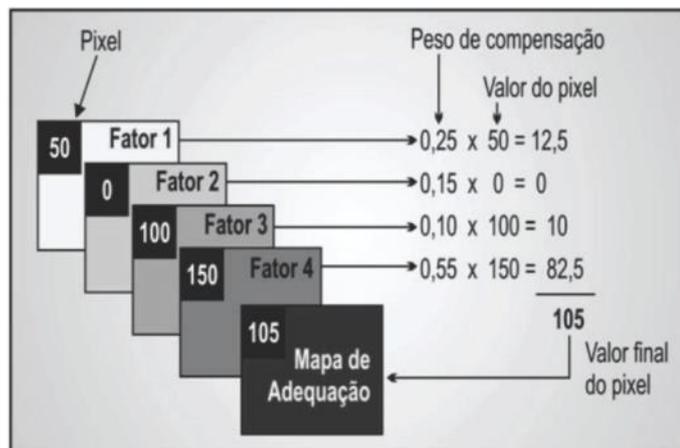


Figura 8 – Ilustração da técnica Combinação Linear Ponderada. Fonte: Sartori, Silva e Zimback (2012).

Para a geração dos pesos das variáveis, foi utilizada a técnica *Analytic Hierarchy Process (AHP)* proposta por Saaty (1977) e disponível no módulo *WEIGHT* do IDRISI TAIGA. Esta técnica realiza uma comparação par a par entre os diferentes critérios de acordo com uma escala de nove pontos. Após a comparação, calcula-se a razão de consistência (RC), cujo resultado demonstra a probabilidade da mesma ter sido gerada aleatoriamente. Conforme

Eastman (2009b), matrizes de comparação cuja RC for maior que 0,10 devem ser reavaliadas devido às inconsistências na comparação entre os critérios. Aplicou-se esta técnica para a geração de um mapa de probabilidades de transição com diferentes pesos.

Foram gerados 63 mapas de probabilidades de transição abrangendo todas as combinações possíveis das 6 variáveis potenciais escolhidas nesta pesquisa, atribuindo-se o mesmo peso para cada variável nos diferentes testes. Ou seja, todas as variáveis tiveram a mesma influência no resultado final. Desta forma foram gerados mapas para as diversas combinações de variáveis, como apontado na Tabela 4. Ressalta-se que as mesmas variáveis restritivas foram utilizadas nos 63 testes.

Tabela 4 – Número de testes realizados de acordo com a quantidade de variáveis

Número de Variáveis	Número de testes realizados
1	6
2	15
3	20
4	15
5	6
6	1

4.3.6 Realização dos Testes

Nesta fase, foram realizados testes a fim de identificar a combinação de variáveis que apresenta o melhor desempenho no índice escolhido nesta pesquisa.

Para isso, os mapas de probabilidades de transição, gerados na fase anterior da pesquisa, alimentaram o modelo para a geração das projeções para o ano de 2011. Para a realização desses testes foi utilizada a regra de estratificação em regiões, a qual correspondeu aos limites municipais presentes na UGRHI 13. Também foi informada a quantidade correta de células que se converteram para plantações de cana-de-açúcar em 2011. Desta forma, os erros do modelo referem-se apenas a erros de alocação.

Após a realização dos testes, identificou-se àquele com o melhor desempenho no índice estatístico escolhido e, então, foi feita a fase final de validação do modelo.

4.3.7 Validação do modelo

A avaliação do desempenho do modelo em simular o fenômeno estudado é realizada na etapa de validação. Para isso, compara-se um mapa do momento $t=2$ real com um mapa $t=2$ simulado por meio de técnicas como o índice *Kappa* (OÑATE-VALDIVIESO; BOSQUE SENDRA, 2010; SUCHANT PAUDEL, 2012; TEWOLDE; CABRAL, 2011; VAN VLIET; BREGT; HAGEN-ZANKER, 2011), métricas da paisagem para comparar padrões entre o mapa simulado e o real (GUAN et al., 2011), *Relative Operating Characteristic (ROC)* (PONTIUS; SCHNEIDER, 2001; ZENG, Y.N. et al, 2008), figura de mérito (ESTOQUE e MURAYAMA, 2012; PONTIUS et al., 2008), *allocation e quantity disagreement* (PONTIUS; MILLONES, 2011).

Observa-se na literatura que há diferentes visões desta etapa, podendo ser compreendida segundo o prisma de selecionar o melhor conjunto de variáveis (VAN VLIET; BREGT; HAGEN-ZANKER, 2011) ou de avaliar a capacidade do modelo em prever as mudanças do fenômeno estudado (PONTIUS; HUFFAKER; DENMAN, 2004).

Devido à quantidade de índices e de diferentes definições para esta etapa, conclui-se que ainda não há consenso na comunidade científica em relação à etapa de validação de modelos de uso do solo.

Essa questão pode ser exemplificada com relação ao índice *kappa*, largamente utilizado na literatura. Enquanto Pontius e Millones (2011) apontam a não eficiência do mesmo, destacando o fato de que este índice apresenta apenas a concordância entre os mapas comparados, além de considerar que é muito mais útil identificar os erros a fim de tentar corrigi-los do que ter um único índice de concordância entre os mapas avaliados, Van Vliet, Bregt e Hagen-Zanker (2011) propõem um novo variante para este índice (*Kappa Simulation*).

Nesta pesquisa, optou-se por utilizar a técnica proposta por Pontius et al. (2008), considerando-se que a mesma é eficiente e de fácil interpretação. Conforme Chen e Pontius (2010), nesta técnica, comparam-se três mapas: mapa real t_1 , mapa real t_2 e o mapa simulado t_2 , tendo como resultado 4 parâmetros:

- *Sucesso*: área de mudança na paisagem corretamente projetada como mudança;
- *Sucesso nulo*: área de persistência na paisagem corretamente projetada como persistência;
- *Perdas*: área de mudança na paisagem incorretamente projetada como persistência;
- *Alarmes Falsos*: área de persistência entre t_1 e t_2 projetada como mudança;

O índice Figura de mérito é um coeficiente no qual o numerador é o parâmetro *Sucessos* e o denominador é a soma dos parâmetros *Sucessos*, *Perdas* e *Alarmes Falsos* (MARTINS; CABRAL; SOUSA E SILVA, 2012), sendo 0% quando não há nenhuma intersecção entre a área de mudança observada e a área de mudança prevista e 100% quando há perfeita intersecção entre a área de mudança prevista e a observada (PONTIUS et al., 2008).

Pontius e Chen (2006) evidenciam a necessidade de comparar os resultados do modelo com seu respectivo modelo nulo. Este último é um modelo cujo melhor resultado é a persistência, ou seja, um modelo de não mudança. Para isso, avalia-se a quantidade de *Alarmes Falsos* e *Sucessos*. Em um modelo nulo não haveria erros classificados como *Alarmes Falsos*, já que neste caso o modelo projetaria corretamente as áreas de persistência, mas não àquelas relativas à mudança. Assim, um modelo será melhor que seu modelo nulo toda vez que a quantidade de *pixels* relativa a *Sucessos* for maior que o número de *pixels* classificados como *Alarmes Falsos* (PONTIUS et al., 2008).

Optou-se por realizar esta etapa concomitantemente com a calibração, tornando o processo interativo, a fim de analisar a performance do modelo ao longo da realização dos diferentes testes. Após a identificação do resultado que apresentou o maior desempenho em relação ao índice Figura de Mérito, o mesmo foi comparado com seu respectivo modelo nulo por meio do cálculo dos parâmetros que compõe o índice supracitado em múltiplas resoluções.

A análise em múltiplas resoluções foi realizada utilizando o módulo CONTRACT do IDRISI na opção *Majority*, a qual atribui ao novo *pixel* o valor que aparece com maior frequência entre uma determinada quantidade de *pixels* (EASTMAN, 2009b). Os mapas das plantações de cana-de-açúcar em 2003, 2011 e do teste escolhido foram submetidos a esse módulo e comparados em diferentes resoluções a fim de verificar o comportamento do índice Figura de Mérito.

4.3.8 Projeções da área de cana-de-açúcar na UGRHI 13 para 2019

Para realizar a projeção para cenários futuros, deve-se informar a quantidade de células no instante final (t_2). Essa informação pode ser obtida por meio de métodos como extrapolação linear simples e cadeias de Markov, por exemplo.

Nessa pesquisa, optou-se por utilizar as projeções realizadas por órgãos públicos e instituições, como por exemplo a UNICA, posto que a cana-de-açúcar é largamente estudada por estas instituições em decorrência de seu uso para a produção de etanol e açúcar. Sendo assim, entende-se que ao utilizar as projeções já feitas por esses órgãos tem-se um panorama mais confiável da quantificação das novas áreas de cana-de-açúcar na UGRHI 13 quando comparado a técnicas como extrapolação linear, por exemplo.

Na projeção da área plantada, considerou-se que o estado de São Paulo teria a mesma participação na área de expansão de cana-de-açúcar relativa ao território nacional que apresentou no período de 2003 até 2011 e que a UGRHI 13 também manteria a mesma participação na área de expansão de São Paulo neste período. Com base nestas premissas, calculou-se a área plantada na UGRHI 13 para o ano de 2019.

Em seguida, foi realizada a projeção das lavouras de cana-de-açúcar no território da UGRHI 13 em 2019, para a discussão dentro do contexto dos instrumentos de política ambiental selecionados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variáveis identificadas na literatura

A expansão do setor sucroalcooleiro é orientada por fatores mercadológicos/estratégicos e por critérios técnicos inerentes às atividades industrial e agrícola (WWF BRASIL, 2008). As áreas selecionadas para expansão devem atender as exigências edafoclimáticas da cana-de-açúcar e infraestruturais da indústria, englobando desta forma os requisitos de produtividade e logística que norteiam o setor sucroalcooleiro.

A conversão do uso do solo para o cultivo desta monocultura é, então, um ponto crítico envolvendo tanto custos relacionados à compra/arrendamento da terra quanto os impactos causados por esta expansão.

Em São Paulo, constatou-se que, na safra de 2008/2009 56,5% das novas áreas cultivadas com cana-de-açúcar se estabeleceram em pastagens, 40,2% em áreas agrícolas, 2,9% em locais onde havia culturas cítricas e 0,3% em áreas de reflorestamento e floresta nativa (RUDORFF et al., 2010). Resultado semelhante foi obtido por Nassar et al (2008), identificando que no estado de São Paulo, para o período de 2005 a 2008, 44,6% das novas áreas plantadas com esta monocultura localizaram-se em áreas agrícolas, 53% em pastagens, 2% em culturas cítricas e 0,31% em áreas classificadas como reflorestamento e/ou matas. Adami et al. (2012) avaliaram mudanças de uso do solo para a região centro-sul do Brasil no período de 2000 até 2009, concluindo que 94,7% da expansão da cana-de-açúcar ocorreu em áreas ocupadas com pastagem (69,7%) e agricultura (25%). Já Ramos-Neto e Feltran-Barbieri⁶ (2011) *apud* Feltran-Barbieri et al (2012) identificaram para o período de 2003 até 2009, que 45% da novas áreas ocupadas com cana-de-açúcar localizaram-se em áreas cultivadas com outras culturas, 29% em áreas ocupadas por pastagens, 5% aconteceu em áreas provenientes de desmatamentos e o restante em outras categorias.

Glehn (2008) enfatiza que, excetuando-se situações muito pontuais, a expansão da cana-de-açúcar não está ocorrendo em áreas de vegetação nativa no estado de São Paulo. Entretanto, a autora aponta que a vegetação do estado encontra-se significativamente

⁶RAMOS-NETO, M.B.; FELTRAN-BARBIERI, R. *Brazilian ethanol on pasturelands: a convenient untruth*. Não publicado, 2011.

fragmentada e sofre com o efeito de borda, o qual compromete a sobrevivência das populações de animais e plantas.

Os resultados apresentados acima constatam que a expansão da cana-de-açúcar tem ocorrido com maior frequência em áreas classificadas como pastagens ou agricultura, sendo que outras categorias de uso do solo como a classe reflorestamento, tem pouca expressividade neste processo.

A ocupação de áreas agrícolas por cana-de-açúcar apesar de representar um custo mais alto para o setor justifica-se pela produtividade da terra aliada à presença de infraestrutura. Desta forma, quando a receita gerada for superior ao custo de arrendamento da terra, explica-se a expansão desta cultura em áreas agrícolas (FELTRAN-BARBIERI et al, 2012). A presença da infraestrutura evita que o empreendedor tenha gastos para a sua construção, o que contribui para agilizar a instalação/ampliação do empreendimento e o próprio escoamento da produção.

Neste ponto, enfatiza-se o papel da infraestrutura viária no desenvolvimento do setor. Milanez et al. (2010) e Figueiredo (2006) apontam que a preferência por áreas próximas às vias principais deve-se à utilização do modal rodoviário tanto para o transporte da cana colhida até a usina quanto para a entrega do etanol nas bases primárias e secundárias. No transporte de açúcar, também predomina o modal rodoviário posto que a infraestrutura do modal ferroviário ainda não é suficiente para o atendimento da demanda do setor sucroalcooleiro, apesar de ser economicamente mais vantajoso (SETTEN, 2010).

Para ilustrar a importância da infraestrutura para o setor, pode-se citar o trabalho de Branco (2012), o qual destaca que, apesar do alto custo das terras, o estado de São Paulo continuará a ter expressiva participação na alocação dos novos canaviais. O autor aponta que o custo com o arrendamento da terra é compensado pela produtividade das terras paulistas e pela competitividade logística deste estado.

Em relação ao transporte da cana colhida até a usina, Mitsutani (2010) indica que a proximidade dos canaviais às unidades industriais justifica-se devido ao custo do transporte e a rápida degradação do conteúdo de açúcar na estrutura da planta após o corte. O valor pago pela cana *in-natura* depende do teor de açúcar (*brix*) avaliado no momento da sua chegada à usina, sendo assim, quanto mais rápido e curto for o percurso, maior será o preço pago pela cana, além de minimizar os custos com o transporte (MITSUTANI, 2010). Ribeiro, Ferreira e Ferreira (2008), por exemplo, identificaram que no estado de Goiás, 95% da expansão da cana-de-açúcar ocorreu em áreas situadas em até 30 km de uma Usina de Açúcar e Álcool. MAPA (2012) aponta que a distância média dos canaviais até o ponto de recepção na unidade

industrial é de 25,65 km no estado de São Paulo. Conforme WWF-BRASIL (2008), as plantações de cana-de-açúcar devem estar localizadas a uma distância máxima de 80 km das usinas, caso contrário o custo do transporte inviabiliza a atividade, enquanto que para Mitsutani (2010), essa distância é de 50 km.

A produtividade da cana-de-açúcar está diretamente relacionada ao tipo de solo, clima e a declividade do local escolhido para o canavial. Quanto à pedologia, esta monocultura se adapta bem a diversos tipos de solo, entretanto, conforme os locais se afastam das características ideais, a produtividade tende a cair (EMBRAPA, 2011a, GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Considerando as características físicas, os solos devem ser profundos e com boa capacidade de retenção de água e infiltração (EMBRAPA, 2011a). Conforme Prado (2005), a reduzida oferta de água pode causar perda de produtividade, independente da fertilidade do solo. Entretanto, quando disponibilizada em quantidade adequada, as plantações de cana-de-açúcar podem ocorrer até mesmo em solos com menor aptidão química para esta cultura. Solos arenosos, por exemplo, têm dificuldade em armazenar água, apresentando, assim, menor potencial para a expansão da cana (EMBRAPA, 2011a).

Conforme Amaral et al. (2001), o cultivo da cana-de-açúcar requer um tipo de clima no qual haja duas estações bem definidas, sendo uma quente e úmida e outra fria e seca. Na estação quente e úmida, a cana-de-açúcar brota e se desenvolve, enquanto que na estação fria e seca, acontece a maturação, fase na qual a planta acumula sacarose. A temperatura ideal nesta última fase deve estar entre 10⁰ e 20⁰C, que aliada à ausência de chuvas e irrigação e à deficiência de nitrogênio no solo, são requisitos para uma boa fase de maturação (EMBRAPA, 2011b).

Quanto à topografia, EMBRAPA (2011a) aponta que a declividade ideal está entre 2% a 5%, sendo que uma área completamente plana cria condições para o desenvolvimento de problemas com a drenagem. Para Amaral et al. (2001), a declividade máxima deve ser até 12%, a fim de se trabalhar com segurança em culturas semi-mecanizadas como a cana-de-açúcar.

Inclusive, foram criados mecanismos a fim de fomentar a tendência de ocupação de áreas mecanizáveis, ou seja, com declividade até 12%. Isso porque foi promulgada a Lei Estadual nº 11.241 em 19 de Setembro de 2002, a qual define prazos para a extinção da queima da cana para a colheita em São Paulo (2021 para áreas mecanizáveis e 2031 em áreas onde a declividade é maior que 12%, consideradas não mecanizáveis). Outro fato que

incentiva essa tendência é o Protocolo Agroambiental do setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo que antecipa as referidas datas para 2014 em áreas mecanizáveis e 2017 em áreas não mecanizáveis (SÃO PAULO, 2007).

Deve-se considerar, também, que a produção de novas variedades de cana-de-açúcar possibilita a expansão desta monocultura em locais que apresentem condições diversas das consideradas ideais, uma vez que são desenvolvidas para se adaptar a diferentes condições edafoclimáticas, de manejo, plantio e colheita (WWF BRASIL, 2008).

As áreas naturais protegidas são por definição “uma área definida geograficamente que é destinada, ou regulamentada, e administrada para alcançar objetivos específicos de conservação” (BRASIL-MMA, 2000, p. 9). Logo, seu uso e ocupação são restritos a fim de conservar determinado recurso natural. Exemplos deste tipo de área são as Unidades de Proteção Integral, instituídas pela Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000 (BRASIL, 2000). No território deste tipo de unidade de conservação, admite-se apenas o uso indireto dos recursos naturais, com foco em atividades de pesquisa e conservação (BRASIL, 2000).

As áreas de preservação permanente legalizadas pelo Código Florestal, idealmente, também são áreas cuja proteção à vegetação nativa também é integral. Entretanto, não faltam trabalhos que apontam irregularidades no uso do solo dentro de seu território (CAMPOS; MATIAS, 2012; DITT et al., 2008; NARDINI et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2008; SANTOS; HERNANDEZ, 2013). Merece destaque o trabalho de Luz; Aguiar e Rudorff (2013) que mapearam a expansão da cana-de-açúcar em áreas de preservação permanente no estado de São Paulo entre as safras de 2003/2005 a 2009/2010, concluindo que apenas 0,47% das novas áreas plantadas com cana-de-açúcar localizam-se em áreas de preservação permanente de cursos d'água.

A preocupação com a sustentabilidade da expansão das terras ocupadas com esta monocultura suscitou na elaboração do Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (Figura 9), conforme Manzatto et al. (2009). Elaborado pela EMBRAPA, este zoneamento abrange total ou parcialmente 21 estados brasileiros (devido às áreas de exclusão). Foram consideradas restrições: as terras com declividade superior a 12%, as áreas com cobertura vegetal nativa, os biomas Amazônia e Pantanal, as áreas de proteção ambiental, as terras indígenas, dunas, remanescentes florestais, mangues, escarpas e afloramentos rochosos, reflorestamento e nos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo, foram desconsideradas as áreas cultivadas com cana-de-açúcar no ano safra 2007/2008. Como fatores potenciais, foram utilizadas as Condições Edafoclimáticas e o Uso da terra.

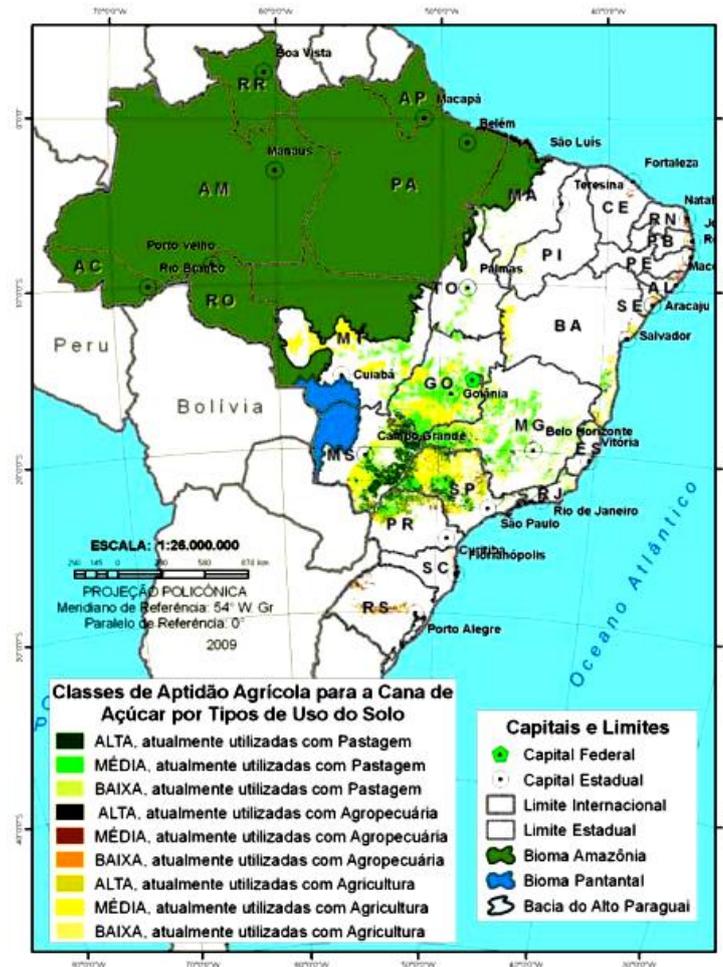


Figura 9 – Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar. Fonte: Manzatto et al. (2009).

O estado de São Paulo também elaborou um zoneamento para subsidiar o licenciamento ambiental de empreendimentos desta tipologia (SÃO PAULO, 2009b). Tal como o Zoneamento anterior, este também conciliou a aptidão agrícola e as restrições ambientais do território, tendo como resultado as quatro classes discriminadas abaixo (Figura 10):

- *Áreas Adequadas*: abrange as áreas com aptidão edafoclimática favorável para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e sem restrições ambientais específicas;
- *Áreas Adequadas com Limitação Ambiental*: correspondem ao território com aptidão edafoclimática favorável para cultura da cana-de-açúcar e incidência de Áreas de Proteção Ambiental (APA); áreas de média prioridade para incremento da conectividade, conforme indicação do Projeto BIOTA-FAPESP; e as bacias hidrográficas consideradas críticas;

- *Áreas Adequadas com Restrições Ambientais*: correspondem ao território com aptidão edafoclimática favorável para a cultura da cana-de-açúcar e com incidência de zonas de amortecimento das Unidades de Conservação de Proteção Integral - UCPI; as áreas de alta prioridade para incremento de conectividade indicadas pelo Projeto BIOTA-FAPESP; e áreas de alta vulnerabilidade de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, conforme publicação do IG-CETESB-DAEE - 1997;
- *Áreas Inadequadas*: correspondem às Unidades de Conservação de Proteção Integral – UCPI Estaduais e Federais; aos fragmentos classificados como de extrema importância biológica para conservação, indicados pelo projeto BIOTA-FAPESP para a criação de Unidades de Conservação de Proteção Integral - UCPI; às Zonas de Vida Silvestre das Áreas de Proteção Ambiental - APAs; às áreas com restrições edafoclimáticas para cultura da cana-de-açúcar e às áreas com declividade superior a 20%.

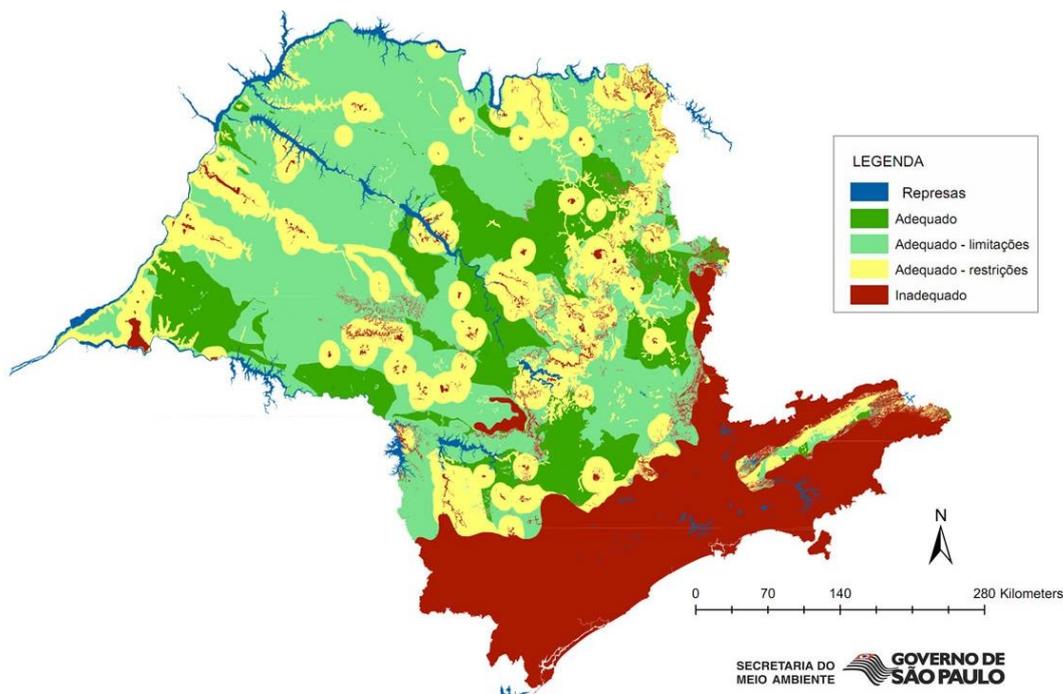


Figura 10- Zoneamento Agroambiental do setor sucroalcooleiro para o estado de São Paulo. Fonte: SÃO PAULO (2009b).

Os critérios e restrições utilizadas por estes zoneamentos são importantes uma vez que os mesmos subsidiam a formulação de leis e resoluções. No caso do Zoneamento elaborado pela EMBRAPA, este subsidia o Decreto N° 6.961, de 17 de setembro de 2009, enquanto que o segundo é a base para o licenciamento ambiental de empreendimentos desta tipologia no estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2009).

5.2 Justificativas locais encontradas nos Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e escolha das variáveis potenciais e restritivas

Com o intuito de auxiliar na escolha das variáveis, foram levantadas as justificativas locais apresentadas por 11 EIAs do setor cujas características estão no Apêndice A. Pode-se observar que a maioria dos EIAs referem-se à ampliação de empreendimentos já existentes. Destaca-se a significativa taxa de expansão de alguns empreendimentos, como por exemplo, a Alcoeste Destilaria e Usina Furlan, os quais propõem um aumento de mais de 100% em sua área agrícola e a Usina Branco Peres na qual a produção de açúcar terá um crescimento de 189,56%. Quanto à produção de etanol, evidencia-se o aumento da produção nas Usinas Paraíso Bioenergia e Furlan, sendo 192,32% e 113,58%, respectivamente. Estas duas últimas usinas juntamente com a Branco Peres destacaram-se também na fabricação de cana-de-açúcar com mais de 100% de crescimento em sua produção.

As justificativas locais encontradas nos EIAs analisados estão sintetizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Descrição das Justificativas Locacionais encontradas nos Estudos de Impactos Ambientais (EIAs)

	DESCRIÇÃO DA JUSTIFICATIVA	QUANTIDADE	% em relação ao total de EIAs
JUSTIFICATIVAS	Condições edafoclimáticas e/ou topográficas adequadas	11	100,00
	Infraestrutura de transporte adequada (rodoviário, hidroviário e ferroviário para escoamento e ligação com centros produtores e consumidores)	10	90,91
	Cultura Industrial Sucroalcooleira/Tradicional na produção de cana	9	81,82
	Disponibilidade de terras para expansão	7	63,63%
	Adequação ao Zoneamento Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro para o estado de São Paulo	5	45,45
	Apoio das prefeituras/Incentivos governamentais	5	45,45
	Existência de Organizações de Produtores Rurais p/ fornecimento de matéria prima	4	36,36
	Força de trabalho especializada	4	36,36
	Proximidade com mercados consumidores	4	36,36
	Propriedade das terras ou de boa parte delas já é de um dos sócios do empreendimento	2	18,18
	Possível concorrência de outras usinas pelas terras disponíveis	2	18,18
	Expansão agrícola ocorrerá sobre áreas já alteradas por ações antrópicas, sem necessidade de retirada de matas nativas	2	18,18
	Disponibilidade de mão-de-obra	1	9,09

Tabela 5 – Descrição das Justificativas Locacionais encontradas nos Estudos de Impactos Ambientais (EIAs)

DESCRIÇÃO DA JUSTIFICATIVA	QUANTIDADE	% em relação ao total de EIAs
Proximidade a subestação de energia/linhas de transmissão	1	9,09
Boas condições legais e ambientais da propriedade do empreendimento e dos fornecedores	1	9,09
Construção de um polo de distribuição e exportação de álcool etílico na região	1	9,09
Proximidade com outra unidade do mesmo grupo	1	9,09
Processos produtivos e variedades desenvolvidas especialmente para a região	1	9,09
Região com maior potencial de crescimento e futuro da agroindústria sucroalcooleira paulista (Nordeste e Oeste Paulista).	1	9,09

As condições edafoclimáticas e/ou topográficas juntamente com a infraestrutura de transportes são as justificativas com maior destaque, aparecendo em 100% e 90,9% dos EIAs, respectivamente. Como apontado na literatura e já citado no item 5.1, estes são fatores fundamentais para a localização de usinas de cana-de-açúcar uma vez que a adequabilidade das terras (boa produtividade) juntamente com uma boa rede viária (facilitando a logística de transporte) minimiza custos e aumenta a receita do setor.

A tradição da região no setor sucroalcooleiro apareceu como justificativa em 81,8% dos estudos analisados. Interessante notar que o estado de São Paulo é o “carro chefe” do setor sucroalcooleiro no Brasil, sendo grande parte de seu território totalmente apto ao cultivo de cana-de-açúcar e já ocupado por ela. Portanto, essa justificativa pode ser considerada inócua.

O apoio das prefeituras e os incentivos governamentais estão presentes em 45,4% dos EIAs assim como a adequação ao Zoneamento Agroambiental do setor sucroalcooleiro. Por outro lado, boas condições legais e ambientais da propriedade do empreendimento e dos fornecedores apareceram em apenas 9,09% dos estudos analisados, embora, os EIAs não esclareçam quais seriam estas condições e o motivo de terem sido consideradas positivas.

A disponibilidade de terras para expansão está presente em 63,63% dos EIAs e justifica-se devido à necessidade de ocupar grandes áreas para a plantação dos canaviais. Interessante notar que em 18,18% dos estudos analisados apresentaram como uma de suas justificativas a competição com outras usinas pelas terras disponíveis ou o fato da terra já ser propriedade dos sócios do empreendimento, sugerindo uma disputa pelas terras paulistas para o crescimento desta cultura, que já ocupa 21,75% do território do estado (INPE, 2012).

Em 18,18% dos EIAs analisados encontrou-se como uma das razões de escolha do local a ocupação de áreas já antropizadas, evitando a remoção de matas nativas. Outras

justificativas citadas foram a disponibilidade de mão-de-obra (9,09%), proximidade a subestação de energia/linhas de transmissão (9,09%) e a construção de um polo de distribuição e exportação de álcool na região (9,09%), o que facilita e minimiza os custos com o transporte deste combustível.

Sendo assim, percebe-se que as condições edafoclimáticas e/ou topográficas e infraestruturais, representadas principalmente pela rede viária, são as principais características observadas para a alocação/ampliação destes empreendimentos. Também cabe destacar que o objetivo não foi analisar a qualidade deste item nos Estudos analisados, apenas identificar as justificativas apresentadas.

Baseado nas justificativas encontradas na literatura, nos EIAs avaliados e na disponibilidade de dados espaciais, as seguintes variáveis potenciais e restritivas foram escolhidas para o fenômeno da expansão da cana-de-açúcar na UGRHI 13 (Tabela 6):

Tabela 6 – Variáveis Potenciais e Restritivas para a UGRHI 13

	VARIÁVEL	JUSTIFICATIVA
VARIÁVEIS POTENCIAIS	Distância das Usinas de açúcar e álcool em 2003	A localização das usinas é um fator de atração, pois envolve não só o custo do transporte como também a produtividade da planta.
	Distância do Sistema viário em 2003	Considera-se um fator de atração, pois, as rodovias são utilizadas na escoagem da produção de açúcar e etanol e no transporte da cana pelos caminhões entre as lavouras e as usinas.
	Pedologia	Diretamente relacionada à produtividade das terras para a plantação desta monocultura já que diferentes tipos de solos apresentam graus distintos de aptidão ao cultivo da cana-de-açúcar.
	Condições Edafoclimáticas	As condições edafoclimáticas abrangem os tipos de solo e as condições climáticas dentro da UGRHI 13 e estão diretamente relacionadas à produtividade das terras.
	Declividade	Condiciona a expansão desta monocultura, pois, áreas declivosas (> 12%) não são aptas para o plantio da cana, além de serem consideradas como não mecanizáveis, entrando em conflito com a legislação e os acordos atuais relativos ao fim da queimada da cana para a colheita.
	Uso da terra	Relacionam-se à questão do preço da terra e a própria estabilidade do uso que pode restringir ou potencializar a expansão da cana-de-açúcar. No caso da UGRHI 13, identificou-se que os usos Laranja e Reflorestamento por estarem associados a atividades industriais são menos propensos à conversão para cana-de-açúcar.
VARIÁVEIS RESTRITIVAS	Áreas Urbanas e Rodovias	Considerada fator de restrição para a expansão da cana-de-açúcar, pois uma vez que o solo se converteu para área urbana, tem-se uma estabilização deste tipo de uso devido ao investimento para realizar essa conversão. A área ocupada pelas rodovias segue esta mesma lógica.
	Unidades de Proteção Integral	O uso da terra é controlado por lei nestas áreas, sendo permitidas apenas atividades de pesquisa e conservação e, por isso, são restrições à expansão da cana-de-açúcar.
	Vegetação Natural	Foi classificada como um fator de restrição para a expansão da cana-de-açúcar, pois, entende-se que a cana não abre novas áreas de desmatamento diretamente, mas sim, ocupa áreas já desmatadas por outros tipos de uso do solo.

Hidrografia e Represa	A presença de rios, lagos e represas representam restrições à expansão desta monocultura.
-----------------------	---

5.3 Análises Espaciais Realizadas

As análises espaciais utilizando as variáveis potenciais em SIG deram origem aos histogramas que representam as tendências da expansão da cana-de-açúcar em relação às variáveis potenciais selecionadas dentro do território da UGRHI 13 (Figura 11, 12, 14, 15, 16, 17 e 20).

No período estudado, observou-se uma significativa taxa de expansão da cana-de-açúcar no território da UGRHI 13, sendo que em 2003 essa monocultura já ocupava 356.388 hectares, o que corresponde a 30,24% da área de estudo. Em 2011, essa cultura passou a ocupar 468.329 hectares, representando 39,74% do território desta UGRHI. Em relação ao aspecto espacial desta expansão, nota-se um adensamento dos canaviais já existentes e o aparecimento de novas plantações de cana-de-açúcar, sendo os municípios de Ibitinga, Brotas e Bariri responsáveis por aproximadamente 30% dessa expansão (Figura 11).

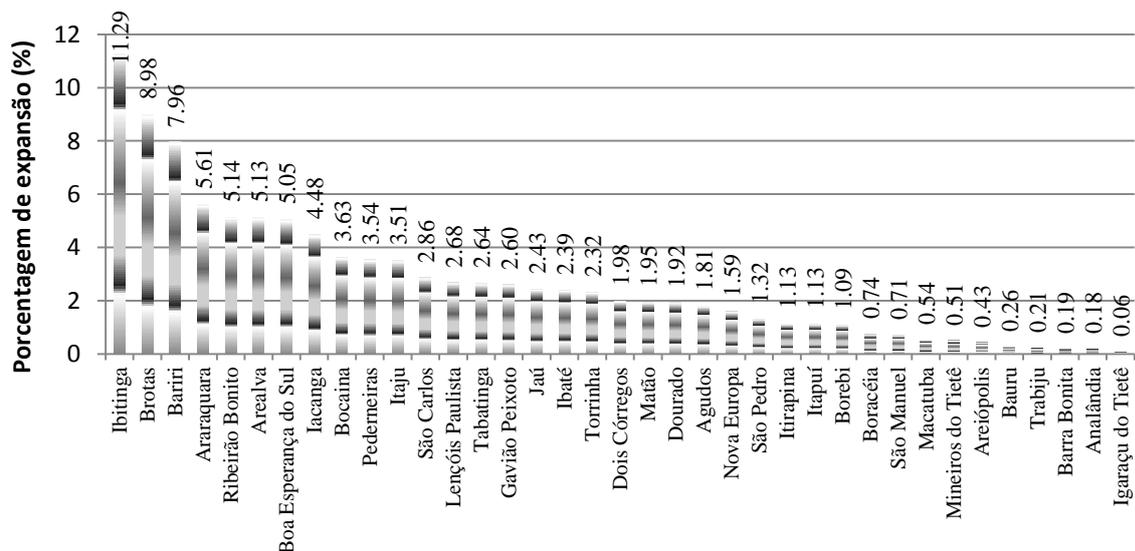


Figura 11 - Expansão da cana-de-açúcar em relação aos municípios da UGRHI 13 no período de 2003 até 2011

Constatou-se que 88,75% das novas plantações de cana no período estudado localizam-se a uma distância máxima de 25 km dos empreendimentos sucroalcooleiros da UGRHI 13 (Figura 12), o que está de acordo com as referências já citadas, corroborando que a proximidade com as Usinas minimiza custos com transportes além de beneficiar o aproveitamento do teor de açúcar.

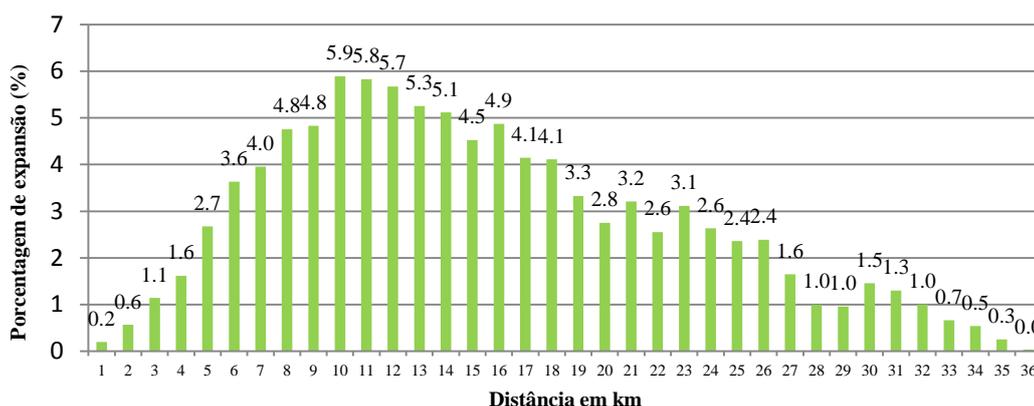


Figura 12 - Expansão da cana-de-açúcar em relação aos empreendimentos sucroalcooleiros na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011

A maioria dos empreendimentos deste ramo instalou-se na região entre as décadas de 1940 e 1970 e, no período de 2003 até 2011, foram emitidas 6 licenças para ampliação de usinas e 1 licença para a instalação de uma usina no município de Iacanga (RINALDI et al, 2012 e CETESB, 2013). Quanto ao aspecto espacial deste setor, os empreendimentos localizam-se, em sua maioria, na região de Araraquara e no centro da UGRHI em especial nos municípios de Jaú, Lençóis Paulista e Barra Bonita o que explica a significativa concentração de plantações de cana-de-açúcar nessas áreas, como pode-se observar na Figura 13.

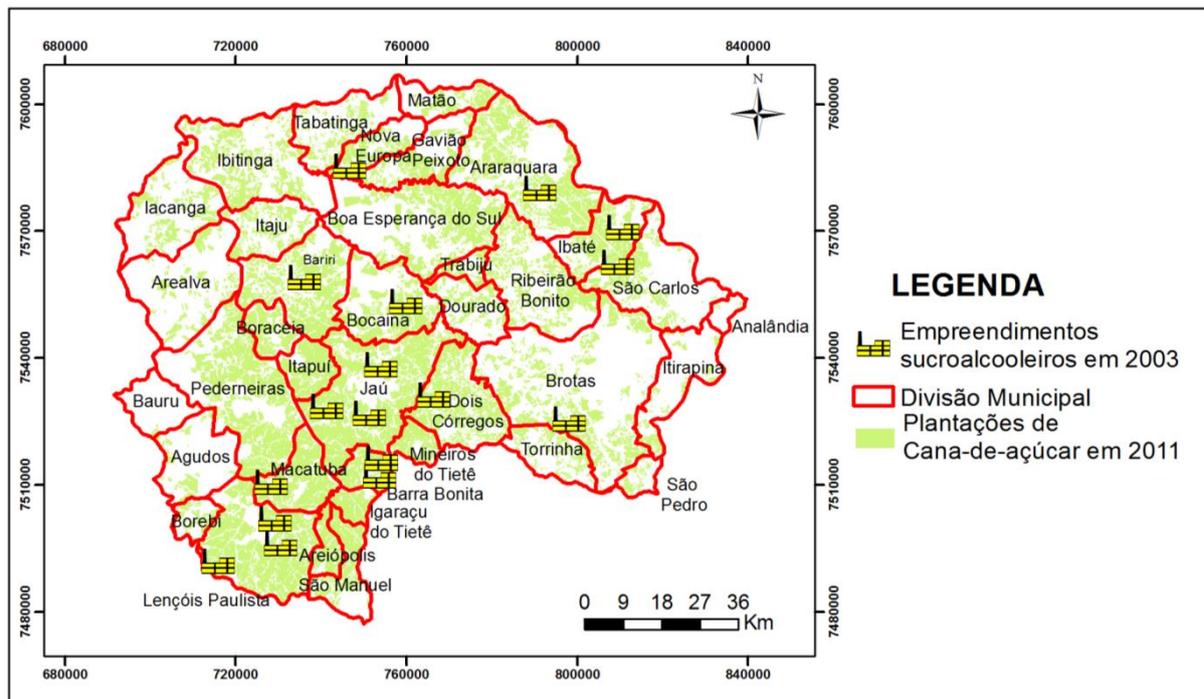


Figura 13 - Empreendimentos sucroalcooleiros lotados na UGRHI 13

Ademais, a UGRHI 13 está próximo à região de Ribeirão Preto onde estão localizados empreendimentos de grande representatividade e tradição no setor sucroalcooleiro, como por exemplo, a Usina São Martinho, maior processadora de cana-de-açúcar do mundo, com moagem de aproximadamente 8,5 milhões de toneladas por safra (SÃO MARTINHO, 2011). Também estão localizadas usinas pertencentes aos grupos Raízen, Cosan, Copersucar e *Louis Dreyfus Commodities*.

Quanto ao sistema viário, constatou-se que, entre 2003 e 2011, 83,86% da expansão desta monocultura ocorreu em áreas até 5 km distante de estradas e rodovias e a distância máxima encontrada foi 14 km (Figura 14). A extensa malha viária da UGRHI 13 é composta pela Rodovia Washington Luis (SP-310), Rodovia Marechal Rondon, SP-331, SP-225 (cruza toda a sua extensão no sentido oeste-leste) e a SP-255 (cuja direção é de nordeste ao sul), além de outras rodovias que interligam os municípios (IPT-CBH-TJ, 2000).

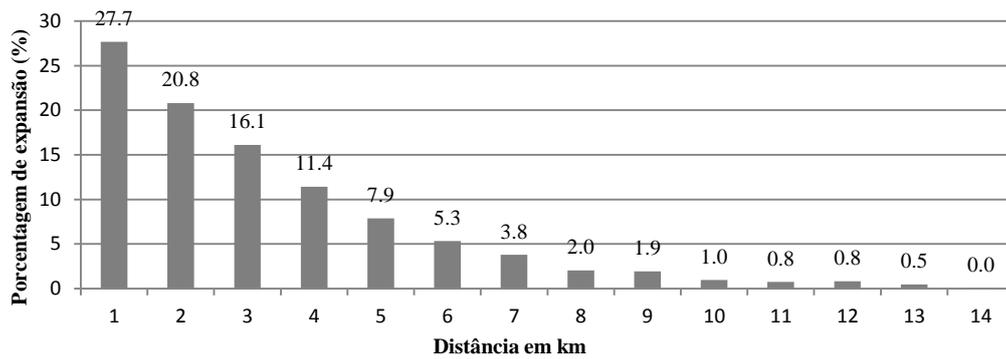


Figura 14 - Expansão da cana-de-açúcar em relação ao sistema viário na UGRHI 13, no período de 2003 até 2011

A expansão da cana-de-açúcar na UGRHI 13 aconteceu majoritariamente na classe Latossolo, que representou 66,63% das novas áreas ocupadas com cana-de-açúcar neste período, sendo o Latossolo Vermelho Escuro Álico o tipo que teve maior representatividade nesta classe (28,42%) seguido do Podzólico Vermelho Amarelo Abrupto Álico (20,95%) (Figura 15). A preferência por latossolos pode ser explicada pela boa produtividade dos mesmos para atividades agrícolas, além de serem geralmente encontrados em áreas planas consideradas aptas para o cultivo e colheita automatizada da cana-de-açúcar (RIBEIRO; FERREIRA; FERREIRA, 2008).

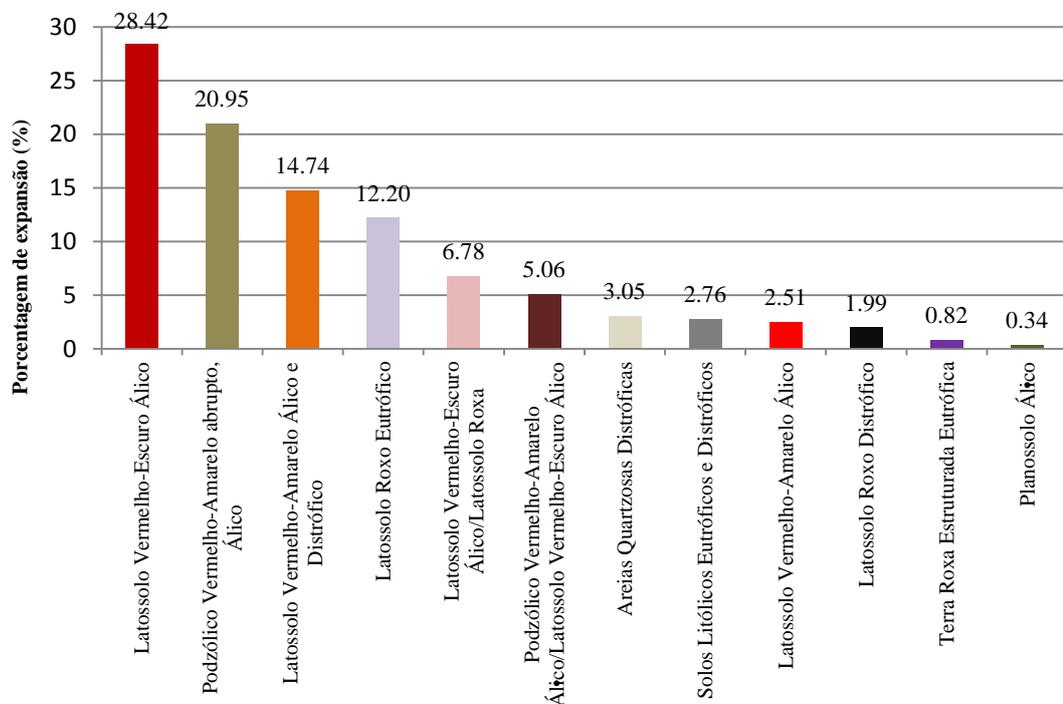


Figura 15 - Expansão da cana-de-açúcar em relação à Pedologia na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011

Constatou-se que a expansão da cana-de-açúcar, no período estudado, ocorreu em áreas com baixa declividade, sendo que 45,46% dos novos canaviais concentraram-se em declividades de até 6% e 45,98% em áreas cuja declividade varia entre 6% e 12%. As áreas com declividade > 12% foram ocupadas por apenas 8,56% das novas plantações dentro da UGRHI 13. Observa-se na Figura 16 que as novas lavouras concentraram-se majoritariamente na classe 6%, correspondendo a 13,07% da área total ocupada no período estudado.

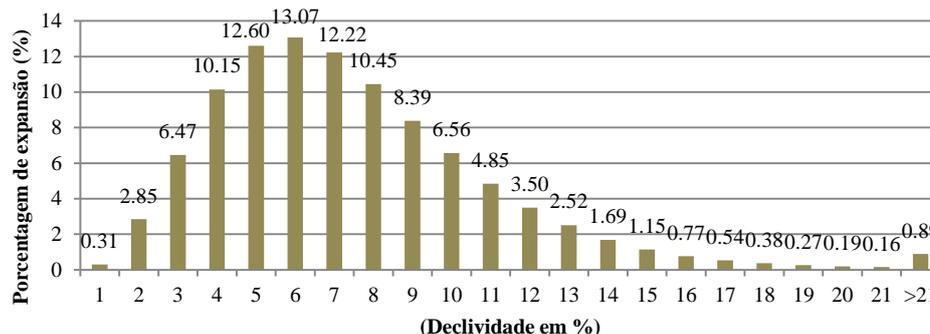


Figura 16 - Expansão da cana-de-açúcar em relação à Declividade na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011

A classe Adequada da variável Condições Edafoclimáticas representou 93,68% da expansão desta monocultura enquanto que a classe Adequada com Limitações Leves foi responsável por 6,32% no período estudado (Figura 17). A alta aptidão edafoclimática da UGRHI 13 é responsável pela discrepância na ocupação das classes dessa variável uma vez que, considerando a área total da UGRHI 13, 92,01% de seu território é classificado como Adequado.

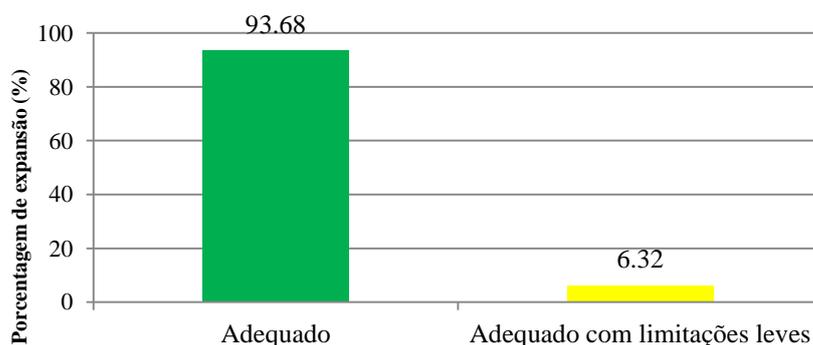


Figura 17 - Expansão da cana-de-açúcar em relação às Condições Edafoclimáticas na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011

Os mapas representantes do uso da terra em 2003 e 2011 estão ilustrados nas Figuras 18 e 19. Considerando a expansão dos canaviais e o uso da terra, identificou-se que as classes Laranja e Reflorestamento representaram 6,72% e 2,08%, respectivamente no período estudado, enquanto que 3,49% das novas áreas localizaram-se em áreas classificadas como

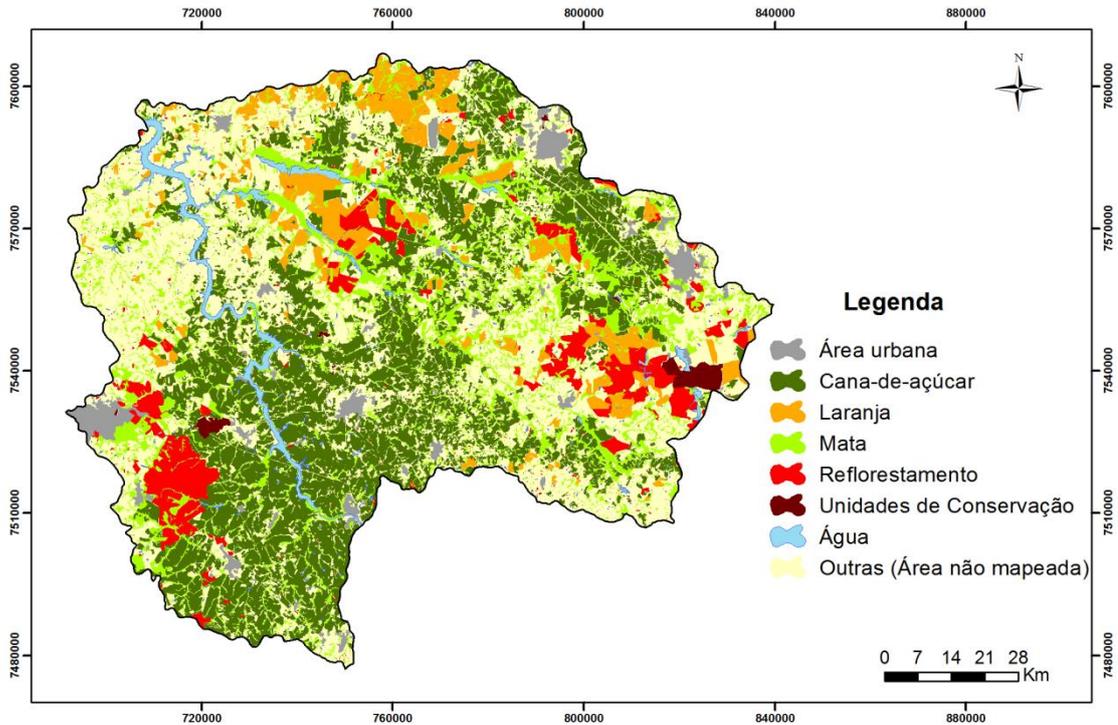


Figura 18 – Mapa do uso da terra na UGRHI 13 em 2003

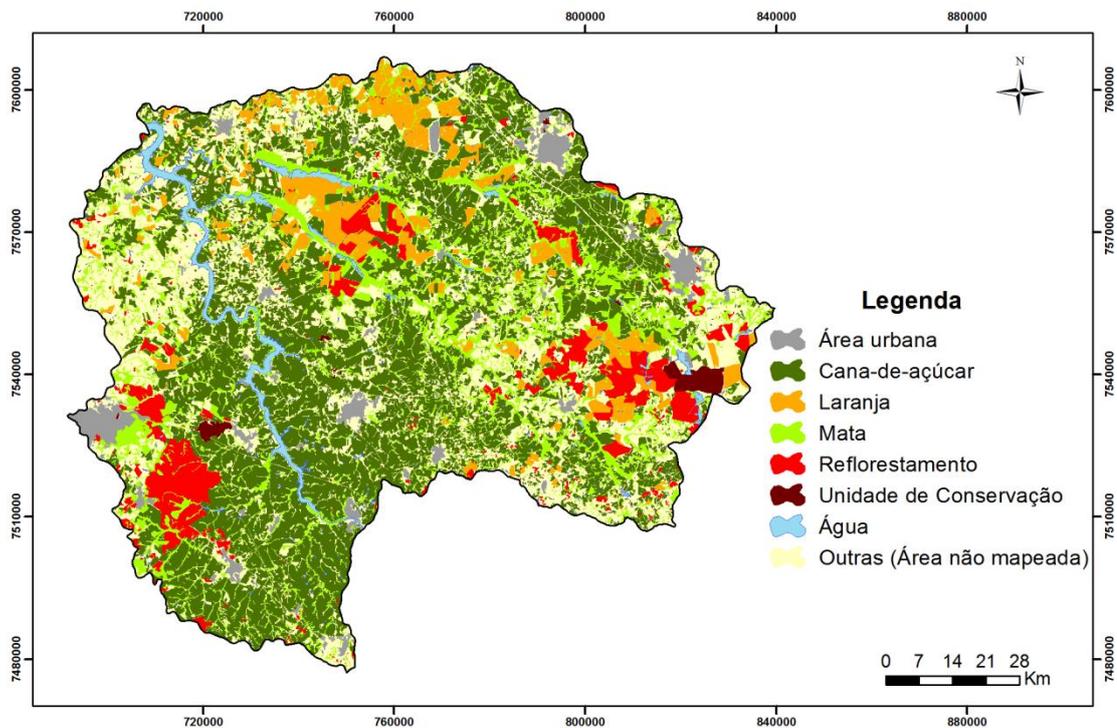


Figura 19 – Mapa do uso da terra na UGRHI 13 em 2011

Mata (Figura 20⁷). Conforme IPT-CBH-TJ (2000), o cultivo e processamento de citrus é uma das atividades de destaque dentro da UGRHI 13, portanto, os laranjais têm certa estabilidade quando comparados com outros usos. As áreas ocupadas com Reflorestamento atendem à indústria de papel principalmente nos municípios de Bauru, Araraquara e Agudos (IPT-CBH-TJ, 2000), logo, também se apresentaram menos propensas à conversão para cana-de-açúcar.

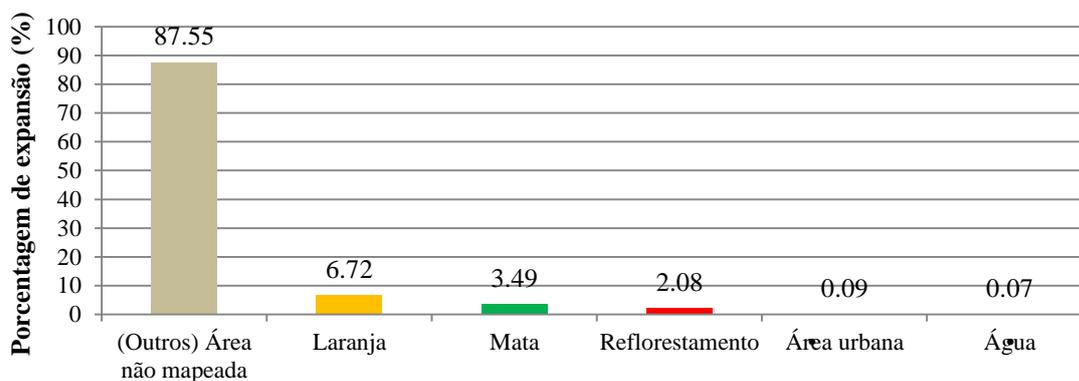


Figura 20 - Expansão da cana-de-açúcar em relação ao uso da terra na UGRHI 13 no período de 2003 até 2011

Comparando os dados obtidos neste mapeamento com os dados de uso e conversão da terra do Projeto CANASAT para o período de 2005 até 2011 (Figura 21), percebe-se que a tendência de baixa ocupação de áreas classificadas como Reflorestamento e Citrus se mantém (0,76% e 5,12%, respectivamente). Neste mapeamento, observou-se, também, que 89,48% das áreas de expansão da cana-de-açúcar ocuparam áreas classificadas como pastagem e agricultura. Entretanto, em relação à classe mata, apenas 0,30% das novas áreas ocuparam esta classe (ADAMI et al., 2012).

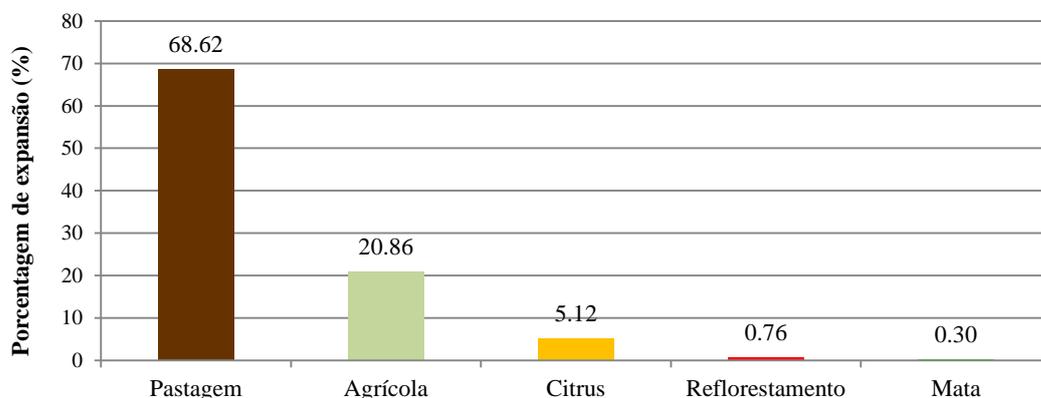


Figura 21 - Expansão da cana-de-açúcar em relação ao uso da terra na UGRHI 13 no período de 2005 até 2011 conforme dados fornecidos pelo Projeto CANASAT Fonte: Adami et al (2012)

⁷ A ocupação nas classes Área urbana e Água devem-se, provavelmente às diferenças de georreferenciamento.

Os resultados encontrados nestas análises confirmam as tendências apontadas pela literatura apresentados no item 5.1. Percebe-se a significativa preferência para expansão dos novos canaviais em áreas próximas às Usinas e ao sistema viário, baixas declividades e por condições edafoclimáticas adequadas. Quanto à conversão do uso do solo na UGRHI 13, detectou-se que áreas ocupadas com plantações de laranja e reflorestamento representaram 22,4%. A classe Outros que inclui as áreas não mapeadas e possivelmente ocupadas por Pastagem e outros tipos de Agricultura representou 87,55% das novas áreas ocupadas com cana-de-açúcar (Conforme o mapeamento da presente pesquisa).

Em relação à classe Mata, observou-se que esta representou 3,49% da expansão no período no mapeamento elaborado na presente pesquisa e 0,30% nos dados fornecidos pelo CANASAT. Comparando esses valores, percebe-se uma nítida diferença e, com base na premissa de que a cana não causa desmatamento diretamente, mas sim de forma indireta, pois obriga outras atividades a se realocarem espacialmente, optou-se por considerar que a mesma é um fator impeditivo para a expansão da cana-de-açúcar.

Quanto aos mapas de uso do solo produzidos nesta pesquisa, é importante ressaltar que não foram calculados índices de concordância ou realizada conferência em campo para aferir a qualidade da interpretação.

5.4 Padronização das variáveis

Este procedimento tem como objetivo padronizar as variáveis em uma mesma escala para que se possa gerar um mapa síntese por meio da análise multicritério. Sendo assim, as variáveis Distância das Usinas, Distância do sistema viário e Declividade foram padronizadas através da aplicação do módulo *FUZZY*, no SIG IDRISI TAIGA. Os pontos de controle basearam-se nos histogramas apresentados anteriormente e podem ser observados juntamente com as funções escolhidas na Tabela 7.

Os pesos das classes das variáveis Condições Edafoclimáticas, Pedologia e Uso do solo foram estimados por meio da ponderação de pesos conforme a participação de cada classe no universo da variável sobre o tema. As Tabelas 8,9 e 10 apresentam as classes de cada variável e seus respectivos pesos enquanto que os mapas resultantes podem ser vistos na Figura 22.

Tabela 7 - Variáveis utilizadas na Calibração do GEOMOD

	VARIÁVEL	Forma de Padronização
VARIÁVEIS POTENCIAIS	Distância das Usinas de açúcar e álcool em 2003	Foi escolhida a Função Linear Simétrica, tendo como pontos de controle: A= 0 km B=11km C=11km D=36km Nesta função, a aptidão atinge seu máximo em 11 km. No intervalo de 0 até11km, a aptidão sobe gradualmente enquanto que a partir dos 11km a aptidão cai até atingir 36km, sendo que neste ponto a aptidão atinge seu mínimo.
	Distância do Sistema viário em 2003	Foi utilizada a opção na qual o próprio usuário cria sua curva. Neste caso, o módulo foi alimentado com as distâncias e seu respectivo peso. Estes pesos foram gerados conforme a expansão da cana-de-açúcar em cada distância, seguindo mesma lógica da equação 1. Cabe ressaltar que neste caso os pontos são interpolados linearmente (EASTMAN, 2009b).
	Declividade	Foi escolhida a curva Sigmoidal Simétrica, utilizando os seguintes pontos de controle: A= 0 B = 6 C = 6 D = 20 Portanto, a aptidão máxima é atingida na declividade 6%. No intervalo de 0 a 20 a aptidão sobe gradualmente e a partir de 6, diminui até chegar aos 20, ponto em que atinge seu mínimo.
	Pedologia	Os pesos foram estimados com base na preferência constatada no período estudado.
	Condições Edafoclimáticas	Pedologia – Tabela 8 Condições Edafoclimáticas – Tabela 9
	Uso da terra	Uso da terra – Tabela 10
FATORES DE RESTRIÇÃO	Áreas Urbanas e Rodovias	As variáveis classificadas como fatores de restrição foram transformadas em imagens booleanas nas quais o valor 0 representa a área dos fatores de restrição mencionados ao lado.
	Unidades de Proteção Integral	
	Hidrografia e Represa	
	Vegetação Natural	

Tabela 8 - Pesos Pedologia

<i>Classes</i>	<i>Peso</i>
Latossolo Vermelho-Escuro Álico	255
Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto, Álico	188
Latossolo Vermelho-Amarelo Álico e Distrófico	132
Latossolo Roxo Eutrófico	109
Latossolo Vermelho-Escuro Álico/Latossolo Roxa	61
Podzólico Vermelho-Amarelo Álico/Latossolo Vermelho-Escuro Álico	45
Areias Quartzosas Distróficas	27

Tabela 8 - Pesos Pedologia

<i>Classes</i>	<i>Peso</i>
Solos Litólicos Eutróficos e Distróficos	25
Latossolo Vermelho-Amarelo Álico	22
Latossolo Roxo Distrófico	18
Terra Roxa Estruturada Eutrófica	7
Planossolo Álico	3

Tabela 9 – Pesos Uso da terra

<i>Classe</i>	<i>Peso</i>
Área urbana	0
Água	0
Mata	0
Reflorestamento	6
Laranja	20
Outros	255

Tabela 10 - Pesos Classes Edafoclimáticas

<i>Classes</i>	<i>Peso</i>
Adequado	255
Adequado com limitações leves	17
Adequado com restrições moderadas	Não há na UGRHI 13
Inadequado	Não há na UGRHI 13

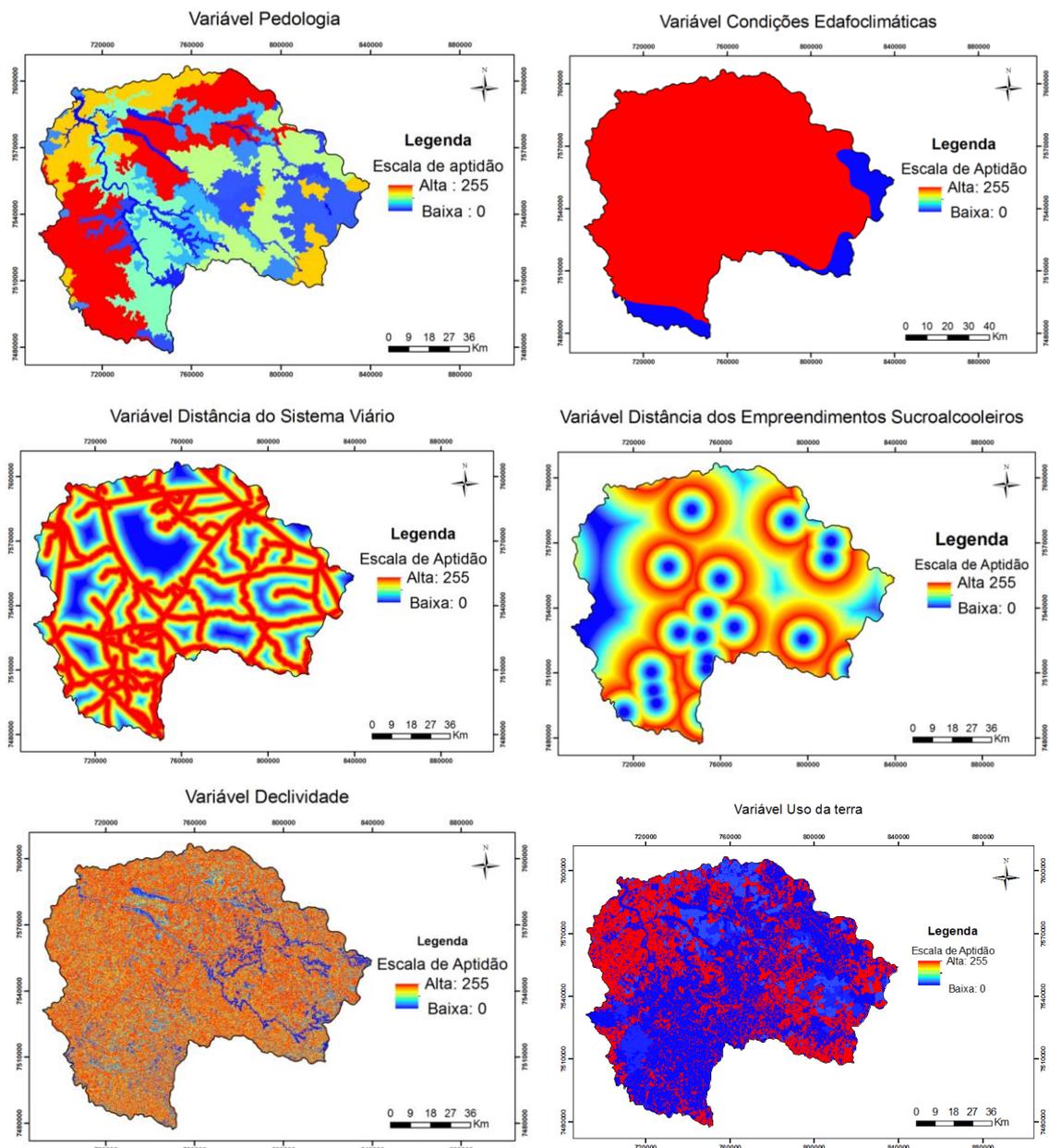


Figura 22 – Mapas representantes das variáveis padronizadas em uma mesma escala de aptidão: 0 = Aptidão Nula a 255 = Aptidão Máxima

5.5 Realização e Análise dos Testes

Após a padronização das variáveis, foram elaborados os mapas de probabilidades de transição para a realização das simulações entre 2003 e 2011.

Os resultados aqui apresentados foram primeiramente compilados em uma tabela contendo as variáveis utilizadas e o índice Figura de Mérito (Apêndice B). Pontius e Malanson (2005) apontam a dificuldade em comparar os diferentes resultados gerados por um modelo com um mesmo conjunto de dados, sugerindo que primeiramente sejam analisadas as suposições mais simples e depois as mais complexas. Sendo assim, os resultados abaixo apresentam as projeções realizadas pelo modelo para o ano de 2011 conforme o número de variáveis potenciais utilizadas no mapa de probabilidades de transição. Ressalta-se que todas têm o mesmo peso na composição deste último mapa.

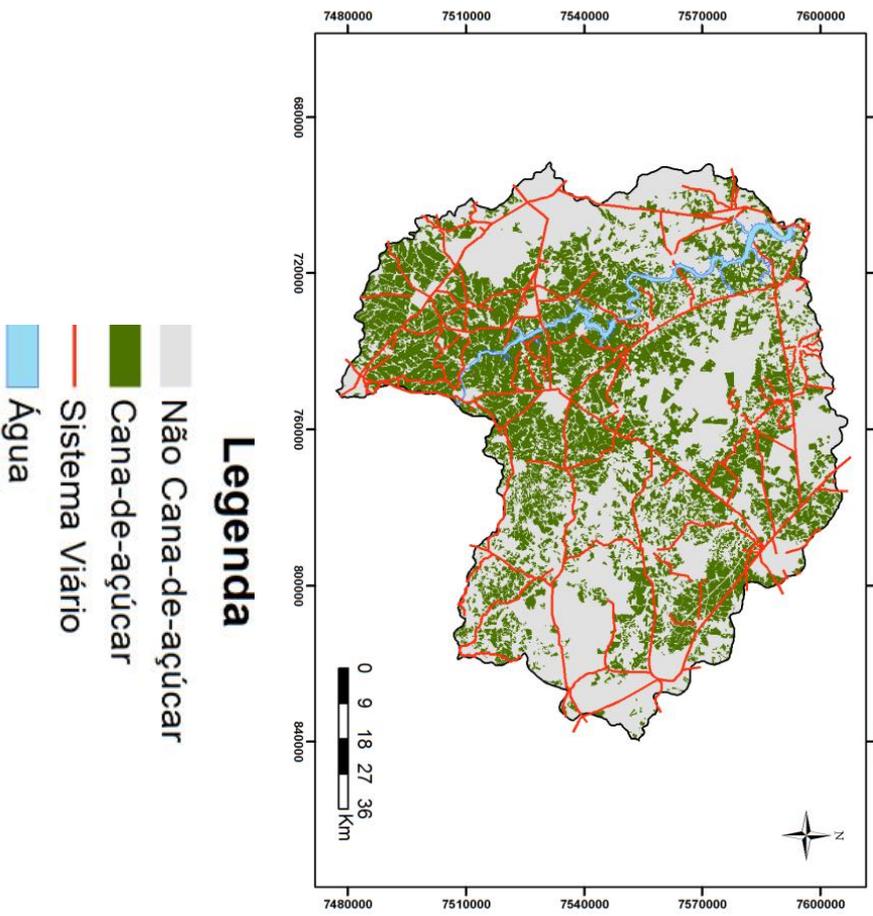
5.5.1 Apenas uma variável

A variável Uso da terra apresenta maior Figura de Mérito (FM) (15,67%) quando o modelo é alimentado com apenas uma variável (Figura 23 – Teste 06), seguida da variável Distância do Sistema viário (FM 13,24% - Figura 23 – Teste 02). As variáveis Distância das Usinas e Declividade apresentaram FM de 12,22% e 12,80%, respectivamente.

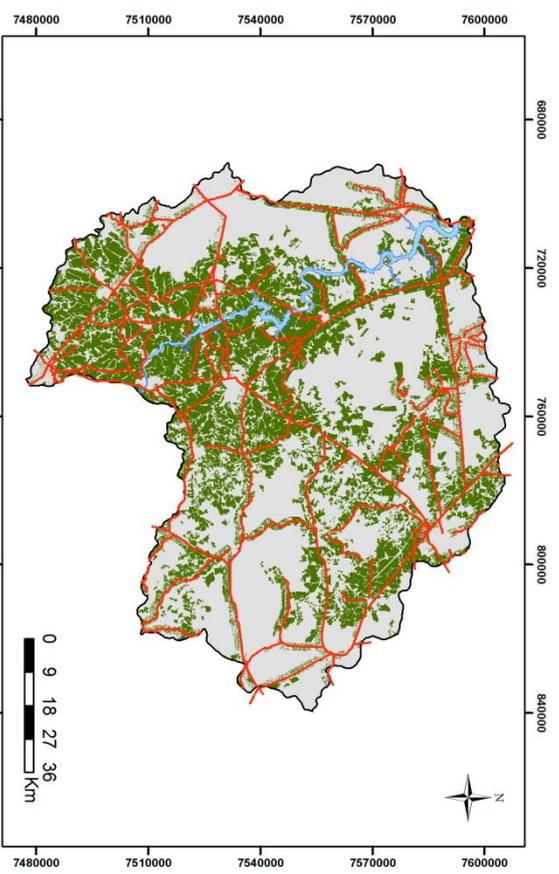
As projeções produzidas pelo modelo quando alimentado com as variáveis Condições Edafoclimáticas e Pedologia tiveram um desempenho similar, sendo FM 12,65% e 12,68%, respectivamente.

Em relação ao aspecto espacial, nota-se claramente a influência da distância das rodovias no Teste 2 pois há concentrações de *pixels* praticamente em forma de rodovias (Figura 23). Já o Teste 6 caracteriza-se pela presença de *pixels* espalhados. Uma possível explicação para a configuração espacial do Teste 6 reside no fato de que o mapa de probabilidades de transição não tem áreas com altas probabilidades de transição em formas tão definidas quanto àquele que alimentou o Teste 2 (Os mapas de probabilidades de transição podem ser vistos no item 5.4, Figura 22).

UGRHI 13 - Plantações de Cana-de-açúcar em 2011 (Mapa Real)



UGRHI 13 - TESTE 02



UGRHI 13 - Teste 06

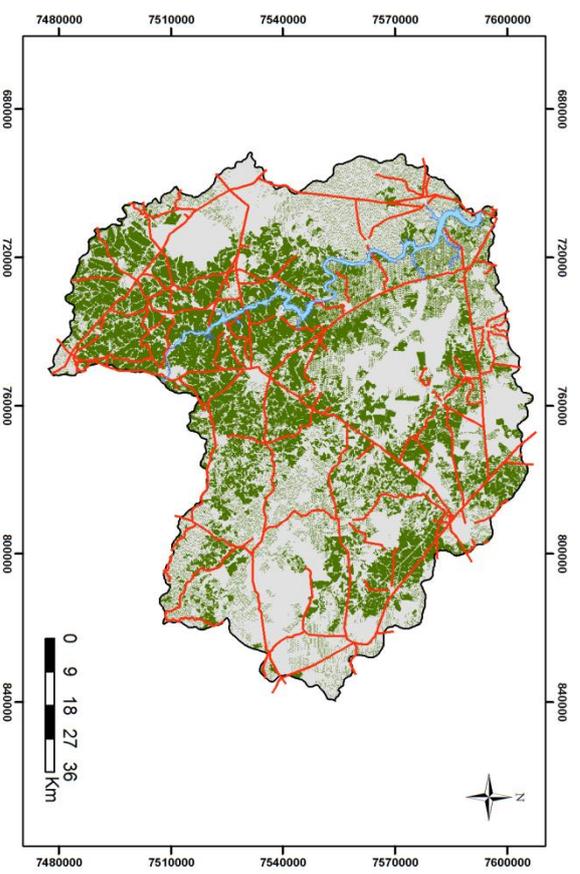


Figura 23 – Comparação entre os testes com maior FM utilizando uma variável e o mapa de 2011 real

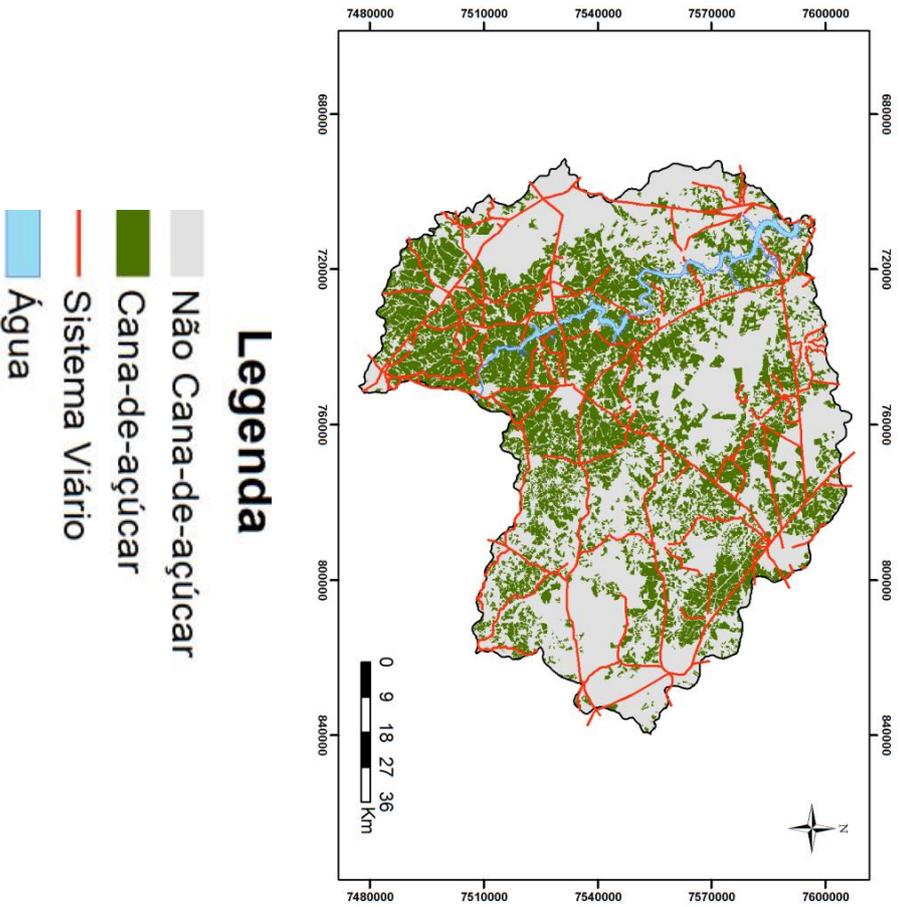
5.5.2 Duas variáveis

Comparando-se o desempenho das combinações realizadas, constatou-se que os testes realizados com a variável Uso da terra apresentaram desempenho superior, sendo o teste 18 àquele com maior FM neste conjunto (17,03%) (Figura 24). Este teste foi realizado com o mapa de probabilidades de transição confeccionado com a variável Pedologia e Uso da terra.

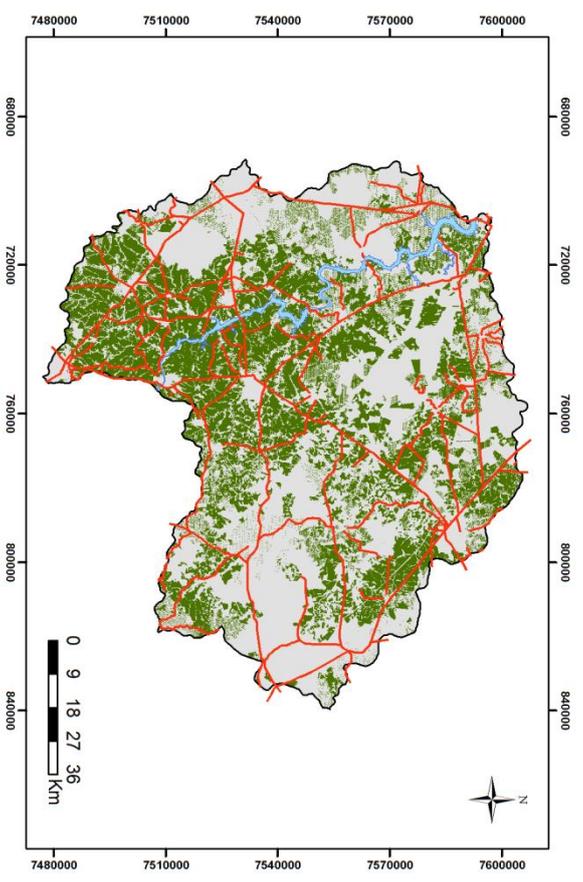
Excetuando-se os testes que envolvem a variável Uso da terra, o teste 12 cuja combinação é a Distância do sistema viário e Pedologia apresentou maior FM (14,16%), ou seja, uma diferença de 2,87% quando comparado ao teste com maior FM neste conjunto de simulações. O desempenho das combinações restantes variou entre 12,52% (Teste 8) e 13,84% (Teste 14).

Observa-se na Figura 24 que o Teste 18, cujo mapa de probabilidades de transição utilizou a variável Uso da terra, possui conjuntos de *pixels* espalhados pela área de estudo, com especial concentração nas regiões norte e nordeste da UGRHI 13, quando comparado ao Teste 12. Neste último, pode-se observar a influencia da distância às rodovias por meio, por exemplo, dos *pixels* em forma retangular no norte da bacia.

UGRHI 13 - Plantações de Cana-de-açúcar em 2011 (Mapa Real)



UGRHI 13 - TESTE 18



UGRHI 13 - TESTE 12

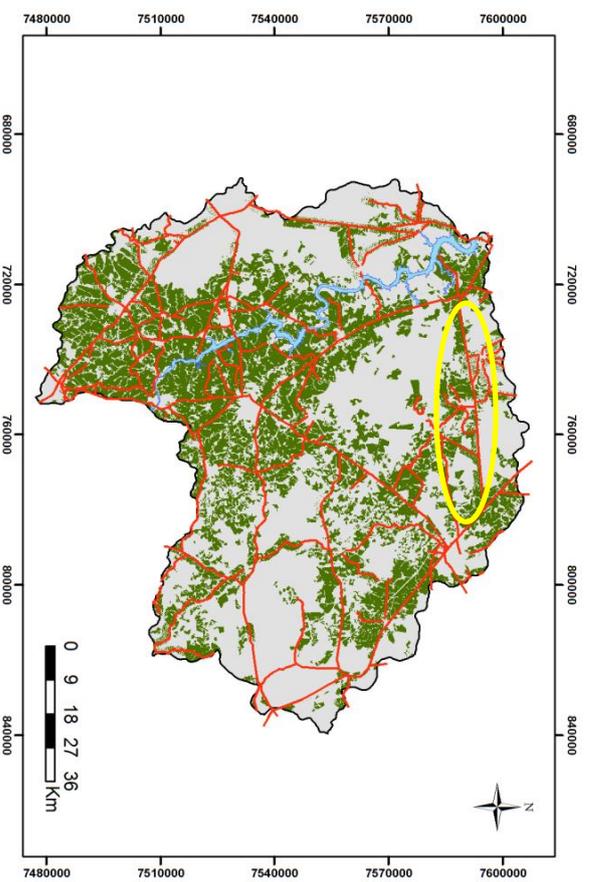


Figura 24 – Comparação entre o mapa com as plantações de cana-de-açúcar em 2011 real e o Teste 18 – Maior Figura de Mérito – e o Teste 12 o qual apresenta o maior Figura de Mérito na ausência da variável Uso da terra em seu mapa de probabilidades de transição.

5.5.3 Conjunto de variáveis: três a seis variáveis

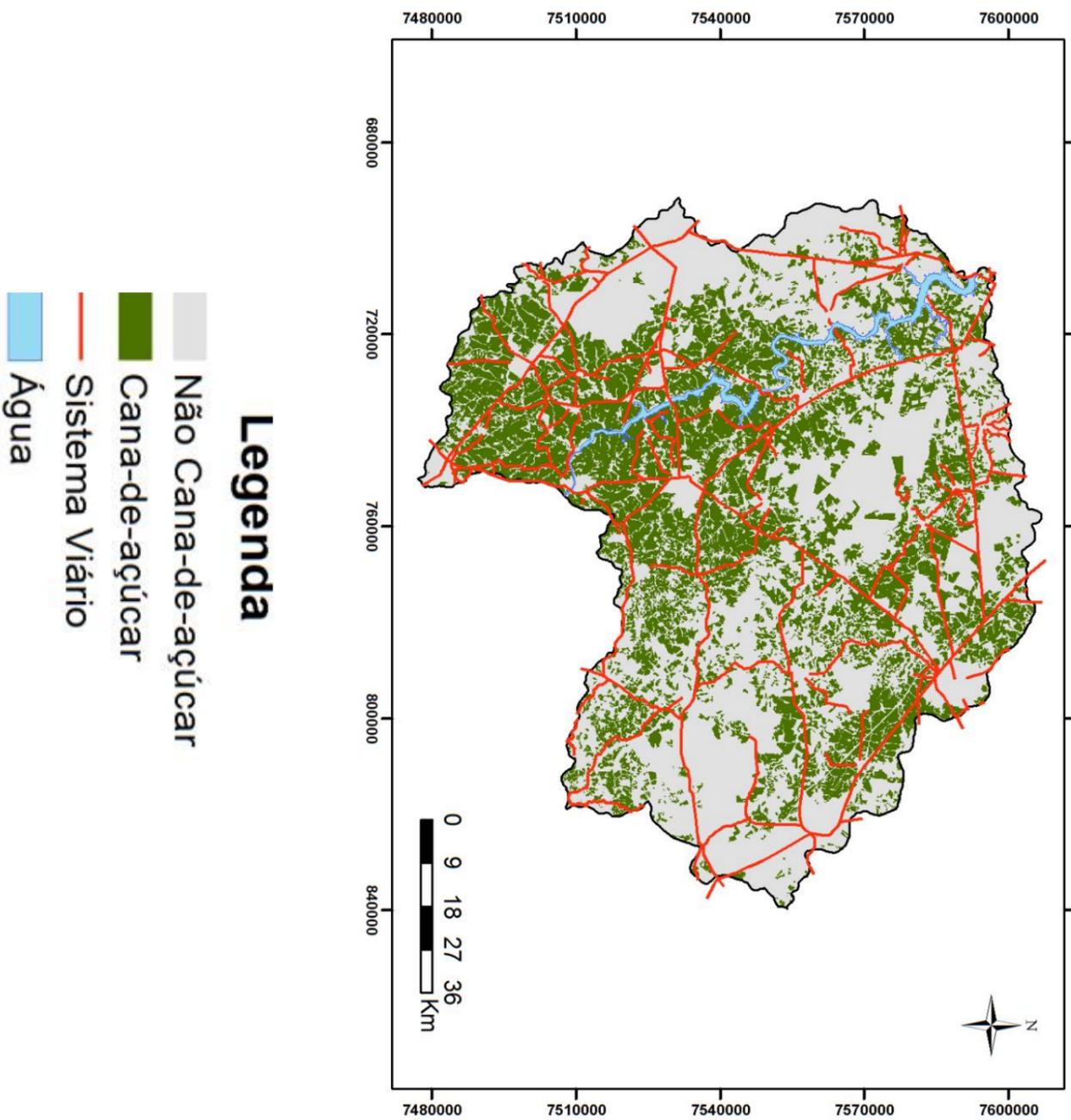
Constatou-se que a utilização de um conjunto de variáveis seguiu o padrão dos testes anteriores, sendo que a presença da variável Uso da terra melhora o desempenho do modelo quanto ao índice Figura de Mérito. Por exemplo, em relação aos testes realizados com três variáveis, o teste 36 apresentou o maior FM (17,30%), enquanto que o teste 32 (FM 14,70%) apresentou o maior FM entre àqueles que não utilizaram a variável uso da terra.

A utilização de quatro ou cinco variáveis também seguiu essa mesma tendência, confirmando a variável uso da terra como um fator chave para elevar o índice FM. Analisando esses conjuntos de variáveis (quatro ou cinco), identificou-se que àqueles que não utilizaram a variável uso da terra, apresentaram FM inferior a 15%.

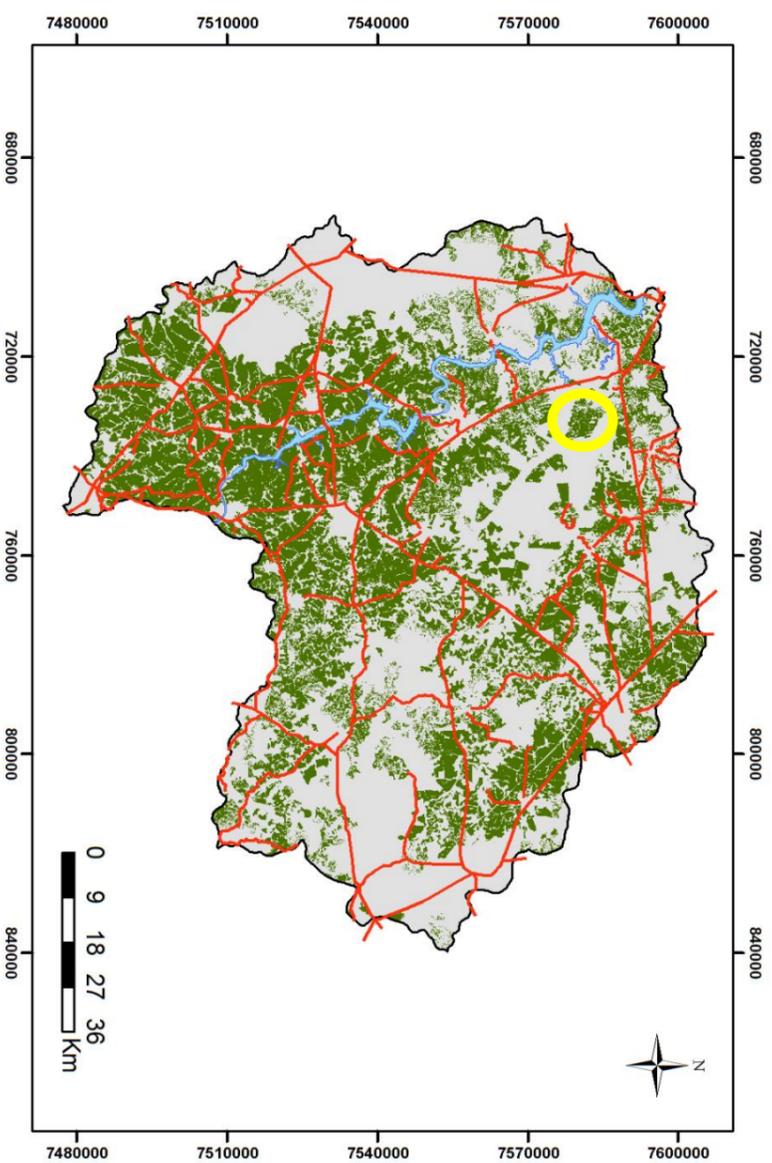
Quando foram utilizadas as seis variáveis, o modelo apresentou FM 16,98% (Teste 63 – Figura 25). Considerando os testes realizados com quatro e cinco variáveis, a combinação composta por Distância das Usinas, Pedologia, Condições Edafoclimáticas, Declividade e Uso da terra foi àquela que apresentou maior FM 17,62% (Teste 60 – Figura 25), a qual também foi a que apresentou maior FM entre os testes realizados com todas as variáveis tendo a mesma influência no mapa de probabilidades de transição final.

Os testes 60 e 63 apresentam fortes similaridades em relação à configuração espacial, já que a única diferença entre eles consiste na presença da variável Distância das Usinas no teste 63. Entretanto, percebe-se que no teste 60 há maiores concentrações de *pixels* no oeste da bacia e na região norte há uma grande mancha constituindo um denso canavial, enquanto que no Teste 63 essa mancha existe, porém é menos densa que no Teste 60.

UGRHI 13 - Plantações de Cana-de-açúcar em 2011 (Mapa Real)



UGRHI 13 - TESTE 60



UGRHI 13 - TESTE 63

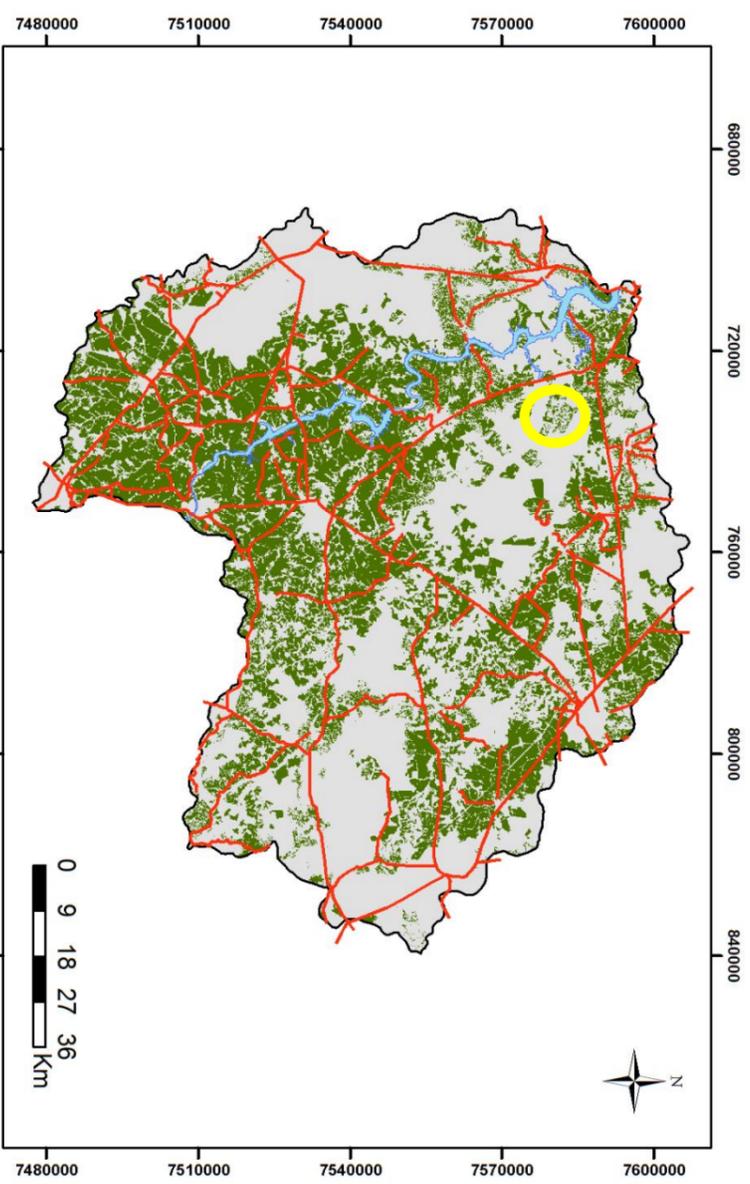


Figura 25 – Comparação entre o mapa com as plantações de cana-de-açúcar em 2011 real e o Teste 63 – presença de todas as variáveis– e o Teste 60 o qual apresenta o maior Figura de Mérito de todos os testes realizados.

5.5.4 Teste com variáveis potenciais com pesos diferentes

Neste teste foram utilizadas as seis variáveis potenciais, entretanto, ao contrário dos testes apresentados anteriormente, pesos distintos foram atribuídos às variáveis. Estes pesos foram gerados por meio da aplicação da técnica *Analytic Hierarchy Process (AHP)*.

A técnica em questão baseia-se na comparação par a par entre as variáveis através da utilização de uma escala de 9 pontos (Figura 26). A comparação das variáveis baseou-se na revisão de literatura realizada para a escolha das variáveis e nas características da área de estudo.

Pairwise Comparison 9 Point Continuous Rating Scale								
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremely	very strongly	strongly	moderately	equally	moderately	strongly	very strongly	extremely
Less Important					More Important			

Figura 26 – Escala para a comparação par a par entre as variáveis. Fonte: Eastman (2009b)

Do ponto de vista Edafoclimático, 92,01% da área da UGRHI 13 foi considerada adequada, conforme os dados relativos às condições edafoclimáticas utilizados nesta pesquisa. Considerando apenas a Pedologia, somente 7,36 % da área desta UGRHI é ocupada por areias quartzosas e planossolo álico, os quais apresentam restrição à expansão da cana-de-açúcar, uma vez que a produtividade desta monocultura é menor neste tipo de solo, de acordo com o mapa pedológico utilizado nesta pesquisa.

A declividade na área de estudo também é, em sua maioria, apta para o cultivo de cana-de-açúcar uma vez que 87,01% de sua área localiza-se em declividades até 12%. Desta forma, nota-se que a produtividade das terras desta UGRHI 13 é, em sua maioria, adequada para o cultivo desta monocultura.

Sendo assim, entende-se que a infraestrutura local representada pela presença da usina e das rodovias é um diferencial no momento de escolher a alocação de novos canaviais. Baseado nesta premissa, comparou-se as variáveis par a par conforme recomenda a técnica AHP.

Logo, as variáveis distância das usinas e distância do sistema viário foram consideradas mais importantes quando comparadas às outras variáveis (exceção à declividade).

Em relação à variável declividade, considerou-se que tem a mesma importância das variáveis uso da terra e distância do sistema viário, posto que envolve não só a produtividade como também abrange questões relacionadas à mecanização da colheita, por exemplo. Por este último motivo, foi considerada mais importante quando comparada às variáveis pedologia e condições edafoclimáticas.

O custo da terra obviamente interfere diretamente na escolha das novas áreas para a expansão desta monocultura. Neste caso, foram mapeadas as áreas ocupadas com laranja e reflorestamento, cujo custo para a expansão desta monocultura é maior, pois, estão atrelados à atividades industriais dentro desta bacia. Comparando-se então esta variável com àquelas relacionadas às condições edafoclimáticas e à pedologia, atribui-se uma importância maior para o uso em função da alta aptidão das áreas para o cultivo de cana-de-açúcar.

Cabe ressaltar que a variável condições edafoclimáticas foi considerada menos importante, pois sua variação é muito pequena dentro da UGRHI 13.

A matriz ilustrada na Tabela 11 representa a comparação entre as variáveis para a geração dos pesos:

Tabela 11 – Matriz de Comparação das Variáveis Potenciais

	Distância das Usinas	Distância do sistema viário	Pedologia	Declividade	Condições Edafoclimáticas	Uso da terra
Distância das Usinas	<i>1</i>					
Distância do sistema viário	1	<i>1</i>				
Pedologia	1/3	1/3	<i>1</i>			
Declividade	1/3	1	3	<i>1</i>		
Condições Edafoclimáticas	1/5	1/5	1/5	1/5	<i>1</i>	
Uso da terra	1/3	1/3	3	1	5	<i>1</i>

Razão de Consistência: 0,07

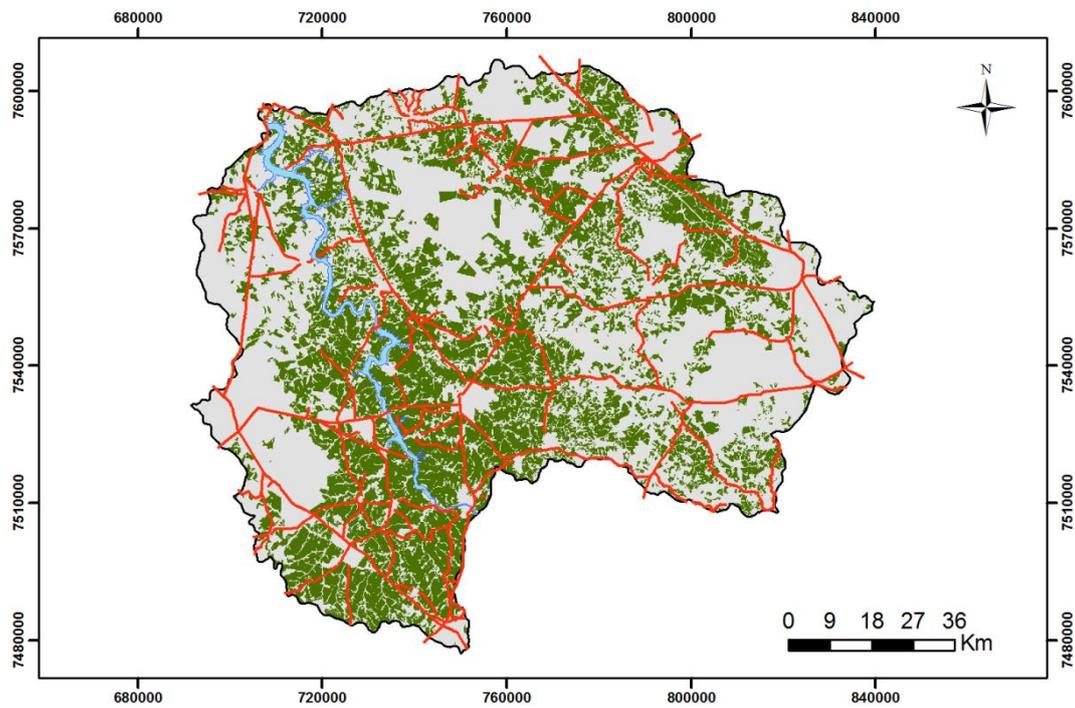
Os pesos gerados estão ilustrados na Tabela 12. Analisando esta tabela, percebe-se que a distância das usinas é a variável que possui maior influência no mapa final, seguida da variável distância do sistema viário. A variável declividade é a terceira mais influente no mapa final, seguida da variável uso da terra. Já as variáveis pedologia e condições edafoclimáticas têm a menor influência no mapa de probabilidades de transição final.

Tabela 12 – Pesos Gerados para cada variável potencial

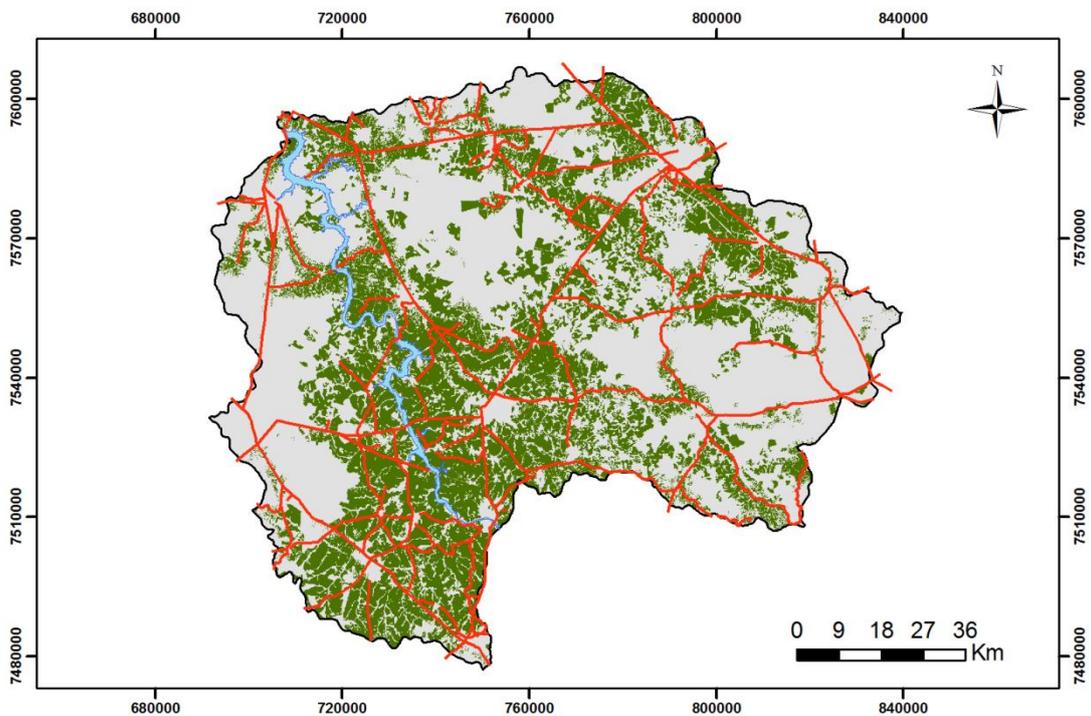
Variável	Pesos
Distância das Usinas	0.3053
Distância das rodovias	0.2512
Declividade	0.1735
Uso da terra	0.1474
Pedologia	0.0869
Condições Edafoclimáticas	0.0356

A projeção produzida com este mapa de probabilidades de transição pode ser vista na Figura 27. Este teste apresentou FM 15,89% (Teste 64), ou seja, inferior àquele com maior FM dentre os testes realizados com todas as variáveis tendo o mesmo peso (Teste 63). Uma possível explicação para o teste 63 ter um desempenho melhor seria o fato de que praticamente toda a área da UGRHI 13 pode ser considerada positiva para a expansão desta monocultura, uma vez que são poucas as áreas com restrições edafoclimáticas e/ou pedológicas.

UGRHI 13 - Plantações de Cana-de-açúcar em 2011 (Mapa Real)



UGRHI 13 - TESTE 64



Legenda

- Não Cana-de-açúcar
- Cana-de-açúcar
- Sistema Viário
- Água

Figura 27 – Comparação entre o mapa com as plantações de cana-de-açúcar em 2011 real e o Teste 64

A Tabela 13 sintetiza os testes com maior FM, conforme o número de variáveis utilizadas para sua realização. Pode-se observar que os testes realizados com apenas uma variável e àquele utilizando pesos diferentes para as seis variáveis selecionadas apresentam o menor FM enquanto que os maiores FMs são encontrados nos testes realizados com quatro ou cinco variáveis. Destaca-se também a utilização da variável Uso da terra em todos os testes, evidenciando seu papel no aumento do índice FM.

Tabela 13 - Síntese dos testes com maior Figura de Mérito

Número do Teste	Número de Variáveis	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
Teste 6	1	Uso da terra	15,67%
Teste 18	2	Pedologia	17,03%
		Uso da terra	
Teste 36	3	Pedologia	17.30%
		Condições Edafoclimáticas	
		Uso da terra	
Teste 47	4	Pedologia	17.49%
		Condições Edafoclimáticas	
		Declividade	
		Uso da terra	
<i>Teste 60</i>	5	<i>Distância das usinas</i>	<i>17.62%</i>
		<i>Pedologia</i>	
		<i>Condições Edafoclimáticas</i>	
		<i>Declividade</i>	
		<i>Uso da terra</i>	
Teste 63	6	Distância das usinas	16.98%
		Distância do sistema viário	
		Pedologia	
		Condições Edafoclimáticas	
		Declividade	
		Uso da terra	
Teste 64 (Pesos diferentes para as variáveis)	6	Distância das usinas	15.89%
		Distância do sistema viário	
		Pedologia	
		Condições Edafoclimáticas	
		Declividade	
		Uso da terra	

Cabe ressaltar também que no Teste 60, que apresentou a melhor performance em relação ao Figura de Mérito, não foi utilizada a variável Distância das rodovias. Entretanto, é inegável sua importância para o fenômeno estudado.

5.6 Validação do Modelo GEOMOD

Considerando a técnica escolhida para validação, deve-se comparar os mapas reais das plantações de cana-de-açúcar de 2003 e 2011 e àquele representante da projeção realizada. Optou-se então por utilizar o *Teste 60* que apresentou o melhor desempenho no índice Figura de Mérito. Na comparação ilustrada na Figura 28, observou-se que o tipo de erro Alarmes Falsos concentra-se principalmente na região norte desta UGRHI, enquanto que as Perdas aparecem espalhadas pela área de estudo (Figura 28).

Desta forma, as Perdas são o tipo de erro mais cometido pelo modelo (Tabela 14), representando 41,19% da área de mudança projetada enquanto que os Alarmes Falsos representam 28,55% dessa área.

A próxima etapa consiste na comparação do modelo com seu respectivo modelo nulo. Para tal, compara-se o número de Alarmes Falsos com Sucessos, sendo que sempre que o número de Alarmes Falsos for inferior aos Sucessos, o desempenho do modelo é superior ao seu modelo nulo. Sendo assim, analisando o modelo gerado para a UGRHI 13 com maior FM, constatou-se que o mesmo apresenta um desempenho inferior quando comparado ao seu respectivo nulo (Tabela 14).

Tabela 14 – Figura de Mérito e seus parâmetros calculados para o Teste 60

Parâmetros	Porcentagem Da Área Projetada Pelo Modelo ⁸
	TESTE 60
Perdas	41,19%
Alarmes Falsos	28,55%
Sucessos	17,62%
Perdas (conversão de cana-de-açúcar para outros usos)	12,64%

⁸ Neste cálculo, não estão inclusas as áreas classificadas como sucesso nulo, ou seja, que permaneceram com o mesmo uso da terra em 2003, 2011 e no mapa simulado para 2011.

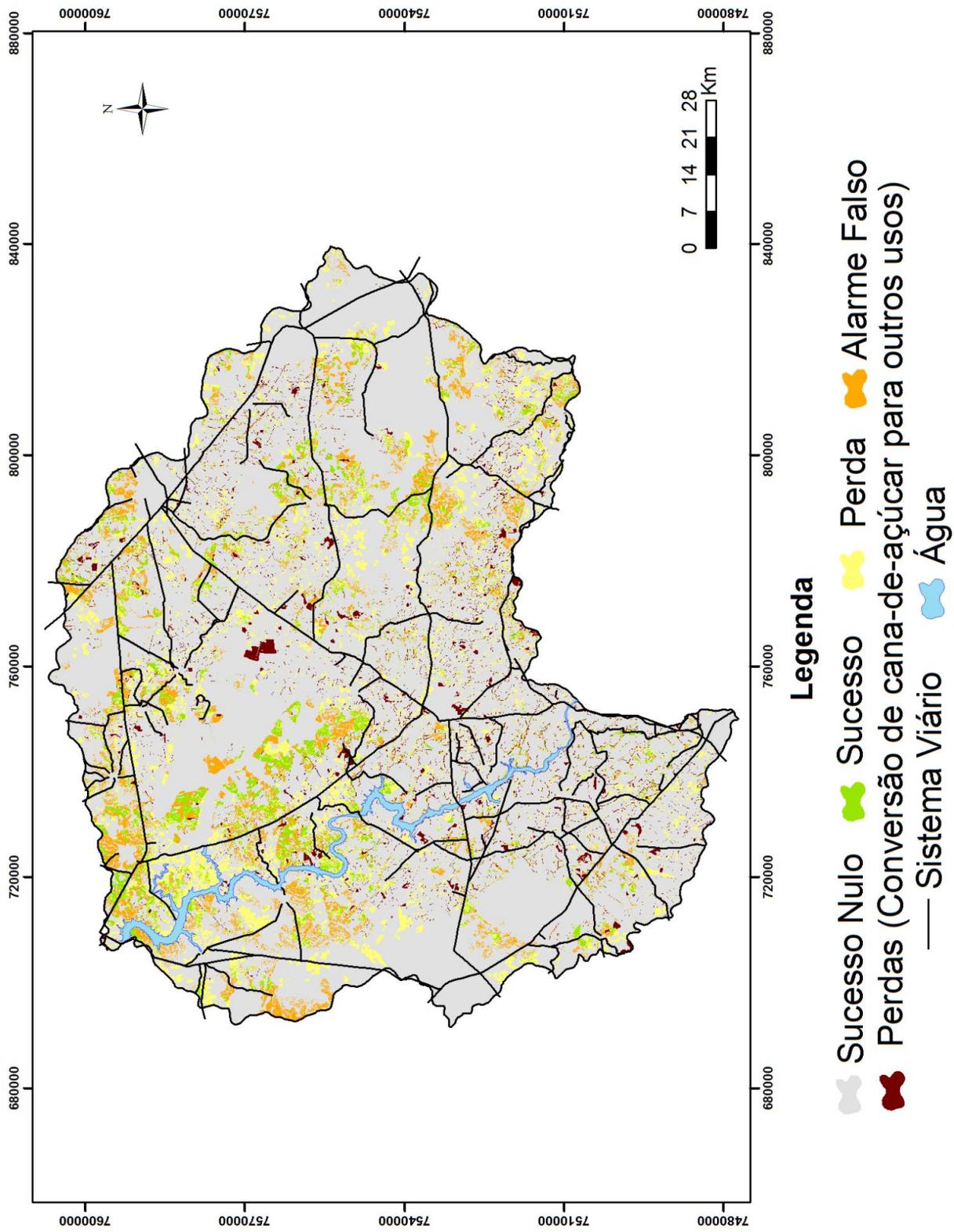


Figura 28 – Comparação entre os mapas de 2003 real, 2011 real e o Teste 60

Esta situação não é incomum na literatura. Pontius et al. (2008) avaliaram 13 aplicações de 9 diferentes modelos de mudanças do uso do solo, das quais 6 aplicações não foram melhores que o modelo nulo na resolução inicial tal como em Martins; Cabral; Sousa e Silva (2012) e Sloan; Pelletier (2012). Com base nos resultados obtidos, também constataram que quando a porcentagem de mudança da paisagem ocupada pelo fenômeno é de aproximadamente 10%, o índice Figura de Mérito tende a ser até 15%, o que é o caso da UGRHI 13 (PONTIUS et al., 2008).

Os motivos para essa performance podem estar relacionados a erros dos próprios mapas de entrada, como por exemplo diferenças no georreferenciamento entre os mapas de 2003 e 2011, as variáveis podem ter relevância em diferentes escalas, além de que as variáveis potenciais e restritivas podem não explicar sozinhas o fenômeno estudado.

Após esta análise *pixel a pixel*, foi feita uma análise em várias resoluções na qual se aumenta o tamanho do *pixel* a fim de verificar se o comportamento dos dados se altera conforme se diminui a resolução dos mapas. Na Tabela 15, verificou-se que quando o tamanho do *pixel* é aumentado em 64, 128 e 256 vezes, o modelo apresenta um desempenho superior ao seu respectivo modelo nulo. Logo, os mapas devem estar na resolução mínima de 3200 x 3200 metros para que o número de Sucessos seja maior que o de Alarmes Falsos.

Tabela 15 - Diminuição da Resolução X Sucessos X Alarmes Falsos

Diminuição da resolução	Sucessos (células)	Alarme Falso (células)
2	37149	59479
4	10557	16079
8	2808	4047
16	726	1010
32	198	247
64	52	52
128	14	12
256	5	2
512	1	-

Tem-se na literatura a indicação que um modelo só deve ser utilizado quando seu desempenho for igual ou superior ao do seu respectivo modelo nulo (PONTIUS; HUFFAKER; DENMAN, 2004). Portanto, seguindo esta lógica, os resultados deste modelo deveriam ser apresentados apenas na resolução 3200 x 3200 metros. Entretanto, os resultados

apresentados na resolução inicial adotada 50 x 50 metros não são considerados inválidos, mas sim “*uma evidência da falta de consenso existente no seio da comunidade científica em relação à eficácia dos métodos de validação*” (PINTO, 2008, p. 80).

Sendo assim, optou-se por gerar as projeções na resolução inicial, entretanto, destaca-se a necessidade de observar essas projeções com cautela uma vez que seu objetivo é dar indicações gerais dos possíveis locais onde ocorrerá esta expansão e não apontar exatamente onde serão as novas plantações de cana-de-açúcar. A etapa de validação é entendida neste trabalho como um procedimento padrão a fim de informar a performance do modelo com o objetivo final de “*melhorar modelos sobre o fenômeno estudado*” (PONTIUS; HUFFAKER; DENMAN, 2004, p.458)

5.7 Projeções da Área de Cana-de-Açúcar na UGRHI 13 para o ano de 2019

O modelo GEOMOD tem como um de seus requisitos informar a quantidade de células dos estados 1 e 2 no instante final da projeção.

Para realizar a quantificação da área de plantações de cana-de-açúcar em 2019, foram utilizados os seguintes dados:

- Projeção da UNICA (2008) apresentada na Tabela 1;
- Área plantada no estado de São Paulo e na UGRHI 13;
- Participação do estado de São Paulo na área plantada do Brasil no período de 2003 até 2011;
- Participação da UGRHI 13 na área de expansão da cana-de-açúcar do estado de São Paulo no período de 2003 até 2011;

A Tabela 16 contém os dados utilizados. Observa-se que São Paulo teve uma participação de 56,58% na área de expansão de cana-de-açúcar brasileira no período de 2003 até 2011. Já a UGRHI 13 teve uma participação de 4,66% na área de expansão do estado de São Paulo no período estudado. Apesar da projeção da UNICA (2008) ser para o ano de 2020, considerou-se que a diferença de um ano em relação à projeção para 2019 não seria significativa.

Tabela 16 – Dados utilizados para o cálculo da área projetada na UGRHI 13 para 2019

Caracterização do dado	Área em ha
Área plantada com cana-de-açúcar no Brasil em 2003	5377216
Área plantada com cana-de-açúcar no Brasil em 2011	9616615
Área de expansão do Brasil no período 2003-2011	4239399
Área plantada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em 2003	2817604
Área plantada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em 2011	5216491
Área de expansão do Estado de São Paulo no período 2003-2011	2398887
Participação do Estado de São Paulo na área de expansão do Brasil no período 2003-2011	56,58%
Projeção de área plantada para o Brasil em 2020 (UNICA, 2008)	13.900.000
Área de expansão do Brasil no período 2011-2020	4283385
Área de expansão de São Paulo no período 2011- 2020 (mantida a mesma participação no período 2003-2011)	2423539
Área plantada com cana-de-açúcar na UGRHI13 em 2003	356388
Área plantada com cana-de-açúcar na UGRHI13 em 2011	468329
Área de expansão no período 2003-2011	111941
Participação da UGRHI 13 na área de expansão do estado de São Paulo	4,66%
Área de expansão da UGRHI 13 em 2019 (mantida a mesma participação do período anterior)	112936,91
Área plantada da UGRHI 13 em 2019	581265,91

Fonte dos dados: UNICADATA referenciando IBGE (2012)

Logo, se essa tendência de expansão for mantida dentro da UGRHI 13, em 2019, 581265,91 hectares, ou seja, 49,32% de sua área total estarão ocupados com cana-de-açúcar.

Para a geração da projeção, foram utilizadas as mesmas variáveis potenciais e restritivas do Teste 60. Apenas foram inseridas novas Usinas que apareceram no período e os dados de uso do solo foram atualizados para 2011. Sendo assim, um novo mapa de probabilidades de transição (Figura 29) alimentou o modelo para a geração da projeção das lavouras de cana-de-açúcar em 2019.

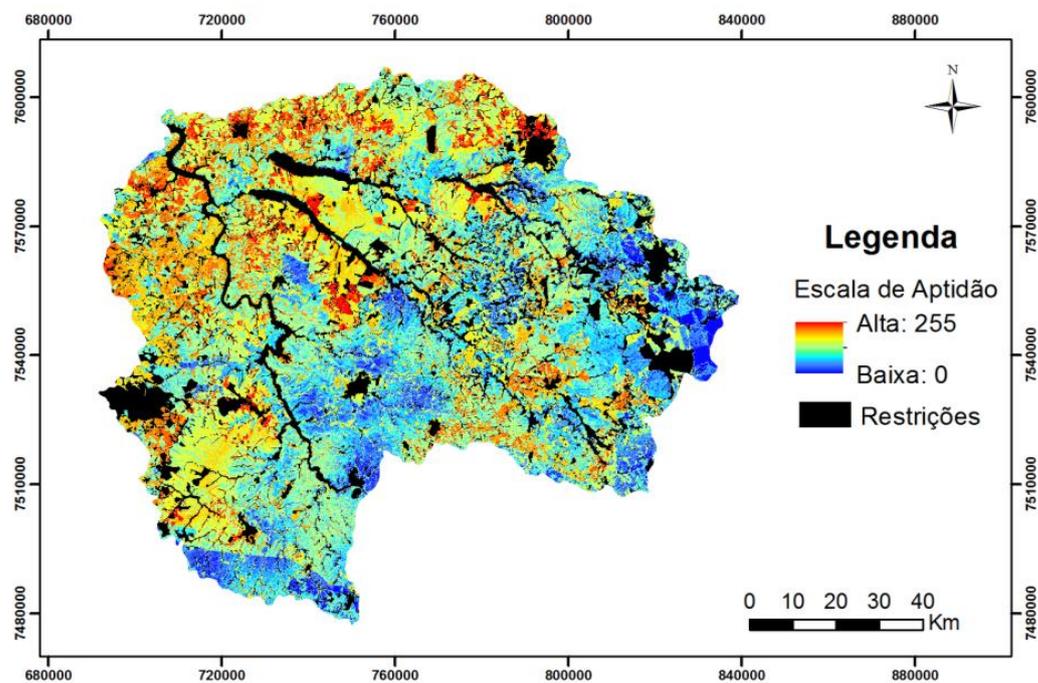


Figura 29 - Probabilidades de transição para 2019

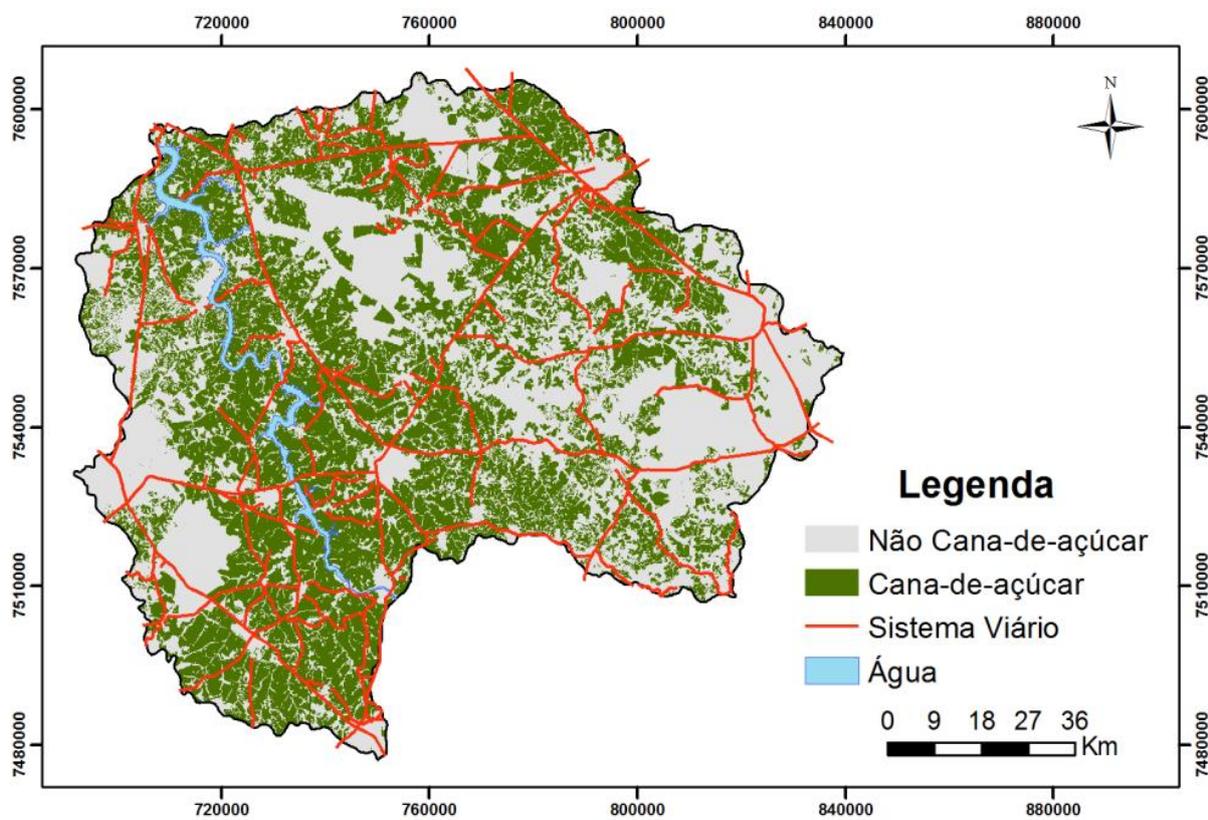


Figura 30 - Projeção da área plantada com cana-de-açúcar para 2019.

A análise da projeção gerada permite identificar regiões dentro da bacia com maior probabilidade de expansão de cana-de-açúcar, além de áreas onde já se encontra estabilizada, possibilitando aos gestores e mesmo aos planejadores municipais antecipar potenciais impactos sobre essa expansão. Observa-se, por exemplo, que os municípios de Arealva, Iacanga e Tabatinga apresentam as seguintes taxas de expansão para a cana: 159,83%, 115,40% e 115,40% (Figura 33). Também constata-se a presença de dois municípios ao oeste da bacia com altas taxas de expansão de cana-de-açúcar: Bauru (325,91%) e Agudos (99,26%) (Os dados de expansão por município estão no Apêndice C).

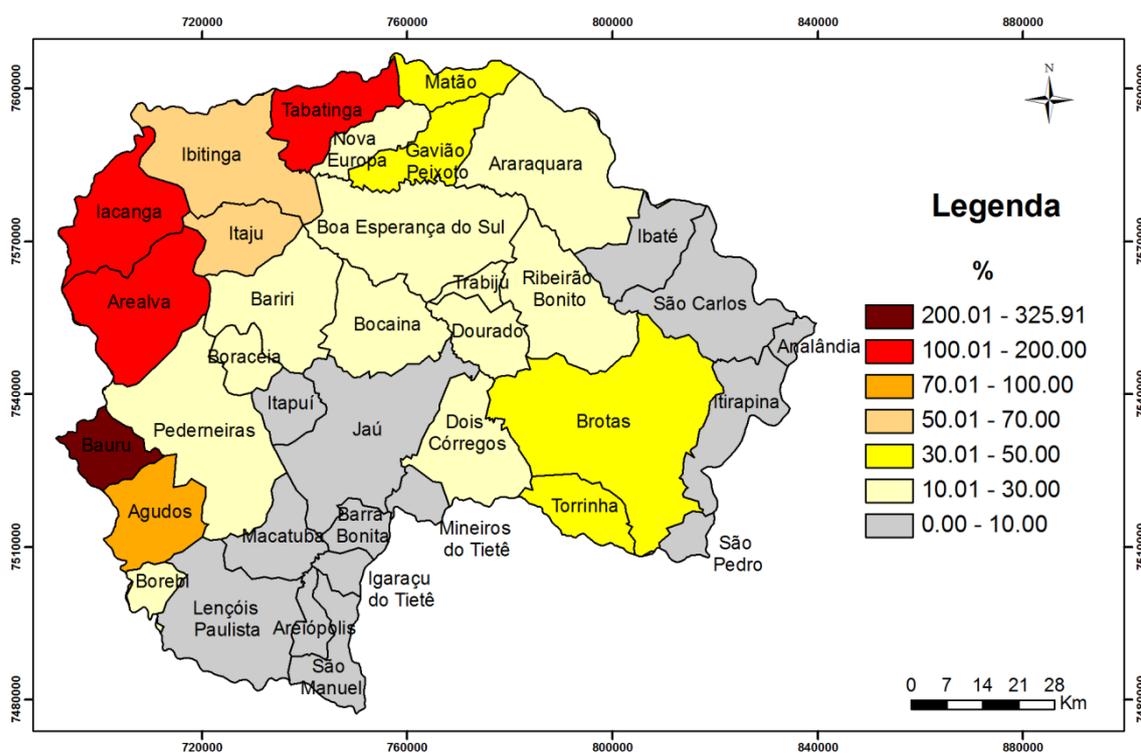


Figura 31 – Porcentagem de aumento da cana-de-açúcar em 2019 em relação à área plantada em 2011.

A região central da bacia apresenta baixa taxa de expansão uma vez que sua área já está densamente ocupada por esta cultura. Todavia, na região sudeste, destaca-se a ocupação de cana-de-açúcar para o período de 2011 a 2019 nos municípios de Brotas e Torrinhas cujas taxas de expansão ficaram em torno de 30% na projeção realizada.

A análise da projeção gerada permite afirmar que existe uma preferência da cana-de-açúcar pela região norte desta UGRHI ao mesmo tempo em que há uma estagnação da

expansão da cana-de-açúcar na região central da bacia. Também destaca-se as altas taxas de expansão nos municípios de Brotas e Torrinha.

O mapa de probabilidades de transição foi gerado atribuindo-se pesos baixos para as classes Laranja e Reflorestamento dentro da variável uso da terra. A projeção gerada reforça essa tendência acomodando 100% da expansão desta monocultura em áreas classificadas como não mapeadas (Figura 32 - caso não haja mudança no uso da terra no período de 2011 a 2019).

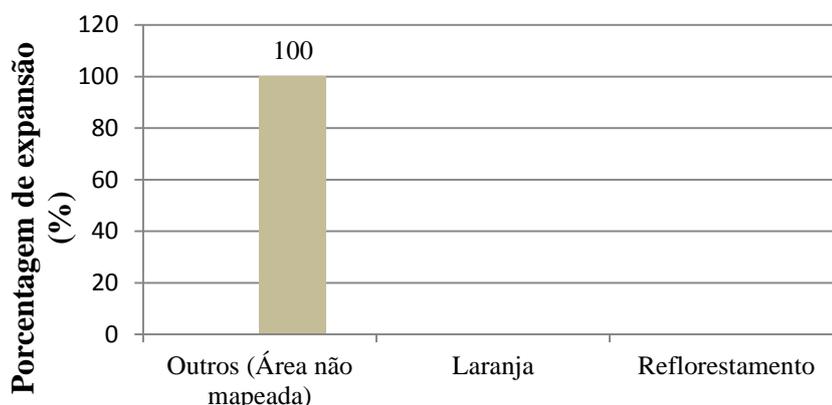


Figura 32 - Expansão da cana-de-açúcar x Uso da terra no período de 2011-2019

Estes são os principais limitantes da expansão da cana-de-açúcar dentro do território desta UGRHI (Com exceção das restrições utilizadas dentro do modelo). Estes tipos de uso do solo realmente são mais estáveis quando comparados às pastagens, por exemplo, entretanto, caso haja uma diminuição no faturamento gerado pelos mesmos quando comparados ao rendimento da cana-de-açúcar, estes também tendem a ser substituídos por esta cultura, devido, principalmente, ao número de usinas presentes na região.

Apesar do vetor da expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo apontar para a região oeste, conforme já mencionado, a crescente demanda por etanol/cana-de-açúcar tende a fomentar o aumento da produção desses produtos. Os empreendimentos da região, conseqüentemente, podem vir a elevar sua produção tanto através do aumento da área plantada quanto da produtividade desta cultura. Sendo assim, entende-se que se as usinas da região apresentarem índices maiores de crescimento do que no período estudado, poderá haver substituição destes tipos de uso em escala maior do que àquela adotada nesta pesquisa.

Considerando a localização dos novos canaviais em relação às áreas urbanas, constatou-se que 5,69% das novas áreas estarão a uma distância de até 500 metros de áreas urbanas identificadas em 2011 (Figura 33).

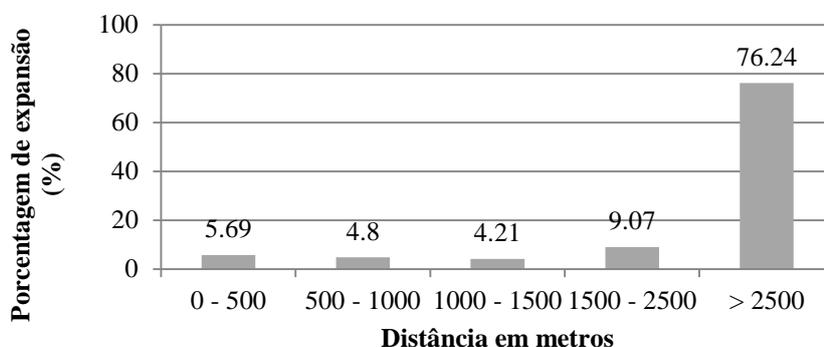


Figura 33 - Expansão da cana-de-açúcar em relação às Áreas Urbanas

Considerando apenas a distância de áreas urbanas até 500 metros, identificou-se que os municípios de Araraquara, Ibitinga e Pederneiras concentrarão aproximadamente 50% dessa expansão (Apêndice D). Este é um ponto importante, pois, a proximidade dos canaviais das áreas urbanas gera insegurança para a população, sendo frequentes relatos de crimes nessas áreas.

Quanto às unidades de conservação presentes no território desta UGRHI, a expansão da cana-de-açúcar ocorrerá majoritariamente a uma distância maior que 2,5 km das mesmas, como se pode observar na Figura 34. A área localizada no entorno de unidades de conservação deve ter seu uso do solo controlado de forma a criar um filtro a fim de minimizar os efeitos de atividades antrópicas nos ecossistemas naturais dentro de áreas protegidas (VITALLI; ZAKIA; DURIGAN, 2009).

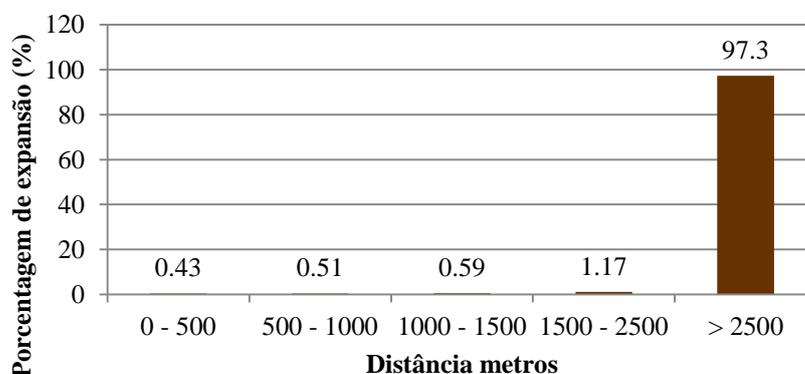


Figura 34 - Expansão da cana-de-açúcar em relação às Unidade de Conservação

Sendo assim, identifica-se uma oportunidade para a utilização da modelagem dentro do contexto do planejamento ambiental através da avaliação dos impactos dessa expansão nas zonas de amortecimento das Unidades de conservação. As informações geradas podem auxiliar os gestores dessas Unidades a demonstrarem com maior segurança os impactos dentro de suas áreas suscitando discussões mais aprofundadas e subsidiando ações preventivas.

Neste contexto, no item 5.8 será explorado o potencial da modelagem da cana-de-açúcar junto ao planejamento ambiental no âmbito de dois instrumentos da política ambiental: o Plano de Bacia hidrográfica e Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro.

5.8 Aplicação de técnicas de modelagem para projeção de alterações no uso do solo como suporte ao Planejamento Ambiental

5.8.1 Plano de Bacia e a expansão da cana-de-açúcar em 2019

De acordo com Santos (2004), o planejamento ambiental:

[...]consiste na adequação de ações à potencialidade, vocação local e a sua capacidade de suporte, buscando o desenvolvimento harmônico da região e à manutenção da qualidade do ambiente físico, biológico e social (SANTOS, 2004, p.28).

As principais etapas do planejamento ambiental são: Definição de objetivos, Inventário, Diagnóstico, Prognóstico, Tomada de Decisão e Formulação de Diretrizes (SANTOS, 2004). A autora aponta que a etapa de prognóstico objetiva a “*construção de cenários, modelagem e simulação, análise e agrupamentos*”. Logo, as informações geradas pela modelagem da expansão da cana-de-açúcar podem subsidiar esta etapa do planejamento, sobretudo com enfoque ambiental, pois, a ferramenta de modelagem permite a construção de diferentes cenários através da alteração dos padrões fornecidos ao modelo GEOMOD.

Conforme Montaño (2005), a utilização conjunta dessas informações com instrumentos de política ambiental constitui uma abordagem preventiva em relação aos possíveis impactos ambientais relacionados à ocupação do território. No contexto da UGRHI 13, cujas plantações de cana-de-açúcar já ocupam 39,74% de seu território e, conforme as

projeções realizadas, ocuparão 49,32% em 2019, aponta-se a necessidade de se ponderar as consequências desta expansão em relação às fragilidades e potencialidades ambientais da bacia.

As informações geradas podem ser utilizadas durante a elaboração do Plano de Bacia desta UGRHI, por exemplo. Estes planos, também chamados de plano de recursos hídricos, são um dos principais instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos. Conforme Peres e Silva, (2010), os planos de bacia podem ser considerados planos diretores cujo objetivo é “*definir objetivos, diretrizes, critérios e intervenções ou ações necessárias para o gerenciamento dos recursos hídricos*” (CPTI-CBH-TJ, 2008, p.6).

O conteúdo do plano de bacia deve abranger diagnósticos gerais e específicos, (incluindo material cartográfico e estimativas de disponibilidade/qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, quantificação das demandas urbanas, rurais e industriais) e Prognósticos, que devem contemplar projeções de população e demandas diversas, além da proposição de cenários com objetivos, metas e definição de indicadores de acompanhamento (SÃO PAULO, 2006).

Neste sentido, as informações como as apresentadas nesta pesquisa, resultantes da projeção da expansão da cana-de-açúcar nesta bacia, podem contribuir para o Comitê de bacia nas discussões acerca da avaliação das demandas hídricas e potenciais impactos desta monocultura dentro da UGRHI 13 e, em especial, nos municípios localizados na região norte da bacia. Antecipando essa demanda, o Comitê possui mais elementos para discutir as projeções relacionadas à demanda rural, não só no quesito numérico, mas também espacial.

Como indicado na Tabela 17, os municípios da bacia que apresentaram altas taxas para a expansão da cana são classificados como de média e alta suscetibilidade à erosão, segundo dados da Secretaria de Meio Ambiente do estado de São Paulo⁹ (2007 *apud* CPTI-CBH-TJ, 2008). Essa situação é preocupante uma vez que o manejo desta cultura propicia condições para a ocorrência de processos erosivos, causando inclusive prejuízos econômicos (ANDRADE et al., 2011).

Tabela 17 - Suscetibilidade à erosão nos municípios da UGRHI 13

Município	Classe
Agudos	Alta
Araraquara	Baixa
Arealva	Média
Areiópolis	Baixa
Bariri	Baixa

⁹ SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (SMA). **Relatório de Qualidade Ambiental do Estado de São Paulo**. SMA, 2007.

Tabela 17 - Suscetibilidade à erosão nos municípios da UGRHI 13

Município	Classe
Barra Bonita	Média
Bauru	Alta
Boa Esperança do Sul	Média
Bocaina	Média
Boracéia	Baixa
Borebi	Média
Brotas	Média
Dois Córregos	Média
Dourado	Média
Gavião Peixoto	Média
Iacanga	Média
Ibaté	Média
Ibitinga	Alta
Igaraçu do Tietê	Baixa
Itaju	Alta
Itapuí	Baixa
Itirapina	Média
Jaú	Baixa
Lençóis Paulista	Baixa
Macatuba	Baixa
Mineiros do Tietê	Média
Nova Europa	Baixa
Pederneiras	Média
Ribeirão Bonito	Média
São Carlos	Alta
São Manuel	Média
Tabatinga	Média
Torrinha	Média
Trabiju	Média
Analândia	Não classificado
São Pedro	Não classificado
Matão	Não classificado

Fonte: SMA (2007) *apud* CPTI-CBH-TJ (2008)

Isso porque o plantio da cana-de-açúcar é anual, expondo o solo ao intemperismo e à erosão, e possibilitando que estas partículas sejam depositadas nos cursos d'água (CPTI-CBH-TJ, 2008). A irrigação para o aumento de produtividade desta cultura também representa um sério problema uma vez que envolve tanto a questão da demanda hídrica quanto da poluição difusa, a qual pode não só carregar partículas sólidas como também compostos químicos, atuando neste caso como precipitação (CPTI-CBH-TJ, 2008).

No que tange aos prognósticos, esses dados contribuem para o cálculo da demanda hídrica que será utilizada por esta monocultura em cada município, a fim de verificar se os mesmos comportam tal expansão até 2019.

Isto é importante uma vez que a UGRHI 13 figura como a 6^a colocada na demanda rural por água no estado de São Paulo. O fato de algumas usinas sucroalcooleiras terem optado pelo “sistema hidráulico fechado” para a redução no consumo de água contribuiu para a diminuição da demanda por água superficial nesta UGRHI 13 (CBH-TJ, 2012). Por outro lado, a cana-de-açúcar tem aparecido como uso importante no aumento da demanda por águas subterrâneas dentro desta UGRHI (CBH-TJ, 2012). Inclusive, o Relatório de Situação de 2012 dessa bacia enfatiza a necessidade do Comitê de Bacia criar critérios para o uso dos recursos hídricos devido a sua situação crítica (CBH-TJ, 2012).

As informações geradas pela modelagem também podem contribuir para a escolha das áreas de trabalho de campo para avaliação/monitoramento de processos erosivos. Um estudo aprofundado da situação dos processos erosivos nessa UGRHI é recomendado pelo Plano de bacia, que aponta a necessidade de visitas de campo e questionários para avaliar e quantificar os processos erosivos nesta UGRHI (CPTI-CBH-TJ, 2008).

Quanto à vegetação, as projeções geradas consideraram que a expansão da cana-de-açúcar não ocorrerá em território ocupado por vegetação. Entretanto, ressalta-se que esta monocultura tem grande potencial de causar impactos na vegetação devido à ocorrência do efeito de borda. WWF Brasil (2008) aponta a necessidade de um planejamento para a minimização dos impactos causados por essa cultura, além da realização de novos estudos para definição de corredores ecológicos e a conexão de fragmentos utilizando APPs e áreas de reserva legal.

Entende-se, assim, que este tipo de estudo seria muito benéfico para esta UGRHI no sentido de conservar e aumentar a área de matas nativas para não só beneficiar elementos da fauna e flora como também os recursos hídricos da região.

5.8.2 Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro e a expansão da cana-de-açúcar em 2019

Outro instrumento que pode utilizar as informações geradas pela modelagem no momento de sua revisão é o Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro para este setor (item 5.1). A sobreposição de suas classes com a projeção gerada nesta pesquisa possibilita a identificação daquelas classes com maior taxa de expansão até 2019. A Tabela 18 apresenta as classes do zoneamento e a taxa de ocupação enquanto que as Figuras 35 e 36 ilustram as classes desse zoneamento dentro da UGRHI 13 e a expansão apontada na Tabela 18.

Tabela 18 - Área plantada em 2019 em função do Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro

ÁREA (ha) / CLASSES DE APTIDÃO	Adequada	Adequada com limitações	Adequada com restrições	Inadequada
Área plantada com cana-de-açúcar em 2011 (ha)	234807.75	63577.5	164696	5246.75
Área plantada com cana-de-açúcar em 2019 (ha)	279357.5	76310.25	219422.25	6175.25
<i>Expansão (%): 2011-2019</i>	<i>18.97%</i>	<i>20.03%</i>	<i>33.23%</i>	<i>17.70%</i>

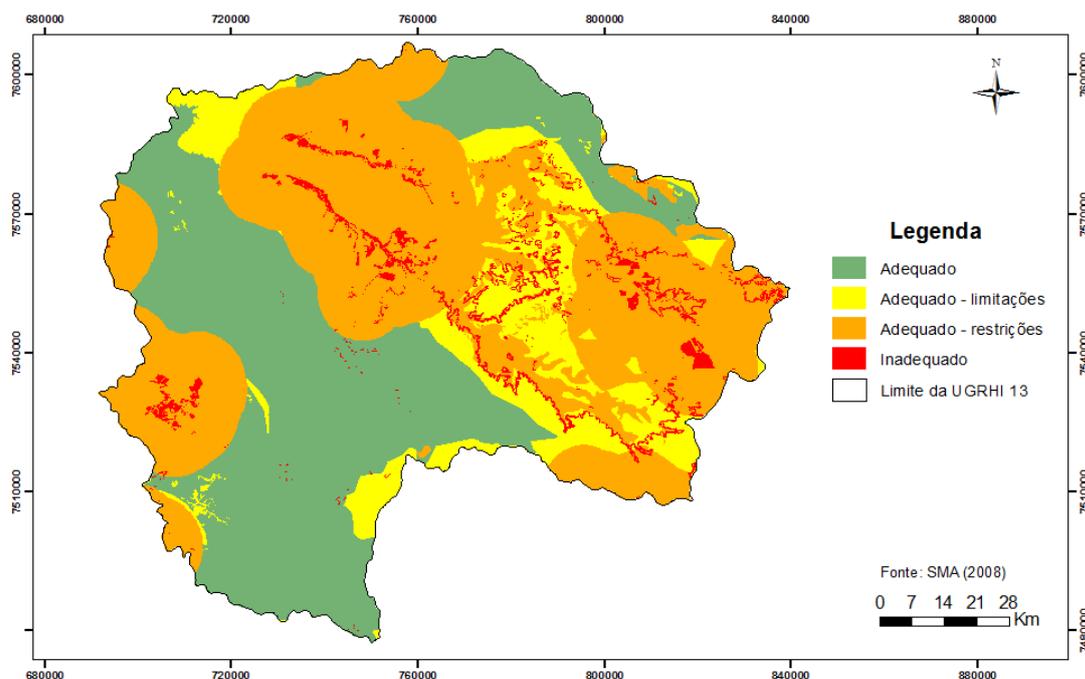


Figura 35 – Zoneamento Agroambiental Sucroalcooleiro na UGRHI 13

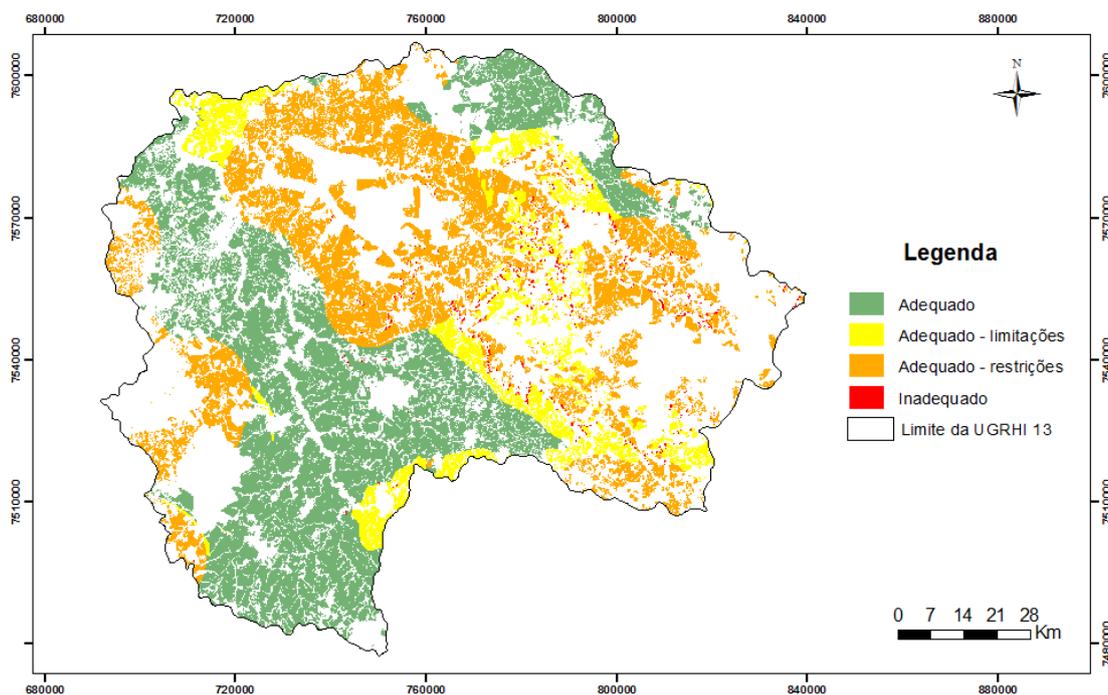


Figura 36 – Área de cana-de-açúcar em 2019 em função das classes do Zoneamento Agroambiental para o Setor Sucroalcooleiro

O aumento da área plantada com cana-de-açúcar na classe Adequada representou e 18,97%. Importante destacar que, com exceção da classe Inadequada, esta é a classe com menor taxa de expansão e mesmo sendo adequada, a expansão da cana não deve ser ilimitada devido aos inúmeros impactos associados à mesma, que podem afetar serviços ecossistêmicos essenciais para a sociedade (JORDÃO, 2011).

A classe Adequada com restrições é àquela onde ocorre a maior taxa de expansão no período projetado 2011, sendo 33,23%. Essa classe envolve áreas com alta prioridade para o incremento da conectividade indicadas pelo Biota-FAPESP, zonas de amortecimento de Unidades de Proteção Integral e áreas de alta vulnerabilidade de águas subterrâneas do estado de São Paulo (IG-CETESB-DAEE-1997). Sendo assim, a possibilidade de realizar um estudo aprofundado dos potenciais impactos ambientais provocados por esta monocultura nessas áreas caracteriza-se como uma ação preventiva e benéfica tanto para as UPIs envolvidas quanto para a gestão desses recursos dentro da UGRHI, tal como foi apontado anteriormente.

A ocupação da classe Adequada com limitações apresenta um aumento de 20,03% em relação à área ocupada com cana-de-açúcar nesta classe em 2011. Para esta situação, poderia ser incorporado o mecanismo de restrição ao consumo de água tal como acontece na classe Adequada com restrições, uma vez que os recursos hídricos desta UGRHI já se encontram em estado crítico (GOMES e MONTAÑO, 2012; CBH-TJ, 2012).

A expansão dos canaviais na classe Inadequada foi de 17,70% em relação a 2011. Apesar de preocupante, é improvável que a expansão constatada aconteça, uma vez que não se concede licença para a instalação/ampliação de empreendimentos nessa classe (RESOLUÇÃO SMA, 2008). E para os empreendimentos já instalados, exige-se a apresentação de um plano de adequação atendendo os requisitos da classe Adequada com Restrições Ambientais.

A modelagem também contribui para a identificação de variáveis potenciais do fenômeno estudado. No caso da expansão da cana-de-açúcar, constatou-se que a Distância das Usinas é um fator essencial para a localização dos novos canaviais. Neste sentido, Brunini et al. (2008) apontam que será desenvolvido um índice de saturação ambiental que especificará um número adequado de usinas e/ou área plantada por bacia hidrográfica do Estado de São Paulo (BRUNINI et al., 2008).

Aplicada em conjunto com este índice, a modelagem poderia indicar, por exemplo, eventuais bacias que estarão em conflito em determinado período de tempo, o que poderia dar suporte à discussão sobre a viabilidade de implantação/ampliação de empreendimentos em casos nos quais a bacia já está ou estará saturada no período de tempo da projeção.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a aplicabilidade de um modelo de uso do solo para o fenômeno da expansão da cana-de-açúcar na UGRHI 13 em conjunto com instrumentos de política ambiental. Para tal, empregou-se o modelo GEOMOD disponível no SIG IDRISI TAIGA como ferramenta para a elaboração de um cenário futuro de expansão da cana sobre o território de estudo, cotejando-o posteriormente com algumas diretrizes preconizadas pelo Zoneamento Agroambiental para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e pelo Plano de bacia hidrográfica da UGRHI 13.

A avaliação multicritério, método escolhido para a elaboração do mapa de aptidão do território para a cultura da cana, mostrou-se muito versátil no sentido de permitir a realização de diferentes testes, alterando as combinações e os pesos atribuídos às variáveis. Assim, foi possível identificar que o fenômeno estudado - a expansão da cana sobre o território da bacia - tem maior relação com um dado conjunto de variáveis dentre aquelas que foram selecionadas para a sua análise.

Com relação à escolha de novas áreas para o cultivo da cana, constatou-se que está relacionada ao atendimento de critérios edafoclimáticos e infraestruturais. Obviamente que o custo da terra também é avaliado, entretanto, em locais como o Estado de São Paulo e a UGRHI 13 onde, em sua maioria, as condições edafoclimáticas são adequadas, a infraestrutura aparece como um elemento que compensa o maior custo quando a terra está ocupada por outro tipo de uso, por exemplo.

A combinação que apresentou o melhor desempenho para a explicação do fenômeno incluiu as variáveis: Pedologia, Uso da terra, Condições Edafoclimáticas, Declividade e Distância das usinas, sendo atribuído o mesmo peso para todas elas no mapa de probabilidades de transição. Uma possível justificativa para que tal situação tenha sido a de melhor desempenho é o fato de que, na escala dos dados trabalhados nesta pesquisa praticamente todo o território da UGRHI 13 é adequado, tanto do ponto de vista edafoclimático quanto infraestrutural, ou seja, não há grandes áreas que não poderiam ser ocupadas por esta cultura. Sendo assim, quando todas as variáveis têm o mesmo peso, os locais escolhidos pela expansão da cana-de-açúcar refletem com mais fidelidade a realidade quando comparado à situação na qual pesos diferentes são atribuídos às variáveis potenciais.

Na etapa de validação, identificou-se a falta de consenso da comunidade científica nesta área, devido à existência de vários índices diferentes e mesmo concepções diferentes desta etapa. Isso dificulta a validação do modelo, pois, apesar da necessidade de se considerar a especificidade do fenômeno, os índices e definições são tantos que pode gerar confusão.

Quanto ao desempenho do modelo GEOMOD, o melhor teste apresentou Figura de Mérito de 17,62%, sendo que 9,49% da área total da UGRHI 13 foi convertida para cana-de-açúcar no período estudado. Neste sentido, apesar de baixo, o Figura de Mérito alcançado está próximo àqueles calculados por Pontius et al. (2008) para situações nas quais o fenômeno estudado ocupou 10% da área total da paisagem. Segundo os autores, este indicador de desempenho (Figura de Mérito) tende a apresentar valores em torno de 15% em situações nas quais apenas 10% da paisagem se altera por determinado fenômeno.

Na projeção realizada para 2019, 49,32% da área de estudo é ocupada por cana-de-açúcar. Optou-se por assumir que a UGRHI 13 manteria a mesma participação do período de 2003 até 2011 na área de expansão do estado de São Paulo, uma vez que esta UGRHI já possui 39,74% de sua área ocupada em 2011. Outra razão para manter a mesma participação está no fato de que, atualmente, o vetor da cana-de-açúcar do estado de São Paulo aponta para a região noroeste deste estado, portanto, sendo, pouco provável que esta UGRHI aumente sua participação na área de expansão do estado.

As limitações das projeções efetuadas por modelos de uso do solo devem ser claras para aqueles que utilizarão o modelo. No caso desta pesquisa, devido ao baixo desempenho no índice Figura de Mérito e seu desempenho inferior ao modelo nulo na resolução inicial, entende-se que as projeções deste modelo devem ser observadas com cautela, enfatizando-se que são dados espaciais regionais, sem o objetivo de indicar a localização exata das novas plantações no período de 2011 até 2019.

A projeção realizada indica que os municípios localizados na área norte da bacia terão as maiores taxas de expansão em relação à área plantada de cana-de-açúcar em 2011. Também foi possível inferir que as conversões de uso da cana-de-açúcar para Laranja e Reflorestamento não acontecerão no período 2011-2019.

Na elaboração do Plano de Bacia, os dados a respeito da expansão da cana-de-açúcar para 2019 poderiam contribuir nas discussões acerca do impacto desta monocultura dentro do território desta UGRHI, em especial nas considerações acerca da demanda hídrica rural e no monitoramento de processos erosivos, uma vez que em 2019 a cana-de-açúcar passará a ocupar 49,32% da área total da bacia.

No contexto do Zoneamento Agroambiental, a modelagem indicou que a classe Adequada com Restrições é aquela na qual haverá maior taxa de ocupação no período de 2011 a 2019, seguida da classe Adequada com Limitações. Essas informações contribuem para a realização de estudos preventivos específicos acerca dos elementos que compõe estas classes, além de possibilitar medidas de contenção da expansão da cana-de-açúcar nestas classes.

Os dados gerados pela modelagem suscitam a questão: a expansão da cana-de-açúcar da forma como tem acontecido é o que queremos para o futuro? Os dados fornecidos por modelos de uso do solo, como os gerados nesta pesquisa, podem subsidiar processos de avaliação de impacto ambiental, inclusive contemplando restrições de caráter ambiental para a expansão da monocultura. O uso de ferramentas deste tipo, então, apresenta argumentos consistentes que podem ter maior influencia na tomada de decisão.

Por fim, constatou-se que a aplicação de modelos de uso do solo para a projeção do fenômeno da cana-de-açúcar apresenta-se como prática promissora que pode ser integrada ao planejamento ambiental da expansão desta cultura dentro do território paulista, sendo, entretanto, necessário melhorar a performance do modelo elaborado a fim de gerar informações mais confiáveis para os tomadores de decisão.

Recomendações para trabalhos futuros

- Identificação de novas variáveis potenciais e restritivas da expansão da cana-de-açúcar;
- Aplicação de outros modelos de uso do solo para prospecção do fenômeno da expansão da cana-de-açúcar, inclusive considerando um intervalo maior de tempo entre os instantes t_1 e t_2 , por exemplo, 1990 e 2011;
- Realização de um estudo no qual cenários são elaborados e avaliados com a participação de representantes do setor sucroalcooleiro e do Comitê de Bacia da UGRHI 13.

REFERÊNCIAS

ADAMI, M. et al. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2 abr. 2012.

AMARAL, E. F. et al. Aptidão do solos do Acre para o cultivo da cana-de-açúcar. **Comunicado Técnica Embrapa**, v. 143, p. 1-6, 2001.

ANDRADE, NILO.S.F. et al. Impacto Técnico e Econômica das perdas de solo e nutrientes por erosão no cultivo da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 539-550, 2011.

BARROS, G. S. DE C.; MORAES, M. A. F. D. A Desregulamentação do Setor Sucroalcooleiro. **Revista de Economia Política**, v. 22, n. 86, p. 156-173, 2002.

BRANCO, J. E. H. **Avaliação das localidades ótimas para expansão da oferta de cana-de-açúcar no Brasil: uma aplicação de programação inteira mista**. 2012. 247 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. BRASÍLIA: MME: EPE, 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Energia 2020**. BRASÍLIA: MME: EPE, 2011.

BRASIL. MINISTÉRIOS DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA(MCT). **Rede Temática de Pesquisa e Modelagem na Amazônia (GEOMA)**. Projeto científico e institucional.2002.. Disponível em: < www.geoma.lncc.br >. Acesso em: 10 jun. 2011.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, parágrafo 1º, incisos I, II, III e VII da CF, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm>. Acesso em: 15 mai 2013.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Convenção sobre a Biodiversidade Biológica**. Brasília, 2000. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biodiversidade/convencao-da-diversidade-biologica>>. Acesso em: 20 maio 2013.

BRASIL. **Governo anuncia medidas de incentivo para o setor sucroalcooleiro e indústria química**. 22 de abril de 2013. Disponível em:

<<http://www2.planalto.gov.br/imprensa/noticias-de-governo/governo-anuncia-medidas-de-incentivo-para-setor-sucroalcooleiro-e-industria-quimica>>. Acesso em: 30 abril 2013.

BRUNINI, O. et al. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo: aptidão edafoclimática da cultura da cana-de-açúcar**. Disponível em:

<[http://www.ciiagro.sp.gov.br/zoneamento/2008/ZONEAMENTO DE CULTURAS BIOENERGÉTICAS NO ESTADO DE SÃO PAULO_2.pdf](http://www.ciiagro.sp.gov.br/zoneamento/2008/ZONEAMENTO_DE_CULTURAS_BIOENERGÉTICAS_NO_ESTADO_DE_SÃO_PAULO_2.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2013.

CARMO, V. B. DO. Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar – fase industrial. In: Workshop Programas de Pesquisas em Políticas Públicas, 2008, Campinas. **Anais...** Campinas: 2008.. Disponível em:

<http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/position_paper_painel3_vadson.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2013.

CAMARGO, A. M. M. P. et al. Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias, Estado de São Paulo, 2001-2006. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.38, n. 3, mar. 2008.

CAMPOS, F. F. DE; MATIAS, L. F. Mapeamento das áreas de Preservação Permanente (APPs) e sua situação de uso e ocupação no município de Paulínia (SP). **Geociências**, v. 31, n. 3, p. 309-319, 2012.

CETESB. **Publicação eletrônica** [mensagem contendo tabela com as licenças emitidas para usinas de açúcar e álcool no período de 2003 a 2008]. 19 jan. 2013

CERQUEIRA LEITE, R. C. DE et al. Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? **Energy**, v. 34, n. 5, p. 655-661, maio. 2009.

CHEN, H.; PONTIUS, R. G. Diagnostic tools to evaluate a spatial land change projection along a gradient of an explanatory variable. **Landscape Ecology**, v. 25, n. 9, p. 1319-1331, 11 ago. 2010.

CLAESSENS, L. et al. Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 129, n. 1-3, p. 157-170, jan. 2009.

COELHO, S. T. et al. sustentabilidade da expansão da cultura canavieira. **Cadernos Técnicos da Associação Nacional de Transportes Públicos**, v. 6, p. 13, 2007.

COMITE DE BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ/JACARÉ (CBH-TJ). **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia do Tietê/Jacaré – UGRHI 13**. Ano base 2011. 2012.

COMITE DE BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ/JACARÉ (CBH-TJ). **Fundamentos de Cobrança – UGRHI 13**. Araraquara. 2009.

COOPERATIVA DE SERVIÇOS, PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS (CPTI). COMITE DE BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ/JACARÉ (CBH-TJ). **Elaboração da Revisão do Plano de Bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Tietê/Jacaré (UGRHI 13)**. Relatório Técnico N° 402. 2008.

DITT, E. H. et al. Defying legal protection of Atlantic Forest in the transforming landscape around the Atibainha reservoir, south-eastern Brazil. **Landscape and Urban Planning**, v. 86, n. 3-4, p. 276-283, jun. 2008.

EPA. **Projecting Land Use Change: A Summary of Models for Assessing the Effects of Community Growth and Change on Land Use Patterns**. EPA/600/R-00/098. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, O.H, 2000. 260 p.

EASTMAN, J.R. **Idrisi Taiga: Guide to GIS and image processing**. Worcester: Clark Labs, Clark University, 2009a, 325p.

EASTMAN, J.R. **Idrisi Taiga: Tutorial Version 16.02**. Worcester: Clark Labs, Clark University, 2009b, 333p.

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Árvore do Conhecimento – Cana-de-açúcar (Solo)**. 2011a. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html>. Acesso em: 10 mai 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Árvore do Conhecimento – Cana-de-açúcar (Clima)**. 2011b. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_10_711200516716.html>. Acesso em: 10 mai 2013.

ESTOQUE, R. C.; MURAYAMA, Y. Examining the potential impact of land use/cover changes on the ecosystem services of Baguio city, the Philippines: A scenario-based analysis. **Applied Geography**, v. 35, n. 1-2, p. 316-326, nov. 2012.

FAO. Food and Agriculture Organization. **Countries by Comodity – Sugarcane/2011**. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em: 15 mai 2013.

FARINA, E. **Palavra da Presidente: Um futuro Promissor**. UNICA, 2012. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/palavra-do-presidente/18631428920319334644/um-futuro-promissor/>>. Acesso em: 20 jan 2013.

FELTRAN-BARBIERI, R. et al . Expansão do etanol: diagnóstico no mosaico da paisagem rural no sudoeste de Goiás. In: PAESE, A.; UEZU, A.; LORINI, M.L.; CUNHA, A. (Orgs.). **Conservação da Biodiversidade com SIG**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012, p. 211-221.

FIGUEIREDO, R. **Gargalos Logísticos na Distribuição de Combustíveis Brasileira**. São Paulo: Fórum Logística, 2006. Disponível em: <http://www.forumlogistica.net/site/new/art_Gargalos_Logisticos_na_dist_de_combust.pdf > Acesso em: 22 jan 2013.

FIGUEIREDO, E. B.; LA SCALA, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 141, n. 1-2, p. 77-85, abr. 2011.

FOLEY, J. A et al. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570-4, 22 jul. 2005.

FREITAS, L. C.; KANEKO, S. Ethanol demand under the flex-fuel technology regime in Brazil. **Energy Economics**, v. 33, n. 6, p. 1146-1154, 2011.

GALLARDO, A. L. C. F.; BOND, A. Capturing the implications of land use change in Brazil through environmental assessment: Time for a strategic approach? **Environmental Impact Assessment Review**, v. 31, n. 3, p. 261-270, abr. 2011.

GAUDER, M.; GRAEFF-HÖNNINGER, S.; CLAUPEIN, W. The impact of a growing bioethanol industry on food production in Brazil. **Applied Energy**, v. 88, n. 3, p. 672-679, mar. 2011.

GLEHN, H. C. Uso do Solo e Biodiversidade. In: Workshop Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-açúcar, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/position_paper_painel2_helena.pdf>. Acesso em: 01 jun 2011.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, n. 6, p. 2086-2097, jun. 2008.

GOMES, P.M.; MONTAÑO, M.; CABRAL, P. Aplicação de Diferentes Técnicas para a Caracterização da Expansão da Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 15, 2013, Vitória (ES). **Anais do Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada [recurso eletrônico]**. Vitória : UFES. 1983. p. 126-134.

GOMES, P. M.; MONTAÑO, M. A Expansão da cana-de-açúcar e o Zoneamento Agroambiental do setor Sucroalcooleiro do estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Avaliação de Impacto e Conferência da REDE de Língua Portuguesa de Avaliação de Impactos, 1 e 2, 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2012. Disponível em: <http://avaliacaodeimpacto.org.br/wp-content/uploads/2012/10/068_zoneamento.pdf> Acesso em: 01 jul 2013.

GORDINHO, M. C. **Do álcool ao etanol: trajetória única**. 1. ed. São Paulo: Terceiro Nome. 145 p. 2010.

GUAN, D. et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 20-22, p. 3761-3772, out. 2011.

IACANGA. **Teve início a implantação de infraestrutura básica no conjunto habitacional Iacanga-B**. Assessoria de Imprensa: Prefeitura de Iacanga. 25 jul 2010. Disponível em: <<http://www.iacanga.sp.gov.br/index.php/noticias/infraestrutura/recap/646-teve-inicio-a-implantacao-de-infraestrutura-basica-no-conjunto-habitacional-iacanga-b>>. Acesso em: 20 mai 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). COMITE DE BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ/JACARÉ (CBH-TJ). **Relatório Zero UGRHI13: Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré**. Araraquara: CBH-TJ. 2000. 502 p. (Relatório nº 40.674).

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). MAPEAMENTO DA CANA DE AÇÚCAR VIA IMAGENS DE SATÉLITE (CANASAT). **Mapas e gráficos do estado de São Paulo – Cana-de-Açúcar. 2012**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/index.html>>. Acesso em: 15 jul. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Sensoriamento Remoto. TOPODATA. **Banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos/SP**. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/topodata>>. Acesso em: 1 nov. 2012.

JANK, M.S., **Etanol : benefícios, riscos e desafio**. O Estado de São Paulo, São Paulo, 6 de Novembro 2009, p. A2. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/palavra-do-presidente/4303397592039673243/etanol-beneficios-por-cento2C-riscos-e-desafios/>> Acesso em: 23 jan 2013

JORDÃO, C.O. **Análise da vulnerabilidade ambiental no planejamento espacial do cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2011.

KAMUSOKO, C. et al. Rural sustainability under threat in Zimbabwe – Simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. **Applied Geography**, v. 29, n. 3, p. 435-447, jul. 2009.

LAPOLA, D. M.; PRIESS, J. A.; BONDEAU, A. Modeling the land requirements and potential productivity of sugarcane and jatropha in Brazil and India using the LPJmL dynamic global vegetation model. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 8, p. 1087-1095, ago. 2009.

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.

LIMA, T. C. DE et al. DINAMICA EGO e *Land Change Modeler* para simulação de desmatamento na Amazonia brasileira: análise comparativa. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais... INPE**, 2013. p. 6379-6386. Disponível em:< <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0471.pdf> > Acesso em: 10 mai. 2013.

LUO, L.; VAN DER VOET, E.; HUPPES, G. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1613-1619, ago. 2009.

LUZ, A. M. S. A.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T. Expansão do cultivo de cana-de-açúcar em inconformidade ambiental com as áreas de preservação permanente de cursos d'água entre as safras 2004/2005 a 2009/2010. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...INPE**, 2013. p. 6448-6455. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0623.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2013.

MADEIRA, Marcio Giovanni C. (coord.) **Mapoteca de Unidades de Conservação Estaduais**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS, 2008.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 703-726, ago. 2006.

MANZATTO, C. V. et al. **Zoneamento Agroecológico da Cana-de Açúcar Expandir a produção , preservar a vida , garantir o futuro**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2009.

MAPA. **Perfil Do Setor Do Açúcar E do Álcool no Brasil**. Edição para a safra 2009-2010. DIRETORIA DE POLÍTICA AGRÍCOLA E INFORMAÇÕES, Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), 2012, 62p. Relatório Técnico.

MARTINELLI, L.A.; GARRETT, R.; FERRAZ, S.; NAYLOR, R. Sugar and ethanol production as a rural development strategy in Brazil: Evidence of the state of São Paulo. **Agriculture Systems**, v. 104, p. 419-428, 2011.

MARTINELLI, L. A; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America**, v. 18, n. 4, p. 885-98, jun. 2008.

MARTINS, V. N.; CABRAL, P.; SOUSA E SILVA, D. Urban modelling for seismic prone areas: the case study of Vila Franca do Campo (Azores Archipelago, Portugal). **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 12, n. 9, p. 2731-2741, 3 set. 2012.

MILANEZ, A. Y. et al. **Logística para o etanol : situação atual e desafios futuros**. BNDES SETORIAL 31, 2010, p49-98. Disponível em:
<http://www.bndespar.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/convencimento/bnset/set3102.pdf> Acesso em: 10 abril 2013.

MITSUTANI, C. **A Logística do Etanol de Cana-De-Açúcar no Brasil : Condicionantes e Perspectivas**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MONTAÑO, M. **A aplicação conjunta de método de projeção das no uso e ocupação do solo e de instrumentos de política ambiental: o caso do município de São Carlos (SP)**. 2005. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2005.

MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J. The alcohol program. **Energy Policy**, v. 27, n. 4, p. 229-245, abr. 1999.

MOREIRA, E. et. al. Dynamical coupling of multiscale land change models. **Landscape Ecology**, v. 24, p. 1183-1194, 2009.

MORAN-ORDONÉZ, A. et. al. Using predictive models as a spatially explicit support tool for managing cultural landscapes. **Applied Geography**, v. 31, p. 839 – 848, 2011.

NARDINI, R. C. et al. Analysis of land use and Occupancy in Permanente Preservation Areas According to the Hydrography of Ribeirão Água Fria Bofete, SP - Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 5, p. 944-950, 2012.

NASSAR, A. M. et al. Prospects of the Sugarcane Expansion in Brazil: Impacts on Direct and Indirect Land Use Allocation and Changes. In: Peter Zuurbier, Peter; de Vooren, Jos van (eds). **Sugarcane ethanol**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. Cap. 3. p.63-93.

NOVAES, A.G. **Modelos em Planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

NOVAES, J. R. P. Campeões de produtividade: dores e febres nos canaviais paulistas. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 167-177, 2007.

OLIVEIRA, F. S. DE et al. Identificação de Conflito de Uso da terra em Áreas de Preservação Permanente no entorno do Parque Nacional do Caparaó, Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 899-908, 2008.

OÑATE-VALDIVIESO, F.; BOSQUE SENDRA, J. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. **Journal of Hydrology**, v. 395, n. 3-4, p. 256-263, dez. 2010.

OVERMARS, K. P.; VERBURG, P. H.; VELDKAMP, T. (A. . Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model. **Land Use Policy**, v. 24, n. 3, p. 584-599, jul. 2007.

PAEGELOW, M.; OLMEDO, M. T. C.; TORIBIO, J. M. Cadenas de Markov, Evaluación Multicriterio y Evaluación Multiobjetivo para la Modelización Prospectiva Del Paisaje. **Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica**, n. 3, p. 22-44, 2003.

PARLAMENTO EUROPEU . CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2009/28/EC de 23 Abril de 2009, dispõe sobre a promoção do uso de energia renovável e revoga a Diretiva 2001/77/EC e 2003/30/EC. **Diário Oficial da União Europeia**, 05 jun. 2009a.

Disponível em:

<<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>>. Acesso em: 10 mai 2011.

PARLAMENTO EUROPEU. CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2009/30/EC de 23 de abril de 2009, altera a Diretiva 98/70/EC que dispõe sobre as normas de especificação de petróleo, gasolina e diesel e introduz um mecanismo de Monitoramento e redução de emissão de gases do efeito estufa e altera também a Diretiva 1999/32/EC modificando as normas dos combustíveis de navegação interna e que revoga a Diretiva 83/12/EEC. . **Diário Oficial da União Europeia**, 05 jun. 2009b. Disponível em:

<<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>>. Acesso em: 10 mai 2011.

PERES, R. B.; SILVA, R. S. DA. A relação entre Planos de Bacia Hidrográfica e Planos Diretores Municipais: Análise de Conflitos e Interlocuções visando Políticas Públicas Integradas In: Encontro Nacional da Anppas, 5, 2010, Florianópolis. **Anais...Florianópolis: 2010**. Disponível em: <<http://www.anppas.org.br/encontro5/cd/artigos/GT3-647-646-20100903160334.pdf>> . Acesso em: 10 jan. 2013.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T. Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane. **Natural Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 235-242, 21 ago. 2007.

PINTO, P. M. F. **Sistema de Apoio à Gestão das Zonas Costeiras Aplicação de um modelo para simulação do crescimento urbano no trecho Ovar-Mira**. 2008. 112 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Sistemas de Informação Geográfica) – Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

PIRES, A. **Falta de investimentos põe em xeque o mercado de etanol**. São Paulo, Brasil: UNICA. 05 ago 2011. Disponível em:

<<http://www.unica.com.br/opiniaio/show.asp?msgCode={186EBA9E-C253-4EE9-A9C4-9535AD063485}>>. Acesso em: 15 ago 2012.

PONTIUS, G. R.; MALANSON, J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 19, n. 2, p. 243-265, fev. 2005.

PONTIUS, CHEN, H. **Land Change Modeling with GEOMOD**. Clark University, 2006.

PONTIUS, R. G. et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. **The Annals of Regional Science**, v. 42, n. 1, p. 11-37, 16 ago. 2008.

PONTIUS, R. G.; CORNELL, J. D.; HALL, C. A. . Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 85, n. 1-3, p. 191-203, jun. 2001.

PONTIUS, R. G.; HUFFAKER, D.; DENMAN, K. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. **Ecological Modelling**, v. 179, n. 4, p. 445-461, dez. 2004.

PONTIUS, R. G.; MILLONES, M. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 15, p. 4407-4429, 10 ago. 2011.

PONTIUS, R.G.; SCHNEIDER, L. C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed , Massachusetts , USA. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p. 239-248, 2001.

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região centro-sul do brasil. **Encarte do Informações Agronômicas**, v. 110, p. 12-17, 2005.

RIBEIRO, N.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C. Expansão Sucroalcooleira no Estado De Goiás: Uma Análise Exploratória a Partir de Dados Sócio-Econômicos e Cartográficos. **Revista Geografia**, Rio Claro, SP, v.35, n. 2, p. 331-344,2008.

RINALDI, E.O. et. al. Licenciamento Ambiental e evolução do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo no período de 2008 a 2011. In: Congresso Brasileiro de Avaliação de Impacto e Conferência da REDE de Língua Portuguesa de Avaliação de Impactos, 1 e 2, 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2012. Disponível em: <http://avaliacaodeimpacto.org.br/wpcontent/uploads/2012/10/077_licenciamento_sucroalcooleiro.pdf> Acesso em: 01 jul 2013.

RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 9 abr. 2010.

SAATY, T. L. A Scaling Method for priorities in hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 281, p. 234-281, 1977.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T. Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego do Ipê , Ilha Solteira , SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 60-68, 2013.

SANTOS, R.F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. 1º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SÃO PAULO (Estado). Conselho Estadual de Recursos Hídricos- CRH. Resolução nº 62, de 4 de Setembro de 2006. Aprova prazo e procedimentos, para elaboração do Plano de Bacia Hidrográfica. **Diário Oficial Estadual**, São Paulo, 2006.

SÃO PAULO (Estado). Lei Estadual nº 11.241, de 19 de Setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas **Diário Oficial Estadual**, São Paulo, 19 set. 2002. Disponível em: <http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf>. Acesso em: 10 jan 2013.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente / Coordenadoria de Planejamento Ambiental. **Projeto Ambiental Estratégico Cenários Ambientais 2020**. Coordenação Casemiro Tércio dos Reis Lima Carvalho e Renato Rosenberg - - São Paulo : SMA/CPLA, 2009a.

SÃO PAULO (Estado). Secretária do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Protocolo agroambiental**. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/index.php>>. Acesso em: 08 jun. 2012.

SÃO PAULO (Estado). Resolução Conjunta SMA 088, de 19 de dezembro de 2008 corrigida pela Resolução Conjunta SMA/SAA 006, de 24 de setembro de 2009b. Altera o Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo **Diário Oficial Estadual**, São Paulo, 25 set. 2009. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/zoneamentoAgroambiental.php>>. Acesso em: 20 ago. 2012.

SÃO MARTINHO. **Unidades de Negócio: Usina São Martinho**. 2011. Disponível em: <<http://www.saomartinho.ind.br/>> Acesso em: 10 out. 2012.

SARTORI, A. A. DA C.; SILVA, R. F. B.; ZIMBACK, C. R. L. Combinação Linear Ponderada na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais em ambiente SIG. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1079-1090, 2012.

SETTEN, A. DE M. **Infraestrutura logística de exportação de açúcar e etanol no centro-sul do Brasil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Fundação Getúlio Vargas, 2010.

SLOAN, S.; PELLETIER, J. How accurately may we project tropical forest-cover change? A validation of a forward-looking baseline for REDD. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 2, p. 440-453, maio. 2012.

SMEETS, E. et. al **Sustainability of Brazilian bio-ethanol**. Campinas: UNICAMP, 2006. 136 p. (Relatório de pesquisa – NWS-E-2006-2010).

SNOWLING, S.D.; KRAMER, J.R. Evaluating Modelling Uncertainty For Model Selection. **Ecological Modelling**, v. 138, p. 17-30, 2001.

SUCHANT PAUDEL, F. Y. Assessing landscape changes and dynamics using patch analysis and GIS modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 16, p. 66-76, jun. 2012.

TEWOLDE, M. G.; CABRAL, P. Urban Sprawl Analysis and Modeling in Asmara, Eritrea. **Remote Sensing**, v. 3, n. 10, p. 2148-2165, set. 2011.

TORQUATO, S.A. e FRONZAGLIA, T. Álcool: preço gera lucros extraordinários. Análises e Indicadores do Agronegócio. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 1, n.3, 2006.

TRENTIN, G.; FREITAS, M. I. C. DE. Autômato Celular na Simulação de Cenários para o Município de Americana-Sp. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 01, p. 291-305, 2010.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Área plantada, Produção de Cana-de-açúcar e Etanol (IBGE). UNIDACATA, 2012**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-area-ibge.php?idMn=33&tipoHistorico=5>> Acesso em: 20 mai 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **A indústria da cana-de-açúcar**. 2008. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/documentos/publicacoes/pag=4>>. Acesso em: 20 out 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Licenciamento anual de autoveículos novos no Brasil (ciclo Otto) por tipo de combustível (ANFAVEA)**. UNIDACATA, 2012. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=54>>. Acesso em: 20 mai 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Moagem de cana na safra 2009/2010 na região Centro-Sul pode atingir 550 milhões de toneladas 29/04/2009**. São Paulo, Brasil: UNICA. 29 ago 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/releases/show.asp?rlsCode=%7B6B0A6260-026A-42FB-B4F1-ADE8CAA469F8%7D>> Acesso em: 15 ago 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA) **Pede reconhecimento de qualidades ambientais do etanol de cana na União Europeia**. São Paulo, Brasil: UNICA. 27 mai 2013. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/5573206920327496692/unica-pede-reconhecimento-de-qualidades-ambientais-do-etanol-de-cana-na-uniao-europeia/>>. Acesso em: 05 jun 2013.

URIARTE, M. et al. Expansion of sugarcane production in São Paulo, Brazil: Implications for fire occurrence and respiratory health. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 132, p. 48-56, 2009.

VAN VLIET, J.; BREGT, A. K.; HAGEN-ZANKER, A. Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 8, p. 1367-1375, abr. 2011.

VERBURG, P. H. et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. **Environmental management**, v. 30, n. 3, p. 391-405, out. 2002.

VIEIRA, M. C. A.; LIMA, J. F.; BRAGA, N. M. **Setor Sucroalcooleiro Brasileiro : Evolução e Perspectivas**. BNDES, 2007. 40 p. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Tipo/Livro/200706_11.html>. Acesso em: 10 mai. 2013.

VITALLI, P. D. L.; ZAKIA, M. J. B.; DURIGAN, G. Considerações sobre a legislação correlata à zona-tampão de unidades de conservação no Brasil. **Ambiente & sociedade**, v. 12, n. 1, p. 67-82, jun. 2009.

WWF-BRASIL. **Análise da expansão do complexo agroindustrial canavieiro no Brasil**. 2008. (Relatório de Pesquisa – Programa de Agricultura e Meio Ambiente).

ZENG, Y.N. et al. Modeling spatial land use pattern using autologistic regression. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. **Anais...Beijing**: 2008, p. 115-118.

APÊNDICE A - Características dos Empreendimentos dos Estudos de Impactos Ambientais utilizados nesta pesquisa

Data	Nome	Município	Ampliação/ Instalação	Produção de cana-de- açúcar atual (toneladas)	Produção de cana- de-açúcar Futura (tonelada /safra)	Produção de açúcar (toneladas/ safra)	Produção de açúcar futura (toneladas/ safra)	Produção de Etanol atual (m3/safra)	Produção de Etanol Futura (m3/safra)	Área Agrícola atual (hectares)	Área Agrícola Futura (hectares)
2010	Alcoeste Destilaria	Fernandópolis	Ampliação	1250000	4000000	Não há	213850	101742	198721	19058	55001
2007	Dirceu Luis Bovi	Ocaçu	Instalação	Não há	2500000	Não há	211000	Não há	73800	Não há	29484
2010	Usina Furlan	Avaré	Ampliação	1190000	2400000	87000	150000	51504	110000	11600	28500
2011	Branco Peres Açucar e Álcool	Adamantina	Ampliação	1250000	2500000	60604	175487	66405	106400	17188	35000
2010	Usina da Mata	Santo Antonio do Aracanguá	Instalação	Não há	3000000	Não há	180000	Não há	148129	Não há	40020
2012	Abengoa Unidade São Luiz	Pirassununga	Ampliação	3200000	4000000	265000	331250	84000	105000	36835	55012
2012	Paraíso BioEnergia	Brotas	Ampliação	1378000	3200000	105927	182222	53246	155648	26921	47451
2010	Tonon Bioenergia - Filial Santa Maria	Bocaina	Ampliação	2500000	3500000	177078	224000	106547	148000	30419	47510
2010	Companhia Energética de Cravinhos	Cravinhos	Instalação	Não há	2500000	Não há	100377	Não há	160031	Não há	33500
2009	Renuka do Brasil	Promissão	Ampliação	5456224	7507706	383486	575692	184196	213394	67650	83400
2010	Brazil Flex Energy Açúcar E Álcool	Rosana	Instalação	Não há	3000000	Não há	105000	Não há	124500	Não há	23185

APÊNDICE B – Resultados dos testes realizados conforme o número de variáveis potenciais utilizadas e o índice Figura de Mérito Alcançado

Resultado dos Testes com Duas Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
1	Distância das usinas	12.22%
2	Distância do sistema viário	13.24%
3	Pedologia	12.68%
4	Condições Edafoclimáticas	12.65%
5	Declividade	12.80%
6	Uso da terra	15.67%

Resultado dos Testes com Duas Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
7	Distância das usinas Distância do sistema viário	13.66%
8	Distância das usinas Pedologia	12.52%
9	Distância das usinas Condições Edafoclimáticas	12.38%
10	Distância das usinas Declividade	12.53%
11	Distância das usinas Uso da terra	16.24%
12	Distância do sistema viário Pedologia	14.16%
13	Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas	13.70%
14	Distância do sistema viário Declividade	13.84%
15	Distância do sistema viário Uso da terra	14.74%
16	Pedologia Condições Edafoclimáticas	12.77%
17	Pedologia Declividade	13.04%
18	Pedologia Uso da terra	17.03%
19	Condições Edafoclimáticas Declividade	13.11%
20	Condições Edafoclimáticas Uso da terra	16.04%
21	Declividade Uso da terra	16.42%

Resultado dos Testes com Três Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
22	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia	13.90%
23	Distância das usinas Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas	14.12%
24	Distância das usinas Distância do sistema viário Declividade	13.78%
25	Distância das usinas Distância do sistema viário Uso da terra	16.28%
26	Distância das usinas Pedologia Condições Edafoclimáticas	12.56%
27	Distância das usinas Pedologia Declividade	12.56%
28	Distância das usinas Pedologia Uso da terra	17.22%
29	Distância das usinas Condições Edafoclimáticas Declividade	12.79%
30	Distância das usinas Condições Edafoclimáticas Uso da terra	16.54%
31	Distância das usinas Declividade Uso da terra	16.36%
32	Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas	14.70%
33	Distância do sistema viário Pedologia Declividade	14.32%
34	Distância do sistema viário Pedologia Uso da terra	15.84%
35	Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade	13.10%
36	Pedologia Condições Edafoclimáticas	17.30%

Resultado dos Testes com Três Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
	Uso da terra	
37	Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	16.77%
38	Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas Declividade	14.30%
39	Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas Uso da terra	15.34%
40	Distância do sistema viário Declividade Uso da terra	15.33%
41	Pedologia Declividade Uso da terra	17.29%

Resultado dos Testes com Quatro Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
42	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas	14.38%
43	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Declividade	13.87%
44	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Uso da terra	16.38%
45	Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade	14.70%
46	Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas Uso da terra	16.50%
47	Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	17.49%
48	Distância das usinas Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade	12.64%

Resultado dos Testes com Quatro Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
49	Distância das usinas Pedologia Condições Edafoclimáticas Uso da terra	17.33%
50	Distância das usinas Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	16.69%
51	Distância das usinas Pedologia Declividade Uso da terra	17.27%
52	Distância das usinas Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas Declividade	14.20%
53	Distância das usinas Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas Uso da terra	16.15%
54	Distância das usinas Distância do sistema viário Declividade Uso da terra	15.71%
55	Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	15.94%
56	Distância do sistema viário Pedologia Declividade Uso da terra	16.30%

Resultado dos Testes com Cinco Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
57	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade	14.19%
58	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas Uso da terra	16.92%

Resultado dos Testes com Cinco Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
59	Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	16.86%
60	Distância das usinas Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	17.62%
61	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Declividade Uso da terra	16.52%
62	Distância das usinas Distância do sistema viário Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	16.27%

Resultado dos Testes com Seis Variáveis

No do Teste	Variáveis utilizadas	Figura de Mérito
63	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	16.98%
64 (Pesos Diferentes para as variáveis)	Distância das usinas Distância do sistema viário Pedologia Condições Edafoclimáticas Declividade Uso da terra	15.89%

APÊNDICE C – Taxa de expansão de cana-de-açúcar em relação à área plantada em 2011 nos municípios da UGRHI 13

Expansão da cana-de-açúcar em relação à área plantada de cana-de-açúcar no município em 2011	
Município	(%)
Bauru	325.91
Arealva	159.83
Iacanga	115.40
Tabatinga	115.40
Agudos	99.26
Itaju	61.73
Ibitinga	57.70
Matão	43.26
Brotas	34.11
Torrinha	32.18
Gavião Peixoto	31.74
Nova Europa	29.00
Bocaina	28.19
Araraquara	23.81
Trabiju	22.10
Bariri	22.00
Borebi	21.11
Boa Esperança do Sul	18.78
Ribeirão Bonito	17.19
Dois Córregos	16.93
Pederneiras	15.25
Dourado	12.80
Boracéia	11.58
Itirapina	9.16
São Carlos	6.83
Mineiros do Tietê	6.52
Lençóis Paulista	6.25
Macatuba	5.88
Itapuí	5.80
Areiópolis	5.49
Ibaté	5.22
Igaraçu do Tietê	3.13
Jaú	1.59
São Manuel	1.38
Barra Bonita	0.23
Analândia	0.00
São Pedro	0.00

APÊNDICE D – Expansão da cana-de-açúcar até 500 metros da área urbana dos municípios no período de 2011 a 2019

Expansão da cana-de-açúcar até 500 metros da área urbana dos municípios no período de 2011 a 2019	
Araraquara	24.28
Ibitinga	12.90
Pederneiras	7.85
Tabatinga	7.11
Lençóis Paulista	7.11
Brotas	6.46
Dois Córregos	4.31
Itapuí	3.97
Iacanga	3.58
Agudos	3.42
Itaju	2.33
Ribeirão Bonito	2.16
Torrinha	1.93
Boa Esperança do Sul	1.79
Bauru	1.74
Arealva	1.57
Matão	1.37
Borebi	1.34
Trabiju	1.21
Gavião Peixoto	0.93
Nova Europa	0.76
Areiópolis	0.42
Mineiros do Tietê	0.37
Bocaina	0.36
Macatuba	0.26
Boracéia	0.26
São Carlos	0.20
Analândia	0.00
Bariri	0.00
Barra Bonita	0.00
Dourado	0.00
Ibaté	0.00
Igaraçu do Tietê	0.00
Itirapina	0.00
Jaú	0.00
São Manuel	0.00
São Pedro	0.00