Caroline Alves Galharte

**Estimativa do escoamento superficial e da produção
de sedimentos em áreas de atividades
agrossilvopastoris, no Estado de São Paulo, em função
da mudança de uso e cobertura do solo**

**Tese de doutorado apresentada ao
Programa de Pós Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental
da Universidade de São Paulo, para
obtenção do Título de Doutor.**

Orientador: Prof. Dr. Silvio Crestana

São Carlos

2011

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **CAROLINE ALVES GALHARTE**

Título da tese: “**Estimativa da produção de sedimentos e do escoamento superficial em áreas de cultivo agro-silvo-pastoril em função da mudança de uso e cobertura do solo**”.

Data da defesa: 11/11/2011:

Comissão Julgadora:

Dr. Silvio Crestana (Orientador)
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Dra. Maria Lúcia Calijuri
(Universidade Federal de Viçosa/UFV)

Dr. Ricardo Tezini Minoti
(Universidade de Brasília/UnB)

MSc. Luciana de Souza Soler
(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/INPE)

Resultado:

APROVADA

APROVADA

Aprovada

APROVADO

APROVADA

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

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

DEDICATÓRIA

Aos grandes amores da minha vida,

meus pais, Everaldo e Diná,

meus irmãos, Valentina, Patrick e Felipe,

meus sobrinhos, Nádia, Matheus e Lara

e

meu namorado Gustavo,

por serem a minha base e o meu referencial,

pelo amor e carinho incondicionais,

pelo respeito e cuidado,

por todos os momentos felizes ou difíceis que vivemos juntos,

por sempre acreditarem em mim, me apoiando e incentivando em cada acontecimento de minha

vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, por estar sempre ao meu lado.

Ao Dr. Silvio Crestana, quem considero carinhosamente ser o meu “pai acadêmico”, por proporcionar mais uma grande oportunidade em minha vida, pela orientação, confiança e amizade, pelos ensinamentos e apoio na realização desse trabalho.

"Se enxerguei mais longe, foi porque subi em ombros de gigantes" (Isaac Newton).

À Embrapa Instrumentação Agropecuária de São Carlos, por oferecer amplas condições para a realização do presente trabalho.

À Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP), por intermédio do Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, pela oportunidade oferecida.

Aos professores das disciplinas cursadas na pós-graduação, pelos ensinamentos e formação de conhecimentos.

Ao Dr. Ricardo Tezini Minoti, pesquisador da Universidade de Brasília, pela contribuição no fornecimento de dados referente à microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas, colaboração ao compartilhar seu conhecimento em relação ao modelo SWAT, amizade, disponibilidade e solicitude.

À Msc. Luciana de Souza Soler, pela disponibilidade, amizade, entusiasmo e colaboração ao compartilhar seu conhecimento em relação ao modelo CLUE-S, acompanhamento nas visitas a campo e pela generosidade de me receber em sua casa.

Ao Dr. Paulino Ribeiro Villas Boas, pesquisador da Embrapa Instrumentação Agropecuária, pela amizade, disponibilidade, colaboração e auxílio com o modelo SWAT.

Ao Dr. Celso Vainer Manzatto, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, ao Msc. Sandro Eduardo Marschhausen Pereira e ao Dr. Jesus Fernando Mansilla Baca, pesquisador da Embrapa Solos pela confiança e disponibilização de dados necessários para essa pesquisa.

Ao Dr. Peter Verburg e à Universidade de Wageningen, por disponibilizar o modelo de simulação CLUE-S, fundamental para a execução desse trabalho.

Ao Msc. Daniel Alves de Aguiar, ao Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff e ao INPE, por disponibilizarem dados do Canasat.

Ao Dr. Eduardo Delgado Assad, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, por disponibilizar informações relacionadas às estações meteorológicas do Estado de São Paulo.

À Dr^a. Marlene Cristina Alves, professora da Unesp Ilha Solteira, pela presteza, acompanhamento e colaboração na visita a campo.

Ao Dr. Hélio Ricardo Silva, professor da Unesp Ilha Solteira, pela sugestão da área de estudo microbacia hidrográfica córrego da Onça, acompanhamento e colaboração na visita a campo.

Ao Dr. Ricardo Antônio Ferreira Rodrigues, professor da Unesp Ilha Solteira, por disponibilizar dados da estação meteorológica de Ilha Solteira.

Ao Dr. Aldo Ometto, professor da EESC-USP, e ao Dr. Cláudio César de A. Buschinelli, pesquisador da Embrapa Meio ambiente, pelas sugestões e contribuições realizadas no exame de qualificação.om

À Dr^a. Maria Conceição Peres Young Pessoa, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, por nortear o início do trabalho com SIG.

À Dr^a. Margareth Simões Penello Meirelles, pesquisadora da Embrapa Solos/Labex - Europa, por nortear o início do trabalho com o CLUE-S.

Ao Dr. Abimael Cereda Júnior, professor da PUC-Campinas, pelas aulas de geoprocessamento.

À Giovana Maranhão Bettiol, funcionária da Embrapa Pecuária Sudeste, pelo auxílio em geoprocessamento.

Ao João Marcos Villela, estagiário do Dr. Silvio Crestana, pela amizade, disposição e auxílio na geração do banco de dados.

A todos que nos acolheram (Eu, Luciana, João e Renê) durante as visitas às áreas de estudo, contribuindo com valiosas informações e proporcionando momentos únicos.

Aos amigos embrapianos, por todos esses anos de convivência. Em especial, ao Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso, ao Dr. João De Mendonça Naime, à Dilma Maria Costa Sylvestre, pela solicitude, paciência e amizade, ao Emerson De Stefani pela amizade, simpatia, ao Renê de Oste, pelo auxílio nas visitas a campo e ao Msc. Ednaldo José Ferreira pelo auxílio na estatística.

Aos colegas Chien Tseng, Gabriela Carósio, Juliana Scramin, Tassiane Corrêa, Paulo Falco, Alexandra Manzoli, Fábio Plotegher, Gabriela Byzynski, Rafaela Takehara e Clarice Steffens pelos inúmeros momentos de descontração. Em especial à Fabiana Diuk, à Luiza Nunes e à Úrsula Zúñiga, pela amizade, simpatia e alegria.

Aos meus pais, Everaldo Galharte e Diná Alves Galharte, por serem pais maravilhosos, por acreditarem em meus sonhos e ajudarem a torná-los realidade, por nunca medirem esforços para que eu pudesse ter uma formação

de qualidade, por estarem sempre ao meu lado e serem os meus maiores incentivadores, por todo o suporte emocional em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos, Valentina Alves Galharte, Marcus Patrick Alves Galharte e Felipe Alexandre Alves Galharte, por serem irmãos maravilhosos e amigos leais e fiéis, pelas demonstrações de afeto e carinho, alegria contagiante e apoio incondicional. À minha cunhada Camila Schichi Galharte, pelo incentivo, apoio e momentos de descontração.

Aos meus sobrinhos, Nádia Galharte, Matheus Galharte e Lara Galharte, por serem crianças lindas e fonte de alegria, pureza e esperança.

Ao meu namorado Gustavo Henrique Ribeiro da Silva, uma pessoa extremamente especial que faz a minha vida ainda mais bela, pelo companheirismo, incentivo, paciência, amizade, compreensão, alegria e amor.

Enfim, eu agradeço a todos citados acima, com os quais compartilhei momentos únicos e inesquecíveis nessa fase tão importante em minha vida.

Ao CNPQ, pela concessão da bolsa de estudos.

“Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas
usadas ... Que já têm a forma do nosso corpo ...
E esquecer os nossos caminhos que nos levam sempre aos mesmos
lugares ...
É o tempo da travessia ...E se não ousarmos fazê-la... Teremos ficado ...
para sempre ... À margem de nós mesmos.”

(Fernando Pessoa)

RESUMO

GALHARTE, C. A. (2011). Estimativa do escoamento superficial e da produção de sedimentos em áreas de atividades agrossilvopastoris, no Estado de São Paulo, em função da mudança de uso e cobertura do solo. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

O significativo investimento em desenvolvimento tecnológico associado aos fatores ambientais, como disponibilidade de recursos naturais, clima e solo elevaram o Brasil ao patamar de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, matéria-prima do açúcar e do etanol. Atualmente, o país exporta açúcar para mais de 100 países. Em relação ao etanol, esse vem se destacando no cenário mundial devido à viabilidade econômica e à necessidade de se utilizar energia renovável, em substituição aos combustíveis fósseis, com o intuito de mitigar o efeito estufa. Sendo assim, as perspectivas mundiais para a produção e, principalmente, consumo do etanol são favoráveis. Para o Brasil, devido à alta demanda mundial por açúcar e biocombustíveis, o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar, que apresenta uma seleção de terras potenciais para a expansão do seu cultivo visando uma produção sustentável, é uma necessidade imperiosa. Entretanto, os processos de mudança de uso e cobertura do solo são complexos e podem causar impactos, tais como: desertificação, perda da biodiversidade, poluição de ar, degradação dos componentes ambientais água e solo. Esse trabalho acadêmico visou estimar o escoamento superficial e a produção de sedimentos em área consolidada e em área que encontra-se em expansão do cultivo da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol. Para isso, com base no Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (ZAE Cana) que indica as áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar, foram selecionadas duas áreas de estudo que possuem alta aptidão para a expansão da cana-de-açúcar. São elas: a Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas (MBH-G) localizada no município de São Carlos – SP, região onde a cultura da cana-de-açúcar é consolidada e; a Microbacia hidrográfica córrego da Onça (MBH-O), localizada na região oeste do Estado de São Paulo, nos municípios de Ilha Solteira e Itapura, região onde a cultura da cana-de-açúcar encontra-se em expansão. O modelo de simulação espacial usado no trabalho é o Conversion of Land Use and its Effects at small region extent (CLUE-S), desenvolvido pela Universidade de Wageningen (Holanda). A aplicação satisfatória do CLUE-S permitiu o desenvolvimento de cenários futuros de uso e cobertura do solo com o intuito de simular a expansão da cultura da cana-de-açúcar em paisagens com diferentes características. A posteriori, foi estimada o escoamento superficial e a produção de sedimentos desses cenários com o auxílio do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). O SWAT foi sensível aos cenários, possibilitando a geração de resultados consistentes, qualitativa e quantitativamente para cada um deles, o que permitiu verificar as suas particularidades. Vale ressaltar que a avaliação ex-ante dos impactos ambientais na área de expansão da cultura da cana-de-açúcar em diferentes cenários pode direcionar ações de políticas públicas e de planejamento sócio-econômico-ambiental, dentre outros.

Palavras-chave: escoamento superficial, produção de sedimentos, área de expansão, cana-de-açúcar, mudança de uso e cobertura do solo, CLUE-S, SWAT

ABSTRACT

GALHARTE, C. A. (2011). Runoff and sediment yield estimation in agroforestry areas in São Paulo state due to changes in land use and land cover. Doctorate Thesis – São Carlos School of engineering; University of São Paulo, São Carlos, 2011.

The significant investments in technological development associated to environmental factors, such as the availability of natural resources, for instance, climate and soil, have led Brazil to become the world's largest producer of sugarcane, the raw material used in the manufacture of ethanol and sugar. Currently, the country exports sugar to more than 100 countries. Ethanol has become globally eminent due to its economic feasibility and the need of clean and renewable energy rather than of fossil fuels in order to mitigate the greenhouse effect. Therefore, the global perspectives on the production and especially the consumption of ethanol are favorable. Due to the high global demand for sugar and biofuels, the agro-ecological zoning of sugarcane, which features a selection of potential areas for cultivation expansion aiming at sustainable production, is a fundamental necessity for Brazil. However, the changes inland use and land cover are complex processes and can cause impacts such as desertification, biodiversity loss, air pollution, and degradation of environmental components such as water and soil. This research aims to estimate the sediment yield and runoff in areas where the culture of sugarcane is consolidated and in areas of sugarcane expansion for the production of sugar and ethanol. Accordingly, based on the Agro-Ecological Zoning for Sugarcane (ZAE Cana), which indicates suitable areas for sugarcane cultivation, two study areas that have high potential for the expansion of sugarcane were selected, namely the *microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas/MBH-G* (Ribeirão das Guabirobas micro-drainage basin), located in the city of São Carlos - SP, a region where the culture of sugarcane is consolidated, and the *microbacia hidrográfica córrego da Onça/MBH-O* (córrego da Onça micro-drainage basin), located in the western region of the state of São Paulo, in the cities of Ilha Solteira and Itapura, an area of sugarcane expansion, i.e. a sugarcane expansion region. The spatial simulation model used in this research is the Conversion of Land Use and its Effects at small region extent (CLUE-S), developed by the University of Wageningen, Netherlands. Making use of this methodology, future land use and land cover scenarios were created in order to simulate the expansion of sugarcane cultivation in areas with different characteristics. Subsequently, the sediment yield and superficial runoff in these scenarios were estimated with the help of the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool). This model was sensitive to both scenarios allowing the generation of consistent qualitative and quantitative results for each scenario enabling the identification of their particularities. It is noteworthy that the ex-ante evaluation of environmental impacts on areas of sugarcane expansion in different scenarios can guide public policy actions and socio-economic and environmental planning among others.

Keywords: runoff, sediment yield, expansion area, sugarcane, land use and cover change, CLUE-S, SWAT

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da produção de etanol combustível no Brasil	12
Figura 2: Evolução da produção de etanol combustível e produção de açúcar no Brasil	13
Figura 3: Produção de etanol no Brasil no período de 1994 a 2010.....	18
Figura 4: Número de automóveis produzidos por tipo de combustível no Brasil em 2009	19
Figura 5: Vendas das distribuidoras de combustíveis no Brasil.....	20
Figura 6: Matriz energética brasileira	21
Figura 7: Matriz energética mundial.....	21
Figura 8: Novas Unidades Produtoras de Etanol	30
Figura 9: Perspectiva da distribuição espacial das usinas	31
Figura 10: Áreas contempladas pelos estudos de Zoneamento (em branco) e distribuição espacial dos biomas Amazônia, Pantanal e bacia do alto Paraguai	35
Figura 11: Áreas aptas e inaptas à expansão da cana-de-açúcar no Brasil	36
Figura 12: Visão geral do procedimento do CLUE-S.....	46
Figura 13: Visão geral dos módulos que compõem o fluxo de informações no modelo CLUE-S	48
Figura 14: Exemplo de matriz de conversão com as diferentes opções implementadas	50
Figura 15: Fluxograma do módulo de alocação do modelo CLUE-S	54
Figura 16: Sequência dos dados de entrada e a visualização dos dados de saída do modelo SWAT.....	63
Figura 17: Localização da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas no Estado de São Paulo	69
Figura 18: Mapa de declividade da Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	71
Figura 19: Área cultivada com cana-de-açúcar nos municípios de Américo Brasiliense, Rincão, Santa Lúcia e São Carlos	72
Figura 20: Localização da microbacia hidrográfica córrego da Onça no Estado de São Paulo	75
Figura 21: Carta de declividade da microbacia hidrográfica córrego da Onça.....	77
Figura 22: Área cultivada com cana-de-açúcar nos municípios de Ilha Solteira e Itapura	78
Figura 23: Mapa de uso e cobertura do solo 2005 da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas.....	81
Figura 24: Carta de hipsometria da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	82
Figura 25: Mapa classe de solos da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	83
Figura 26: Interface do CLUE-S para edição dos parâmetros de regressão logística..	86
Figura 27: Interface para edição de arquivos de parâmetros principais	89
Figura 28: Interface para edição dos parâmetros dos solos	91
Figura 29: Interface para edição dos parâmetros climáticos	95
Figura 30: Carta de uso do solo 2005 da microbacia hidrográfica córrego da Onça .	101
Figura 31: Carta de densidade populacional rural da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas.....	103
Figura 32: Carta de densidade populacional rural da microbacia hidrográfica córrego da Onça.....	103
Figura 33: Carta de distribuição espacial de renda da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas.....	104
Figura 34: Carta de distribuição espacial de renda da microbacia hidrográfica córrego da Onça.....	105

Figura 35: Carta de Distância a estradas na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	106
Figura 36: Carta de Distância a rios na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	106
Figura 37: Carta de Distância a estradas na microbacia hidrográfica córrego da Onça	107
Figura 38: Carta de Distância a rios na microbacia hidrográfica córrego da Onça	108
Figura 39: Carta de Distância a usinas na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e localização das usinas.....	109
Figura 40: Carta de Distância a usinas na microbacia hidrográfica córrego da Onça e localização das usinas	109
Figura 41: Carta de Custo da distância a usinas na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	111
Figura 42: Carta de Custo da distância a usinas da microbacia hidrográfica córrego da Onça.....	112
Figura 43: Carta hipsometria da microbacia hidrográfica córrego da Onça	113
Figura 44: Mapa classe de solos da microbacia hidrográfica córrego da Onça	113
Figura 45: Carta de temperatura mínima e temperatura máxima da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	115
Figura 46: Carta de temperatura mínima e temperatura máxima da microbacia hidrográfica córrego da Onça.....	116
Figura 47: Carta de precipitação da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	117
Figura 48: Carta precipitação da microbacia hidrográfica córrego da Onça	117
Figura 49: Carta de uso do solo 2005 e 2011 da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	118
Figura 50: Carta de restrição de área na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas	120
Figura 51: Carta de uso do solo 2005 e 2011 da microbacia hidrográfica córrego da Onça.....	121
Figura 52: Carta de restrição de área na microbacia hidrográfica córrego da Onça..	123
Figura 53: Cartas de uso do solo de 1988, 1992, 1994 e 1996 da MBH-G	127
Figura 54: Cartas de uso do solo de 1998, 2000, 2003 e 2008 da MBH-G	128
Figura 55: Cartas de uso do solo de 2010 e 2011 da MBH-G	129
Figura 56: Cartas de uso do solo de 1988, 1990, 1993 e 1995 da MBH-O	130
Figura 57: Cartas de uso do solo de 1997, 1998, 2001 e 2003 da MBH-O	131
Figura 58: Cartas de uso do solo de 2005, 2007, 2008 e 2010 da MBH-O	132
Figura 59: Cartas de uso do solo de 2011 da MBH-O.....	133
Figura 60: Histórico do uso e cobertura do solo na MBH-G	134
Figura 61: Histórico do uso e cobertura do solo na MBH-O	134
Figura 62: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-G para a geração do Cenário Guabirobas 1	135
Figura 63: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-O para a geração do Cenário Onça 1.....	135
Figura 64: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-G para a geração do Cenário Guabirobas 2.....	136
Figura 65: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-O para a geração do Cenário Onça 2.....	136
Figura 66: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-O para a geração do Cenário Onça 3.....	137
Figura 67: Mapas de probabilidade para as classes de uso do solo da MBH-G.....	145
Figura 68: Mapas de probabilidade para as classes de uso do solo da MBH-O.....	146
Figura 69: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 (Cenário Guabirobas 1) com Demanda_1 MBH-G	147

Figura 70: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 (Cenário Guabiobas 2) com Demanda_2 MBH-G	149
Figura 71: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 com Demanda_1 MBH-O – Cenário Onça 1	151
Figura 72: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 com Demanda_2 MBH-O –	152
Figura 73: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 com Demanda_3 MBH-O – Cenário Onça 3.....	152
Figura 74: Evolução do uso da terra em território nacional	156
Figura 75: Mapas de distribuição do escoamento superficial e da produção de sedimentos dos cenários da MBH-G.....	158
Figura 76: Carreador na MBH-G	162
Figura 77: Carreador na MBH-O	163
Figura 78: Escoamento superficial dos cenários da MBH-G	164
Figura 79: Produção de sedimentos dos cenários da MBH-G	164
Figura 80: Mapas de distribuição do escoamento superficial e da produção de sedimentos dos cenários da MBH-O.....	169
Figura 81: Escoamento superficial dos cenários da MBH-O	171
Figura 82: Produção de sedimentos dos cenários da MBH-O	172
Figura 83: ribeirão das Guabiobas.....	199
Figura 84: Horizonte cana-de-açúcar, laranja e vegetação nativa.....	199
Figura 85: Laranjal abandonado	200
Figura 86: Laranjal novo (3 anos) com resquício de cana-de-açúcar	200
Figura 87: Pastagem na MBH-G	201
Figura 88: Agricultura – área de assentamento na MBH-O	203
Figura 89: Cana-de-açúcar ao fundo e Crotalaria spectabilis na MBH-O	204
Figura 90: Cana-de-açúcar à esquerda e pasto em estado avançado de degradação à direita na MBH-O	204
Figura 91: Pastagem na MBH-O	205
Figura 92: Pastagem degradada na MBH-O	205
Figura 93: Lagoa com cana-de-açúcar ao fundo na MBH-O	206
Figura 94: Pequeno lago na nascente com presença de Taboa	206

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Trabalhos com aplicação do CLUE-S no Brasil.....	55
Quadro 2: Trabalhos com aplicação de versões adaptadas do CLUE-S no Brasil.....	55
Quadro 3: Arquivos usados na simulação no CLUE-S.....	86
Quadro 4: Descrição das etapas de entrada dos parâmetros de regressão logística..	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Área plantada, área colhida, produção e rendimento de cana-de-açúcar no Brasil	10
Tabela 2: Estados com maior produção e área plantada de cana-de-açúcar no Brasil	15
Tabela 3: Porcentagens de adição de etanol em combustível, capacidade de produção e demanda potencial.....	17
Tabela 4: Perspectiva para a produção de cana, açúcar e etanol no Brasil	29
Tabela 5: Perspectiva da frota de veículos por combustível no Brasil	29
Tabela 6: Área total, área cultivada com cana, área apta à expansão do cultivo de cana por estado brasileiro.....	38
Tabela 7: Área dos usos e cobertura da microbacia hidrográfica córrego da Onça em 2005 e 2011.....	119
Tabela 8: Área dos usos e cobertura da microbacia hidrográfica córrego da Onça em 2005 e 2011.....	122
Tabela 9: Valores inseridos na matriz de conversão para simulação da MBH-G	124
Tabela 10: Valores inseridos na matriz de conversão para simulação da MBH-O	124
Tabela 11: Coeficientes de correlação de variáveis	139
Tabela 12: Coeficientes das análises de regressão logística usados nos modelos CLUE-S para a MBH-G.....	140
Tabela 13: Coeficientes das análises de regressão logística usados nos modelos CLUE-S para a MBH-O.....	142
Tabela 14: Área real e área demandada para cada uso do solo na MBH-G (Cenário Guabiobas 1)	148
Tabela 15: Área real e área demandada para cada uso do solo na MBH-G (Cenário Guabiobas 2).....	150
Tabela 16: Área real e área demandada para cada uso do solo na MBH-O	153
Tabela 17: Médias do escoamento superficial e da produção de sedimentos nos cenários da MBH-G	159
Tabela 18: Produções médias de sedimento e escoamento superficial em 2007 para diversos níveis de divisão da BHRSB	160
Tabela 19: Área e número de HRU's em cada sub-bacia dos cenários da MBH-G...	166
Tabela 20: Médias do escoamento superficial e da produção de sedimentos nos cenários da MBH-O	170
Tabela 21: Área e número de HRU's em cada sub-bacia dos cenários da MBH-O...	173

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA	Associação Nacional dos fabricantes de veículos automotores
ARS	- USDA Agricultural Research Service
CLUE	- Conversion of Land Use and its Effects
CLUE-S	- Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent
CN	- Número da curva do SCS
ESRI	- Environmental Systems Research Institute
ETM+	- Enhanced thematic mapper, plus
EUA	- Estados Unidos da América
EUPS	- Equação Universal de Perda de Solo
GXbe	- GLEISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico
h	- Hora
ha.	- Hectare
HRU	- Unidade de resposta hidrológica
IAC	- Instituto Agrônômico de Campinas
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LV	- LATOSSOLO VERMELHO
LVef	- LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico
LVw	- LATOSSOLO VERMELHO Ácrico
LVAd	- LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico
m	- Metro
MAPA	- Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento
MBH-G	- Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas
MBH-O	- Microbacia hidrográfica córrego da Onça
MEUPS	- Equação Universal de Perda de Solo Modificada
mm	- Milímetro
MNT	- Modelo numérico do terreno
NRCS	- Serviço de conservação dos recursos naturais dos Estados Unidos
PIB	- Produto Interno Bruto
PVA	- ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELO
SCS	Soil Conservation Service
SIG	- Sistemas de Informações Geográficas
SWAT	- Soil and Water Assessment Tool
t	- Tonelada
UE	- União Européia

UNESP	- Universidade Estadual de São Paulo
UNICA	- União da Agroindústria Canavieira de São Paulo
USLE	- Universal Soil Loss Equation
UTM	- Universal Transverso Mercator

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE QUADROS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
SUMÁRIO	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipótese.....	5
2 OBJETIVO	6
2.1 Objetivos específicos	6
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1 Cana-de-açúcar	7
3.1.1 Evolução da agroindústria canavieira no Brasil	7
3.1.2 Cana-de-açúcar: açúcar e etanol.....	14
3.1.3 Cadeia produtiva do etanol de cana-de-açúcar	23
3.1.4 Perspectiva do mercado de etanol e açúcar	27
3.2 Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar.....	33
3.3 Mudança de uso e cobertura do solo.....	39
3.4 Escorrimento superficial e produção de sedimentos em bacias hidrográficas	41
3.5 Modelagem ambiental.....	44
3.5.1 CLUE-S.....	44
3.5.2 SWAT	56
3.6 Cenários	64
4 MATERIAIS E MÉTODOS	68
4.1 Áreas de estudo.....	68
4.1.1 Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas.....	68
4.1.2 Microbacia hidrográfica córrego da Onça	74
4.2 Implementação do modelo de uso do solo utilizando o CLUE-S	79
4.2.1 Dados de entrada	80
4.2.2 Simulação CLUE-S.....	83
4.3 Implementação do modelo hidrossedimentológico SWAT.....	90
4.3.1 Dados de entrada	90
4.3.2 Simulação SWAT.....	96
4.4 Sistemas Computacionais	98
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
5.1 Base de dados para as simulações utilizando o CLUE-S e SWAT.....	100
5.2 Resultados das simulações utilizando o CLUE-S	118
5.3 Resultados das simulações utilizando o SWAT	157
6 CONCLUSÃO.....	176
7 SUGESTÕES.....	179
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	181
APÊNDICE	195

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a humanidade sempre exerceu forte pressão sobre os recursos naturais, propiciando a destruição dos alicerces de sua própria sustentação em prol do atual modelo de desenvolvimento econômico, baseado em produção e consumo exacerbados. Com a elevada demanda, o meio ambiente tem mostrado sinais de exaustão em relação a alguns recursos naturais, dentre os quais, os combustíveis fósseis.

Os combustíveis fósseis têm papel significativo na matriz energética mundial, pois são responsáveis por 80% de sua composição, sendo que 34% correspondem ao petróleo, 26,5% ao carvão mineral e 21% ao gás natural (MME, 2010). Entretanto, as previsões de disponibilidade desses recursos não são favoráveis, pois suas reservas são finitas, o custo de extração é significativo e a segurança de abastecimento é problemática para muitos países que os importam.

Em relação ao petróleo, há divergência entre a elevada demanda mundial – devido ao crescimento de inúmeros países – o volume de produção e a descoberta de novos campos de petróleo. Esses são fatores que alardeiam o desabastecimento e supervalorizam o produto. Além das especulações econômicas, o uso do petróleo apresenta inúmeros questionamentos ambientais. A sua queima influi consideravelmente nas condições do meio ambiente, promovendo o efeito estufa – em virtude do excesso de gases poluentes do ar, como o dióxido de carbono – e, conseqüentemente, na mudança climática.

A preocupação em torno das mudanças climáticas é considerável e tem convergido para políticas globais de redução da poluição. No protocolo de Kyoto, muitos países se comprometeram a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover o uso de fontes energéticas renováveis. Sendo assim, devido ao interesse econômico aliado à pressão ambiental, ocorreu a necessidade imperiosa de buscar alternativas que permitissem o uso de energias mais limpas e renováveis a fim de prover as futuras gerações.

Entende-se que os biocombustíveis são alternativas viáveis para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Atualmente, inúmeros países como: França, Estados Unidos, Alemanha, Japão, Suécia, Espanha, Índia, China e outros procuram minimizar os efeitos de aditivos, como o chumbo tetraetila, na queima dos combustíveis fósseis que são usados nos veículos, inserindo uma porcentagem de etanol à gasolina, a exemplo do Brasil que foi pioneiro.

Os biocombustíveis são fontes de energias renováveis, derivados de produtos agrícolas como: cana-de-açúcar, plantas oleaginosas, biomassa florestal e outras fontes de matérias orgânicas. Há dois tipos principais de biocombustíveis, que são: etanol (substituto ou aditivo da gasolina) e biodiesel.

Em prol do desenvolvimento do próprio programa de fontes alternativas de energia, países como Índia, Estados Unidos, França, Tailândia, China e Suécia usam a fonte de biomassa que melhor lhes convém, levando em consideração as questões climáticas e a oferta do produto. Ou seja, para cada clima, existe uma cultura que melhor se adapta e, conseqüentemente, gera maior produtividade em sua exploração. Os que mais se destacam são os Estados Unidos com a produção de etanol de milho, países europeus adotam a

beterraba como matéria-prima para a produção de etanol e o Brasil que produz etanol a partir da cana-de-açúcar.

Apesar da crescente produção mundial de biocombustível, o Brasil possui inúmeras vantagens frente aos demais países que o potencializam para se tornar líder mundial na produção de combustíveis a partir de fontes renováveis. São elas: o clima adequado para a lavoura de cana-de-açúcar, o fato de ser o maior país tropical do mundo que permite a incorporação de áreas destinadas a agroenergia sem obrigatoriamente ter que competir com a agricultura de alimentos, a experiência empreendedora, o progresso tecnológico e o domínio do processo produtivo do etanol.

Atualmente, o Brasil possui 9,6 milhões de hectares disponíveis para a colheita da cana-de-açúcar (MAPA, 2010). E, segundo o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar, em 2009, o país continha 64,7 milhões de hectares aptos à expansão do cultivo da cana. Entretanto, os processos de mudança de uso e cobertura do solo despertam grande preocupação no planejamento da ocupação do espaço, devido à sua complexidade e à vulnerabilidade dos sistemas econômicos, sociais e ambientais.

Vale ressaltar que as mudanças de uso e cobertura do solo surgem, de modo geral, em respostas às demandas e padrões impostos pela economia global, que têm diferentes efeitos nos ecossistemas e na sociedade. Assim, analisar as possíveis alterações na paisagem e seus impactos constitui uma tarefa complexa, sendo cada vez mais importante o desenvolvimento de pesquisas que mensurem com melhor precisão a magnitude das alterações no uso e cobertura do solo.

O uso da modelagem espacial representa uma importante ferramenta para avaliar cenários de mudanças de curto e longo prazo, sendo útil na tomada de decisões em diversos níveis de estudo. O arcabouço CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent*) tem como principal inovação a possibilidade de simular dinamicamente múltiplos usos da terra por meio da competição entre as classes de uso em escala local e regional.

Com o intuito de estimar o escoamento superficial e a produção de sedimentos devido à mudança de uso e cobertura, foi selecionado o modelo hidrossedimentológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) desenvolvido para simular o impacto das atividades agrícolas na qualidade das águas superficiais.

A compreensão dos possíveis impactos e o melhor planejamento das mudanças de uso e cobertura do solo – de áreas com pastagens, agropecuária e sistema de produção incluindo recursos florestais para a cultura da cana-de-açúcar com o intuito de produzir etanol e açúcar – podem proporcionar um menor impacto ambiental e, conseqüentemente, uma produção mais sustentável.

Nesse contexto, a geração de cenários por meio de simulações configura importante fonte de informação para auxiliar na gestão ambiental e no planejamento do uso do solo podendo, portanto, subsidiar políticas públicas.

1.1 Hipótese

Esse trabalho acadêmico explora duas hipóteses principais sobre o processo de expansão da cana-de-açúcar em duas bacias hidrográficas com históricos diferentes utilizando modelos de simulação:

1 – A partir de dados socioeconômicos e ambientais é possível gerar cenários por meio de modelo de simulação.

2 – A partir de cenários é possível estimar qualitativa e quantitativamente, com certo grau de confiabilidade, impactos ambientais, como escoamento superficial e produção de sedimentos. Isto é, quando o cenário for alterado, o impacto estimado também deverá ser alterado.

2 OBJETIVO

Estimar o escoamento superficial e a produção de sedimentos nos cenários de microbacias hidrográficas, localizadas em áreas aptas à expansão da cana-de-açúcar para a produção de etanol e açúcar, em função da mudança de uso e cobertura do solo.

2.1 Objetivos específicos

- Selecionar duas microbacias hidrográficas não instrumentadas aptas à expansão da cultura da cana-de-açúcar, por meio do Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (ZAE Cana) como áreas de estudos. Sendo uma microbacia hidrográfica inserida em região com a cultura da cana-de-açúcar consolidada e a segunda microbacia hidrográfica inserida em região com a cultura da cana-de-açúcar em expansão.
- Gerar cenários de uso e cobertura do solo frente à possível expansão da cultura da cana-de-açúcar na para as áreas de estudo, utilizando como ferramenta de simulação a modelagem espacial de uso da terra através do CLUE-S.
- Estimar o escoamento superficial e a produção de sedimentos em diferentes cenários temporais nas áreas de estudo, gerados pelo modelo CLUE-S submetidos à expansão da cana-de-açúcar, por meio do modelo hidrossedimentológico SWAT.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cana-de-açúcar

3.1.1 Evolução da agroindústria canavieira no Brasil

No panorama nacional, o setor agroindustrial possui papel fundamental no Produto Interno Bruto (PIB), com destaque ao setor sucroalcooleiro pela geração de divisas, empregos diretos e progresso tecnológico. A evolução do setor sucroalcooleiro é consequência de muito esforço e pesquisa por parte de instituições, que iniciaram em condições rudimentares e chegaram à seleção de espécies, plantio, logística de colheita, transporte, processamento de resíduos e geração de energia (MARCOCCIA, 2007).

O complexo agroindustrial canavieiro constitui-se na mais antiga atividade econômica do Brasil. A atividade iniciou-se no século XVI por colonizadores portugueses e até o início do século XVIII manteve uma significativa preponderância dentre as demais atividades econômicas. A prosperidade, entretanto, declinou lentamente com uma seqüência de crises, mas a estagnação ocorreu em 1811, devido ao Bloqueio Continental de Napoleão Bonaparte e seu incentivo para a produção de açúcar a partir da beterraba que pode ser produzida em clima frio e por isso, o seu cultivo expandiu com facilidade em países europeus e nos Estados Unidos.

Durante o século XIX, a indústria açucareira incorporou inovações tecnológicas importantes que possibilitaram a melhora de seu desempenho. Entretanto, em virtude de diversos fatores, isso não foi suficiente para participar

de forma expressiva no mercado externo. Sendo assim, no início do século XX o governo brasileiro, semelhante a outros países, adotou uma política de proteção da agroindústria canavieira. Na década de 1930, em uma ação intervencionista o Estado adota medidas de planejamento e controle da produção de açúcar com o intuito de garantir bons preços.

A intervenção do Estado na agroindústria canavieira foi consolidada com a criação, a partir do Decreto nº 22.789 de 1 de julho de 1933, do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) como uma entidade autárquica, com atribuições de planejamento e de intervenções na economia do setor (SZMRECSÁNYI, 1979).

“O decreto de criação do IAA não deixa dúvidas sobre os principais objetivos que presidiram a sua criação:

a) assegurar o equilíbrio do mercado interno entre as safras anuais de cana e o consumo de açúcar, mediante a aplicação obrigatória de matéria-prima, a determinar o fabrico de álcool;

b) fomentar a fabricação de álcool anidro mediante a instalação de destilarias centrais nos pontos mais aconselháveis, ou auxiliando as cooperativas e sindicatos de usineiros que para tal fim se organizarem, ou os usineiros individualmente, a instalar destilarias ou melhorar suas instalações atuais” (SZMRECSÁNYI, 1979, p. 180).

Com a erradicação dos cafezais das terras paulistas, na década de 1950, possibilitou o surgimento de novos fornecedores de cana-de-açúcar e novas usinas. Entretanto, o preço do açúcar no mercado internacional sofria oscilações em virtude de baixa eficiência e atrasos tecnológicos.

Como medida urgente para a sobrevivência do setor, foi fundada a Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (Copersucar), formada apenas por dez usinas paulistas e duas entidades regionais, a Coopira e a Coopereste. A junção tinha um objetivo

muito simples: comercializar a produção de etanol e açúcar de seus associados (COPERSUCAR, 2008).

O mercado internacional do açúcar permaneceu bastante aquecido durante a década de 1960 e começo dos anos 1970. Em 1973, ocorreu o primeiro choque do petróleo. A Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) lançou um embargo de fornecimento de petróleo aos Estados Unidos e Europa. Tal fato propiciou o aumento significativo dos preços a níveis nunca atingidos.

O Programa Nacional do Alcool – Proálcool – criado em 14 de novembro de 1975 pelo decreto nº 76.593, firmado pelo presidente Geisel, tinha o objetivo de estimular a produção do etanol visando o atendimento das necessidades do mercado interno além de reduzir o dispêndio de divisas externas com a importação do petróleo – 80% do petróleo que necessitava. Dessa forma, buscava-se estimular a substituição da gasolina por etanol produzido a partir da cana-de-açúcar. Nessa etapa, o programa determinava a adição de até 25% de etanol anidro à gasolina. Além disso, havia a previsão da instalação de novas destilarias anexas às usinas ou autônomas, assim como unidade de armazenamento de etanol e desenvolvimentos na indústria automobilística. Em 1978, surgiram os primeiros carros movidos exclusivamente a etanol. Consequentemente, a área plantada com cana-de-açúcar e o rendimento médio por hectare aumentaram (PEREIRA, 2008). Tal evolução pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1: Área plantada, área colhida, produção e rendimento de cana-de-açúcar no Brasil
Fonte: IBGE, 2011

Ano	Área (milhões de hectares)		Produção	Rendimento
	Área	Área	(milhões de toneladas)	(t/ha.)
1975	1,90	1,90	88,92	46,82
1976	2,08	2,08	102,77	49,43
1977	2,27	2,27	120,01	52,93
1978	2,39	2,39	129,06	54,04
1979	2,54	2,54	139,27	54,79
1980	2,61	2,61	146,23	56,09
1981	2,80	2,80	153,78	54,86
1982	3,08	3,08	186,38	60,47
1983	3,48	3,48	216,45	62,16
1984	3,86	3,86	241,39	62,55
1985	3,90	3,90	246,54	63,22
1986	3,95	3,95	238,49	60,44
1987	4,35	4,31	268,58	62,31
1988	4,15	4,12	258,45	62,78
1989	4,01	4,07	252,29	62,02
1990	4,29	4,27	262,60	61,49
1991	4,24	4,21	260,84	61,94
1992	4,20	4,20	271,43	64,61
1993	3,97	3,86	244,30	63,24
1994	4,36	4,34	292,07	67,23
1995	4,62	4,57	303,56	66,49
1996	4,90	4,83	325,93	67,52
1997	4,95	4,88	337,20	69,10
1998	5,00	4,97	338,97	68,18
1999	4,86	4,85	331,71	68,41
2000	4,82	4,80	325,33	67,51
2001	5,02	4,96	344,28	69,44
2002	5,21	5,10	363,72	71,31
2003	5,28	5,25	385,41	72,94
2004	5,56	5,50	410,66	73,75
2005	5,76	5,71	420,12	72,84
2006	6,16	6,16	445,36	73,82
2007	6,72	6,70	514,06	76,55
2008	7,61	7,61	591,43	77,62
2009	8,67	8,65	696,44	80,24
2010	8,83	8,80	699,23	80,37
2011	9,64	9,64	668,47	78,13

Devido ao Segundo Choque do Petróleo, em 1979, o preço do petróleo disparou novamente e a resposta mundial foi uma redução, racionalização dos gastos com o petróleo e a busca de novas fronteiras alternativas e

sustentáveis. De acordo com o presente cenário, o Proálcool foi intensificado, estimulando o uso do etanol hidratado em motores adaptados ou especificamente produzidos para o emprego desse combustível (NOGUEIRA et al., 2008). Para isso, o governo incentivou a compra de carro movido a etanol com a concessão de financiamentos e fixou o preço do etanol 50% mais barato que a gasolina. Entre 1985 e 1989, 75% dos carros fabricados no Brasil tinham motores movidos a etanol (PEREIRA, 2008).

Segundo Pereira (2008), a recuperação dos preços do açúcar no mercado internacional, a reversão do preço do petróleo – que sofreu forte queda a partir de 1985 – incertezas quanto à política governamental para o setor e ao aumento da produção de petróleo nacional, levaram ao desabastecimento de etanol combustível no país e, conseqüentemente, propiciaram o encerramento de um período de prosperidade para a indústria sucroalcooleira.

O ciclo do Proálcool encerrou-se no final da década de 80 com uma crise de governança e de confiabilidade do setor sucroalcooleiro, originada pela queda da oferta de etanol, Figura 1. A insegurança dos consumidores foi inevitável, assim como a significativa diminuição da procura e, conseqüentemente, da produção de carros a álcool na década de 1990.

Figura 1: Evolução da produção de etanol combustível no Brasil
 Fonte: MAPA, 2007 e MAPA, 2011

Em março de 1990, como marco principal do processo de desregulamentação do setor, o então Presidente Fernando Collor extinguiu o IAA através da Medida Provisória nº151. Assim, o planejamento do setor passou para o Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool (Cima) e ocorreu a liberação total de preços para o setor sucroalcooleiro, concluído em 1999 (NOGUEIRA et al., 2008).

Com a redução do uso do etanol como combustível na década de 1990, a produção de açúcar voltou a se destacar na agroindústria canavieira, Figura 2.

Figura 2: Evolução da produção de etanol combustível e produção de açúcar no Brasil
 Fonte: MAPA, 2007; Conab, 2011

A sinergia entre setor sucroalcooleiro e o automotivo resultou, em 2003, na concepção dos carros *flex fuel* capazes de utilizar, sem qualquer interferência do motorista, gasolina (com 20% a 25% de etanol), etanol hidratado puro ou ainda misturas desses dois combustíveis em qualquer proporção, de acordo com os requisitos de eficiência e dirigibilidade (NOGUEIRA et al., 2008). Tal proposta foi aceita com grande satisfação pela sociedade devido à conscientização do esgotamento das reservas de petróleo, da poluição causada pela queima de combustível fóssil e da valorização do carro flex na comercialização de veículos novos e usados.

Cabe ressaltar que na Figura 2 é possível verificar que a partir da safra 2002/2003 até os dias de hoje, a porcentagem de cana-de-açúcar destinada à produção tanto de etanol quanto de açúcar é relativamente a mesma. Isso é muito interessante, pois como ainda não há regulamentação, o mercado se ocupa de controlar desta proporção, já que são dois produtos bem valorizados e com alta demanda.

3.1.2 Cana-de-açúcar: açúcar e etanol

Oriunda de regiões temperadas quentes a tropicais da Ásia, especialmente Índia, a cana-de-açúcar é uma planta semiperene que pertence ao gênero *Saccharum*, da família das gramíneas, composta de espécies de gramas altas perenes. A parte aérea da planta é composta por colmos (contém sacarose e são caracterizados por nós bem marcados e entrenós distintos, quase sempre fistulosos e espessos), pontas e folhas, que constituem a palha da cana (NOGUEIRA et al., 2008).

O Brasil, considerado o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com aproximadamente 9,6 milhões de hectares de área plantada, colheu na safra de 2010 o equivalente a 699,23 milhões de toneladas de cana, sendo esta dividida para a produção de açúcar e etanol. Ou seja, uma média de produção de 80,37 t/ha., conforme Tabela 1, (IBGE, 2011). Isso corresponde a 12,22% a mais do que os 489,96 milhões de toneladas processadas na safra de 2007. Isto é, na safra de 2008 houve um aumento do volume adicional de cana da ordem de 68,18 milhões de toneladas.

Os estados brasileiros que mais se destacam na produção de cana são: São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Alagoas e Pernambuco, Tabela 2.

Tabela 2: Estados com maior produção e área plantada de cana-de-açúcar no Brasil
Fonte: IBGE, 2011

Ano	Maiores Estados Produtores									
	São Paulo		Minas Gerais		Paraná		Alagoas		Pernambuco	
	Produção (mil toneladas)	Área plantada (mil hectares)	Produção (mil toneladas)	Área plantada (mil hectares)	Produção (mil toneladas)	Área plantada (mil hectares)	Produção (mil toneladas)	Área plantada (mil hectares)	Produção (mil toneladas)	Área plantada (mil hectares)
2000	189.802	2.453	18.794	291	22.655	330	26.773	447	14.452	332
2001	189.540	2.448	18.726	294	26.460	330	28.216	457	17.850	350
2002	206.332	2.601	18.339	284	29.136	359	26.881	426	17.642	402
2003	223.705	2.745	20.788	304	30.680	369	25.003	435	18.227	402
2004	236.301	2.899	24.159	394	32.642	393	25.833	497	18.958	402
2005	244.494	3.529	31.587	424	31.942	414	25.602	415	17.367	404
2006	266.071	3.870	31.600	516	34.460	432	23.991	397	18.875	406
2007	295.477	4.328	38.956	652	46.611	552	24.000	400	18.866	396
2008	337.148	4.873	45.992	766	55.571	647	24.500	415	20.307	399
2009	400.539	5.378	54.502	845	55.637	649	27.077	455	19.577	387
2010	395.729	5.378	60.822	872	55.514	647	25.390	469	20.979	416
2011	359.235	5.044	63.354	903	54.544	648	27.201	480	17.415	353

O principal destino da cana-de-açúcar é a produção de açúcar e etanol, que são os seus principais derivados e que possuem valor econômico expressivo. Além do açúcar e etanol, os seus subprodutos exercem funções de grande importância, como: a vinhaça – um resíduo da destilação – a qual pode ser usada como fertilizante; o bagaço que pode ser usado como combustível na co-geração de energia, fabricação de papel (como pasta de celulose) e alimento para animais. Conforme Nogueira et al. (2008), o etanol, ou álcool etílico, é uma substância com fórmula molecular C_2H_6OH , que pode ser utilizado como combustível em motores a combustão interna com ignição por centelha, de duas maneiras:

- ✓ Aditivo na gasolina – álcool etílico anidro carburante (AEAC).
- ✓ Puro no consumo direto como combustível em automóveis – álcool etílico hidratado carburante (AEHC).

No caso brasileiro, as especificações devem ser atendidas pelos

produtores e respeitadas por toda a cadeia de comercialização. São elas: Portaria ANP 309/2001, para gasolina com etanol anidro e Resolução ANP 36/2005 para o etanol hidratado. Segundo essa legislação, o etanol anidro deve conter menos de 0,6% de água, enquanto o que o etanol hidratado deve ter entre 6,2% e 7,4%.

O principal uso do etanol por ordem de importância no Brasil é o de combustível veicular, indutor de octanagem e solvente (AZEVEDO, 2002).

Desde a década de 1980, no Brasil, o teor de etanol anidro esteve acima de 20% em toda a gasolina comercializada. Já nos Estados Unidos, a porcentagem adotada de etanol anidro em mistura com a gasolina era mais modesta, ou seja, 10%. Tal mistura, denominada E10, foi considerada padrão pela indústria automobilística, pois não havia necessidade de alterações materiais, componentes ou recalibração de motor (NOGUEIRA et al., 2008).

Conforme Neves & Conejero (2007), o mercado internacional se abriu progressivamente, em especial para o etanol anidro, dadas às políticas governamentais de adição de etanol na gasolina. Diversos países aprovaram metas obrigatórias e outros já possuem uma política de autorização da adição, Tabela 3.

Tabela 3: Porcentagens de adição de etanol em combustível, capacidade de produção e demanda potencial

Fonte: Neves e Conejero (2007) ⁽¹⁾ Adição permitida

País/Região	Capacidade Produção (bilhões de litros)	% adição	Demanda potencial (bilhões de litros)	Observações
EUA	18,5	5% (2012)	28,4	Alguns estados permitem a adição de 10% Adição obrigatória em 17% em 2022 em análise.
Brasil	17,4	20 a 25%	10 (somente com as metas de adição)	Isenção de R\$0,28/litro (CIDE) Carros <i>flex fuel</i> representam uma frota de 2 milhões.
UE	3,1	2% - 5,75 (2010)	9,3	Isenção fiscal nos estados membros; possibilidade de 10% em 2020.
Canadá	0,2	5% (2010)	2,1	Adição obrigatória pode chegar a 10% em alguns estados.
China	3,8	10%	7	Vigora em 5 províncias, a adição de 16%. Pode chegar a 15% em 2010.
Japão	0,1	3% ¹	1,8	Adição permitida de até 20% em 2030.
Índia	2,0	10%	1,1	Adição obrigatória de 20% em análise.
Tailândia	0,4	10% ¹	1,5	
Austrália	0,2	10%	2,1	
Filipinas		5% ¹	0,2	
Argentina	0,2	5% (2010) ¹	0,2	Adição obrigatória de 5% em análise.

O aumento da produção de etanol no Brasil foi expressivo. Em 1994 foram produzidos 12,67 milhões de m³ de etanol (2,78 milhões de m³ de etanol anidro e 9,89 milhões de m³ de etanol hidratado). Após 15 anos, a produção de etanol aumentou significativamente, uma vez que em 2010 foram produzidos 27,6 milhões de m³ de etanol, sendo 7,6 milhões de m³ de etanol anidro e 20 milhões de m³ de etanol hidratado, conforme se pode observar na Figura 3.

Figura 3: Produção de etanol no Brasil no período de 1994 a 2010
Fontes: MAPA (2011)

Nesse período, foi possível desenvolver melhores variedades de cana-de-açúcar com melhores índices de produtividade (ganhos na quantidade da cana por hectare e no teor de açúcar contido na cana), assim como o desenvolvimento de novas tecnologias para a extração do etanol (aumento do rendimento da extração, queda do tempo de fermentação do caldo e aumento no teor final do álcool no vinho) a custos reduzidos (NOGUEIRA et al., 2008).

O aumento do consumo de etanol hidratado ocorreu em função da introdução de veículos com motores flexíveis (*flex fuel*) no mercado brasileiro a partir de 2003. O mercado interno do etanol alcançou grande crescimento, principalmente, nos últimos anos devido ao expressivo sucesso do automóvel com motores flexíveis, que em 2009 atingiu mais de 80% das vendas de carros novos, conforme Figura 4.

Figura 4: Número de automóveis produzidos por tipo de combustível no Brasil em 2009
Fonte: ANFAVEA, 2010

Até o ano de 2009, o Brasil foi eminente na exportação mundial e em competitividade devido ao baixo custo de produção do etanol. Entretanto, a partir de 2010 esse cenário mudou e o Brasil iniciou o processo de importação de etanol dos Estados Unidos. Isso se deve aos altos preços do etanol brasileiro e a queda nos preços do etanol norte-americano. Justifica-se o alto preço do etanol brasileiro devido à indústria ter priorizado a produção de açúcar e ao excesso de chuvas em 2009 que prejudicou a produção da safra 2009/10.

Figura 5: Vendas das distribuidoras de combustíveis no Brasil
Fonte: ANP, 2011

Apesar da atual crise do setor, que deve se manter nos próximos quatro anos, o mercado externo mostra grande interesse devido ao fato de inúmeros países estarem preocupados com as questões ambientais e econômicas e, conseqüentemente, almejarem a redução do consumo de combustíveis fósseis e ampliarem o uso de biocombustíveis em sua matriz energética (PIRES, 2011).

Vale ressaltar que a composição da matriz energética brasileira apresenta grande vantagem em relação ao restante do mundo, por usar uma parcela significativa de energia renovável. Enquanto no Brasil há a participação de 47,3% de tais fontes, a média mundial é de 12,7%, conforme indicam os dados da matriz energética brasileira e mundial, respectivamente, Figuras 6 e 7.

Figura 6: Matriz energética brasileira
 Fonte: MME, 2010

Figura 7: Matriz energética mundial
 Fonte: MME, 2010

Os números econômicos do setor sucroalcooleiro são expressivos, pois na safra 2007/2008 o faturamento bruto anual foi de, aproximadamente, R\$ 40 bilhões, sendo que 54% desse valor se deve ao etanol, 44% ao açúcar e 2% a bioeletricidade (UNICA, 2008).

Em termos sócio-ambientais, os dados também são significativos. O Brasil possui 426 usinas sendo 249 unidades mistas, 161 produtoras de etanol e 16 produtoras de açúcar (MAPA, 2010). Além disso, são 85 mil fornecedores de cana-de-açúcar para as usinas. De todos os segmentos agroindustriais, o

sucroalcooleiro é o que gera mais emprego, totalizando 810 mil empregos diretos. Entretanto, o setor sucroalcooleiro recebe severas críticas em razão das condições de trabalho e a baixa remuneração. Atualmente, em média, um trabalhador corta manualmente, em média, 11 toneladas/dia de cana-de-açúcar, contra uma média de 6 toneladas/dia na década de 80.

Outro ponto que tem suscitado debates é a prática da queimada da palha de cana-de-açúcar realizada nos canaviais com o objetivo de facilitar a colheita, mas que provoca danos ao meio ambiente e à saúde humana. Com o intuito de eliminar esse impacto, no Estado de São Paulo, a Lei da Queima da Cana nº 11.241/2002 estabelece que as queimadas devam ser eliminadas até 2031, em áreas não-mecanizáveis (declividade acima de 12%) e até 2021 em áreas mecanizáveis (declividade abaixo de 12%). Em 2007, a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e a Secretaria Estadual de Agricultura e Abastecimento firmaram com a Unica o Protocolo Agroambiental, prevendo a antecipação da final das queimadas nos canaviais no Estado de São Paulo para 2017 em áreas não-mecanizáveis e 2014 em áreas mecanizáveis. A adesão é voluntária e as usinas que aderirem ao Protocolo receberão um selo ambiental.

Vale ressaltar que uma tonelada de cana-de-açúcar contém a energia equivalente a 1,2 barris de petróleo, sendo que em média de 35% dessa energia está armazenada quimicamente no caldo (açúcares) e o restante na biomassa de cana: bagaço e palha (HOLLANDA, 2008).

Goldemberg (2007) afirma que o etanol é uma boa alternativa em relação à gasolina, por ser produzido a partir de produtos agrícolas e não apresentar impurezas, como as encontradas em produtos petrolíferos, tais

como os óxidos de enxofre e os relativos à partícula ínfima, que são as principais fontes de poluição em áreas metropolitanas. Além do fato de que o uso do etanol pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

A redução do gás de estufa pode ser avaliada por uma análise de ciclo de vida do contrapeso de energia envolvida na preparação do etanol. Os resultados são sensíveis às suposições sobre o uso dos fertilizantes, dos inseticidas e de outras entradas na fase agrícola, assim como o uso de combustíveis fósseis na fase industrial de produção, que envolve a destilação do etanol de uma solução diluída (GOLDEMBERG & GUARDABASSI, 2009).

A produção de etanol a partir da biomassa de cana-de-açúcar é a mais eficiente, pois possui um balanço energético positivo, somente uma unidade de energia fóssil é usada para cada 9,3 unidades de energia geradas pelo etanol. Enquanto o etanol europeu obtido a partir do trigo ou beterraba atinge 2,0 vezes e o etanol que usa o milho como matéria-prima, produzido nos EUA, não excede a 1,4 vezes. (MACEDO et al., 2008).

3.1.3 Cadeia produtiva do etanol de cana-de-açúcar

O Brasil possui duas regiões que produzem cana-de-açúcar em calendários distintos. No caso da região Nordeste, nos principais Estados produtores (Alagoas e Pernambuco) a colheita ocorre entre agosto e abril. Enquanto que na região Centro-Sul do Brasil, nos principais Estados produtores (São Paulo, Minas Gerais e Paraná) a colheita ocorre entre abril e dezembro.

A cana-de-açúcar apresenta boa produtividade quando seu cultivo é realizado em duas estações distintas, ou seja, a estação quente e úmida é propícia para a germinação e a formação dos brotos; a estação fria e seca promove a maturação e o acúmulo da sacarose nos colmos. No Brasil, o ciclo completo das práticas agrícolas da cana-de-açúcar é de, geralmente, seis anos, dentro do qual ocorrem cinco cortes, sendo quatro de soqueiras e um de reforma. Inicia-se um novo plantio e ciclo produtivo quando a produção anterior apresentou redução na produtividade (NOGUEIRA et al., 2008).

A cana pode ser colhida tanto de modo manual quanto mecanizado. No sistema tradicional, realiza-se a queima prévia do canavial com o intuito de facilitar a operação, evitar problemas com animais peçonhentos e aumentar o rendimento do corte. Tal procedimento vem sendo substituído pela colheita mecanizada em virtude das restrições ambientais às práticas da queima (NOGUEIRA et al., 2008). A colheita da cana crua propicia o aumento da cobertura vegetal do solo, diminuindo a erosão e aumentando a infiltração de água. Entretanto, só pode ser realizada em terrenos que apresentem a declividade inferior a 12% (FURLANI NETO et al., 1997).

De acordo com Ometto (2000), o cultivo da cana-de-açúcar apresenta alguns impactos ambientais, como: suspensão de material particulado (poeira) no local de operação dos maquinários; compactação do solo devido o uso de máquinas agrícolas pesadas e o sulcamento do solo para receber mudas de cana-de-açúcar; alterações nas características físico-químicas e biológica do solo com o cultivo da cana-de-açúcar; erosão devido à desagregação do solo com o sulcamento; diminuição da fauna devido à extensas áreas com o monocultivo da cana-de-açúcar; além disso, a monocultura propicia aumento

de pragas e doenças, maior quantidade de ervas invasoras e diminuição da disponibilidade de nutrientes e; contaminação dos corpos d'água por pesticidas.

No Brasil, o transporte da cana-de-açúcar até a usina é predominantemente do tipo rodoviário, com o emprego de caminhões que carregam cana inteira (colheita manual) ou picada em toletes de 20 cm a 25 cm (colheita mecânica). A capacidade de carga dos caminhões (simples, duplo, treminhão e rodotrem) pode variar de 15 a 60 toneladas. Ao chegar à usina, os caminhões são pesados em uma balança que precisará a quantidade de cana-de-açúcar carregada. Após a pesagem, retira-se uma amostra do carregamento para determinar, em laboratório, do teor de sacarose na matéria-prima (COPERSUCAR, 2008).

Após essa etapa, a cana-de-açúcar colhida manualmente pode ser encaminhada à mesa alimentadora, onde será lavada para remover as impurezas, ou poderá ser estocada por um curto período a fim de evitar a redução de perdas de açúcar por decomposição bacteriológica. A cana-de-açúcar crua colhida mecanicamente não deve ser estocada nem lavada (COPERSUCAR, 2008).

Os passos seguintes consistem em preparar a cana-de-açúcar para a extração do caldo. O objetivo dessa etapa é aumentar a densidade e, conseqüentemente, a capacidade de moagem, bem como realizar o máximo rompimento das células para liberação do caldo nelas contido, obtendo-se, portanto, uma maior extração. Assim, a cana-de-açúcar é submetida a uma série de facas e desfibradores para aumentar a eficiência de extração do caldo nas moendas, que são movidas, principalmente, por turbinas a vapor

proveniente da queima do bagaço nas caldeiras (OMETTO, 2000).

Basicamente, o que interessa para a cadeia produtiva da cana é o açúcar contido na matéria-prima, que se encontra dissolvido no caldo. Portanto, o objetivo principal é extrair o máximo de caldo da cana-de-açúcar. A extração do caldo pode ser feita por duas diferentes técnicas: o uso de moendas ou de difusor de cana-de-açúcar.

Após o tratamento com o objetivo de retirar impurezas, o caldo pode ser encaminhado para a fabricação de etanol. Segundo Pereira (2008), os produtos desta etapa são: o caldo misto, o bagaço utilizado na geração de vapor e de energia elétrica, água suja, argila e resíduos que retornam ao campo para a fertilização.

Ometto (2000) diferencia os dois tipos de destilarias de etanol:

a) destilarias anexas: tem a capacidade de produzir etanol a partir do produto da fermentação do melaço, subproduto da produção de açúcar – o chamado mosto de melaço;

b) destilarias autônomas: tem a capacidade de produzir etanol obtido a partir da fermentação direta do caldo de cana.

Em um tratamento mais completo, o caldo é submetido à calagem, aquecimento e decantação. Após o tratamento, o caldo é misturado ao melaço, originando o mosto. O mosto seguirá para a fermentação juntamente com leveduras (fungos unicelulares da espécie *Saccharomyces cerevisae*) por um período de 8 a 10 horas, dando origem ao vinho. *O processo de fermentação mais usado no Brasil é o Melle-Boinot, cuja característica principal é a recuperação das leveduras de vinho mediante sua centrifugação* (NOGUEIRA et al., 2008, p. 80).

No processo de destilação, o etanol é recuperado em forma hidratada, com aproximadamente 96° GL (porcentagem em volume) correspondentes a cerca de 6% de água em peso. Nessa etapa do processo é possível retirar de 10 a 13 litros de vinhaça para cada litro de etanol produzido. Finalmente, o etanol hidratado pode ser estocado e, *a posteriori*, comercializado ou passar por um processo de desidratação para se obter o etanol anidro (COPERSUCAR, 2008). Conforme Pereira (2008), os produtos desta etapa são: torta de filtro e vinhaça que podem ser usadas para a fertilização das lavouras de cana-de-açúcar; etanol hidratado ou etanol anidro.

3.1.4 Perspectiva do mercado de etanol e açúcar

Os inúmeros estudos que foram e estão sendo realizados sobre temas que regem o futuro dos biocombustíveis, principalmente o etanol são estimativas dinâmicas, pois o potencial de oferta de biomassa não é absoluta e estática, pois depende de cenários geográficos, econômicos e políticos que se alteram (NOGUEIRA et al., 2008).

Diante do atual cenário de produção e consumo de etanol, a possibilidade de sua projeção no mercado mundial é considerável. A exequível produção de etanol a partir de diversas fontes de matérias-primas propicia condições para que cada país adote o sistema que melhor lhe convier, tendo como parâmetro a cultura mais adequada ao seu clima e solo. O prazo para o desenvolvimento e domínio dessas tecnologias dependerá do estágio tecnológico, das políticas de mitigação de impactos ambientais pelos gases de

efeito estufa e da disponibilidade de recursos financeiros de cada país.

Os Estados Unidos, por exemplo, em curto prazo desenvolveu e ampliou o parque de produção do etanol. Com o intuito de adotar de modo mais amplo o etanol, a União Européia facilita, via financiamento, a conversão de usinas produtoras de açúcar em produtoras de etanol. Inúmeros países africanos, asiáticos e latino americanos almejam na produção interna do etanol a possibilidade de exportar para países desenvolvidos (MARCOCCIA, 2007).

Rudorff et al. (2010), verificaram ao analisar imagens de satélite que na safra 2003/04 haviam 2,57 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar e na safra 2008/09 aumentou para 4,45 milhões de hectares. Tal expansão do cultivo da cana-de-açúcar foi significativa no Estado de São Paulo devido ao aumento da demanda de etanol incentivada pela produção de carros *flex-fuel*. Apesar de aumentar o cultivo da cana-de-açúcar, os autores observaram um decréscimo de área queimada para realizar o corte da cana-de-açúcar.

Segundo a Unica (2008), a produção de etanol projetada para 2020/21 é de 65,3 bilhões de litros, mais que o triplo da produção de 2006/07. O consumo interno de etanol para 2020/21 está projetado em 49,6 bilhões de litros e as exportações em 15,7 bilhões. Em relação ao açúcar, a projeção para 2020/2021 é de 50% em relação à 2006/2007. Tal projeção é mais significativa para o mercado externo (Tabela 4).

Tabela 4: Perspectiva para a produção de cana, açúcar e etanol no Brasil
Fonte: Unica, 2008

	2006/07	2010/11	2015/16	2020/21
Produção de cana-de-açúcar (milhões t/ha.)	430	601	829	1.038
Área cultivada (milhões ha.)	6,3	8,5	11,4	13,9
Açúcar (milhões t)	30,2	34,6	41,3	45,0
Consumo interno	9,9	10,5	11,4	12,1
Excedente para exportação	20,3	24,1	29,9	32,9
Etanol (bilhões de litros)	17,9	29,7	46,9	65,3
Consumo interno	14,2	23,2	34,6	49,6
Excedente para exportação	3,7	6,5	12,3	15,7

Segundo ANFAVEA (2008), as vendas de automóveis *flex fuel* alcançarão em 2017 o patamar de 73,6% do mercado interno, quase o triplo que os automóveis a gasolina, cujas vendas são projetadas em 24,8%, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Perspectiva da frota de veículos por combustível no Brasil
Fonte: Anfavea, 2008

Discriminação	2008	2017
Gasolina	63,4%	24,8%
Álcool	7,0%	1,6%
Flex fuel	29,6%	73,6%
Total	100%	100%

Entretanto, é importante ressaltar que devido à atual crise do setor sucroalcooleiro, tanto as projeções realizadas pela Unica, (2008) quanto pela ANFAVEA (2008) devem ser analisadas com cautela, pois essas foram realizadas anteriormente à crise e representam os interesses mais fortemente dos produtores de açúcar e etanol, bem como da indústria automobilística, do que dos anseios e necessidades reais da sociedade.

A expansão do setor automobilístico através dos veículos *flex fuel* é, atualmente, o principal fator responsável pelo crescimento da produção de etanol no Brasil. Para que se possibilite o crescimento da oferta, necessário se faz a implantação de novas unidades de usinas, a expansão de unidades existentes e o aumento da produtividade agroindustrial.

Devido à ampliação da demanda por etanol, ocorreu um aumento nos investimentos, tanto no número de novas unidades produtoras quanto na expansão de usinas. Entretanto, com a crise financeira de 2008, o setor sucroalcooleiro ficou descapitalizado e o investimento no setor diminuiu. Assim, nesse período também foi observado uma intensificação nos processos de fusão e aquisição, Figura 8.

e: estimativa

Figura 8: Novas Unidades Produtoras de Etanol
Fonte: UNICA (2011)

A Figura 9 mostra a distribuição espacial das usinas atuais e das novas, até 2012. Pode-se observar um pequeno deslocamento do centro produtivo para a região central do país. A expansão está ocorrendo em áreas de pastagem, situadas no oeste do Estado de São Paulo, principalmente nas regiões administrativas de Presidente Prudente, São José do Rio Preto e Araçatuba (AGUIAR et al., 2009a).

Rudorff et al. (2010) observaram que na região administrativa de Ribeirão Preto, tradicionalmente produtora de cana-de-açúcar, entre as safras de 2003/04 e 2008/09 houve três vezes mais área em renovação do que em expansão.

Figura 9: Perspectiva da distribuição espacial das usinas
Fonte: EPE, 2008

O etanol é um produto que cada vez mais recebe atenção das nações que almejam reduzir a emissão de gases nocivos à saúde humana. Sendo

assim, o mercado potencial externo tem grande possibilidade de crescimento.

O Japão visa diminuir em 20% a dependência de combustíveis fósseis até 2030. Apesar de o país ter uma capacidade de produção limitada, há indícios de que a mistura de 3% de etanol à gasolina passe para 10% em 2012. Para atender o potencial aumento na demanda, o Japão visa o aumento da produção via processos de fermentação. Entretanto, isso só será possível quando a tecnologia de lignocelulose estiver comercialmente disponível. (EPE, 2008).

A União Europeia sinalizou que a participação das fontes renováveis será de 10% da matriz energética da área de transportes até 2020. O potencial de importação está estimado em 1,9 bilhões de litros de biocombustíveis, em 2017. Cabe ressaltar que União Europeia vem proporcionando suporte para atividades de Pesquisa e Desenvolvimento sobre etanol de lignocelulose. No entanto, a expectativa é de que os volumes produzidos por esta rota tecnológica não sejam representativos no período decenal (EPE, 2008).

Nos Estados Unidos, mesmo com o alto potencial para o crescimento na produção de etanol, o consumo se manterá superior à produção, sendo necessária a complementação por importação.

Em relação às perspectivas futuras brasileiras, a política seguida pelo atual governo, consolidada pelo Ministério de Minas e Energias por meio do Plano Nacional de Energia PNE 2030, considera que investir em co-geração faz-se necessário para diversificar a matriz energética, melhorar a segurança do sistema de fornecimento de energia elétrica e aumentar a participação de energias renováveis na matriz, minimizando o efeito estufa. Tanto o bagaço quanto a palha de cana-de-açúcar podem ser usados na co-geração de

energia. Porém, essa não é a única forma de aproveitamento da matéria-prima. Além disso, pode-se considerar o uso dessa matéria-prima na obtenção do etanol celulósico. O etanol celulósico é uma tecnologia, de segunda geração, que está sendo aperfeiçoada para obtenção do etanol a partir da palha e do bagaço em nível econômico e competitivo. A expectativa é de que nos próximos anos, as chamadas tecnologias de segunda geração estejam prontas para permitir a utilização do bagaço e da palha na produção de etanol por meio do processo de hidrólise. (GOES, 2008).

3.2 Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar

As perspectivas para o setor sucroalcooleiro tanto no mercado interno quanto no mercado externo serem favoráveis. Nesse contexto, como instrumento de planejamento foi elaborado o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (ZAE Cana) para a produção de etanol e açúcar cujo objetivo é “fornecer subsídios técnicos para formulação de políticas públicas visando o ordenamento da expansão e a produção sustentável de cana-de-açúcar no território brasileiro” (MAPA, 2009, p.3).

Especificamente, o objetivo do ZAE Cana é indicar e espacializar áreas aptas à expansão do cultivo da cana-de-açúcar em harmonia com a biodiversidade e a legislação vigente. Para isso, foram seguidas diversas diretrizes, dentre elas: a exclusão de áreas para cultivo nos biomas Amazônia, Pantanal e na Bacia do Alto Paraguai; diminuição da competição com áreas de produção de alimentos e; indicação de áreas com potencial agrícola para o cultivo da cana-de-açúcar em terras com declividade inferior a 12%,

propiciando a colheita mecânica (MAPA, 2009).

O ZAE Cana almeja promover impactos relevantes, tanto ambiental quanto econômico-social, tais como: a conservação do solo e da água, por meio de técnicas conservacionistas diminuindo a erosão dos solos cultivados; evitar expansão em área com cobertura vegetal nativa; reduzir a emissão de gases de efeito estufa devido ao incentivo da colheita mecanizada; qualificação de trabalhadores do setor e; investimentos em complexos agroindustriais demandando ainda outros investimentos em infraestrutura local como logística, transporte, energia e suporte técnico.

Com o objetivo de avaliar o potencial das terras para a produção da cultura da cana-de-açúcar em regime de sequeiro foram usadas técnicas de processamento digital com o intuito de verificar as características do solo expressos espacialmente em levantamentos de solos e estudo sobre risco climático relacionados aos requerimentos da cultura (MAPA, 2009).

A área de estudo do ZAE Cana compreende todo o território nacional com exclusão do Bioma Amazônia, do Bioma Pantanal e da Bacia do Alto Paraguai, conforme Figura 10.

Figura 10: Áreas contempladas pelos estudos de Zoneamento (em branco) e distribuição espacial dos biomas Amazônia, Pantanal e bacia do alto Paraguai
Fonte: MAPA, 2009

Além das áreas indicadas na Figura 10, para a elaboração do ZAE Cana foram excluídas as terras com declividade superior a 12%, observando-se a premissa da colheita mecânica e sem queima para as áreas de expansão; as áreas com cobertura vegetal nativa; as áreas de proteção ambiental; as terras indígenas; remanescentes florestais; dunas; mangues; escarpas e afloramentos de rocha; reflorestamentos e; áreas urbanas e de mineração. Nos Estados da Região Centro-Sul do país foram também excluídas as áreas cultivadas com cana-de-açúcar no ano safra 2007/2008.

Para a verificação da aptidão climática na área de estudo foram selecionadas quatro variáveis para delimitar as áreas: temperatura média do ar, deficiência hídrica anual, índice de satisfação das necessidades de água e o risco de geada. Em relação à aptidão pedológica, particularmente para o ZAE Cana, as características de relevo das unidades de solo não foram

consideradas, devido à exclusão de terras com declividade superior a 12%. Dessa forma, o potencial pedológico foi avaliado conforme seis fatores de limitação: deficiência de fertilidade; deficiência de água; excesso de água ou deficiência de oxigênio; Suscetibilidade à erosão; Impedimentos à mecanização e impedimento ao sistema radicular. Assim, a aptidão edafoclimática é obtida por meio de cruzamento de informações de aptidão pedológica com as informações de aptidão climática.

Na Figura 11 é possível observar as áreas aptas e inaptas à expansão do cultivo da cana-de-açúcar em todo o território nacional, conforme o ZAE Cana.

Figura 11: Áreas aptas e inaptas à expansão da cana-de-açúcar no Brasil
Fonte: MAPA, 2009

As áreas indicadas para a expansão pelo Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar foram classificadas em três classes de potencial (alto, médio e baixo). Conforme pode ser observado na Tabela 6, os resultados demonstram que o Brasil dispõe de, aproximadamente, 64,7 milhões de hectares de áreas aptas à expansão do cultivo com cana-de-açúcar, sendo que destes 19,3 milhões de hectares foram considerados com alto potencial produtivo, 41,2 milhões de hectares como médio e 4,3 milhões como de baixo potencial para o cultivo. A região centro-oeste dispõe maior área apta à expansão da cana-de-açúcar, são 30,2 milhões de hectares, seguida pela região sudeste com 22,7 milhões de hectares. A soma das áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar das regiões sul, nordeste e norte totaliza 11,7 milhões de hectares. Ou seja, metade da área da região sudeste.

Tabela 6: Área total, área cultivada com cana, área apta à expansão do cultivo de cana por estado brasileiro
 Fonte: MAPA, 2009 e Moreira (2010)

REGIÃO	ESTADO	ÁREA DO ESTADO (MILHÕES DE HECTARES)	ÁREA CULTIVADA COM CANA EM 2007 (MILHÕES DE HECTARES)	ÁREA APTA À EXPANSÃO DO CULTIVO DA CANA (MILHÕES DE HECTARES)
CENTRO-OESTE				
	Mato Grosso do Sul	35,71	0,28	10,87
	Mato Grosso	90,34	0,22	6,81
	Goiás	34,01	0,40	12,60
	Distrito Federal	0,58	-	-
SUDESTE				
	São Paulo	24,82	3,85	10,65
	Minas Gerais	58,65	0,60	11,25
	Rio de Janeiro	4,37	0,05	0,48
	Espírito Santo	4,61	0,07	0,33
SUL				
	Santa Catarina	9,53	-	0,17
	Paraná	19,93	0,52	4,04
	Rio Grande do Sul	28,17	0,00	1,53
NORDESTE				
	Bahia	56,47	0,04	2,94
	Alagoas	2,78	0,43	0,19
	Piauí	25,15	0,01	0,29
	Sergipe	2,19	0,04	0,17
	Ceará	14,88	-	0,08
	Paraíba	5,64	0,11	0,09
	Maranhão	33,20	0,04	0,79
	Pernambuco	9,83	0,32	0,21
	Rio Grande do Norte	5,28	0,06	0,12
NORTE				
	Tocantins	27,76	0,01	1,14
TOTAL		493,92	7,05	64,74

Vale ressaltar que o Estado de São Paulo dispõe de maior área com alta aptidão – 7,3 milhões de hectares – à expansão do cultivo da cana-de-açúcar, apesar de a região centro-oeste dispor de maior área apta à expansão do cultivo da cana-de-açúcar.

3.3 Mudança de uso e cobertura do solo

Turner et al. (1990), Lambin et al. (1999), Lambin et al. (2001), Aguiar (2003) discutem a evolução dos conceitos de uso e cobertura do solo. Cobertura do solo se refere aos atributos biofísicos da superfície terrestre, por exemplo: floresta, área construída e água; o uso do solo contempla o uso que se faz da cobertura do solo, por exemplo: pecuária, agricultura, área residencial etc. A mudança no uso do solo normalmente gera mudanças na cobertura do solo. Porém, a mudança de cobertura no solo pode não incidir na mudança de uso.

As mudanças de uso e cobertura do solo estão ligadas de forma direta e/ou indireta aos determinantes de mudança, tais como: desenvolvimento econômico, crescimento demográfico, desenvolvimento de novas tecnologias e mudanças ambientais.

De acordo com Lambin et al. (2001), o que determina a mudança de uso e cobertura da terra é a resposta da população às condições econômicas, mediadas por fatores institucionais. Os mercados e as políticas, cada vez mais influenciados pelas forças globais, criam oportunidades e restrições para novos usos da terra.

As práticas de intensificação do uso da terra é um dos principais determinantes de vulnerabilidade dentro do sistema homem-ambiente. Ocorre impacto direto na extensão espacial de um ecossistema bem como na configuração espacial dos diferentes tipos de uso (VERBURG et al., 2004).

Conforme Aguiar (2003), a velocidade, a magnitude e a dimensão da mudança de uso e ocupação do solo podem causar impactos ambientais e

sócio-econômicos em nível global, regional e local. São eles:

- Global: o inter-relacionamento entre os padrões de uso/cobertura da terra e o aquecimento global; a diminuição na camada de ozônio; o aumento do nível do mar (como resultado do aquecimento global); a disponibilidade de alimentos e de água para a crescente população mundial; as migrações humanas e; as questões de segurança humana frente a alterações/acidentes causadas por fenômenos naturais ou mudanças tecnológicas.
- Regional: poluição do ar e da água; degradação do solo; desertificação; eutroficação de corpos d'água; assoreamento; acidificação e; perda de biodiversidade.
- Local: erosão; sedimentação; contaminação e extinção de espécies; produtividade da terra; qualidade de vida; a expansão dos subúrbios e áreas industriais nas periferias das grandes cidades.

As mudanças de uso e cobertura da terra são conduzidas pelas interações no espaço e no tempo entre as dimensões biofísica e humana. Os potenciais impactos de mudança de uso e cobertura da terra determinadas por fatores físicos, econômicos e sociais têm estimulado pesquisas para a compreensão da mudança no uso da terra e a busca pela mitigação de seus efeitos (VERBURG et al., 2002). Somando a isso, o estudo das mudanças de uso e cobertura visam prever a intensidade e/ou a localização das mudanças a médio e longo prazo; e analisar os impactos de tais mudanças (AGUIAR, 2003).

3.4 Escorrimento superficial e produção de sedimentos em bacias hidrográficas

O crescimento alarmante dos principais problemas ambientais como a degradação dos recursos naturais, principalmente do solo e da água tem gerado grandes preocupações à sociedade (Bertoni e Lombardi Neto, 1999).

A erosão do solo é a principal causa da degradação das terras agrícolas e uma ameaça à integridade dos ecossistemas aquáticos, devido aos processos de desprendimento e arraste das partículas do solo por meio da ação do vento (erosão eólica) e da água (erosão hídrica). Os danos causados pela erosão hídrica são: perda de solo, perda de nutrientes, aumento do custo da produção, redução da produção das áreas agrícolas, assoreamento dos corpos hídricos e poluição e eutrofização de corpos hídricos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999).

Erosão do solo pela água pode ser definida como o desprendimento de partículas do solo e seu transporte. Quando ocorre uma chuva, parte de suas gotas chegam diretamente ao solo, devido à ausência de vegetação (precipitação direta) e a outra parte da chuva é interceptada pelas árvores ou vegetação (drenagem foliar). Tanto a precipitação direta quanto a drenagem foliar possibilitam que as partículas de solo sejam removidas pelo impacto da gota de chuva, sendo dependente das características físicas e químicas do solo, que definem sua susceptibilidade à desagregação (MINELLA et al. 2010). O desprendimento das partículas do solo produz sedimentos.

A chuva que chega ao solo pode infiltrar e, conseqüentemente, aumentar a umidade do solo ou percolar. Quando a capacidade de armazenamento da água no solo é saturada, ou seja, a capacidade de

infiltração é excedida (Minella et al., 2010), o excesso de água move-se a favor da declividade carreando os sedimentos desprendidos (Lelis, 2011), constituindo o escoamento superficial (MORGAN, 1997). Juntamente com os sedimentos em suspensão, o escoamento superficial transporta nutrientes, matéria orgânica, sementes, pesticidas e fertilizantes, que poluem os recursos hídricos e causam grandes prejuízos à produção agropecuária (SOUTO e CRESTANA, 2000; PEREIRA, 2000; FRAGOSO, 2008; e UZEIKA, 2009; LELIS 2011).

Pruski (1997) e Lelis (2011), afirmam que ocorre a deposição do material sólido quando a energia do fluxo superficial não é suficiente para transportá-lo.

A erosão hídrica, principal tipo de erosão em regiões tropicais, é um processo complexo e se manifesta de maneira variável com dependência em cinco fatores: chuva, solo, topografia, uso e ocupação do solo e práticas conservacionistas (BLAINSKI et al. 2010).

A chuva é o fator climático que exerce maior influência na erosão dos solos. A erosividade é a capacidade potencial da chuva de provocar erosão (SANTOS, 2008). Para isso, relaciona-se o tempo de duração a intensidade e a energia cinética (pelo tamanho das gotas e pela velocidade terminal das mesmas no momento de impacto na superfície do solo) da precipitação. Segundo Richter (1998) citado por Hiepe (2008), para ser considerada erosiva, a precipitação deve ter intensidade superior a 5 mm em 30 minutos de duração.

Mesmo que a chuva, a declividade do terreno e a cobertura vegetal sejam as mesmas, alguns solos são mais suscetíveis ao processo de erosão que outros. Tal diferença que ocorre devido às propriedades do solo é conhecida como erodibilidade do solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999). Segundo Minoti (2006), a velocidade de infiltração, a permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água; são as propriedades que influenciam na erodibilidade.

A topografia das terras agricultáveis desempenha papel importante no condicionamento da erosão do solo. A declividade do terreno está diretamente ligada ao escoamento superficial e a capacidade de transporte de sedimento pela enxurrada. O comprimento das rampas influencia na velocidade do escoamento superficial, assim como é relevante no que se refere ao volume de material transportado (SANTOS, 2008).

Conforme Santos (2008), a cobertura vegetal é fator importante na redução das taxas de erosão do solo devido à proteção do solo contra impacto da chuva, diminuição da velocidade de escoamento superficial e aumento da capacidade de infiltração de água no solo.

Existem diferentes práticas conservacionistas, tanto vegetativas quanto mecânicas. Para serem adotadas, dependerá das condições técnicas de recomendação, da capacidade do agricultor em executá-las e do possível benefício que as práticas conservacionistas possam trazer (SANTOS, 2008).

Xavier (2009) afirma que é possível verificar as características e/ou estado da bacia hidrográfica por meio da quantidade de sedimentos transportada pelos rios. Isso possibilita o planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos da região na qual a bacia hidrográfica está inserida.

3.5 Modelagem ambiental

3.5.1 CLUE-S

O uso de modelos espaciais de mudanças de uso e cobertura da terra possibilita estimar quanto, quando e onde as mudanças poderão ocorrer, ou seja, as possíveis trajetórias de uso e demandas de ocupação do espaço em um futuro próximo. Sendo assim, modelos de simulação proporcionam a avaliação dos impactos ambientais, sociais e econômicos e isso possibilita as suas mitigações. Essas ferramentas são extremamente importantes, pois fornecem suporte às decisões no desenvolvimento de políticas públicas (SOLER, 2010).

O arcabouço de simulação CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects*) desenvolvido por Veldkamp & Fresco 1996, Verburg et al., 1999 foi desenvolvido com o intuito de simular mudanças de uso da terra usando as relações quantificadas empiricamente entre os diferentes usos da terra e seus fatores determinantes em combinação com modelagem dinâmica da concorrência entre os tipos de uso da terra. O arcabouço CLUE foi desenvolvido com foco para grandes extensões territoriais, ou seja, nível nacional e continental, não sendo adequado para escalas locais e regionais devido às diferenças entre as representações de dados contínuos e discretos dentre outras características que dependem de conhecimento localizado geograficamente. Assim, o arcabouço CLUE foi adaptado para as aplicações locais e regionais, constituindo o CLUE-S – *Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent (CLUE-S)*.

Veldkamp, A., and L. O. Fresco. 1996. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological modelling* 91:231–248.

Verburg, P. H., A. Veldkamp, G. H. J. de Koning, K. Kok, and J. Bouma. 1999a. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological modelling* 116:45–61.

O CLUE-S foi desenvolvido inicialmente pelo departamento de Ciências Ambiental (Land Dynamics Group) na Universidade de Wageningen – Países Baixos em 1999, com o objetivo de avaliar as mudanças nos padrões espaciais de uso do solo em consequência das interações entre a dinâmica espacial e temporal de sistemas de uso da terra (VERBURG et al., 2004). Vale ressaltar o CLUE-S está disponível para download na página (<http://www.cluemodel.nl/>). Além disso, é possível baixar o manual e a versão de demonstração que possui algumas restrições, por exemplo: número de regiões e número de tipo de uso do solo. Para obter a versão completa, é preciso fazer um cadastro na página do modelo CLUE-S e realizar uma curta descrição do intuito do uso do modelo e em qual país ele será aplicado. Atualmente, o grupo de desenvolvimento do CLUE-S está sediado na Universidade de Amsterdã.

O modelo CLUE-S possui as seguintes características:

1. é discreto e espacialmente explícito, ou seja, cada classe de uso do solo, assume valores binários em cada ponto no espaço representado por células regulares no espaço geográfico virtual;
2. pode ser aplicado em escala local e regional;
3. multibinomial, pois a mudança de uma classe de uso da terra para outra ocorre em função da maior probabilidade de alocação dada por modelos de regressão logística calculados empiricamente através de um conjunto de determinantes potenciais;
4. considera fatores atuando em escalas locais (fatores determinantes locais) e escalas regionais (demanda agregada do uso do solo) e;
5. enfoque estatístico, baseado na regressão logística para quantificar os pesos dos fatores determinantes de mudança de uso e cobertura do solo

sobre a probabilidade de alocação de uma determinada classe de uso e ocupação do solo.

Segundo Soler (2010), o CLUE-S, modelo espacialmente explícito, requer um banco de dados que contenha fatores considerados importantes para a área de estudo. Sendo assim, esse banco de dados deve ser único, pois cada área de estudo possui características diferentes assim como fatores determinantes na dinâmica do uso e cobertura do solo.

Para montar o banco de dados, deve-se utilizar parâmetros que influenciem direta ou indiretamente nas mudanças de uso do solo, por exemplo: Uso e cobertura da terra; Cultivos específicos; Dados de pecuária; Demografia; Dados socioeconômicos; Manejo da terra; Dados geográficos e Dados biofísicos.

De acordo com Verburg et al. (2002), o modelo é sub-dividido em dois módulos distintos, denominados: a) módulo de demanda não-espacial e b) módulo de alocação espacialmente explícita, Figura 12, descritos a seguir.

Figura 12: Visão geral do procedimento do CLUE-S
Adaptado de Verburg et al. (2002).

- a) Módulo não-espacial: calcula a mudança de área para todos os tipos de uso do solo de forma agregada. Sendo assim, para ocorrer o aumento da área de um tipo de uso é necessário que um ou os demais tipos de usos diminuam. As simples tendências extrapolativas ou modelos econômicos complexos possibilitam o cálculo da demanda de área para os diferentes usos do solo em estudo. Os resultados desse módulo devem determinar a área coberta pelos diferentes tipos de uso e cobertura do solo ao longo do tempo (geralmente, ano a ano), que são valores de entrada do módulo de alocação.
- b) Módulo espacial: é nesse módulo que ocorre a simulação. As demandas são alocadas espacialmente no plano celular. O processo de alocação envolve uma combinação de modelagem dinâmica, análise espacial e empírica.

Os módulos espacial e não espacial do CLUE-S estão divididos em dois sub-modelos. Sendo assim o CLUE-S possui quatro módulos:

1. características da área de estudo;
2. Políticas e restrições de uso do espaço;
3. Parâmetros específicos de conversão e
4. Demanda de uso da terra.

Esses quatro módulos compõem o fluxo de informações, que juntos criam uma série de condições e possibilidades para os quais o modelo calcula a melhor solução por meio de um procedimento iterativo, Figura 13.

Figura 13: Visão geral dos módulos que compõem o fluxo de informações no modelo CLUE-S Adaptado de Verburg et al. (2002)

- 1) Políticas e restrições de uso do espaço:** é possível definir áreas onde as mudanças do uso do solo possuem algumas restrições parciais ou totais. Assim, para rodar o modelo CLUE-S considerando tais restrições, necessário se faz apresentar mapas que indiquem as áreas de restrição. As áreas de conversão restritas podem ser indicadas na

matriz de conversão de uso da terra.

2) Parâmetros específicos de conversão: o CLUE-S possui dois tipos de parâmetros de conversão entre as classes do uso do solo: a elasticidade de conversão e a sequência de transição de uso e cobertura da terra. Esses parâmetros definem a dinâmica espacial e temporal das mudanças de uso da terra. A elasticidade de conversão refere-se à facilidade ou não de determinado uso da terra ser convertido em outro uso, levando em consideração o tempo, o custo da conversão e a facilidade da mudança de localização quando a sua área se torna mais adequada para outro tipo de uso do solo. Assim sendo, o valor da elasticidade de conversão de um determinado uso da terra varia de 0 (fácil conversão) a 1 (irreversível). Para cada uso da terra é designado um valor de elasticidade. Os parâmetros da sequência de transição de uso e cobertura da terra especifica a lógica das conversões entre os tipos de uso do solo durante a simulação. Em outras palavras, a sequência de transição determina para cada uso do solo as possíveis conversões de uso, bem como o seu tempo mínimo e máximo de permanências. As regras de conversões devem ser especificadas na matriz de conversão entre os tipos de uso do solo atual na simulação, Figura 14.

Figura 14: Exemplo de matriz de conversão com as diferentes opções implementadas
Fonte: Soler, 2010

3) Demanda de uso da terra: a demanda de cada do uso do solo pode ser através de possíveis cenários da evolução temporal dos sistemas terrestres em unidades de área. Ou seja, a demanda define a quantidade de área a ser alocada para cada classe a cada ano. Para definir a demanda, pode-se utilizar cenários construídos por métodos de extrapolação de tendências de mudança de uso e cobertura do solo, modelos de mudanças macro-econômicas, *workshops* com *stakeholders* e mapeamento por sensoriamento remoto .

A demanda agregada de usos do solo é um dos parâmetros mais importantes na modelagem do CLUE-S, pois essa define a área a ser alocada para cada classe em cada iteração (ano de simulação). Verburg et al. (2002), Verburg & Overmars (2007) e Soler (2010) afirmaram que o cálculo da demanda de usos do solo é realizado paralelamente ao modelo CLUE-S e pode ser baseado em diferentes técnicas como o método de extrapolação de

tendências – conforme o histórico do uso da terra da área de estudo – e modelos econométricos. Ainda conforme os autores, a extrapolação de tendências é uma das técnicas mais comuns para o cálculo de demanda.

4) Características da área de estudo: geralmente, a preferência de um tipo de uso da terra em determinado tempo propicia as conversões desse uso do solo frente aos demais usos possíveis existentes à área de estudo. Baseadas nas condições biofísicas, geopolíticas e socioeconômicas de um local, é possível calcular uma probabilidade relativa de alocação dos diferentes tipos de uso. A função logística é útil na modelagem, pois relaciona as probabilidades de cada uso com características biofísicas e socioeconômicas em um modelo de regressão logístico que é definida da seguinte forma:

$$\text{Log} \left[\frac{P_i}{1 - P_i} \right] = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i} \quad (1)$$

onde P_i é a probabilidade de uma célula de análise ser convertida em um tipo uso do solo e X 's são os fatores de localização. Os coeficientes (β) são estimados por meio de regressão logística utilizando o uso atual como variável dependente (VERBURG et al., 2002; VERBURG & VELDKAMP, 2004, SOLER 2010).

A regressão logística auxilia na determinação da probabilidade de alocação do uso do solo. É um método usado para avaliar quais os fatores influenciam na mudança de uso do solo e em que extensão afetam a localização de usos do solo na área de análise. Esse método estatístico é adequado quando a variável dependente – nesse caso uso do solo – é do tipo

dicotômica, isto é, recebe o valor binário 0 ou 1. Isso quer dizer que o uso do solo, no momento da conversão, possui a alternativa de se manter o mesmo ou de converter-se em outro (GARSON, 2002).

Os fatores que influenciam na mudança de cada uso e cobertura do solo (variáveis dependentes) são denominados fatores explanatórios (variáveis independentes). A análise de regressão logística é desenvolvida para cada uso do solo em separado.

Vale ressaltar que no modelo CLUE-S as localidades são convertidas para o tipo de uso do solo com maior probabilidade, acatando um mapa de distribuição dessa probabilidade para cada tipo de uso da terra.

O processo de alocação espacial funciona da seguinte forma: após fornecer todos os dados de entrada do modelo CLUE-S, são calculadas, em intervalos discretos de tempo, as mudanças mais prováveis de uso e cobertura da terra.

O processo de alocação espacial (Figura 15) é determinado pelas seguintes etapas:

- 1) Determinação das células que podem sofrer conversões. O processo de alocação espacial não considera áreas com restrições espaciais e células que estão em uma localidade onde a conversão não é permitida de acordo com a matriz de conversão.
- 2) Cálculo das probabilidades totais para cada uso do solo. Para cada célula i , a probabilidade $TPROP_{i,u}$ é calculada para cada uso u , conforme:

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u \quad (2)$$

onde

$P_{i,u}$ é adequação da célula i assumir o uso u (baseado no modelo de regressão logística);

$ELAS_u$ é a elasticidade da conversão para a classe de uso do solo u .

$ITER_u$ é uma variável de iteração que é específica para a classe de uso solo u .

- 3) Alocação preliminar. É feita uma alocação preliminar com um valor igual da variável de iteração ($ITER_u$) para todas as classes de uso do solo e alocando a classe com maior probabilidade total para a célula considerada. Isto gerará mudanças em algumas células.

- 4) Comparação entre área alocada e a demanda agregada. Para cada classe de uso do solo, se compara área total alocada com sua respectiva demanda agregada.

Para as classes cuja área de alocação é menor que a demanda, o valor da variável de iteração $ITER_u$ é aumentado. Para as classes cuja área de alocação é maior que a demanda, o valor da variável de iteração $ITER_u$ é diminuído.

- 5) Iteração. As etapas de 2 a 4 serão repetidas até que as demandas do uso do solo sejam obtidas. Quando a área de alocação de cada classe se iguala à demanda, o mapa final é salvo e se inicia o cálculo do próximo ano.

Figura 15: Fluxograma do módulo de alocação do modelo CLUE-S
 Fonte: Verburg & Veldkamp, 2004

O modelo CLUE-S possui quase dez anos de existência e, segundo Verburg & Overmars (2007) já foi empregado em diversos países da Europa e da América Latina.

No Brasil, os trabalhos realizados com o CLUE-S ainda são escassos, conforme Quadro 1 e Quadro 2.

Quadro 1: Trabalhos com aplicação do CLUE-S no Brasil

Referência	Local de estudo	Objetivo do trabalho
KUHN (2005)	Parque Nacional do Superagui - Paraná	Desenvolver e aplicar uma metodologia para analisar as transformações de uso do solo em regiões com unidade de conservação ambiental e comunidades tradicionais.
Valência (2008)	Bacia do Coxim – Mato Grosso do Sul	Aplicar o modelo CLUE-S na bacia do Coxim, Mato Grosso do Sul, com o intuito de desenvolver uma metodologia para aprimorar sua aplicação em outras regiões.
FREITAS (2011)	Lages – Santa Catarina	Traçar um panorama de modelagem dinâmica baseado em autômatos celulares determinísticos no município de Lages – Santa Catarina, entre os anos de 2002 e 2008.

Quadro 2: Trabalhos com aplicação de versões adaptadas do CLUE-S no Brasil

Referência	Local de estudo	Objetivo do trabalho
Moreira et al. (2005)	Amazônia	Este trabalho oferece uma organização de software para a construção computacional que suportam os modelos dinâmicos de múltiplas escalas.
Coelho (2009)	Santarém – Pará	Estudar o processo de transformação da paisagem ocorrido após a introdução da agricultura capitalizada na região de Santarém, com foco nas relações entre essas transformações e a estrutura fundiária da região.

De acordo com Verburg et al. (2002), para aplicar o modelo é necessário que se tenham dados espaciais de pelo menos 1 ano. No entanto, para que se possa calibrar e validar o modelo é necessário possuir dados com intervalo de pelo menos 10 anos, preferencialmente.

3.5.2 SWAT

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi desenvolvido, na primeira metade da década de 90, pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) no Texas, Estados Unidos da América (ARNOLD et al. 1998). O SWAT é resultado da fusão de outros dois modelos desenvolvidos no mesmo departamento, o *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) e o *Routing Outputs to Outlet* (ROTO). Além da incorporação de fatores de diversos outros modelos. Desde então, o modelo passou por sucessivas revisões e atualizações. A última versão do modelo é o SWAT 2009.

O SWAT é um software de domínio público sendo possível obter o modelo no site (<http://swatmodel.tamu.edu/>), assim como seus manuais (Di Luzio et al. 2002; Neitsch et al., 2002a; Neitsch et al., 2002b; Neitsch et al., 2005; Neitsch et al., 2010) e publicações.

Conforme Neitsch et al. (2002a) e Neitsch et al. (2005), o modelo matemático foi desenvolvido com o intuito de prever o impacto das práticas de manejo do solo sobre a produção de sedimentos, escoamento, carga de poluentes e qualidade da água em bacias hidrográficas que possuem diferentes tipos, usos e manejos de solos, durante longos períodos.

Para atingir tais objetivos, o modelo SWAT possui as seguintes características, conforme Arnold et al. (1998); Neitsch et al. (2002a); Neitsch et al. (2005); Minoti (2006); Uzeika (2009); Xavier (2009) e Lelis (2011):

- ✓ O modelo requer informações específicas sobre a vegetação, o clima, a topografia, as propriedades e as práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica estudada. Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, dentre outros, são diretamente modelados pelo SWAT usando os dados de entrada. Vale ressaltar que as bacias hidrográficas sem dados de monitoramento também podem ser modeladas; o impacto relativo aos dados de entrada alternativos (por exemplo, mudanças nas práticas de gestão, o clima, vegetação, etc) sobre a qualidade da água ou outras variáveis de interesse pode ser quantificado.
- ✓ É computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas sem gastos excessivos de tempo;
- ✓ É um modelo contínuo, capaz de simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos de tempo. O modelo não foi desenvolvido para simular eventos isolados de precipitação.

Para fins da modelagem, a bacia hidrográfica pode ser dividida em diversas sub-bacias. Minoti (2006), afirma que a divisão em sub-bacias é interessante, pois é possível observar as diferenças nas suas características hidrológicas devido aos diferentes tipos ou usos do solo nas diversas áreas da bacia hidrográfica.

Conforme Neitsch et al. (2002a), as informações de entrada para cada sub-bacia são agrupadas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's) baseadas no tipo de solo, uso e cobertura do solo e em classes de declividade preservando a homogeneidade, permitindo maior discretização do modelo na área simulada a fim de identificar áreas mais vulneráveis.

Conforme Neitsch et al. (2002a); Neitsch et al. (2002b) e Di Luzio et al. (2002), o modelo SWAT apresenta os seguintes componentes: clima, ciclo hidrológico, cobertura do solo e crescimento de plantas, erosão, nutrientes e pesticidas e práticas de manejo. Serão descritos a seguir os componentes relacionados ao objetivo deste trabalho acadêmico.

Clima: o clima de uma bacia hidrográfica fornece a umidade do ar e a energia que controlam o balanço hídrico. As variáveis climáticas solicitadas pelo modelo são: os dados de precipitação, temperaturas do ar máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar, com a possibilidade da entrada diária dos dados observados. Caso necessário, ou quando estes não estiverem disponíveis, o modelo pode simulá-los.

Ciclo hidrológico: interceptação da precipitação em superfície vegetativa, infiltração, percolação, evapotranspiração e escoamento superficial.

Segundo Minoti (2006), o balanço hídrico é a força que conduz todos os processos simulados pelo SWAT. A simulação hidrológica da bacia hidrográfica é separada em duas grandes divisões: a fase terrestre do ciclo hidrológico e a

fase aquática. A fase terrestre controla a quantidade de água e as cargas de sedimento, nutrientes e pesticidas que atingem o canal principal de cada sub-bacia. A fase aquática está relacionada ao movimento de água, sedimentos, entre outros, pela rede de canais em direção à saída da bacia hidrográfica.

Na fase terrestre, o ciclo hidrológico é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (3)$$

em que:

SW_t = quantidade final de água no solo (mm H₂O);

SW₀ = quantidade inicial de água no solo no dia i (mm H₂O);

t = tempo (dias);

R_{day} = quantidade de precipitação no dia i (mm H₂O);

Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial no dia i (mm H₂O);

E_a = quantidade de evapotranspiração no dia i (mm H₂O);

w_{seep} = quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior no dia i (mm H₂O);

Q_{gw} = quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i devido ao escoamento sub-superficial (mm H₂O).

A evapotranspiração inclui todos os processos de transpiração das plantas e evaporação de água das plantas e do solo. O SWAT realiza o cálculo da evapotranspiração potencial e real.

A evapotranspiração potencial foi definida como a taxa de evapotranspiração que ocorreria numa grande área completamente e

uniformemente coberta com vegetação em crescimento, com acesso a uma disponibilidade ilimitada de água no solo e não exposta a efeitos de mudanças microclimáticas, a exemplo da advecção ou acúmulo de energia (NEITSCH et al., 2002).

Depois de determinada a evapotranspiração potencial, a evaporação real é calculada. O modelo SWAT considera, primeiramente, a evaporação da água interceptada pelas plantas e, *a posteriori*, a quantidade de água transpirada pelas plantas e evaporada do solo.

Em relação ao escoamento superficial, este ocorre quando a taxa de aplicação de água no solo excede a taxa de infiltração (MINOTI, 2006).

O método utilizado para o cálculo do escoamento superficial foi o método do número da curva do SCS (*Soil Conservation Service*). Esse considerada na sua formulação, a quantidade de água interceptada pelas plantas.

A equação para o cálculo do número da curva do SCS é:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (4)$$

Sendo:

Q_{surf} = quantidade de escoamento superficial acumulado ou excesso de chuva (mm);

R_{day} = quantidade de chuva em um dia (mm);

I_a = perdas iniciais que incluem acumulação superficial, interceptação e infiltração anterior ao escoamento superficial (mm);

S = parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro de retenção varia devido ao uso da terra, ao manejo, à

inclinação e temporalmente em função das variações da quantidade de água no solo. O parâmetro de retenção é calculado por:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

Sendo:

CN = o número da curva para um dia. É função da permeabilidade e uso da terra e umidade do solo anterior à precipitação.

O número da curva do SCS (CN) é uma função da permeabilidade do solo, uso da terra e condições antecedentes de água no solo. O CN é definido de acordo com o tipo hidrológico do solo. (MINOTI, 2006).

Cobertura do solo e crescimento de plantas: o SWAT é capaz de diferenciar plantas anuais e perenes. Esse componente considera o crescimento potencial, baseado na energia interceptada e na eficiência da planta de converter energia em biomassa. A interceptação de energia é estimada em função da radiação solar e do índice de área foliar da planta; transpiração e; absorção de nutrientes.

Erosão: a erosão causada pela chuva e o escoamento são estimados no modelo SWAT, para cada HRU, a partir da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (Modified Universal Soil Loss Equation - MEUPS):

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \quad (6)$$

Sendo:

sed = produção de sedimento em um dia (tonelada métrica);

Q_{surf} = lâmina de escoamento superficial (mm/ha.);

q_{peak} = vazão de pico (m³/s);

area_{hru} = área da HRU (ha.);

K_{USLE} = fator erodibilidade da EUPS;

C_{USLE} = fator cobertura e manejo da EUPS;

P_{USLE} = fator práticas conservacionistas da EUPS;

LS_{USLE} = fator topografia da EUPS;

CFRG = fator fragmentos grosseiros.

Para possibilitar o cálculo dos fenômenos hidrológicos é necessário fornecer ao modelo SWAT dados que lhe permitam efetuar tais cálculos. Para rodar o modelo SWAT é indispensável o seguinte conjunto de dados, conforme Figura 16:

- ✓ Modelo Digital do Terreno (MDT/DEM – Digital Elevation Model);
- ✓ Mapa de uso e ocupação do solo;
- ✓ Mapa da pedologia;
- ✓ Mapa da hidrografia;
- ✓ Parâmetros para cada tipo de solo e;
- ✓ Dados meteorológicos diários (precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento).

Figura 16: Sequência dos dados de entrada e a visualização dos dados de saída do modelo SWAT

O modelo SWAT foi aplicado em inúmeros países, dentre eles: Estados Unidos, Holanda, Coréia, Suíça, Colômbia, Itália, Alemanha, Chile, Romênia, Iran, Vietnã, Filipinas, China etc. Garbossa et al. (2011) realizaram um levantamento para identificar as aplicações do modelo SWAT em bacias hidrográficas brasileiras de 1999 a 2010, assim como os seus pontos fortes e fracos. Ao total, foram mais de setenta publicações, dentre elas artigos, dissertações e teses. Sendo o Brasil um país com uma importante extensão territorial, notou-se uma variabilidade significativa de climas e comportamentos hidrológicos das bacias modeladas. Os resultados fornecidos pelos estudos mostram que o modelo SWAT teve bom desempenho em várias regiões brasileiras.

Segundo Garbossa et al. (2011), dos trabalhos realizados em bacias hidrográficas brasileiras, 43% visavam estimar a produção de sedimentos, 41% estimaram o escoamento superficial e 16% nutrientes. Além disso, é possível verificar que a região sul do Brasil é responsável por 42% dos estudos realizados, seguida pela região sudeste com 32%.

3.6 Cenários

De acordo com Rounsevell et al. (2005), devido às incertezas no desenvolvimento econômico, político e social, o futuro do uso do solo é considerado desconhecido. Ainda que não seja possível a previsão do uso do solo futuro, a construção de cenários possibilita explorar futuros acontecimentos.

Para Raskin et al. (2005, p. 36), cenários são histórias plausíveis, desafiadoras e relevantes sobre a forma como o futuro poderá se desdobrar, que pode ser dito em palavras e números. Cenários não são previsões, projeções, predições ou recomendações. Os cenários vislumbram caminhos futuros e contabilização de incertezas críticas.

Alcamo (2001) afirma que em estudos ambientais, cenários podem ter diversas definições. O autor exemplifica a definição do Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, que descreve cenários como “imagens do futuro ou futuros alternativos, os quais não são previsões nem predições, mas uma imagem alternativa sobre como o futuro pode se desdobrar”. (NAKICENOVIC et al., 2000, *apud* ALCAMO, 2001).

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; deVRIES, H.J.M. et al. (2000). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) special report on emission scenarios (SRES)

Segundo PNUMA (2004), os cenários possibilitam verificar alternativas do que poderia acontecer e de que maneira a população poderia agir para promover ou confrontar acontecimentos e tendências.

Segundo Rounsevell et al. (2005), a idéia principal da abordagem dos cenários é o uso de várias perspectivas para explorar um problema específico.

Contudo, a escala dos cenários desenvolvidos é um fator importante, pois os estudos realizados em escala global fornecem poucos detalhes ao nível regional, portanto não podem representar processos regionais; estudos em escala local são interessantes para verificar condições específicas de uma área de estudo, porém podem não abordar uma escala mais ampla (VERBURG et al., 2006).

Alcamo (2001) e Alcamo (2008) afirma que os principais elementos de um típico cenário ambiental são:

- ✓ Forças direcionadoras, são os fatores determinantes que influenciam as mudanças descritas nos cenários;
- ✓ Descrição passo a passo das mudanças, é um retrato do desenvolvimento da sociedade e do meio ambiente assim como a descrição da interação entre as forças motrizes ao longo do tempo;
- ✓ Horizonte temporal, é a descrição do estado final do cenário;
- ✓ O ano base, é o ano inicial do cenário;
- ✓ Imagens alternativas, geralmente é desenvolvido um conjunto de cenários com diversas alternativas futuras.

De acordo com Alcamo (2001) e Alcamo (2008) os cenários podem ser utilizados para: fornecer uma imagem alternativa futura do estado do ambiente na ausência de políticas ambientais adicionais; aumentar a conscientização

sobre as atuais e futuras conexões entre os diversos problemas ambientais; ilustrar como as políticas alternativas podem atingir um objetivo ambiental; combinar informações quantitativas e qualitativas sobre a evolução futura dos problemas ambientais; identificar a robustez de uma determinada política ambiental sob diferentes condições futuras, auxiliar tomadores de decisões na análise dos problemas ambientais; aumentar o conhecimento sobre os problemas ambientais já existentes e conscientização de novos.

Conforme Alcamo (2008), fornecer um quadro interdisciplinar com o objetivo de analisar os problemas ambientais e tentar descobrir soluções para tais problemas e; oferecer uma oportunidade para os interessados se envolverem no desenvolvimento de políticas públicas e de planejamento de determinada atividade ou ação humana, contribuindo na tomada de decisões.

Os cenários podem ser classificados conforme várias categorias. As categorias mais comuns são: explanatório e antecipatório; quantitativo e qualitativo.

Os cenários explanatórios iniciam-se com a situação presente e exploram o desenvolvimento de futuros alternativos. Os cenários antecipatórios iniciam-se com uma visão preestabelecida – que pode ser desejável, otimista ou pessimista – e analisam diferentes estratégias para alcançar tal decisão. Os cenários quantitativos são geralmente calculados em modelos de computador e fornecem informações numéricas em forma de mapas, gráficos e tabelas. É vantajoso do ponto de vista científico, pois suas premissas são documentadas e mais transparentes, mas a compreensão por não-especialistas é mais difícil. O cenário qualitativo é baseado exclusivamente em narrativas e descreve os futuros possíveis, assim a vantagem desse cenário é representar os diferentes

pontos de vista dos interessados e especialistas ao mesmo tempo; a desvantagem é que as suas premissas não são claramente explicitadas (ALCAMO, 2001 e ALCAMO, 2008).

Rounsevell et al. (2005), afirmam que os modelos usados na construção de cenários de mudança de uso da terra deve ser transparente com os mecanismos modelados, sendo que os valores dos parâmetros e os processos devem ser bem descritos. Caso contrário, impossibilita o debate de suas hipóteses.

Para Alcamo (2001), tanto o cenário quanto a avaliação ambiental tem a importante missão de conectar a ciência ambiental com a política. Além disso, sintetizam o conhecimento científico, facilitam o seu acesso e com isso possibilitam o desenvolvimento de políticas (ALCAMO, 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Áreas de estudo

4.1.1 Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

A microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas (MBH-G) está localizada na região central do Estado de São Paulo, entre as coordenadas Universal Transverso Mercator (UTM) 7.593.434m e 7.608.076m de latitude Sul, 195.432m e 205.149m de latitude Oeste, nos municípios de São Carlos, Rincão, Santa Lúcia e Américo Brasiliense, Figura 17.

Figura 17: Localização da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas no Estado de São Paulo

O ribeirão das Guabirobas é o único curso d'água a drenar a microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas, que percorre longitudinalmente a maior parte da microbacia até desaguar na planície de inundação do rio Mogi-Guaçu, que por sua vez, pertence à bacia hidrográfica do Rio Paraná, a qual abrange boa parte das regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil (MINOTI, 2006).

A Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas ocupa uma área de 5146,75 hectares e, atualmente, é composta por cana-de-açúcar (2876,75 ha.), laranja (1417,5 ha.), eucalipto (233,5 ha.), pastagem (109,4 ha.), vegetação natural (473,25 ha.) e avicultura (36,25 ha.) que ocupa uma área pequena dentro da MBH-G, pois é parte de uma granja que está inserida em outra microbacia vizinha. Os solos predominantes na área de estudo são os Latossolos – Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho Distrófico (LVw) e Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) – restando 1% de área ocupada com a associação Gleissolos e Cambissolos.

A MBH – G possui um relevo suave ondulado, donde mais de 95% da microbacia insere-se na faixa de valores de zero a 8% de declividade, Figura 18.

Figura 18: Mapa de declividade da Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

A escolha da Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas como uma das áreas de estudo do presente trabalho, deve-se à três fatores. O primeiro é a área de estudos estar inserida em uma região do Estado de São Paulo consolidada com a cultura da cana-de-açúcar. Na Figura 19 é possível observar as áreas ocupadas por cana-de-açúcar em cada um dos municípios que a MBH-G está inserida nas últimas safras. Nota-se que todos os municípios possuem histórico com o cultivo da cana-de-açúcar.

Figura 19: Área cultivada com cana-de-açúcar nos municípios de Américo Brasiliense, Rincão, Santa Lúcia e São Carlos
Fonte: Canasat (2011)

Conforme Aguiar et al. (2009b), a Região Administrativa Central, que na safra de 2008/09 possuía 389.941 ha. de cana-de-açúcar, apresentou a taxa de crescimento de 45,54% (aproximadamente 9% ao ano) entre as safras 2003/04 e 2008/09. Nesse mesmo período foram reformados 190.640 ha. As áreas em reforma são indicadores de consolidação da cultura da cana-de-açúcar, pois essa é uma cultura semi-perene. É importante ressaltar que a taxa de crescimento da região Central não é considerada tão significativa em relação às outras Regiões Administrativas do Estado de São Paulo, que apresentaram um crescimento de até 213,06%.

O fato de a região central possuir uma das maiores áreas de ocupação da cultura da cana-de-açúcar influencia diretamente na disponibilidade de área para expansão (AGUIAR et al., 2009b). Assim, a demanda para a expansão da

cana-de-açúcar será influenciada pela área disponível e, ainda sim, competirá com outras culturas também consolidadas na região. Com isso, é possível simular cenários de expansão da cana-de-açúcar e os impactos que a mudança de uso e cobertura do solo podem causar.

O segundo fator que contribuiu significativamente para a escolha da Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas como área de estudo foi a alta aptidão edafoclimática em toda sua extensão para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar, classificada pelo (MAPA, 2009). Previamente sabe-se que a declividade é inferior a 12%; a temperatura média anual fica acima de 19° C, a distribuição anual das chuvas é ideal; não há grande risco de geada; os graus de limitação por deficiência de fertilidade, os graus de limitação por deficiência de água e os graus de limitação por susceptibilidade à erosão são baixos.

Segundo o MAPA (2009), São Carlos possui 30.273,3 ha. aptos à expansão da cana-de-açúcar, sendo 28.442,4 ha. classificados como alta aptidão; Rincão, Américo Brasiliense e Santa Lúcia possuem 5.407,2 ha., 2.188,9 ha. e 3314,1 ha. classificados como alta aptidão, respectivamente.

Vale ressaltar que o último fator contribuinte para a escolha da Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas como área de estudo foi a disponibilidade de informações na base de dados da Embrapa Instrumentação Agropecuária elaborada por Minoti (2006), que realizou o estudo de quantificação da erosão e produção de sedimentos, estimadas por meio da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) e SWAT.

É importante ressaltar que esta é uma microbacia não instrumentada, ou seja, que não apresenta dados de medições.

4.1.2 Microbacia hidrográfica córrego da Onça

A área de estudo denominada microbacia hidrográfica córrego da Onça (MBH-O) está localizada na região noroeste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas Universal Transverso Mercator (UTM) 7.720.431m e 7.730.388m de latitude Sul, 450.957m e 467.657m de latitude Oeste, nos municípios de Ilha Solteira e Itapura, Figura 20.

Figura 20: Localização da microbacia hidrográfica córrego da Onça no Estado de São Paulo

O córrego da Onça deságua no Rio Paraná, a jusante da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira pertencendo portanto, à grande bacia hidrográfica do Paraná.

Ao total, a microbacia córrego da Onça ocupa uma área de 11.874,75 ha., cujos tipos de solos são: Latossolo Vermelho (LV), Argissolos Vermelho-Amarelo (PVA) e Gleissolo Háptico (Gxbe). Atualmente é composta por cana-de-açúcar (5.725,25 ha.), assentamento (1.080,5 ha.), pastagem (3.891ha.), vegetação ripária (5.73,5 ha.), lagoas (224 ha.), vegetação (371,5 ha.) e infraestrutura (9 ha.).

Por meio de observação da Figura 21, há a predominância do relevo suave ondulado, donde mais de 97% da microbacia insere-se na faixa de valores de zero a 9% de declividade.

Figura 21: Carta de declividade da microbacia hidrográfica córrego da Onça

Três fatores foram fundamentais para a seleção da microbacia hidrográfica córrego da Onça como uma das áreas de estudo do presente trabalho. O primeiro é a área de estudos estar inserida em uma região do Estado de São Paulo em expansão com a cultura da cana-de-açúcar, diferentemente da MBH-G.

Aguiar et al., (2009b), verificaram por meio de análise de imagens de satélite que o cultivo da cana-de-açúcar na região administrativa de Araçatuba, cuja microbacia hidrográfica está inserida, cresceu 138,49%, ou seja, expansão de 293.598 ha. entre as safras 2003/04 e 2008/09.

Ao total, o Estado de São Paulo cresceu 73% em área disponível para a colheita da cana-de-açúcar entre as safras 2003/04 e 2008/09. Sendo Presidente Prudente, São José do Rio Preto e Araçatuba as regiões administrativas onde ocorreram maior expansão da cana-de-açúcar, apesar de ainda serem uma das regiões administrativas que possuem menor porcentagem de extensão territorial com esta cultura, indicando grande potencial de expansão nessas áreas.

Na Figura 22 é possível observar as áreas ocupadas por cana-de-açúcar em cada um dos municípios onde a MBH-O está inserida, nas últimas safras. Nota-se que os municípios não possuem histórico com o cultivo da cana-de-açúcar, sendo que sua expansão teve início em 2007.

Figura 22: Área cultivada com cana-de-açúcar nos municípios de Ilha Solteira e Itapura
Fonte: Canasat (2011)

Ao contrário da região central, a região noroeste do Estado de São Paulo possui grande disponibilidade de área para a expansão da cana-de-açúcar. De acordo com o MAPA (2009), o município de Ilha Solteira possui 37.852,6 ha. aptos à expansão da cana-de-açúcar, sendo 29.162,5 ha. classificados como alta aptidão, enquanto que o município de Itapura possui 19.778,8 ha. classificados como alta aptidão.

Assim como a microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas, o segundo fator que contribuiu significativamente para a escolha da microbacia hidrográfica córrego da Onça como área de estudo foi a alta aptidão edafoclimática em toda sua extensão para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar, classificada pelo (MAPA, 2009).

O terceiro fator contribuinte para a escolha da microbacia hidrográfica córrego da Onça como área de estudo foi a disponibilidade de dados assim como a experiência prévia e atuação dos pesquisadores Dr^a. Marlene Cristina Alves, Dr. Hélio Ricardo Silva e Dr. Ricardo Antônio Ferreira Rodrigues, professores da Unesp Ilha Solteira.

Assim como MBH-G, esta é uma microbacia não instrumentada, ou seja, que não apresenta dados de medições.

4.2 Implementação do modelo de uso do solo utilizando o CLUE-S

Para que se obtenha resultados satisfatórios de um modelo de simulação é necessário, basicamente, realizar três etapas, respectivamente: o entendimento do modelo de simulação, conforme descrito no item 3.5.1; montar o banco de dados e rodar o modelo de simulação, de acordo com os itens a seguir.

4.2.1 Dados de entrada

Conforme Soler (2010), a etapa mais demorada no processo de modelagem dinâmica do solo é a coleta e recuperação de dados. Para realizar a simulação da mudança de uso e cobertura do solo é necessário montar um banco de dados que leve em consideração fatores biofísicos, geopolíticos e socioeconômicos relevantes para a área de estudo.

Os fatores e as variáveis deles derivadas adotados no presente estudo para a Microbacia Hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e a Microbacia Hidrográfica córrego da Onça são os seguintes:

✓ **Uso e cobertura do solo (Variáveis dependentes)**

- Uso e cobertura do solo em 2005

Para a confecção da carta de uso e cobertura do solo foi usada uma imagem do sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) a bordo do LandSat-7 para classificação/interpretação visual e realizadas viagens a campo com o intuito de melhorar o conhecimento da área e fazendo a verificação da classificação com possíveis correções quando necessário da classificação da carta (MINOTI, 2006), Figura 23.

Figura 23: Mapa de uso e cobertura do solo 2005 da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

✓ **Dados socioeconômicos (Variáveis independentes)**

- Densidade Populacional Rural e
- Média da Renda mensal por família

✓ **Acessibilidade (Variáveis independentes)**

- Distância a estradas;
- Distância a rios;
- Distância a usinas e
- Custo da distância a usinas

✓ **Dados biofísicos (Variáveis independentes)**

- Hipsometria;
- Tipo de Solo;
- Temperatura Máxima;
- Temperatura Mínima e
- Precipitação

O mapa de hipsometria e classes de solo da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas foi cedido por Minoti (2006), Figura 24 e Figura 25, respectivamente.

Figura 24: Carta de hipsometria da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

Figura 25: Mapa classe de solos da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

4.2.2 Simulação CLUE-S

Inicialmente, o processo de simulação do CLUE-S requer a padronização de todo o banco de dados. Assim, deve-se converter o banco de dados para o formato matricial (raster) e verificar se a projeção cartográfica, os limites e a resolução das células são exatamente as mesmas. Com isso, o número de linhas e colunas dos dados serão iguais em todas as variáveis. A resolução celular de todos dados das áreas de estudos (MBH-G e MBH-O) do presente trabalho é 50X50 m.

O banco de dados consiste na carta de uso e cobertura do solo para o ano inicial da simulação, arquivo *cov_all.0* e nos fatores impulsores de mudança, arquivo *sc1gr#.fil*.

No presente trabalho, o mapa inicial é referente ao ano de 2005. Nesse mapa, estavam contidos os códigos de cada classe de uso do solo especificado. Por exemplo: em uma área de estudo que tem cana-de-açúcar (0), laranja (1), pasto (2) e vegetação nativa (3), cada classe deve ter o seu código específico, iniciando-se do zero. A ordem desses códigos deve ser mantida nos seguintes arquivos: arquivo principal (*main.1*), arquivo de resultados da regressão (*alloc1.reg*), arquivo de matriz de conversão (*allow.txt*) e no arquivo de demanda agregada do uso do solo (*demand.in**).

O próximo passo é converter os dados matriciais como arquivos ASCII e inserí-los no diretório de instalação, por exemplo, C:\CLUE, onde também são armazenados os arquivos de dados, os arquivos de parâmetros e os resultados das simulações.

Vale ressaltar que o CLUE-S reconhece os arquivos de parâmetros e dados espaciais por nomes preestabelecidos e codificados. O Quadro 3, apresenta os arquivos usados (VALENCIA, 2008).

Quadro 3: Arquivos usados na simulação no CLUE-S

Arquivos	Descrição	Nome do arquivo	Tipo de arquivo
Entrada			
Parâmetros	Parâmetros principais	<i>main.1</i>	Texto
	Resultados da regressão	<i>alloc1.reg</i>	Texto
	Matriz de conversão	<i>allow.txt</i>	Texto
Entrada			
Dados	Uso do solo para ano inicial	<i>cov_all.0</i>	ASCII raster
	Impulsores de mudanças		
	Estáveis	<i>sc1gr#.fil</i>	ASCII raster
	Dinâmicos	<i>sc1gr#.*</i>	ASCII raster
	Cenários de demanda agregada	<i>demand.in*</i>	Texto
Saídas			
	Mapas de probabilidades	<i>prob1_*.1</i>	ASCII raster
	Arquivo log	<i>log.fil</i>	Texto
	Saídas da simulação	<i>cov_all.*</i>	ASCII raster

e * indicam códigos numéricos

No diretório do modelo CLUE-S existe um módulo de conversão *File convert* (*convert.exe*) que auxilia na transformação dos arquivos ASCII para um formato tabular, possibilitando seu uso diretamente em pacotes estatísticos, como o *software* SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) para realizar a análise de regressão logística.

Com a criação de um arquivo tabular com os tipos de uso da terra (linhas) e as características da área de estudo (colunas) no pacote estatístico SPSS é possível verificar, antes de realizar a regressão logística, a correlação das variáveis. Por exemplo, as variáveis distância a rios e hipsometria são altamente correlacionadas, ou seja, interdependentes; isso indica que uma ou outra sairá do modelo de regressão logística devido à redundância que causam no ajuste. A regressão logística consiste em verificar quais são as variáveis que mais influenciam para a mudança de uso do solo. Realizada essa etapa, deve-se gerar os modelos de regressão logística para cada uso do solo da área de estudo, exceto determinado uso que está inserido em área de restrição.

Os resultados dos ajustes dos modelos de regressão logística são inseridos no CLUE-S no arquivo *alloc1.reg* conforme ilustrado na Figura 26 e descrito no Quadro 4 (SOLER, 2010).

Figura 26: Interface do CLUE-S para edição dos parâmetros de regressão logística

Quadro 4: Descrição das etapas de entrada dos parâmetros de regressão logística

<i>Linha</i>	<i>Descrição</i>
Linha 1	Código numérico para o tipo de uso do solo
Linha 2	Constante da equação de regressão para o tipo de uso do solo
Linha 3	Nº de fatores explanatórios na equação de regressão do uso do solo indicado na linha 1
Linha 4 em diante	Em cada linha os coeficientes para os fatores explanatórios seguidos do código numéricos do fator correspondente

Os Parâmetros principais do CLUE-S, armazenados no arquivo *main.1*, seguem os mesmos preceitos do arquivo de regressão logística, ou seja, cada linha corresponde a uma informação, descritas abaixo, Figura 27, (SOLER, 2010).

- ✓ Linha 1: Número de usos/ coberturas solo considerados na simulação.
- ✓ Linha 2: Número de regiões consideradas na simulação (uma área de estudo consiste em um região).
- ✓ Linha 3: Número máximo de variáveis independentes consideradas na equação de regressão logística.
- ✓ Linha 4: Número total de fatores explanatórios (variáveis) usados no

modelo de simulação.

- ✓ Linha 5: Número de linhas da grade de entrada. Esse valor depende da resolução
- ✓ Linha 6: Número de colunas da grade de entrada.
- ✓ Linha 7: Área da célula da grade
- ✓ Linha 8: Coordenada x
- ✓ Linha 9: Coordenada y
- ✓ Linha 10: Códigos numéricos dos tipos de uso do solo. Cada tipo de uso do solo deve ter o seu código representante, sendo que deve começar do 0.
- ✓ Linha 11: Código das elasticidades. Cada uso do solo deve ter a sua elasticidade. Assim, deve-se seguir a sequência da linha 10.
- ✓ Linha 12: Variáveis de iteração. Deve-se informar 3 valores: 1) Modo de interação – 0 para critérios de convergência expressos em porcentagem da demanda e 1 para os critérios expressos em valores absolutos (hectares da demanda); 2) Desvio da média entre as mudanças na demanda e as mudanças alocadas. Para demanda em porcentagem, é usual o valor 0.35, demanda em valores absolutos, deve-se dividir a área da célula pelo número de tipos de uso do solo e; 3) Desvio máximo entre as mudanças na demanda e as mudanças alocadas. Para demanda em porcentagem, é usual o valor 3.0, demanda em valores absolutos, deve-se dividir a área da célula pela menor demanda de um tipo de uso do solo.
- ✓ Linha 13: Ano inicial e ano final da simulação, respectivamente.
- ✓ Linha 14: Número de fatores explanatórios dinâmicos.

- ✓ Linha 15: Escolha do formato dos arquivos de saída.
- ✓ Linha 16: Escolha de regiões com diferentes regressões. Caso haja regiões distintas. O valor usual é 0.
- ✓ Linha 17: Inicialização do histórico do uso do solo. Deve-se conhecer o histórico do uso da terra quando a dinâmica temporal é considerada. É possível escolher entre três opções:
 - 0: A história inicial do uso do solo é lida do arquivo age.0, que deve conter uma grade com o número de anos que cada célula é usada para o uso da terra atual
 - 1: Um número randômico é gerado para todas as células representando o número de anos que o uso atual do solo existe. Com essa opção, duas simulações resultarão no mesmo número randômico.
 - 2: Um número randômico é gerado para todas as células representando o número de anos que o uso atual do solo existe. Nessa opção, duas simulações usam diferentes geradores de números randômicos.
- ✓ Linha 18: Escolha do cálculo de vizinhança. Sendo 0 para desativar a função de vizinhança e 1 para ativar.
- ✓ Linha 19: Adição específica na preferência da área. Essa função pode ser ativada (1) ou desativada (0).

Figura 27: Interface para edição de arquivos de parâmetros principais

Os arquivos de entrada do modelo de simulação CLUE-S Matriz de conversão (*allow.txt*), Restrições de área (*region*.fil*) e Cenários de Demanda (*demand.in**) foram mencionados no item 3.5.1 CLUE-S e serão abordados mais detalhadamente no item 5.1 do presente trabalho, tendo em vista que já são considerados resultados do presente trabalho.

Após a finalização de todas essas etapas de entrada de dados, o modelo CLUE-S oferece a opção de calcular mapas de probabilidades a partir dos resultados de regressão logística para cada classe do uso do solo. Isso possibilita verificar, espacialmente, a relação dos fatores impulsores de mudanças com determinada classe de uso do solo. Para isso, é necessário selecionar um arquivo de demanda e um arquivo de restrição de área. Estas saídas são armazenadas em arquivos *prob1_*.1*.

Para rodar o modelo de simulação CLUE-S e obter os resultados, deve-se selecionar um arquivo de restrição de área e um arquivo de demanda. É importante ressaltar que o modelo aceita diversos arquivos de restrição de área e de demanda correspondente à área de estudo, possibilitando fazer inúmeras

combinações e a geração de vários resultados.

Os resultados das simulações são gerados para cada ano do período da simulação e são armazenadas em arquivos denominados *cov_all.**, onde * corresponde ao ano da simulação.

Por fim, o CLUE-S fornece um relatório – arquivo (*log.fil*) – das configurações dos parâmetros e dados de entrada e informação das iterações da simulação para todos os anos.

4.3 Implementação do modelo hidrossedimentológico SWAT

4.3.1 Dados de entrada

O modelo de simulação SWAT requer dois tipos de dados de entrada: Planos de Informação (PI's) e dados tabulares.

Os PI's necessários para o SWAT são: Modelo Digital de Elevação (MDE), mapa de solos e mapa de uso e ocupação do solo. A construção dessa base de dados, tanto para a microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas quanto para a microbacia hidrográfica córrego da Onça, foi discutida no item 4.2.1 (Banco de dados).

Os dados tabulares utilizados nessa simulação foram: dados de solos, dados climáticos e dados do número da curva de escoamento superficial (CN).

Os dados de entrada referente aos solos são:

- ✓ Número das camadas de solo (NLAYERS)
- ✓ Grupo hidrológico (HYDGRP)

- ✓ Máxima profundidade da raiz no perfil do solo (SOL_ZMX)
- ✓ Profundidade das camadas de solo (SOL_Z)
- ✓ Densidade (SOL_BD)
- ✓ Capacidade de água disponível (SOL_AWC)
- ✓ Teor de carbono orgânico (SOL_CBN)
- ✓ Condutividade hidráulica saturada (SOL_K)
- ✓ Teores de argila, silte, areia e fragmentos de rocha
- ✓ Albedo (SOL_ALB)
- ✓ Fator erodibilidade do solo (fator K da EUPS)

Esses dados foram adicionados ao modelo na interface apresentada na

Figura 28.

Figura 28: Interface para edição dos parâmetros dos solos

Os dados Profundidade das camadas de solo (SOL_Z); Densidade (SOL_BD); Capacidade de água disponível (SOL_AWC); Teor de carbono

orgânico (SOL_CBN); Condutividade hidráulica saturada (SOL_K); Teores de argila, silte, areia e fragmentos de rocha; Albedo (SOL_ALB) e Fator erodibilidade do solo (fator K da EUPS) devem ser específicos para cada camada do solo.

Os dados de solos referentes à microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas foram fornecidos por (MINOTI, 2006), com exceção dos dados: Albedo, Fator K (erodibilidade) do solo e Teor de carbono orgânico que foram calculados.

O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida de volta para a atmosfera ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.

Este parâmetro pode ser estimado para solos úmidos.

$$\text{SOL_ALB} = 0.6 / \exp(0.4 * \text{SOL_CBN}) \quad (7)$$

em que:

SOL_ALB = albedo do solo úmido, em %; e

SOL_CBN = matéria orgânica na superfície do solo, em %.

Conforme o manual do SWAT (Biesbrouck, 2002), esse parâmetro está baseado em Taylor e Ashcroft (1972)¹ e tem os seguintes valores de referência:

- Areia seca: 0,35-0,45
- Areia úmida: 0,20-0,30
- Solo escuro: 0,05-0,15
- Solo cinza úmido: 0,10-0,20
- Solo argiloso claro seco: 0,20-0,35
- Solo arenoso seco: 0,25-0,45

¹Taylor S. A e Ashcroft, G. L. Physical edaphology: the physics of irrigated and non-irrigated soils, W.H.Freeman and Company, San Fransisco, CA. 1972.

Para estimar a erodibilidade (Fator K_USLE), que expressa a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica, Baldissera (2005), apresentou a equação 8, desmembrada nas seguintes equações:

$$K_{USLE} = f_{csand} \cdot f_{cl-si} \cdot f_{orgC} \cdot f_{hisand} \quad (8)$$

em que:

f_{csand} = fração de solos com alto conteúdo de areia grossa;

$$f_{sand} = \left\{ 0,2 + 0,3 \exp \left[-0,256 \cdot m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

f_{cl-si} = fração de solos com alta razão de silte e argila;

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_{silt} + m_c} \right)^{0,3} \quad (10)$$

f_{orgC} = fração de solos com alto conteúdo de carbono orgânico;

$$f_{orgC} = 1 - \frac{0,25 \cdot orgC}{orgC + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC)} \quad (11)$$

f_{hisand} = fração de solos com conteúdo extremamente alto de areia.

$$f_{hisand} = 1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \quad (12)$$

Nas Equações 9, 10, 11 e 12:

m_s = fração de areia (diâmetros 0.05 – 2.00 mm);

m_{silt} = fração de silte (diâmetros 0.002 – 0.05mm);

m_c = fração de argila (< 0.002 mm); e

orgC = percentual de carbono orgânico na camada.

O percentual de carbono orgânico no solo foi estimado por meio do percentual de matéria orgânica (MO), segundo equação apresentada no trabalho de Romanowicz et al. (2005).

$$orgC = \frac{MO}{1,7924} \quad (13)$$

Os dados de solos, referentes à microbacia hidrográfica córrego da Onça – com exceção dos dados de Albedo, Fator erodibilidade do solo e Teor de carbono orgânico que foram calculados – foram extraídos de Arruda (2010), que realizou o Levantamento taxonômico dos solos em Suzanápolis, que fica à 60 km de Ilha Solteira e 75 km de Itapura. Esse estudo continha as informações dos mesmos tipos de solo encontrados na área de estudo.

Os dados climáticos demandados pelo modelo SWAT são mensais e diários. Os dados diários são as médias diárias ou somas diárias dos fatores precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento.

Os dados mensais são os seguintes fatores: média mensal da temperatura máxima diária (TMPMX), média mensal da temperatura mínima diária (TMPMN), desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês (TMPSTDMX), desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês (TMPSTDMN), média mensal da precipitação total (PCPMM), desvio padrão para a precipitação diária no mês (PCPSTD), probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos para o determinado mês (PR_W1), probabilidade de

dias úmidos seguidos de dias úmidos para o determinado mês (PR_W2), média mensal de dias de precipitação (PCPD), valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registros de um determinado mês (RAINHHMX), média de radiação solar diária para um determinado mês (SOLARAV), média diária do ponto de orvalho para determinado mês (DEWPT) e média diária da velocidade do vento para determinado mês (WNDV). Além desses dados, deve-se informar ao SWAT a localização geográfica da estação, a altitude e número de anos dos dados acumulados, conforme Figura 29.

Weather Station Parameters	
Station Name	Selvina
WLONGITUDE (deg)	51.21
WLATITUDE (deg)	20.25
RAIN_YRS (yrs)	11
WELEV (m)	337

Monthly Weather Parameters						
Parameter: TMPMX ()	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
	31.68	31.9	31.9	31.99	28.28	28.02
	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	28.53	30.83	31.76	32.67	32.41	31.99

Figura 29: Interface para edição dos parâmetros climáticos

Os dados climáticos referentes à MBH-G foram extraídos da estação meteorológica automática da Embrapa Pecuária Sudeste – Fazenda Canchim (21°57'42" lat. S, 47°50'28" long. W, 860m de altitude), localizada no município de São Carlos. Segundo Minoti (2006), essa estação fica a 27,3 km do ponto mais próximo (contorno) da MBH-G e 32,1 km da região central dessa microbacia. Foram obtidos dados referentes aos anos de 1991 a 2010, constituindo-se um total de vinte anos de dados contínuos, no site da Unidade de Pesquisa (EMBRAPA, 2011).

Em relação aos dados climáticos da MBH-O, esses foram extraídos da

estação meteorológica automática da Unesp de Ilha Solteira (20° 25' 23,5" lat. S, 51° 21' 12,6" long. W e 337m de altitude), localizada no município de Ilha Solteira. Os dados obtidos foram referentes aos anos de 2000 a 2010, constituindo-se um total de onze anos de dados contínuos (UNESP, 2011).

Com o intuito de estimar o escoamento superficial, o Serviço Nacional de Conservação dos Recursos (NRCS) dos Estados Unidos desenvolveu o procedimento do número da curva (CN) (MINOTI, 2006). Devido à sua facilidade de uso, o procedimento se tornou a ferramenta mais popular para cálculo do escoamento superficial. O método é definido de acordo com o tipo hidrológico e é função da permeabilidade, uso e ocupação e condições de umidade no solo antecedentes à precipitação (LELIS, 2011).

No Brasil, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de estimar os valores de CN em função do grupo hidrológico, uso do solo e manejo. Sendo assim, optou-se por usar valores de CN para usos agrícolas brasileiros (SARTORI, 2004).

Como o modelo SWAT possui um extenso banco de dados, no qual inclui as coberturas do solo presentes na MBH-G e na MBH-O, optou-se por utilizá-los nos dados de cobertura do solo e crescimento vegetal. Porém, é importante ressaltar que é possível inserir, remover e editar o uso e ocupação, caso não tenha semelhante existente.

4.3.2 Simulação SWAT

O processo de simulação do modelo SWAT requer uma sequência de entrada dos dados. O primeiro processo do modelo SWAT é o delineamento

da área de estudo. No presente trabalho, o delineamento da microbacia hidrográfica e a rede de canais foram obtidos automaticamente baseados no MDE (Modelo Digital de Elevação). Em seguida, o modelo realizou automaticamente a divisão da microbacia hidrográfica em sub-bacias. Tanto a MBH-G quanto a MBH-O foram divididas em 19 sub-bacias, sendo que cada unidade de sub-bacia foi associada a um curso d'água. O passo seguinte foi a criação das HRU's, após a inserção dos mapas de uso e cobertura do solo e tipo de solo. Para o presente trabalho foi estabelecida a criação de múltiplas HRU's com o intuito de criar geoambientes com combinações entre um tipo de uso da terra com um tipo de uso do solo. Nesse caso, o nível de sensibilidade para uso do solo foi de 10% e tipo de solo de 20%. Ou seja, as classes de uso do solo igual ou superior a 10% da área da sub-bacia são selecionadas, assim como os solos inseridos em cada categoria de uso da terra, com área igual ou superior a 20% formará uma HRU.

4.4 Sistemas Computacionais

Os sistemas computacionais usados na execução desse trabalho foram:

- ✓ ArcGIS v. 9.3, desenvolvido pela Environmental Systems Research Institute, Inc.
- ✓ CLUE-S – Conversion of Land Use and its Effects at small region extent, desenvolvido pelo grupo de pesquisa Land Dynamics Group na Universidade de Wageningen – Holanda.
- ✓ SPSS – *Statistical Package for the Social Sciences* – PASW Statistic 18, desenvolvido na Universidade de Stanford e na Universidade de Chicago.
- ✓ SWAT versão 2009, desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS), Texas A&M University System, Temple, Texas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta os dados de entrada gerados para rodar os modelos de simulação CLUE-S e SWAT e os resultados obtidos para as áreas de estudo microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e a microbacia hidrográfica córrego da Onça. O intuito da aplicação do modelo de simulação CLUE-S foi gerar cenários, baseados nas áreas de estudo que estão inseridas em regiões consolidadas e em região de expansão da cana-de-açúcar. *A posteriori*, esses cenários foram inseridos no modelo de simulação SWAT como dados de entrada de uso e ocupação do solo para estimar a produção de sedimento e o escoamento superficial.

A simulação com o CLUE-S inicia-se em 2005, ano base, com o objetivo de simular 20 anos, portanto, os cenários apresentados compreendem o período até 2025. Uma característica interessante do SWAT é que foi importante para a realização desse trabalho é que o modelo tem, também, a opção de simular os dados climáticos diários de 1902 a 2100. Assim, foram utilizados os dados climáticos do ano de 2025, conforme os cenários obtidos do modelo CLUE-S. Sabe-se que os fatores climáticos influenciam diretamente na produção de sedimento e no escoamento superficial.

5.1 Base de dados para as simulações utilizando o CLUE-S e SWAT

Os fatores e as variáveis deles derivadas adotados para as simulações utilizando o CLUE-S e SWAT para a Microbacia Hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e a Microbacia Hidrográfica córrego da Onça são os seguintes:

✓ Uso e cobertura do solo (Variáveis dependentes)

A carta de uso e ocupação da Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas, referente ao ano de 2005, foi cedido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária no formato Shapefile.

A classificação da carta de uso e ocupação do solo da Microbacia hidrográfica córrego da Onça referente ao ano de 2005 foi realizada por meio da imagem do sensor TM (Thematic Mapper) do satélite LandSat-5, Órbita/Ponto/220/75, de 06 de agosto de 2005.

Entretanto, a interpretação visual das classes de uso do solo por meio da imagem de satélite não foi suficiente, deixando inúmeros pontos de dúvidas dentro da área de estudo. Assim, decidiu-se realizar visita à área de estudo, em fevereiro de 2011, com o auxílio de um GPS (Global Positioning System) da marca Garmin, para georreferenciar os pontos de dúvidas e os contornos dos polígonos referentes ao uso e cobertura do solo na área. Vale ressaltar que nessa etapa, o auxílio e o conhecimento histórico do uso e cobertura do solo de moradores da região foram, também, essenciais para o sucesso dessa classificação, pois em algumas áreas tinha ocorrido a mudança de uso e cobertura do solo.

Com a junção da interpretação visual da imagem de satélite e a eliminação de todos os pontos de dúvidas referentes à classificação do uso e cobertura do solo, foi possível gerar a carta de uso e cobertura do solo de 2005 da MBH-O, Figura 30.

Figura 30: Carta de uso do solo 2005 da microbacia hidrográfica córrego da Onça

A carta de uso do solo da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e a carta de uso do solo da microbacia hidrográfica córrego da Onça se referem ao ano de 2005, pois este é o ano inicial (ano zero) da simulação, pois o intuito foi simular 20 anos a partir do ano 0. Apesar do CLUE-S simular anualmente os mapas de uso e ocupação, optou-se por estudar o último resultado de cada simulação, ou seja, os cenários de 2025. Justifica-se a

escolha em simular 20 anos, pois o intuito era trabalhar com a máximo de anos que o modelo consegue simular.

✓ **Dados socioeconômicos (Variáveis independentes)**

Para gerar a carta de Densidade Populacional Rural, tanto da MBH-G quanto da MBH-O foram utilizados dados do Censo Demográfico 2000 (IBGE, 2000), que no momento da elaboração do banco de dados era o mais recente disponibilizado.

Inicialmente, verificou-se a distribuição dos setores censitários dentro de cada área de estudo e, *a posteriori*, foram inseridas as informações da variável densidade referentes a cada setor censitário, figura 31 e figura 32.

Segundo o IBGE (2000), setor censitário é a unidade territorial criada com o intuito de controlar o cadastro da coleta. Para isso, seus limites físicos respeitam os limites de áreas urbanas, rurais e da divisão político-administrativa. Além disso, o setor censitário abrange uma área que deve possuir um número máximo de domicílios e que pode ser percorrido por um único recenseador.

Figura 31: Carta de densidade populacional rural da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

Figura 32: Carta de densidade populacional rural da microbacia hidrográfica córrego da Onça

As cartas de Renda da MBH-G e da MBH-O foram gerados seguindo os mesmos preceitos da carta Densidade Populacional Rural. Entretanto, a variável utilizada foi Rendimento mensal por pessoa responsável por domicílio, Figuras 33 e 34.

Figura 33: Carta de distribuição espacial de renda da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas

Figura 34: Carta de distribuição espacial de renda da microbacia hidrográfica córrego da Onça

✓ **Acessibilidade (Variáveis independentes)**

As variáveis do parâmetro Acessibilidade são: Distância a estradas, Distância a rios, Distância a usinas e Custo da distância a usinas. Para gerar as três primeiras variáveis, foram necessários a malha viária, a hidrografia e a localização de usinas sucroalcooleiras próximas da MBH-G e da MBH-O.

A malha viária e a hidrografia da MBH-G foram cedidas por Minoti (2006), possibilitando a geração das cartas Distância a estradas (Figura 35) e Distância a rios (Figura 36) na MBH-G.

Figura 35: Carta de Distância a estradas na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

Figura 36: Carta de Distância a rios na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

As cartas da malha viária e a hidrografia da MBH-O foram elaborados a partir da carta topográfica Bela Floresta 1:50.000, da Região Sul do Brasil folha SF-22-C-IV-1 de 1967, publicada pelo Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo - IGGSP em 1967, que foi adquirida em formato digital da mapoteca da USP (Departamento de Geografia). Com esses dados foi possível gerar a distância euclidiana dos mesmos, Figura 37 e Figura 38, respectivamente.

Figura 37: Carta de Distância a estradas na microbacia hidrográfica córrego da Onça

Figura 38: Carta de Distância a rios na microbacia hidrográfica córrego da Onça

Para gerar a carta de distância a usinas, foi necessário obter a localização das usinas sucroalcooleiras que atuavam dentro um raio de 40 quilômetros de distância das microbacias hidrográficas. Tal medida é importante, pois acima dessa distância não é rentável para a usina buscar cana-de-açúcar, visto que aumenta o custo de sua produção. Assim, foi possível verificar quais seriam as usinas que poderiam consumir a cana-de-açúcar produzida dentro da área de estudo. A Figura 39 e Figura 40 ilustram a distância a usinas da MBH-G e MBH-O, respectivamente.

Figura 39: Carta de Distância a usinas na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas e localização das usinas

Figura 40: Carta de Distância a usinas na microbacia hidrográfica córrego da Onça e localização das usinas

Para gerar a carta Custo da distância a usinas, Figura 41 e Figura 42, além das localizações das usinas no entorno das áreas de estudo, foi necessário saber quanto custa às usinas sucroalcooleiras cada quilômetro rodado para buscar a cana-de-açúcar. Em ambas regiões o custo aumenta, em média, R\$ 0,22/t x km.

A geração dessa carta envolve a distância a usinas, o custo da distância, acima citado e, a carta de uso e cobertura do solo 2005 da área de estudo.

É importante esclarecer que a carta de uso e ocupação 2005 da MBH-G foi usado para definir o custo da distância na cultura de cana-de-açúcar em R\$ 0,23/t x km; em laranja, eucalipto, pasto e avicultura, o valor do custo da distância foi definido o dobro da cana-de-açúcar (R\$ 0,46/t x km) com intuito de representar, simbolicamente, o valor da conversão dessas áreas e; na área com vegetação nativa o valor do custo da distância foi significativo (R\$ 23,00/t x km), com o intuito de dificultar a mudança nessa área.

Figura 41: Carta de Custo da distância a usinas na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

Em relação à MBH-O, o custo da distância a usinas nas áreas com a cultura da cana-de-açúcar é de R\$ 0,21/t x km; nas áreas com pasto o custo da distância a usinas é de R\$ 0,42/t x km e nas áreas que possuem vegetação ripária, vegetação, lago e assentamento o custo da distância a usinas é de R\$ 21,00/t x km.

Figura 42: Carta de Custo da distância a usinas da microbacia hidrográfica córrego da Onça

✓ **Dados biofísicos (Variáveis independentes)**

As variáveis biofísicas selecionadas para comporem o presente estudo são: Hipsometria, Tipo de Solo, Temperatura Máxima, Temperatura Mínima e Precipitação.

O mapa de hipsometria e classes de solo da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas foi cedido por Minoti (2006).

A digitalização das curvas de nível obtidas na carta topográfica Bela Floresta 1:50.000 da Região Sul do Brasil folha SF-22-C-IV-1 de 1967 possibilitou a elaboração da carta de hipsometria da microbacia hidrográfica córrego da Onça, Figura 43. O mapa classe de solo da MBH-O foi obtido por meio dos dados do ZAE Cana, Figura 44.

Figura 43: Carta hipsometria da microbacia hidrográfica córrego da Onça

Figura 44: Mapa classe de solos da microbacia hidrográfica córrego da Onça

As cartas de temperatura máxima, temperatura mínima e pluviosidade foram elaborados a partir de dados de estações meteorológicas próximas às MBH-G e MBH-O. Os dados meteorológicos foram interpolados pelo método IDW (Inverso do Quadrado da Distância), que considera que os pontos mais próximos das células a serem processadas influem mais do que os pontos que estão mais distantes, ou seja, a influência do ponto diminui com a distância.

Os dados de temperatura máxima, mínima e precipitação diários foram obtidos do Agriempo – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO, 2010) para a MBH-G. Os dados climáticos para a MBH-O foram obtidos da UNESP Ilha Solteira (UNESP, 2011). Os critérios de escolha das estações meteorológicas foram: proximidade das áreas de estudo e disponibilidade de dados entre os anos de 2003 e 2007.

Os municípios e suas respectivas estações meteorológicas que atenderam os critérios da MBH-G foram: São Carlos, Mococa, São Simão e Pirassununga. Sendo que no município de São Carlos foram selecionadas três estações meteorológicas. Em relação à MBH-O, os municípios e suas respectivas estações meteorológicas que se enquadraram nos critérios foram: Ilha Solteira, Irapuru, Junqueirópolis, Marinópolis, Santa Adélia, Santa Adélia Pioneiros.

É importante ressaltar que para elaborar a carta de temperatura máxima das duas microbacias hidrográficas, fez-se a média da temperatura máxima dos meses de janeiro a março entre os anos de 2003 e 2007. Já os dados de temperatura mínima tiveram como base a média da temperatura mínima dos meses de abril a agosto entre os anos de 2003 a 2007. Assim, chegou-se a uma média de temperatura máxima e mínima para cada estação meteorológica

das duas áreas de estudo, que após o procedimento de interpolação resultaram as cartas, Figura 45 a Figura 46. É importante ressaltar que a escolha da série histórica de 5 anos deve ao fato de que a simulação é referente ao ano de 2005. Entretanto, esse poderia ser um ano atípico, ou seja, ser um ano chuvoso ou um ano seco. Assim, decidiu-se trabalhar com dois anos antes e dois anos após o ano da simulação.

A escolha desses meses deve-se ao fato de que nas duas microbacias hidrográfica cultiva-se cana-de-açúcar de 18 meses (cana de ano e meio). Sendo que esta é plantada nos meses de janeiro a março e inicia o seu desenvolvimento nos três primeiros meses. A chegada do inverno desacelera esse processo nos meses de abril a agosto. Assim, de setembro a abril do ano seguinte o seu desenvolvimento fica completamente estagnado. Nos três meses subseqüentes a cana-de-açúcar amadurece e está pronta para ser colhida.

Figura 45: Carta de temperatura mínima e temperatura máxima da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

Figura 46: Carta de temperatura mínima e temperatura máxima da microbacia hidrográfica córrego da Onça

Os dados da precipitação anual média das estações meteorológicas, correspondente a cada área de estudo, foram interpolados resultando nas cartas de precipitação da MBH-G e MBH-O, Figura 47 e Figura 48, respectivamente .

Figura 47: Carta de precipitação da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas

Figura 48: Carta precipitação da microbacia hidrográfica córrego da Onça

5.2 Resultados das simulações utilizando o CLUE-S

Entre 2005 a 2011 ocorreram algumas mudanças de uso do solo nessa área, ou seja, alguns usos aumentaram sua área em detrimento da diminuição da área de outro uso, conforme podemos verificar na Figura 49.

Figura 49: Carta de uso do solo 2005 e 2011 da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

As áreas referentes a cada uso e ocupação do solo da MBH-G em 2005 e 2011 podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7: Área dos usos e cobertura da microbacia hidrográfica córrego da Onça em 2005 e 2011

Uso e cobertura do solo	2005 (ha.)	2011 (ha.)
Cana-de-açúcar	3079,75	2.876,41
Laranja	941,5	1.419,51
Pastagem	318,5	108,58
Eucalipto	297,5	232,75
Vegetação	472,93	472,92
Avicultura	36,58	36,58

Ao comparar os dois mapas de uso do solo, verificou-se que a única cultura que aumentou significativamente a sua área durante esse período foi a da laranja, em 50,77% sobre a cultura da cana-de-açúcar. Entretanto, é importante ressaltar que essa área, com pouco mais de 470 ha., foi vendida em 2007 a um único proprietário que possui outras propriedades no Estado de São Paulo nas quais também se cultivava laranja. Tal informação foi obtida durante a visita à área de estudo. Essa é uma situação atípica que encontramos nessa área, visto que a expansão da cana-de-açúcar é maior que a expansão da laranja no Estado de São Paulo. Porém, não é impossível de ocorrer, como nesse caso.

Outra consideração importante a fazer é que apesar da área da cultura da cana-de-açúcar ter diminuído, devido ao aumento da cultura da laranja, essa se expandiu sobre área de eucalipto, pastagem e laranja. Os únicos usos que mantiveram a mesma área de 2005 a 2011 foram vegetação natural e avicultura, pois assim foram estabelecidas no CLUE-S.

Ao verificar a competição entre os usos da MBH-G, com base no Código Florestal Federal, no qual considera mata ciliar como Área de Preservação

Permanente (Lei n.º 4.771/65) e visando a sustentabilidade da área de estudo decidiu-se por considerar tanto a área de vegetação quanto a área de avicultura como área de restrição para a modelagem no CLUE-S, Figura 50. Isso significa que, para a simulação, em toda a área da microbacia hidrográfica pode ocorrer mudança de uso e cobertura do solo, exceto na área com vegetação e com a avicultura.

Figura 50: Carta de restrição de área na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabiobas

A área de estudo microbacia hidrográfica córrego da Onça (MBH-O) é maior que a MBH-G, pois possui 11874,75 hectares ocupados com cana-de-açúcar, pastagem, vegetação, lagoas, assentamento e uma infraestrutura. Assim como a outra área de estudo, ao observar e comparar a carta de uso e

cobertura do solo de 2005 com a carta de uso e cobertura do solo de 2011 foi possível verificar que durante esse período ocorreu o aumento de algumas classes em detrimento de outras, mas não houve a ocorrência de uma nova classe de uso e cobertura do solo, Figura 51.

Figura 51: Carta de uso do solo 2005 e 2011 da microbacia hidrográfica córrego da Onça

As áreas referentes a cada uso e ocupação do solo da MBH-O em 2005 e 2011 podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8: Área dos usos e cobertura da microbacia hidrográfica córrego da Onça em 2005 e 2011

Uso e cobertura do solo	2005 (ha.)	2011 (ha.)
Assentamento	496,75	1080.5
Cana-de-açúcar	1110,25	5725
Pastagem	9089,5	3891
Vegetação natural	371,75	371,75
Vegetação ripária	573,5	573,5
Lagoa	224	224
Infraestrutura	9	9

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 8 e as cartas de uso e cobertura da MBH-O de 2005 e 2011, verificou-se que ocorreu a expansão da cana-de-açúcar sobre a área de pastagem e houve formação de mais um assentamento do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), também sobre área de pastagem. As áreas com vegetação, vegetação ripária, lagoas e infraestrutura mantiveram-se as mesmas. Assim, seguindo os mesmos preceitos da MBH-G para a determinação da área de restrição na modelagem do CLUE-S, decidiu-se considerar áreas com infraestrutura, vegetação ripária e lagoas como área de restrição na modelagem do CLUE-S, Figura 52. Assim, para a simulação, em toda a área da microbacia hidrográfica pode ocorrer mudança de uso e cobertura do solo, exceto na área com infraestrutura, vegetação ripária e lagoas, que corresponde a 6,8% da área total.

Figura 52: Carta de restrição de área na microbacia hidrográfica córrego da Onça

A determinação das áreas de restrição deve estar em consonância com a matriz de transição, a elasticidade e a demanda agregada do uso e cobertura do solo.

Nas matrizes de conversão para as modelagens do CLUE-S tanto da MBH-G (Tabela 9) quanto na MBH-O (Tabela 10) foram indicadas para quais usos do solo os usos atuais poderiam (1) ou não (0) ser modificados. Não houve a indicação de número máximo de iterações (anos) que o uso poderiam se manter e nem o número mínimo de iterações (anos) que o uso deveriam se manter o mesmo na matriz de conversão, pois os usos e coberturas do solo nas áreas estudos encontravam-se em diferentes estágios e esse não foi objeto de classificação do presente trabalho acadêmico.

Tabela 9: Valores inseridos na matriz de conversão para simulação da MBH-G

Uso futuro Uso atual	Cana-de-açúcar	Eucalipto	Laranja	Pastagem	Outros (avicultura e vegetação)
Cana-de-açúcar	1	1	1	1	0
Eucalipto	1	1	1	1	0
Laranja	1	1	1	1	0
Pastagem	1	1	1	1	0
Outros (avicultura e vegetação)	0	0	0	0	1

Tabela 10: Valores inseridos na matriz de conversão para simulação da MBH-O

Uso futuro Uso atual	Assentamento	Cana-de-açúcar	Pastagem	Vegetação	Outros (vegetação ripária e infraestrutura)	Lagoas
Assentamento	1	0	0	0	0	0
Cana-de-açúcar	0	1	1	1	0	0
Pastagem	1	1	1	1	0	0
Vegetação	0	1	1	1	0	0
Outros (vegetação ripária e infraestrutura)	0	0	0	0	1	0
Lagoas	0	0	0	0	0	1

Para a MBH-G, foi indicado na matriz de conversão que todas as classes de uso do solo poderiam ser modificadas, exceto avicultura e vegetação, classificadas como outros.

Quanto à MBH-O, ocorre uma particularidade em relação à área de assentamento do INCRA, pois essa foi desapropriada pelo Governo Federal e após a emissão de posse da terra foi repassada para os trabalhadores rurais sem terra a fim de que a cultivassem e promovessem seu desenvolvimento econômico. Ou seja, essas terras são destinadas aos trabalhadores rurais com o intuito de fortalecer a agricultura familiar e produzir alimentos; a cana-de-

açúcar, caracterizada como monocultura, não atenderia a esses objetivos. Tais informações foram confirmadas durante a visita à área de estudo, que possibilitou a conversa com um dos agricultores assentados. Esse afirmou que não possui interesse em arrendar suas terras, como também as usinas nunca o procuraram oferecendo tal proposta. O uso “lagoa” foi inserido separadamente do uso Outros, para facilitar a classificação dos cenários gerados pelo CLUE-S que serviram como dados de entrada para o modelo SWAT.

Em relação ao parâmetro elasticidade, esse foi discutido com especialistas e com funcionários das usinas que se abastecem com a cana-de-açúcar produzida tanto na MBH-G quanto na MBH-O, considerando o tempo da conversão, o custo da conversão e a facilidade da mudança de localização quando a sua área se torna mais adequada para outro tipo de uso do solo. O objetivo foi obter valores fidedignos das áreas de estudo. Vale ressaltar que para a modelagem do CLUE-S, a valor da elasticidade varia de 0 (fácil conversão) a 1 (irreversível). Sendo assim, para a MBH-G, as elasticidades consideradas para cada uso do solo são: cana-de-açúcar 0.5, eucalipto 0.8, laranja 0.8, pasto 0.3 e outros 1. As elasticidades consideradas para a MBH-O, referentes aos usos do solo são: assentamento 0.9, cana-de-açúcar 0.5, pastagem 0.3, vegetação 0.8, outros 1 e lagoas 1.

A fim de utilizar a extrapolação de tendência como método do presente estudo, elaborou-se cartas de uso e ocupação da MBH-G e MBH-O baseados em imagens de satélite LandSat-5, adquiridas do catálogo de imagens do INPE, com o objetivo de obter informações do histórico do uso do solo. Segue abaixo as datas e algumas informações técnicas das imagens obtidas tanto para a MBH-G quanto para a MBH-O, respectivamente:

✓ Data das Imagens do satélite LandSat-5 Órbita/Ponto/220/75 – MBH-G

1988/08/02	1996/08/24	2003/10/15	2011/03/27
1992/08/29	1998/07/29	2008/07/08	
1994/07/02	2000/12/07	2010/09/31	

✓ Data das Imagens do satélite LandSat-5 Órbita/Ponto/223/74 – MBH-O

1988/08/23	1995/08/11	2001/07/10	2007/08/12	2011/02/12
1990/06/10	1997/09/17	2003/06/30	2008/08/05	
1993/08/05	1998/07/02	2005/08/06	2010/06/17	

Por meio das imagens acima citadas, foram gerados as cartas de uso e ocupação da MBH-G (Figura 53 a Figura 54) e da MBH-O (Figura 56 a Figura 59).

Figura 53: Cartas de uso do solo de 1988, 1992, 1994 e 1996 da MBH-G

Figura 54: Cartas de uso do solo de 1998, 2000, 2003 e 2008 da MBH-G

Figura 55: Cartas de uso do solo de 2010 e 2011da MBH-G

Figura 56: Cartas de uso do solo de 1988, 1990, 1993 e 1995 da MBH-O

Figura 57: Cartas de uso do solo de 1997, 1998, 2001 e 2003 da MBH-O

Figura 58: Cartas de uso do solo de 2005, 2007, 2008 e 2010 da MBH-O

Figura 59: Cartas de uso do solo de 2011 da MBH-O

Com a elaboração das cartas de uso e cobertura do solo para um período histórico foi possível compreender a evolução de cada uso dentro das microbacias hidrográficas.

Na Figura 60 é possível verificar que na MBH-G, a cultura da cana-de-açúcar possui um histórico dentro da área, ou seja, está consolidada e compete diretamente com a laranja e a pastagem. Na Figura 61, observa-se que a MBH-O não possuía um histórico da cultura da cana-de-açúcar até 2001 e somente em 2003 é que essa cultura aparece na área e se mantém em constante expansão até os dias atuais. A sua competição é diretamente com a pastagem, sendo que esta perde área também para os assentamentos do INCRA. É importante destacar que a expansão da cana-de-açúcar na MBH-O acompanha a expansão da cultura no território nacional devido à fabricação de carros flex e aumento na exportação do açúcar.

Figura 60: Histórico do uso e cobertura do solo na MBH-G

Figura 61: Histórico do uso e cobertura do solo na MBH-O

Além de proporcionar a compreensão da evolução de cada uso dentro das microbacias hidrográficas, as cartas de uso e cobertura do solo foram importantes fontes de informações para realizar a extrapolação de tendências por meio da regressão linear e gerar as demandas agregadas do uso do solo. A MBH-G possui 11 pontos amostrais e a MBH-O 13 pontos amostrais, referentes à área de cada uso do solo. O primeiro modelo de tendência linear gerado para as duas microbacias hidrográficas conteve todos os pontos amostrais referentes a cada uso do solo. Ou seja, trabalhou-se com todos os

dados históricos disponíveis. Esses dados possibilitaram a geração do primeiro cenário de demanda agregada de uso do solo, até o ano de 2025, na MBH-G e na MBH-O para a modelagem no CLUE-S, Figura 62 e Figura 63, respectivamente. Esses cenários de demanda foram denominados Demanda_1 MBH-G e Demanda_1 MBH-O

Figura 62: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-G para a geração do Cenário Guabirobas 1

Figura 63: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-O para a geração do Cenário Onça 1

Um segundo cenário de demanda agregada de uso do solo, até o ano

de 2025, na MBH-G e na MBH-O foi gerado para a modelagem no CLUE-S, Figura 64 e Figura 65, respectivamente. Para sua geração, foram abordados somente os pontos amostrais a partir de 2005, visto que o ano inicial da simulação do modelo CLUE-S inicia-se em 2005. Assim, para a extrapolação de tendências, a MBH-G teve 4 pontos amostrais (2005, 2008, 2010 e 2011) referentes a cada uso do solo e a MBH-O teve 5 pontos amostrais (2005, 2007, 2008, 2010 e 2011). Esses cenários de demanda foram denominados Demanda_2 MBH-G e Demanda_2 MBH-O.

Figura 64: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-G para a geração do Cenário Guabirobas 2

Figura 65: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-O para a geração do Cenário Onça 2

Para a MBH-O foi gerado mais um cenário de demanda agregada de uso do solo, até o ano de 2025, contendo todos os pontos amostrais (de 1988 a 2011) referentes a cada uso do solo, no qual foi considerada a hipótese de não surgir um novo assentamento na área de estudo, Figura 66. É importante ressaltar que atualmente existem dois assentamentos na MBH-O, sendo que primeiro assentamento criado em 2004 possui 496,75 ha. e o segundo foi criado em 2007 e possui 583,75 ha., totalizando 1.080,5 ha. Considerando a hipótese de não surgir um novo assentamento na área de estudo, a demanda desse uso do solo fixou-se em 1.080,5 ha. até o ano de 2025, por isso a demanda por assentamento fixa. Esse cenário de demanda foi denominado Demanda_3 MBH-O.

Figura 66: Demanda agregada do uso e cobertura do solo na MBH-O para a geração do Cenário Onça 3

A análise de regressão logística é desenvolvida para cada uso do solo em separado. Sendo assim, foram desenvolvidos quatro modelos para a MBH-G (cana-de-açúcar, eucalipto, laranja e pastagem) e quatro para a MBH-O (assentamento, cana-de-açúcar, pastagem e vegetação). Como os usos vegetação e avicultura (classificados como outros) da MBH-G estão inseridos em área de restrição, a demanda é estável, a elasticidade é a máxima e na

matriz de conversão foi indicada a impossibilidade de conversão, não há necessidade de se gerar um modelo de regressão. A mesma regra foi empregada para os usos vegetação ripária e infraestrutura (classificados como outros) e lagoas na MBH-O.

Em cada um dos modelos, a variável dependente representa a presença (ou não) de cada uma das classes de uso nas células de 50 x 50 m, isto é, o padrão espacial daquele uso.

Após inserir a variável dependente (uso do solo) e as variáveis independentes (Densidade populacional Rural, Renda, Distância a estradas, Distância a rios, Distância a usinas, Custo da distância, Hipsometria, Classes de solos, Temperatura máxima, Temperatura mínima e Precipitação) no SPSS, foi realizada a análise de correlação das variáveis. Essa análise tem como objetivo identificar se as variáveis são correlacionadas umas com as outras. Uma das suposições do modelo é que as variáveis que ficam no modelo final não são correlacionadas entre si, ou seja, cada uma delas agrega uma informação diferente na predição da variável resposta.

A correlação das variáveis é possível identificar por meio dos coeficientes de correlação de Pearson. Segundo Figueiredo Filho & Silva Júnior (2009), o coeficiente assume apenas valores entre -1 e 1. Sendo 1 uma correlação perfeita positiva entre as variáveis, -1 uma correlação negativa perfeita entre as variáveis e 0 indica que não há relação linear entre as variáveis. Valores entre 0 e 0.30 são considerados fraca correlação, de 0.30 a 0.50 (positivo ou negativo) moderada correlação e 0.70 a 1 (positivo ou negativo) forte correlação. Na Tabela 11, observa-se exemplo de coeficientes de correlação de variáveis gerados no SPSS.

Tabela 11: Coeficientes de correlação de variáveis

		Correlações					
		cana.asc	custo	densidade	diestradas	dirios	diusinas
cana.asc	Correlação Pearson	1	-.162**	.435**	-.107**	.396**	.004
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000	.000	.840
	N	2201	2201	2201	2201	2201	2201
Custo	Correlação Pearson	-.162**	1	.282**	.124**	.049*	.638**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000	.020	.000
	N	2201	2201	2201	2201	2201	2201
Densidade	Correlação Pearson	.435**	.282**	1	.010	.405**	.510**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.652	.000	.000
	N	2201	2201	2201	2201	2201	2201
Diestradas	Correlação Pearson	-.107**	.124**	.010	1	-.238**	-.003
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.652		.000	.887
	N	2201	2201	2201	2201	2201	2201
Dirios	Correlação Pearson	.396**	.049*	.405**	-.238**	1	.238**
	Sig. (2-tailed)	.000	.020	.000	.000		.000
	N	2201	2201	2201	2201	2201	2201
Diusinas	Correlação Pearson	.004	.638**	.510**	-.003	.238**	1
	Sig. (2-tailed)	.840	.000	.000	.887	.000	
	N	2201	2201	2201	2201	2201	2201

** . Correlação é significativa ao nível 0.01

* . Correlação é significativa ao nível 0.05

Após a análise de correlação das variáveis, foi realizado o ajuste do modelo. Essa parte consiste na ponderação dos parâmetros já na fase de refinamento do modelo. Para isso, foi selecionado o procedimento denominado *stepwise regression* que insere no modelo, de modo sequencial, os fatores explanatórios estatisticamente significantes (HAIR et al., 2009). Assim, foram obtidos diversos modelos para cada uso do solo de cada microbacia hidrográfica e, *a posteriori*, analisada a qualidade de ajuste dos modelos.

Os resultados das análises estatísticas para a MBH-G podem ser vistos na Tabela 12. São apresentados, a seguir, os resultados dos quatro modelos de regressão logística referentes às seguintes classes de uso do solo

avaliadas.

Tabela 12: Coeficientes das análises de regressão logística usados nos modelos CLUE-S para a MBH-G

Variável	Cana-de-açúcar		Eucalipto		Laranja		Pastagem	
	β	Exp(β)	β	Exp(β)	β	Exp(β)	β	Exp(β)
Custo	-.058	.943			-.024	.976		
Hipsometria	-.035	.966	.184	1.202	-.028	.972	-.044	.957
Densidade	-.004	1.996			.001	1.001	-.031	.970
Dist_estradas								
Dist_rios	.002	1.002	-.006	.994				
Dista_usinas								
Gxbe								
Lvad								
Lvef								
LVw								
Renda	-.011	1.011			-.008	.992	-.032	.969
Temp_max			-30.379	0				
Temp_min					3.700	40.441	-89.505	0
Precipitação	.069	1.071					.685	1.983
Constante	1055.582		845.645		407.118		940.476	
ROC	.884		.989		.803		.952	

1. Cana-de-açúcar: observa-se que os fatores explanatórios custo, hipsometria, densidade e renda tem sinal negativo, por isso uma variação positiva diminui a possibilidade de ser cana-de-açúcar. Os demais fatores explanatórios possuem sinal positivo, assim um variação negativa nesses fatores contribui para diminuir a probabilidade de ser cana-de-açúcar.

Em relação à razão de chances – Exp (β) – considera-se que o custo influência negativamente no sucesso do uso do solo ser cana-de-açúcar, o que leva a interpretação de quanto maior o custo menor a chance de ocorrer cana-de-açúcar. Assim como hipsometria, densidade e renda. A

ocorrência de precipitação aumenta 1,071 vezes a chance uso do solo ser cana-de-açúcar.

2. Eucalipto: a distância a rios e a temperatura máxima possuem uma influência negativa na ocorrência do uso do solo eucalipto, assim uma variação positiva diminui a possibilidade do uso do solo ser eucalipto. A hipsometria tem maior influência no sucesso do uso do solo ser eucalipto.
3. Laranja: assim como no modelo cana-de-açúcar, no modelo laranja os fatores explanatórios custo, hipsometria e renda tem sinal negativo, por isso uma variação positiva diminui a possibilidade de ser laranja. Destaca-se temperatura mínima que possui sinal positivo, assim um variação negativa nesse fator contribui para diminuir a probabilidade do uso do solo ser laranja. Assim, considera-se que a ocorrência de temperatura mínima aumente 40,441 vezes a chance do uso do solo ser laranja.
4. Pastagem: os fatores explanatórios hipsometria, densidade, renda e temperatura mínima influencia negativamente na pastagem, exceto precipitação. A ocorrência de precipitação aumenta 1,983 vezes a chance do uso do solo ser pastagem.

A Tabela 13 apresenta os resultados das análises estatísticas para a MBH-O, referentes aos quatro modelos de regressão logística compreendendo as seguintes classes de uso do solo avaliadas.

Tabela 13: Coeficientes das análises de regressão logística usados nos modelos CLUE-S para a MBH-O

Variável	Assentamento		Cana-de-açúcar		Pastagem		Vegetação	
	B	Exp(β)	β	Exp(β)	β	Exp(β)	β	Exp(β)
Custo	.032	1.032	-.015	.985	-.029	.971	.007	1.007
Densidade			.016	1.016			.010	1.010
Dist_estradas							-.003	.997
Dist_rios								
Dist_usinas	-.001	.999						
Hipsometria	.100	1.105					.056	1.058
LV	2.637	13.967			.756	2.131		
Precipitação			-.045	.956	-.368	.692	.117	1.124
PVA							2.673	14.477
Renda								
Temp_max								
Temp_min					22.665	1.240	5.757	316.347
Gxbe								
Constante	-306.875		177.967		266.385		-304.211	
ROC	.993		.911		.904		.858	

1. Assentamento: os fatores explanatórios custo, hipsometria e tipo de solo latossolo vermelho exercem uma influência positiva nos usos do solo assentamento e pastagem, exceto na variável distância a usinas. Nesse modelo é importante salientar que quando há ocorrência do tipo de solo latossolo vermelho, a influência é significativa, pois esse fator aumenta 13,967 vezes a chance do uso do solo ser assentamento.
2. Cana-de-açúcar: os fatores explanatórios desse modelo são custo, densidade e precipitação. Esses três fatores compõem o modelo de regressão logística cana-de-açúcar para a MBH-G. Assim como nesse modelo, o fator explanatório custo influencia negativamente no sucesso

do uso do solo ser cana-de-açúcar, o que leva a interpretação de quanto maior o custo menor a chance de ocorrer cana-de-açúcar. O fator explanatório densidade influencia positivamente na ocorrência do uso do solo ser cana-de-açúcar, diferentemente do fator precipitação.

3. Pastagem: a ocorrência dos fatores explanatórios custo e precipitação resultam na menor chance do uso do solo ser pastagem; diferentemente da ocorrência do tipo de solo latossolo vermelho e temperatura mínima, cujas influências são positivas e, conseqüentemente, aumentam a probabilidade do uso do solo ser pastagem.
4. Vegetação: o modelo vegetação é o que possui maior número de fatores explanatórios. Ao total são sete fatores – custo, densidade, distância a estradas, hipsometria, precipitação, argissolo vermelho amarelo e temperatura mínima. Todos esses fatores explanatórios influenciam positivamente na probabilidade de uso do solo ser vegetação, exceto distância a estradas. Ou seja, quanto maior a distância a estradas menor a probabilidade de ocorrer o tipo de uso do solo vegetação. Entretanto, isso não condiz com a realidade. Soler & Verburg (2010) afirmaram que as estradas influenciam no desmatamento. Assim, a proximidade aos acessos rodoviários influencia de modo negativo no uso do solo vegetação favorecendo o desmatamento.

Destacam-se dois fatores nesse modelo, que são: temperatura mínima, cuja ocorrência aumenta em 14,477 vezes a chance do uso do solo ser vegetação e tipo de solo argissolo vermelho amarelo, cuja ocorrência aumenta em 316,347 vezes a chance do uso do solo ser vegetação e tipo de solo argissolo vermelho amarelo.

A análise dos modelos de regressão logística tanto da MBH-G quanto da MBH-O permitiu verificar uma particularidade. O fator explanatório custo esteve presente em todos os modelos de regressão, exceto nos modelos eucalipto e pastagem da MBH-G. Tal fato pode ser explicado pelo tamanho da área desses usos. De qualquer forma, esse fator influenciou negativamente na probabilidade de ocorrência dos usos de solo cana-de-açúcar, laranja e pastagem; porém influenciou de forma positiva na probabilidade de ocorrência dos usos de solo assentamento e vegetação, possibilitando a agricultura familiar e a conservação do meio ambiente.

É importante salientar que foi realizada a verificação da qualidade de ajuste dos modelos por meio do parâmetro ROC – *Receiver Operating Characteristic*. Conforme Soler (2010), esse parâmetro é uma medida de qualidade de ajuste semelhante à estatística R^2 na regressão comum, sendo que um modelo ajustado perfeitamente resulta em um ROC de 1. Após análises, verificou-se que todos os modelos possuem um ROC acima de .8 e isso indica que esses estão bem ajustados. Embora seja possível melhorá-los em estudos futuros.

Os coeficientes estimados nos modelos de regressão logística permitem caracterizar a influência dos fatores impulsores de mudanças sobre a probabilidade de ocorrência de uma classe de uso do solo para cada célula. Baseado nesses coeficientes, foram calculados mapas de distribuição dessa probabilidade para cada uso e cobertura do solo.

A Figura 67 apresenta os mapas de distribuição de probabilidade para a MBH-G e na Figura 68 observam-se os mapas de distribuição de probabilidade para a MBH-O.

Figura 67: Mapas de probabilidade para as classes de uso do solo da MBH-G

Figura 68: Mapas de probabilidade para as classes de uso do solo da MBH-O

Os parâmetros elasticidade, matriz de conversão, restrição de área e modelos de regressão logística foram mantidos os mesmos para a MBH-G e para a MBH-O, cada um com as suas particularidades. Entretanto, o que

possibilitou a obtenção de diferentes cenários temporais para cada área de estudo foram as demandas agregadas de mudança de uso do solo, conforme já citadas no presente trabalho. Ou seja, são cenários de demandas alternativas, pois cada demanda para cada uso do solo inserido na área de estudo possui um valor diferente em cada ano de simulação.

O primeiro cenário refere-se à MBH-G com Demanda_1 MBH-G, Figura 69.

Figura 69: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 (Cenário Guabiobas 1) com Demanda_1 MBH-G

É notável que nesse cenário ocorreu a expansão da cana-de-açúcar em detrimento da cultura da laranja, da pastagem e do eucalipto. Sendo que a pastagem desapareceu completamente. Entretanto, percebe-se que a cultura da cana-de-açúcar não dominou todos os usos, ela competiu diretamente com a cultura da laranja. Tanto que é perceptível a expansão da cultura da laranja em área que outrora fora cana-de-açúcar. Além disso, a laranja também se

expandiu em área de eucalipto, mesmo que de forma mais modesta.

A visualização da carta de uso e cobertura do solo de 2011 que encontra-se no início desse item (página 120) e a comparação com o cenário de 2025, percebe-se que o cultivo da laranja no cenário seguiu uma tendência de alocação dos dias atuais.

Ao comparar a área de cada uso e cobertura do solo em 2005 e a área demandada por cada uso do solo no cenário de 2025, por meio da Tabela 14, verificou-se que não ocorreram demandas por área tão significativas. Assim, conclui-se que houve alocação dos usos do solo, principalmente a cultura da laranja.

Tabela 14: Área real e área demandada para cada uso do solo na MBH-G (Cenário Guabirobas 1)

	Cana-de-açúcar (ha.)	Eucalipto (ha.)	Laranja (ha.)	Pastagem (ha.)	Outros (ha.)
2005 (real)	3079.75	297.5	941.5	318.5	509.5
2025 (cenário)	3447.56	235.98	952.85	0.86	509.5

O outro cenário simulado utilizou a Demanda_2 MBH-G, Figura 70.

Figura 70: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 (Cenário Guabiobas 2) com Demanda_2 MBH-G

Diferentemente do primeiro cenário da MBH-G, nesse não ocorreu a expansão da cultura da cana-de-açúcar. A cultura da laranja expandiu-se sobre a cana-de-açúcar, o eucalipto e a pastagem, que desapareceu por completo novamente. Essa tendência de expansão significativa da laranja na MBH-G, deve-se a fato de que em 2007 uma propriedade inserida na microbacia foi vendida e nessa iniciou-se o cultivo da laranja. Como a demanda para esse cenário utilizou os dados amostrais a partir de 2005, gerou essa tendência. Por meio da Tabela 15, pode-se verificar quanto de área foi demandada para cada uso do solo da MBH-G.

Tabela 15: Área real e área demandada para cada uso do solo na MBH-G (Cenário Guabiobas 2)

	Cana-de-açúcar (ha.)	Eucalipto (ha.)	Laranja (ha.)	Pastagem (ha.)	Outros (ha.)
2005 (real)	3079.75	297.5	941.5	318.5	509.5
2025 (cenário)	2089.72	64.99	2481.66	0.88	509.5

O mais marcante ao analisar os dois cenários da MBH-G é a influência da demanda na formação de cenários distintos. Além disso, a competição entre os tipos de uso do solo difere entre os dois cenários. No primeiro cenário, a pastagem competiu com a cana-de-açúcar e no segundo com a laranja, embora a cana-de-açúcar tenha se alocado em uma pequena área de pasto.

Segundo Nassar et al. (2008), Aguiar et al. (2009a) e Rudorff et al. (2010), na safra 2008/2009 houve a expansão de 1,3 milhões de hectares de cana-de-açúcar, sendo que 56, 5% da área expandida pela cultura ocorreu sobre área de pastagem, 40,2% sobre áreas agrícolas com culturas anuais e 3,24% sobre área com laranja e vegetação.

Wilkinson e Herrera (2008) afirmaram que a expansão da cana-de-açúcar é notória, porém esse fato ocorre sobre pastagens plantadas e áreas ocupadas por laranjais não renovados no Estado de São Paulo.

Conforme as projeções do MAPA (2010) para todo o território nacional até 2019/2020, a expansão da área com o cultivo da cana-de-açúcar deve se manter e alcançará o patamar de 12,94 milhões de hectares. Contudo, a cultura da laranja não possui projeções tão positivas, tanto que essa continuará sofrendo redução em sua área cultivada. Atualmente, a laranja é cultivada em 0,82 milhões de hectares e em 2019/2020, segundo projeções, a área cultivada com laranja será de 0,78 milhões de hectares.

Para a microbacia hidrográfica córrego da Onça, foram simulados 3 cenários de 2025, com diferentes demandas. O primeiro cenário foi simulado com a Demanda_1 MBH-O (todos os dados históricos amostrais disponíveis de 1988 a 2011) e denominado Cenário Onça 1; o segundo cenário foi simulado com a Demanda_2 MBH-O (com os dados históricos a partir de 2005) e denominado Cenário Onça 2 e; o último cenário foi simulado com a Demanda_3 MBH-O (todos os dados históricos amostrais disponíveis de 1988 a 2011, porém a demanda da área de assentamento é fixa) e denominado Cenário Onça 3, Figura 71, Figura 72 e Figura 73 respectivamente.

Figura 71: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 com Demanda_1 MBH-O – Cenário Onça 1

Figura 72: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 com Demanda_2 MBH-O – Cenário Onça 2

Figura 73: Cartas de uso e cobertura do solo 2005 e cenário 2025 com Demanda_3 MBH-O – Cenário Onça 3

Os três cenários simulados para a microbacia hidrográfica córrego da Onça são relativamente parecidos, pois basicamente ocorreu a expansão significativa do cultivo da cana-de-açúcar, em detrimento, principalmente da pastagem, um aumento modesto do uso do solo vegetação e o aumento de área de assentamento, devido à criação de um novo assentamento dentro da microbacia hidrográfica. Além da cana-de-açúcar, a pastagem competiu diretamente com o uso do solo assentamento. Sendo que cana-de-açúcar e assentamento não competem diretamente entre si, embora aumentando a área de assentamento no Cenário 3, diminui-se a área para possível expansão da cana-de-açúcar.

O arrendamento de terras à usinas de cana-de-açúcar ocorre nessa região devido ao seu rendimento que é superior a qualquer outra cultura. Porém a maioria dos proprietários de terra vêem a cana-de-açúcar como uma renda adicional, pois não pretendem abandonar a prática da criação de gado de corte, que em muitos casos faz parte da tradição familiar.

Por meio da Tabela 16, pode-se verificar quanto de área foi demandada para cada uso do solo da MBH-O em cada um dos cenários.

Tabela 16: Área real e área demandada para cada uso do solo na MBH-O

	Assentamento(ha.)	Cana-de-açúcar (ha.)	Pastagem (ha.)	Vegetação (ha.)	Outros (ha.)
2005 (real)	496.75	1110.25	9089.5	371.75	806.5
2025 (Cenário Onça 1)	1738.79	8348.85	604.75	375.86	806.5
2025 (Cenário Onça 2)	1333.17	9362.78	0.55	371.75	806.5
2025 (Cenário Onça 3)	1080.5	8958.27	648.09	381.39	806.5

Apesar do sentido de cada demanda de uso do solo na MBH-O ser a mesma, os seus valores são diferentes, o que resulta em algumas particularidades em cada cenário. No Cenário Onça 1 percebe-se que a demanda de cana-de-açúcar é um pouco menor em virtude da demanda de área para o assentamento e que dentre os três cenários, esse foi o que demandou maior área para esse tipo de uso do solo, seguido do Cenário Onça 2.

A hipótese da criação de um novo assentamento na MBH-O não foi descartada, pois segundo INCRA (2010) cada ano que passa aumentam o número de assentamentos no país. No período de 1995 e 2002 foram incorporados ao programa de reforma agrária 21,1 milhões de hectares e essa área passou para 48,3 milhões entre 2003 e 2010, representando um aumento de 129%. Somente entre esses oito anos 614.093 famílias foram beneficiadas, com a criação de 3.551 assentamentos. Atualmente, o Brasil possui 85,8 milhões de hectares incorporados à reforma agrária, 8.763 assentamentos atendidos pelo Incra, onde vivem 924.263 famílias.

Em 2009 o Estado de São Paulo possuía 244 assentamentos que ocupavam 321 mil hectares. Entre o período de 2005 e 2009, foram incorporados 59 novos assentamentos, totalizando-se 77 mil hectares (INCRA, 2011).

A área de demanda do uso do solo assentamento para o Cenário Onça 3 é a mesma área ocupada atualmente por dois assentamentos na MBH-O. Como o segundo assentamento foi criado em 2007, dois anos após o ano base da simulação, decidiu-se simular esse cenário com o pressuposto de que não ocorresse a criação de assentamento nessa área.

Ao visualizar a carta de uso e cobertura do solo de 2011 (Figura 50) e comparar com o Cenário Onça 3 (Figura 72), nota-se que a alocação do segundo assentamento simulado foi semelhante ao real.

O mais marcante no Cenário Onça 2 é que a pastagem desapareceu por completo em virtude da expansão da cana-de-açúcar. Essa expansão deve-se aos dados amostrais usados para gerar a demanda agregada do uso do solo para a MBH-O, pois até 2001 não existia um hectare de cana-de-açúcar e em 2005 havia 1.110 ha. de cana-de-açúcar na microbacia hidrográfica. Além disso, em 2001 haviam 10.763 ha. destinados à pastagem e em 2007 essa área caiu praticamente pela metade, eram 5.242 ha.

Nota-se que essa retração da área destinada à pastagem ocorreu não só no nível local como também nacional. Segundo dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2006), Figura 74, entre 1985 e 2006 ocorreu a diminuição da área destinada à pastagem, o aumento de área destinada às matas e florestas no cenário nacional e uma variação do crescimento de área com lavoura.

Figura 74: Evolução do uso da terra em território nacional
Fonte: Censo (2006)

Segundo ISO (2009), há indícios de que a expansão da cana-de-açúcar ocorrerá em grande parte sobre área de pastagem, já que se prevê a redução de 6 milhões de hectares da área de pastagem. Entretanto, estima-se que aumentará em 10% até 2020 o rebanho bovino, o que deverá se viabilizar através da pecuária intensiva.

Ao simular os cenários de 2025 tanto para a MBH-G quanto para a MBH-O, foi possível compreender que a expansão da cana-de-açúcar como dos outros usos do solo deve-se, principalmente, a três fatores: quantidade de área demandada por essa cultura, área disponível para sua expansão e a competição com os outros usos inseridos nas áreas de estudo.

A escolha de duas áreas de estudo para o presente trabalho, sendo uma inserida em região consolidada com a cana-de-açúcar e outra inserida em região que não possuía um histórico com a cultura da cana-de-açúcar, ocorreu em função do interesse em investigar o comportamento da expansão da cultura

da cana-de-açúcar em duas regiões distintas do Estado de Paulo. Sendo assim, por meio da simulação foi possível entender não só a tendência do comportamento da expansão em nível local como também em nível regional, pois as microbacias hidrográficas são um reflexo dos seus entornos, ou seja, de suas regiões.

5.3 Resultados das simulações utilizando o SWAT

Nesse item são apresentados e discutidos os resultados da simulação do modelo SWAT utilizando-se os cenários simulados no CLUE-S a fim de fornecer uma avaliação do potencial impacto das mudanças de uso do solo nos recursos ambientais das duas microbacias hidrográficas. Tais impactos são: produção de sedimento e escoamento superficial.

Os primeiros cenários a serem avaliados são os referentes à microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas. Esta foi dividida em 19 diferentes sub-bacias, cada uma com áreas distintas.

Na Figura 75 são apresentados os mapas de distribuição do escoamento superficial e da produção de sedimentos dos cenários simulados para a MBH-G a fim de comparar os resultados obtidos.

Figura 75: Mapas de distribuição do escoamento superficial e da produção de sedimentos dos cenários da MBH-G

Ao analisar os dois cenários, nota-se que a produção de sedimento e o escoamento superficial é maior no Cenário Guabirobas 1, embora algumas sub-bacias apresentem os mesmos valores para ambos os cenários.

O valor médio do escoamento superficial nas sub-bacias foi de 116,31 mm/ano nas sub-bacias da MBH-G, Cenário Guabirobas 1 obtido pelo modelo SWAT e o valor médio da produção de sedimentos, foi de 0,049 t/ha. x ano. No Cenário Guabirobas 2, o valor médio do escoamento superficial e da produção de sedimentos nas sub-bacias foi de 83,91 mm/ano e 0,024 t/ha. x ano, respectivamente.

Na Tabela 17 são apresentadas as médias tanto de escoamento superficial quanto de produção de sedimentos para o Cenário Guabirobas 1 e Cenário Guabirobas 2 obtidas pelo modelo SWAT.

Tabela 17: Médias do escoamento superficial e da produção de sedimentos nos cenários da MBH-G

Cenários Usos	Escoamento superficial (mm)		Produção de sedimentos (t/ha. x a)	
	Cenário Guabirobas 1	Cenário Guabirobas 2	Cenário Guabirobas 1	Cenário Guabirobas 2
Cana-de-açúcar	144,46	145,67	0,048	0,045
Laranja	45,91	46,64	0,004	0,005
Floresta	17,08	17,27	0,001	0,001
Eucalipto	17,02	17,35	0,16	0,13

Segundo Minoti et al (2011), a MBH-G não apresenta uma perda de solo tão significativa pois possui declives menos acentuados, com uma média de 3,3% de declividade e o uso da terra é dominado por plantações.

Minoti (2006) e Crestana et al. (2010) observaram que o valor total de perda de solo na MBH-G, simulado pelo SWAT, foi de 54.530 toneladas métricas/ano.

Silva et al. (2010) obtiveram os seguintes valores de perda de solo de uma sub-bacia localizada na Fazenda experimental Canchim da Embrapa no município de São Carlos – SP para os usos do solo: mata nativa 0,39 t/ha. x ano; eucalipto 2,9 t/ha. x ano; pastagem 3,86 t/ha. x ano; cana-de-açúcar 32,5 t/ha. x ano e milho 42 t/ha. x ano.

Lelis (2011) ao simular com o SWAT o escoamento superficial e a produção de sedimentos da bacia do ribeirão São Bartolomeu (BHR SB), no município de Viçosa - MG, realizou a divisão da bacia em diferentes níveis de sub-bacias e obteve os seguintes resultados para cada uso do solo, Tabela 18.

Tabela 18: Produções médias de sedimento e escoamento superficial em 2007 para diversos níveis de divisão da BHR SB

Fonte: Lelis, 2011

Divisões de bacias Uso	Produções médias em 2007							
	Sedimentos (t/ha.)				Escoamento Superficial (mm)			
	392 SB	24 SB	73 SB	136 SB	392 SB	24 SB	73 SB	136 SB
Pastagem	0,288	0,263	0,306	0,287	117	86	95	98
Café	0,007	-	0,001	0,001	92	-	72	89
Mata	0,019	0,063	0,068	0,054	34	37	43	43

Bertoni & Lombardi Neto (1999) determinaram uma perda média de solo para diversas culturas no Estado de São Paulo, sendo que para a cultura da cana-de-açúcar era de 12,4 t/ha. x ano, para pastagem era de 0,4 t/ha. x ano, para reflorestamento era de 0,9 t/ha. x ano, para laranja era 0,9 t/ha. x ano e para milho era de 12 t/ha. x ano.

Ao comparar os dados de produção de sedimentos obtidos no presente trabalho e os obtidos por Lelis (2011) com os dados apresentados por Bertoni & Lombardi Neto (1999), verifica-se que há discrepância dos dados obtidos

pelos autores. Sendo assim, é importante considerar que os dados obtidos por Bertoni & Lombardi Neto (1999) abrangem o Estado de São Paulo; foram obtidos há mais de uma década, portanto foram consideradas práticas de manejo diferentes das atuais e possivelmente consideraram a perda de solo em carreadores. Todos esses fatores propiciam maior perda de solo. Tanto os dados do presente trabalho quando os apresentados por Lelis (2011) foram simulados com o SWAT, com isso, os valores são mais próximos, porém é importante ressaltar que não foi considerada a perda de solo em carreadores. Tal fator implica em maior perda de solo, o que pode aumentar os valores obtidos e, conseqüentemente, diminuir a discrepância com os dados de Bertoni & Lombardi Neto (1999).

É importante ressaltar três fatores que possivelmente contribuíram para os baixos valores dos dados de escoamento superficial e produção de sedimentos obtidos nesse trabalho comparados aos outros valores dos trabalhos apresentados. O primeiro fator é que foram considerados valores de Curva Número para os usos agrícolas brasileiros. O segundo fator foi o cálculo do Fator K (erodibilidade), que geraram valores inferiores aos obtidos por Minoti (2006). Segundo Silva et al. (2010), altos valores de perda de solo podem ser justificados, em parte, pelos altos valores de K (fator erodibilidade) e LS (fator topográfico). O terceiro fator é que, diferentemente de Lelis (2011), não foi realizada a calibração do modelo SWAT, pois não era objetivo do presente trabalho de tese e sim, dar uma contribuição metodológica.

Além disso, é importante ressaltar tanto a MBH-G quanto a MBH-O são microbacias hidrográficas não instrumentadas e esse fato contribui para a discrepância dos valores obtidos.

Um aspecto que deve ser ressaltado é que tanto na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas quanto na microbacia hidrográfica córrego da Onça existem inúmeros carreadores e estradas rurais, conforme Figura 76 e Figura 77.

Figura 76: Carreador na MBH-G

Figura 77: Carreador na MBH-O

Minoti (2006) em análise visual da área de estudo microbacia hidrográfica ribeirão das Guabirobas e microbacia hidrográfica do córrego do Beija-Flor, observou erosão laminar ou em sulco nos carreadores rurais ou formação de canais de escoadouro de água e sedimentos. Sendo assim, a localização dos carreadores nas áreas de estudo de sua produção de sedimentos poderia interferir do resultado final do escoamento superficial e da produção de sedimentos.

De acordo com Marques & Pazzianotto (2004), na época desse estudo, o custo econômico para erosão de solo da cana-de-açúcar era R\$ 23,91 t/ha. x ano, da pastagem era R\$ 0,77 t/ha. x ano, do reflorestamento era de R\$ 1,74 t/ha. x ano, da laranja era R\$ 1,74 t/ha. x ano e do milho era R\$ 23,14 t/ha. x

ano.

Por meio da Figura 78 e da Figura 79 é possível verificar quais sub-bacias mais se distinguem entre si, tanto para a produção de sedimento quanto para o escoamento superficial.

Figura 78: Escoamento superficial dos cenários da MBH-G

Figura 79: Produção de sedimentos dos cenários da MBH-G

A análise dessas tabelas permite observar de maneira geral que as sub-bacias com valores mais ou menos críticos para a produção de sedimento e escoamento superficial são coincidentes, ratificando a interdependência desses fatores (LELIS, 2011).

Ao realizar a comparação entre as sub-bacias dos cenários da MBH-G, foi possível notar que das 19 sub-bacias, 8 possuem valores próximos e 11 possuem valores distintos. Com isso, verifica-se a influência do uso do solo no resultado final do SWAT, pois nessas 8 sub-bacias: 3, 5, 6, 7, 9, 10, 15 e 16 os usos do solo são praticamente os mesmos para dois cenários da MBH-G. Nas sub-bacias 1, 2, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 18 e 19, os usos dos solo são diferentes para os dois cenários. Tal análise é possível, com a verificação das HRU's em cada um dos cenários.

É importante ressaltar que como os tipos de solos não apresentam características susceptíveis à erosão, a declividade não é acentuada na área e a intensidade de precipitação é homogênea na microbacia hidrográfica, o fator uso e cobertura do solo é o fator agravante do processo de erosão da área de estudo.

O Cenário Guabirobas 1 possui 48 HRU's e o Cenário Guabirobas 2 possui 50 HRU's. O número de HRU's em cada sub-bacia do Cenário Guabirobas 1 e Cenário Guabirobas 2 estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Área e número de HRU's em cada sub-bacia dos cenários da MBH-G

Sub-bacia	Área da sub-bacia (ha.)	Cenário Guabirobas 1	Cenário Guabirobas 2
1	541	4	5
2	101,5	1	2
3	1077,8	2	2
4	353,5	3	3
5	115,7	3	3
6	120,5	1	1
7	180,7	2	2
8	109,7	2	3
9	337	4	4
10	281,2	2	2
11	198,2	2	2
12	23	4	4
13	98,7	1	1
14	168,5	3	1
15	157	2	2
16	69	3	3
17	166,2	4	3
18	148,2	3	3
19	531	2	4

As sub-bacias 1, 2, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 18 e 19 do Cenário Guabirobas 1 possuem valores maiores, tanto para a produção de sedimento quanto para o escoamento superficial, quando comparados com o Cenário Guabirobas 2.

Com a análise dos números de HRU's em cada sub-bacia dos cenários, foi possível notar que aumentou 1 HRU nas sub-bacias 1, 2, 8, e 12; aumentaram 2 HRU's na sub-bacia 19, diminuiu 1 HRU nas sub-bacias 11 e 17 e diminuíram 2 HRU's na sub-bacia 14 do Cenário Guabirobas 2 em relação ao Cenário Guabirobas 1.

Com a análise dos usos de cada uma das HRU's das sub-bacias dos cenários observou-se que: nas sub-bacias 1, 2, 8, e 12 aumentou 1 HRU de laranja e na sub-bacia 19 aumentaram 2 HRU's de laranja; nas sub-bacias 11 e 17 diminuiu 1 HRU de cana-de-açúcar; na sub-bacia 14 diminuiu uma HRU de cana-de-açúcar e outra de eucalipto; nas sub-bacias 4, 13 e 18 uma HRU's passou de cana-de-açúcar para laranja no Cenário Guabirobas 2 em relação

ao Cenário Guabirobas 1.

É importante ressaltar que na sub-bacia 14, a perda da HRU de eucalipto influenciou nos valores do escoamento superficial e da produção de sedimentos.

Assim, é possível afirmar que, segundo a simulação realizada com o modelo SWAT e comparação do uso do solo dos cenários, pode-se estimar que a cultura da cana-de-açúcar e do eucalipto propiciam maior produção de sedimento e maior escoamento superficial em relação à cultura da laranja.

A grande diferença na ordem de grandeza das perdas de solo deve-se, provavelmente à densidade da cobertura vegetal, que intercepta as gotículas de chuva, favorece o processo de infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento superficial e, conseqüentemente, o arraste das partículas. Outro fator de influência é a forma de manejo, como as curvas de nível que favorecem, também, a infiltração de água no solo ao atuar como barreira ao escoamento superficial, minimizando o transporte do material erodido (LELIS, 2011).

Assim como os cenários da MBH-G, os cenários da MBH-O também foram divididos em 19 sub-bacias, cada uma com áreas distintas.

Na Figura 80 são apresentados os mapas de distribuição do escoamento superficial e da produção de sedimentos dos cenários simulados para a MBH-O com o intuito de comparar os resultados obtidos pelo SWAT.

Cenário Onça 1 (cenário 2025) com Demanda_1 MBH-O

Cenário Onça 2 (cenário 2025) com Demanda 2 MBH-O

Continua...

Figura 80: Mapas de distribuição do escoamento superficial e da produção de sedimentos dos cenários da MBH-O

O valor médio do escoamento superficial nas sub-bacias da MBH-O referente ao Cenário Onça 1, Cenário Onça 2 e Cenário Onça 3 obtido pelo modelo SWAT, 3 foi de 17,05 mm/ano, 16,25 mm/ano e 17,08 mm/ano, respectivamente. O valor médio da produção de sedimentos nas sub-bacias referente ao Cenário Onça 1, Cenário Onça 2 e Cenário Onça 3 foi de 0,09 t/ha. x ano, 0,06 t/ha. x ano e 0,08 t/ha. x ano, respectivamente.

Nota-se que por serem cenários semelhantes, não ocorreu significativa variação dos valores tanto de escoamento superficial quanto produção de sedimentos. Porém, existem certas particularidades em cada cenário.

Na Tabela 20 são apresentadas as médias tanto de escoamento superficial quanto de produção de sedimentos para o Cenário Onça 1, Cenário Onça 2 e Cenário Onça 3 obtidas pelo modelo SWAT.

Tabela 20: Médias do escoamento superficial e da produção de sedimentos nos cenários da MBH-O

Cenários Usos	Escoamento superficial (mm)			Produção de sedimentos (t/ha. x a)		
	Cenário Onça 1	Cenário Onça 2	Cenário Onça 3	Cenário Onça 1	Cenário Onça 2	Cenário Onça 3
Cana-de-açúcar	21,18	21,08	21,18	0,15	0,15	0,15
Pastagem	3,92	-	3,92	0,42	-	0,40
Assentamento (agricultura genérica)	17,70	17,91	17,70	0,44	0,037	0,44

Neves (2005) observou que a microbacia hidrográfica do Ribeirão Bonito (MBH-RB), localizada no município de Descalvado - SP, apresentou as seguintes perdas de solo para os usos do solo: agricultura genérica 79,1 t/ha. x ano; pastagem 65,6 t/ha. x ano; cana-de-açúcar 6,6 t/ha. x ano; mata 4,0 t/ha. x ano; cerrado 3,0 t/ha. x ano; laranja 2,9 t/ha. x ano e; reflorestamento 1,9 t/ha. x ano.

Embora os dados apresentados nesse trabalho e os dados obtidos por Neves não estejam próximos, referentes à cada cultura, é possível observar que o uso do solo agricultura genérica, pastagem e cana-de-açúcar foram os que apresentaram maiores taxas de perda de solo, respectivamente, em ambos trabalhos.

Conforme Minoti et al. (2011), a razão da discrepância dos dados de perda do solo por erosão calculados pela EUPS (mais baixos) e pelo SWAT (mais elevados) pode estar relacionado com a subestimação dos dados de evapotranspiração, com consequente aumento do escoamento superficial,

pela deficiência no processo de parametrização dos dados de solo e pela não inclusão da prática do plantio direto em alguns tipos de culturas.

Bramorski (2007) caracterizou, experimentalmente, na microbacia hidrográfica do ribeirão Canchim totalmente inserida na Fazenda Canchim, base física do Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste (EMBRAPA Pecuária Sudeste, os processos de perda de solo, suas relações com o tipo e preparo do solo e a influência da intensidade da chuva. Os resultados permitiram identificar que nas parcelas com o tipo de preparo do solo raspado, a taxa de erosão foi maior do que em parcelas com o tipo de preparo do solo arado. Sendo que nas simulações de chuvas mais intensas com menor tempo de duração, a taxa de erosão foi maior do que nas simulações de chuvas menos intensas com maior tempo de duração.

Por meio da Figura 81 e da Figura 82 é possível verificar quais sub-bacias mais se distinguem entre si, tanto para a produção de sedimento quanto para o escoamento superficial.

Figura 81: Escoamento superficial dos cenários da MBH-O

Figura 82: Produção de sedimentos dos cenários da MBH-O

Dentre as 19 sub-bacias dos três cenários da MBH-O, 10 possuem valores muito próximos tanto para produção de sedimento quanto para escoamento superficial. As sub-bacias dos três cenários com valores muito próximos são: 5, 6, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 17 e 19. Isso deve-se ao fato de os três mapas de uso e ocupação serem praticamente idênticos na localização dessas sub-bacias e todas as HRU's que compõem essas sub-bacias são iguais entre si em todos os cenários.

O Cenário Onça 1 e o Cenário Onça 3 são semelhantes, porém não são idênticos e, por isso se distinguem do Cenário Onça 2, tanto para a produção de sedimento quanto de escoamento superficial.

O Cenário Onça 1 possui 41 HRU's, o Cenário Onça 2 possui 40 HRU's e o Cenário Onça 3 possui 44 HRU's. O número de HRU's em cada sub-bacia desses cenários estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Área e número de HRU's em cada sub-bacia dos cenários da MBH-O

Sub-bacia	Área da sub-bacia (ha.)	Cenário Onça 1	Cenário Onça 2	Cenário Onça 3
1	361,2	2	2	2
2	418,5	3	2	2
3	346,5	3	2	3
4	1.593,2	4	3	6
5	423	2	2	2
6	198,5	2	2	2
7	14,5	2	2	2
8	2.410	3	3	3
9	236,2	1	2	1
10	272,2	2	2	1
11	875,7	2	2	2
12	947,5	2	3	2
13	26,5	2	2	2
14	237,7	1	1	1
15	744	2	2	2
16	764	2	2	3
17	340,7	1	1	1
18	302,5	3	3	5
19	755,7	2	2	2

Ao analisar os resultados da simulação do Cenário Onça 1 e do Cenário Onça 3, nota-se que cinco sub-bacias (2, 4, 10, 16 e 18) apresentam valores diferentes entre si. Isso se deve à diferença no uso e ocupação do solo em cada um dos cenários. Com a análise dos números de HRU's em cada uma dessas sub-bacias, verificou-se que na sub-bacia 2 diminuiu uma HRU's de assentamento, na sub-bacia 4 aumentaram duas HRU's de vegetação, na sub-bacia 10 diminui uma HRU de vegetação, na sub-bacia 16 aumentou uma HRU de vegetação e na sub-bacia 18 aumentaram duas HRU's de cana-de-açúcar no Cenário Onça 3 em relação ao Cenário Onça 1.

A comparação entre o Cenário Onça 1 e o Cenário Onça 2 permite observar que, as sub-bacias 1, 2, 3, 4, 9 e 12 possuem números de HRU's diferentes assim como valores de produção de sedimento e escoamento superficial. Na sub-bacia 1 foi substituído o uso do solo pastagem por cana-de-açúcar, nas sub-bacias 2, 3 e 4 diminuiu uma HRU de pastagem, na sub-bacia 9 aumentou uma HRU de assentamento e na sub-bacia 12 aumentou uma

HRU de vegetação no Cenário Onça 2 em relação ao Cenário Onça 1.

Os últimos cenários comparados em si são o Cenário Onça 2 e o Cenário Onça 3. Observa-se que as sub-bacias 1, 3, 4, 9, 10, 12, 16 e 18 possuem números de HRU's diferentes assim como valores de produção de sedimento e escoamento superficial. Assim como no Cenário Onça 1, na sub-bacia 1 foi substituído o uso do solo pastagem por cana-de-açúcar, na sub-bacia 3 diminuiu uma HRU de cana-de-açúcar, na sub-bacia 4 diminuíram duas HRU's de vegetação e uma HRU de pasto, na sub-bacia 9 aumentou uma HRU de assentamento, nas sub-bacias 10 e 12 aumentou uma HRU de vegetação, na sub-bacia 16 diminuiu uma HRU de vegetação e na sub-bacia 18 diminuíram duas HRU's de cana-de-açúcar no Cenário Onça 2 em relação ao Cenário Onça 3.

Conforme dados analisados e comparados entre as sub-bacias dos três cenários e os usos do solo por meio das HRU's que compõem cada uma das sub-bacias, foi possível verificar que, segundo a simulação realizada com o modelo SWAT, áreas com o uso do solo assentamento e pastagem propiciaram maior produção de sedimento e escoamento superficial na microbacia hidrográfica córrego da Onça, comparados às áreas ocupadas com cana-de-açúcar e vegetação.

Porém, é importante ressaltar que no modelo SWAT não existe em sua base de dados informações sobre assentamento, assim utilizou-se a cobertura Terras Agrícolas Genéricas (AGRL) e isso pode ter influenciado no resultado obtido.

O trabalho em conjunto realizado com os modelos de simulação CLUE-S e SWAT propiciou a identificação de áreas mais críticas relacionadas tanto ao

escoimento superficial quanto à produção de sedimentos. Sendo assim, os resultados obtidos com esses modelos de simulação podem ser utilizados na identificação dos usos do solo mais adequados e as práticas de gestão mais adequadas para os setores mais vulneráveis das microbacias hidrográficas.

6 CONCLUSÃO

Dentre as várias conclusões que se podem inferir do trabalho de tese, as principais são apontadas:

- ✓ O CLUE-S possibilitou simular cenários em função da mudança do uso do solo na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e na microbacia hidrográfica córrego da Onça a partir de fatores socioeconômicos e biofísicos, no período de 20 anos.
- ✓ Devido à extrapolação de tendências dos dados históricos da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e na microbacia hidrográfica córrego da Onça foi possível simular diferentes cenários de expansão da cana-de-açúcar no CLUE-S.
- ✓ As demandas por área de cada um dos usos do solo da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas (inserida em região consolidada pela cultura da cana-de-açúcar) e na microbacia hidrográfica córrego da Onça (inserida em região onde o cultivo da cana-de-açúcar encontra-se em expansão) influenciaram diretamente nos resultados. A partir das diferentes demandas foi possível gerar diferentes cenários.
- ✓ Nos cenários simulados para a microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e a microbacia hidrográfica córrego da Onça, o uso do solo pastagem diminui drasticamente.
- ✓ A microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas , inserida em área consolidada com cultura da cana-de-açúcar, apresentou menor demanda para a cana-de-açúcar e maior competitividade com os outros

usos que a compõem.

- ✓ O modelo SWAT foi sensível aos diferentes cenários de uso do solo gerados pelo modelo de simulação CLUE-S tanto da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas quanto da microbacia hidrográfica córrego da Onça e possibilitou verificar os usos do solo mais suscetíveis ao escoamento superficial e à produção de sedimentos.
- ✓ Por meio da simulação de cenários da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas no modelo SWAT foi possível verificar que os usos do solo eucalipto e cana-de-açúcar foram os mais suscetíveis à produção de sedimentos.
- ✓ Por meio da simulação de cenários da microbacia hidrográfica córrego da Onça no modelo SWAT foi possível verificar que os usos do solo assentamento e pastagem foram os mais suscetíveis à produção de sedimentos.
- ✓ Por meio do modelo SWAT, foi possível verificar que o uso do solo cana-de-açúcar foi mais suscetível à produção de sedimentos nos cenários da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas do que da microbacia hidrográfica córrego da Onça.
- ✓ No Brasil, os trabalhos realizados utilizando o modelo CLUE-S ainda são escassos. Além disso, o uso em conjunto do modelo CLUE-S com o modelo SWAT é inédito no Brasil, o que representa uma importante contribuição metodológica para o país.
- ✓ Embora não fosse objetivo desse trabalho de tese a calibração dos resultados de escoamento superficial e produção de sedimentos em função das diferentes situações avaliadas, foi possível verificar que

esses foram bastante satisfatórios, pois geraram informações importantes para as área de estudo, podendo auxiliar a formulação de políticas públicas ou planejamento de atividades agropecuárias, florestais e de produção de bioenergia.

7 SUGESTÕES

Este trabalho trata da aplicação do modelo CLUE-S com o intuito de simular cenários futuros da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e da microbacia hidrográfica córrego da Onça. Os resultados dessa simulação serviram como dados de entrada para o modelo de simulação SWAT, com o objetivo de estimar o escoamento superficial e a produção de sedimentos. Portanto, sugere-se em futuros estudos:

- ✓ Em uma microbacia hidrográfica existem diversos tipos de uso e ocupação do solo. Cada um desses usos e ocupação podem estar em diversos estágios. Assim, sugere-se realizar uma classificação diversa do atual estágio de cada uso e ocupação do solo da microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas e da microbacia hidrográfica córrego da Onça com o intuito de refinar a matriz de conversão.
- ✓ Fazer uso de cartas de adição específica na preferência da área, com um conhecimento mais aprofundado de cada propriedade, tanto na microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas quanto da microbacia hidrográfica córrego da Onça.
- ✓ Melhorar a escala dos dados espaciais, o que permitirá o refinamento do resultado.
- ✓ Fazer o levantamento dos parâmetros de solos utilizados no SWAT, nas microbacias hidrográficas estudadas com o objetivo de aumentar a fidedignidade dos dados.
- ✓ Parametrizar os dados de cobertura da terra/crescimento das plantas para uso do solo assentamento.

- ✓ Inserir áreas de carregadores para a simulação com o modelo SWAT e verificar os impactos nos resultados gerados.
- ✓ Utilizar os resultados de perda de solo em área experimental da Fazenda Canchim, localizada no município de São Carlos, obtidos por BRAMORSKI (2007) para possível calibração do modelo SWAT na MBH-G na perspectiva de realização de novos testes de aplicação do modelo nesta MBH não instrumentada.
- ✓ Explorar os modelos de simulação CLUE-S e SWAT, a partir dos resultados gerados nesse trabalho de tese para avaliar outros impactos ambientais, tais como: impacto do desmatamento em outros biomas e recuperação de áreas degradadas.
- ✓ Instrumentalizar tanto a MBH-G quanto a MBH-O para iniciar a obtenção de dados hidrológicos como vazão a fim de que futuramente o modelo SWAT possa ser calibrado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRITEMPO – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (2010). Dados meteorológicos. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/>>. Acesso em: 12 jun. 2010.

AGUIAR, A. P. D. Modelagem de mudanças de uso e cobertura do solo na Amazônia: Questões Gerais. In: Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial. 2003. cap. 04. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem>>. Acesso em: 06. nov. 2010.

AGUIAR, D. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; FREITAS, R. M. Avaliação da conversão do uso e ocupação do solo para cana-de-açúcar utilizando imagens de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009a, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009a. p. 5547-5554.

AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; CARVALHO, M. A. Expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: safras 2003/2004 a 2008/2009. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009b, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009b. p. 9-16.

ALCAMO, J. Scenarios as tools for international environmental assessments. Environmental Issue Report n. 24. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2001. 31 p.

_____. Environmental Futures: The Practice of Environmental Scenario Analysis. Elsevier: Amsterdam, 2008. 224 p.

AMARAL, W. A. N.; MARINHO, J. P.; TARASANTCHI, R.; BEBER, A.; GIULIANI, E. Environmental sustainability of sugarcane ethanol in Brazil. In: ZUURBIER, P.; VOOREN, J. Sugarcane ethanol contributions to climate

change mitigation and the environment. The Netherlands. Wageningen Academic Publishers, 2008. cap. 5, p. 113 – 138.

ANFAVEA – Associação Nacional dos fabricantes de veículos automotores. Estatísticas. 2008. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>. Acesso em: 07 out. 2008.

_____. Anuário da indústria automobilística brasileira 2010. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/anuario.html>. Acesso em: 08 set. 2011.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2011. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=57890>. Acesso em: 27 set. 2011.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development. JAWRA, v. 34, n. 1, p. 73-89. 1998.

ARRUDA, O. G. de. Levantamento taxonômico dos solos e classificação dos ambientes de produção para a cana-de-açúcar na Fazenda Santa Rosa, Suzanópolis, SP. 2010. 65 p. Relatório final – Iniciação Científica. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual de São Paulo – UNESP, 2010.

AZEVEDO, H. J. Uma análise da cadeia produtiva de cana-de-açúcar na região norte fluminense. Observatório socioeconômico da região norte fluminense. Boletim técnico n. 06. 2002.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. Piracicaba: Livroceres. 392 p.

BIESBROUCK, B.; WYSEURE, G.; VAN ORSCHOVEN, J e FEYEN, J. AVSWAT 2000. Katholieke Universiteit Leuven (K.U.Leuven), Belgium. 199 pp. 2002.

BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L. H. P.; MALUTTA, S. Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a simulação da

perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 10., 2010, Fortaleza – CE.

BRAMORSKI, J. Avaliação da perda de solo e fertilizantes nitrogenados por erosão em áreas agrícolas: uma abordagem integrada e experimental dos fatores intervenientes no processo. 2007. 201 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2007.

CANASAT. Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra. Tabelas. 2011. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>. Acesso em: 02 jul. 2011.

COELHO, A. Modelagem de dinâmica do uso da terra e cobertura vegetal na região de Santarém, oeste do Pará. 2009. 128 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências Programa de pós-graduação em Ciências Ambientais - Universidade Federal do Pará.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2011. Brasília: Conab, 2011. 21 p.

COPERSUCAR – Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. Histórico. Disponível em: <http://www.copersucar.com.br/institucional/por/empresa/historico.asp>. Acesso em: 06 out. 2008.

CRESTANA, S.; MINOTI, R. T.; NEVES, F. F. Modelagem e simulação aplicadas a avaliação dos impactos da perda de solo e dos dejetos de suínos na qualidade da água de microbacias: uma nova abordagem voltada ao planejamento ambiental de microbacias hidrográficas. In: GOMES, M. A. F.; PESSOA, M. C. P. Y. (Org.). Planejamento ambiental do espaço rural com ênfase para microbacias hidrográficas: manejo de recursos hídricos, ferramentas computacionais e educação ambiental. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010, p. 167-199.

DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; NEITSCH, S.L.; WILLIAMS, J.R. ArcView Interface for SWAT2000 – User's Guide. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 2002. 345 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Pecuária Sudeste. Dados Meteorológicos. Base de dados. 2011 Disponível em: < <http://www.cppse.embrapa.br/servicos/dados-meteorologicos>>. Acesso em: 12 abr. 2011.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Perspectiva para o etanol no Brasil. Cadernos de energia EPE. Brasília, DF. 2008. 62 p.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) . Revista Política Hoje, Vol. 18, n. 1, 2009. p. 115-146.

FRAGOSO, M. M. A. Estudo hidrológico e de transporte de sedimentos em uma bacia do bioma cerrado: bacia do Córrego Capão Comprido. 2008. 86 p. Dissertação (Mestrado). Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília – UNB, 2008.

FREITAS, M. W. D.; SANTOS, J. R. Esboço de modelagem da dinâmica da paisagem no Município de Lages-SC. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15. Curitiba – PR. Anais... INPE, 2011. p. 6742- 6749.

FURLANI NETO, V. L.; RIPOLI, T. C.; VILA NOVA, N. A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhico remanescente de colheita mecânica. Stab – Açúcar, Álcool e Subprodutos, v. 15. 1997. p. 24-27.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C. de; LAPA, K. R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. In: 2011 International SWAT Conference & Workshops, 2011, Toledo. 2011 International SWAT Conference & Workshops. Bryan: Texas A&M University.

GARSON, G. D. (2002), Statnotes: Topics in Multivariate Analysis. Disponível em: <http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>. Acesso em: 02 ago. 2011.

GOES, T. A energia que vem da cana-de-açúcar. Embrapa: Artigos. 2008 Disponível em: <http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/Aenergiaquevemdacanadeacucarultimo.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2008.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. Science, v. 315, p. 808 – 810, 2007.

GOLDEMBERG, J., GUARDABASSI, P. Are biofuels a feasible option? Energy Policy, v. 37, p. 10-14, 2009.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. TATHAM, R. L. Análise Multivariada de Dados. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.

HIEPE, C. Soil degradation by water erosion in a sub-humid West-African catchment: a modelling approach considering land use and climate change in Benin. 2008. Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, 2008.

HOLLANDA, J. B. Eficiência energética na indústria da cana. Revista Opiniões.. Ribeirão Preto: Editora WDS, Jan-Mar 2008.

IAC – INSTITUTO AGRONÔMICO de CAMPINAS. Mapa de Solos do Estado de São Paulo. Campinas, 1982. 1 mapa. Folha: SF.23-V-C-IV. Escala 1:50.000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO de GEOGRAFIA e ESTATÍSTICA. Mapa Topográfico. 1971. Folha: SF.23-V-C-IV-1. Escala 1:50.000.

_____. Censo Demográfico: Brasil, 2000. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. 173 p.

_____. Censo Agropecuário. Resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 141 p.

_____. Levantamento sistemático da produção agrícola. Rio de Janeiro: IBGE. 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>. Acesso em: 23 mai. 2011.

IGGSP – Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo. BELA FLORESTA. Região Sul do Brasil. São Paulo: 1 folha SF. 22 C IV-1, color, 76x57 cm. Escala 1:50.000. 1967.

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. Jornal INCRA. Publicação Especial do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. n. 02. 2010. Disponível em: http://www.incra.gov.br/portal/images/arquivos/jornal_incra_27_01_2011.pdf. Acesso em: 13 jul. 2011.

_____. Números da Reforma Agrária. 2011. Disponível em: <http://www.incra.gov.br/> Acesso em: 13 jul. 2011.

ISO – International Sugar Organization. Outlook on Brazil's competitiveness in sugar and ethanol. 2009. Disponível em: <http://www.isosugar.org>. Acesso em: 28 mai. 2010.

KUHN, C. Uma análise sistêmica das transformações de uso do solo como suporte à decisão para o planejamento de unidades de conservação. 2005. 163 p. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em Planejamento Urbano e Regional. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

LAMBIN, E. F.; BAULIES, X.; BOCKSTAEL, N. FISCHER, G.; KRUG, T.; LEEMANS, R.; MORAN, E. F.; RINDFUSS, R. R.; SATO, Y.; SKOLE, D.; TURNER, B. L.; VOGEL, C. 1999. Land-use and land-cover change (LUCC). Implementation strategy. IGBP Report, n. 48, IHDP Report, n. 10. Stockholm, Bonn. 125 p.

LAMBIN, E. F.; TURNER, B. L.; GEIST, H. J.; AGBOLA, S. B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J. W.; COOMES, O. T.; DIRZO, R.; FISCHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P. S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X.;

MORAN, E. F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P. S.; RICHARDS, J. F.; SKANES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G. D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T. A.; VOGEL, C.; XU, J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*. n. 11, p. 261-269, 2001.

LELIS, T. Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT. 2011. 165 p. Tese (Doutorado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 2011.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, n.4, p. 582-595, 2008.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Balanço nacional da cana-de-açúcar e agroenergia. Brasília, DF, 2007. 140 p

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cana-de-açúcar e agroenergia. Estatística. 2008a Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 08 set. 2008.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cana-de-açúcar e agroenergia. Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia. 2008b Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/1984_posicao_04_2010.pdf

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento. Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar para a produção de etanol e açúcar no Brasil: seleção de terras potenciais para a expansão do seu cultivo. Org. Celso Vainer Manzatto ... [et al.] Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Documentos 110. 2009.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento. Projeções do Agronegócio Brasil 2009/2010 a 2019/2020. Assessoria de Gestão Estratégica– Brasília: Mapa/ACS. Brasília, DF, 2010. 76 p.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e do Abastecimento. Cana de açúcar: Produção Brasileira de Etanol. 2011. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>

MARCOCCIA, R. A participação do etanol brasileiro em uma nova perspectiva na matriz energética mundial. 2007. Dissertação (Mestrado). Instituto de Eletrotécnica e Energia. Faculdade de Economia e Administração. Universidade de São Paulo, 2007.

MARQUES, J. F.; PAZZIANOTTO, C. B. Custos econômicos da erosão do solo: estimativa pelo método do custo de reposição de nutrientes. Comunicado técnico 23. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. Disponível em: http://www.cnpma.embrapa.br/analise_econ/. Acesso em: 03 jul. 2011.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; CASSOL, E. A.; REICHERT, J. M. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. de. (Org.). Manejo e Conservação do Solo e da Água no Contexto das Mudanças Ambientais. Rio de Janeiro: Embrapa. cap. 04, 2010. p. 105 -122.

MINOTI, R. T. Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Micro-bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior/SP. 2006. 231 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2006.

MINOTI, R. T.; SILVA, F. G. B.; LOMBARDI NETO, F.; KOIDE, S.; CRESTANA, S. Application of models to estimate erosion, sediment production and future scenarios in two Brazilian tropical watersheds. IAHS-AISH Publication, v. 345, p. 99-105, 2011.

MME – Ministério de Minas e Energia. Balanço energético nacional 2010, ano base 2009. 2010. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf

MOREIRA, E.; COSTA, S.; AGUIAR, A. P.; CÂMARA, G.; CARNEIRO, T. Dynamical coupling of multiscale land change models. *Landscape Ecology*, v. 24, p. 1183-1194, 2009.

MORGAN, R. P. C. *Erosión y conservación del suelo*. 2 ed. Madrid: Ediciones Mundi Prensa. 1997. 343p.

MOREIRA, R. C. G. G. S. *Segurança Alimentar x Agrocombustíveis: a controvérsia entre a produção de alimentos e a produção de etanol no Brasil*. 2010. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós - Graduação em Estudos Populacionais e Pesquisas Sociais da Escola Nacional de Ciências Estatísticas, 2010.

NASSAR, A. M.; RUDORFF, B. F. T.; ANTONIAZZI, L. B.; AGUIAR, D. A.; BACCHI, M. R. P.; ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: Peter Zuurbier; Jos van de Vooren. (Org.). *Sugarcane ethanol*. 1 ed. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. v. 1, p. 63-93.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; KING, K.W. *Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation: Version 2000*. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 2002a. 458 p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R. *Soil and Water Assessment Tool – User's Manual: Version 2000*. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 2002b. 412 p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. . *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2005*. Temple, TX: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. 2005. 476 p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. *Soil and Water Assessment Tool Input/ Output File Documentation*.

Version 2009. Temple, TX: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. 2010. 603 p.

NEVES, F. F. Análise prospectiva das áreas de risco á erosão na Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Bonito, Descalvado – SP, potencialmente poluidoras por dejetos de granjas. 2005. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2005.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. Economia Aplicada, v. 11, n. 4, p. 587-604, 2007.

NOGUEIRA, L. A. H.; SEABRA, J. E. A.; BEST, G.; LEAL, M. R. L. V.; POPPE, M. K. (Org.). Bioetanol de cana de açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. 1. ed. Rio de Janeiro: BNDES, v. 1. 2008. 316 p.

OMETTO, A. R. Discussão sobre os fatores ambientais impactados pelo setor sucroalcooleiro e a certificação sócio-ambiental. 2000. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2000.

PEREIRA, C. de F. L. Avaliação da sustentabilidade ampliada de produtos agroindustriais. Estudo de caso: suco de laranja e etanol. 2008. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, 2008.

PEREIRA, S. B. Desprendimento e arraste do solo em decorrência do escoamento superficial. 2000. 81 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2000.

PIRES, A. Paradigma da Energia Barata. Tendências para o Mercado de Etanol no Brasil. 2011. Disponível em: http://www.abag.com.br/pdf/Apresentacao_Paradigma_da_Energia_Barata%20-%20ABAG%202.pdf. Acesso em: 25 set. 2011.

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. (2004). Perspectivas futuras 2002 – 32. In: Perspectivas do Meio Ambiente Mundial – 2002 GEO 3. Passado, presente e futuro. PNUMA-IBAMA, 2004, cap. 4, p. 344-424. Disponível em:

http://www.wwiuma.org.br/geo_mundial_arquivos/index.htm. Acesso em: 14 abr. 2011.

PRUSKI, F. F.. Aplicação de modelos físico-matemáticos para a conservação de água e solo. In: SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. (Eds.). Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura. 1 ed. BRASÍLIA: MMA/SRH - ABEAS, 1997, p. 129-171.

RASKIN, P.; MONKS, F.; RIBEIRO, T.; VUUREN, D.; ZUREK, M. Global scenarios in historical perspective. In: CARPENTER, S. R.; PINGALI, P. L.; BENNETT, E. M.; ZUREK, M. B. (eds). Ecosystems and human well-being: scenarios: findings of the scenarios working group of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC: Island Press, 2005. Cap. 02, p. 35-44.

ROMANOWICZ, A. A.; VANCLOOSTER, M.; ROUNSEVELL, M.; LA JUNESSE, I. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. Ecological Modelling, n. 187, p. 27-39. 2005.

ROUNSEVELL, M. D. A.; EWERT, F., REGINSTER, I.; LEEMANS, R.; CARTER, T. R. Future scenarios of European agricultural land use II. Projecting changes in cropland and grassland. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 107, p.117–135, 2005.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A. de.; SILVA, W. F. da; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. (2010). 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, 2010.

SANTOS, C. N. dos. El Niño, La Niña e a erosividade das chuvas no Estado do Rio Grande do Sul. 2008. 137 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas, 2008.

SARTORI, A. Avaliação da Classificação Hidrológica para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. 2004. 161 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil,

Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SILVA, F. G. B.; MINOTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim - SP (Embrapa) utilizando geoprocessamento e USLE 2D. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, p. 135 -142, 2010.

SOLER, L. S. Modelagem espacial de uso da terra utilizando o CLUE-S. Conceito e aplicações para estudos de dinâmica de uso da terra. Material de apoio. 2010. 49 p.

SOLER, L. S., VERBURG, P. Combining remote sensing and household level data for regional scale analysis of land cover change in the Brazilian Amazon. Regional Environmental Change, 2010.

SOUTO, A. R.; CRESTANA, S. Identificação das áreas potenciais de produção de sedimentos com o modelo AGNPS e técnicas de SIG em uma microbacia hidrográfica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 4, n. 4, p. 429-435, 2000.

SZMRECSÁNYI, T. O planejamento da agroindústria canavieira no Brasil (1930-1975). São Paulo: Hucitec, 1979. 540 p.

TURNER, B. L.; CLARK, W. C.; KATES, R.W.; RICHARDS, J. F.; MATHEWS, J. T.; MEYER, W. B. The earth as transformed by human action: global and regional changes in the biosphere over the past 300 years. Cambridge University Press, 1990.

UNESP – Universidade Estadual Paulista. Dados meteorológicos. Unesp Ilha Solteira, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos. 2011. Disponível em: <<http://clima.feis.unesp.br/>>. Acesso em: 09 mar. 2011.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. A importância do etanol e da co-geração na atual matriz energética brasileira e os principais

desafios. 2008. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br>>. Acesso em: 14 dez. 2008.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Etanol: dificuldades e desafios de crescimento. 2011. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br>>. Acesso em: 27 set. 2011.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimento em uma pequena bacia hidrográfica rural. 2009. 129 p. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

VALENCIA, L. I. O Enfoque da estatística espacial em modelos dinâmicos de mudança do uso do solo. 2008. 89 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2008.

VELDKAMP, A.; FRESCO, L.O. CLUE-CR: An integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modelling*, vol.91, issues 1-3, pages 231-248, 1996.

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

VERBURG, P. H.; OVERMARS, K. P. (2007). Dynamic simulation of land-use change trajectories with the CLUE-S model. In: KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H.J. (eds.). *Modelling Land-Use Change. Progress and applications. The GeoJournal Library*, v.90. Springer. 2007. cap. 18, p. 321-338.

VERBURG, P. H.; SOEPBOER, W.; LIMPIADA, R.; ESPALDON, M. V. O.; SHARIFA, M.; VELDKAMP, A. (2002). Land use change modelling at the regional scale: the CLUE-S model. *Environmental Management*, v. 30. N, 3, p. 391-405, 2002.

VERBURG, P. H.; VELDKAMP, A.; WILLEMEN, L.; OVERMARS, K. P.; CASTELLA, J. C. Landscape level analysis of the spatial and temporal complexity of land-use change. In: DEFRIES, R.; ASNER, G.; HOUGHTON, R. (Eds) Ecosystems and land use change. Geophysical Monograph Series, v. 153, 2004. p. 217-230.

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

VERBURG, P. H., ROUNSEVELL, M. D. A.; VELDKAMP, A. Scenario-based studies of future land use in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.114, n.1, 2006.

WILKINSON, J.; HERRERA, S. Agrofuels in Brazil: what is the outlook for its farming sector? 1. ed. Brasília: Oxfam Internacional no Brasil, 2008. v. 2000. 66 p.

XAVIER, F. V. Contribuições metodológicas ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Manso utilizando o modelo AVSWAT. 2009. 148 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Ciências. Exatas e da Terra. Universidade Federal de Mato Grosso, 2009.

APÊNDICE

As visitas às áreas de estudo tiveram o objetivo de realizar verificação em campo para melhor interpretação visual das imagens de satélite a fim de gerar o mapa de uso e ocupação das microbacias hidrográficas. Além disso, foi uma oportunidade para conhecer as áreas de estudo, verificar suas particularidades e conversar com alguns agricultores cujas propriedades estão inseridas nas microbacias hidrográficas, trabalhadores da região, funcionários do Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI e funcionários das usinas que são abastecidas pela cana-de-açúcar produzidas nas áreas de estudo.

O intuito de conversar com esses atores foi ampliar a gama de informações e, assim, encontrar um “retrato” mais fiel da situação. As conversas foram conduzidas de maneira informal, porém as perguntas eram praticamente sempre as mesmas para todos. Sendo que todos os indivíduos foram informados do propósito deste trabalho acadêmico e convidados a participar do processo de “entrevistas” para contribuir com seus conhecimentos e testemunhar suas experiências.

Abaixo seguem alguns tópicos abordados durante a conversa com os atores:

- ✓ Tamanho da propriedade
- ✓ Se há ou não resistência de mudança de uso do solo e qual o motivo
- ✓ Produtividade da propriedade
- ✓ Preço da terra
- ✓ Percepção de algum impacto após a expansão da cana-de-açúcar

No caso de propriedade com cana-de-açúcar:

- ✓ Rotação com qual leguminosa
- ✓ Se há ou não queima da cana-de-açúcar
- ✓ Colheita manual ou mecanizada
- ✓ Se são arrendatários, parceiros ou fornecedores
- ✓ Se a cana é a única renda ou se existia outra fonte

Microbacia hidrográfica do ribeirão das Guabirobas – MBH-G

As visitas a campo foram realizadas nos dias 28 e 29 de julho de 2010, juntamente com a Msc. Luciana de Souza Soler – INPE, João Marques Villela – UFSCar/Embrapa e Renê de Oste – Embrapa.

Durante esses dois dias foi possível verificar todos os pontos de dúvidas para gerar os mapas de uso e ocupação e conversar com sete pessoas, sendo 1 funcionário do CATI de Rincão, 1 funcionário do CATI de Américo Brasiliense, 1 proprietário de terras com o cultivo da laranja, 1 morador da região, 1 proprietário de terra com cultivo de cana-de-açúcar, 1 proprietário de terras com eucalipto, cana-de-açúcar e pasto e 1 funcionário de uma propriedade com o cultivo de cana-de-açúcar. *A posteriori*, foi realizada uma visita à usina de cana-de-açúcar que é abastecida por cana-de-açúcar produzida na MBH-G.

O tamanho das propriedades dos proprietários de terra “entrevistados” varia de 20 a 560 ha.

Em geral, houve a expansão de cana-de-açúcar não somente pela rentabilidade e facilidade, já que exige menos força de trabalho, mas também devido ao *greening*, uma doença que está acometendo os pomares de laranja

que, conseqüentemente, apresentam queda na rentabilidade. Existe a situação de alguns proprietários que almejam a mudança do cultivo da laranja para cana-de-açúcar em suas terras, porém estão “amarrados” a contratos com indústrias de beneficiamento da laranja.

No período em que foram realizadas as visitas a campo, existia proprietário que não pretendia mudar o cultivo da laranja para a cana-de-açúcar, devido ao momento de estabilidade do preço da laranja em relação à cana. Entretanto, conforme relato, a maioria dos produtores não pensa da mesma forma, pois o laranjal demanda muito trabalho. Além disso, o arrendamento para a cana é um rendimento certo.

O proprietário de área com pastagem afirmou que boa parte daquela propriedade foi arrendada para a usina de cana-de-açúcar devido o rendimento. Porém, dependendo da expansão de sua empresa, pretende usar a área para a produção de eucalipto com o objetivo de produzir energia.

A propriedade que nos últimos anos mudou o uso do solo de cana-de-açúcar para laranja ocorreu devido à mudança de proprietário.

A produtividade média de cana-de-açúcar na MBH-G foi de 95 t/ha em 2010.

A média do preço da terra é, em média, R\$25.000,00 ha.

Os impactos notados após a expansão da cana-de-açúcar foram: devido às queimadas da cana-de-açúcar, houve queda na qualidade do ar, com isso aumentaram os problemas respiratórios da população que vive nas cidades próximas à MBH-G.

Além disso, notou-se que com as queimadas os animais tem procurado abrigo em área urbana, tanto que houve ocorrências com jibóias em

residências, invasão de lagarta em campo de futebol da cidade e enxames de abelhas. Com isso, a cidade propôs para as usinas criarem um cinturão verde ao longo do perímetro urbano.

Por outro lado, as usinas enfrentam o problema de descarte de lixo nos canaviais, por parte da população como também de indústrias de pequeno porte, pois o descarte correto é caro.

As propriedades com cana-de-açúcar preferem fazer a rotação da cultura com amendoim para recuperação da terra. Pois, além da rentabilidade que é maior, o sistema de plantio/colheita é mais rápido.

Relata-se que 30% da cana-de-açúcar inserida na MBH-G é queimada e que em 75% da área é realizada a colheita mecanizada.

Todos os “entrevistados” que possuem área com cana-de-açúcar são arrendatários – o proprietário. Porém a usina informou que possui terras próprias assim como fornecedores – o proprietário é dono da cana-de-açúcar e vende sua produção à usina de cana-de-açúcar.

A usina “entrevistada” informou que em 2011, 56% da cana-de-açúcar destina-se à produção de açúcar e 44% à produção de etanol.

A cana-de-açúcar colhida na área são de 18 meses.

Segue abaixo algumas fotos da MBH-G, Figura 83 a Figura 87.

Figura 83: ribeirão das Guabirobas

Figura 84: Horizonte cana-de-açúcar, laranja e vegetação nativa

Figura 85: Laranjal abandonado

Figura 86: Laranjal novo (3 anos) com resquício de cana-de-açúcar

Figura 87: Pastagem na MBH-G

Microbacia hidrográfica córrego da Onça

As visitas a campo foram realizadas nos dias 02, 03 e 04 de março de 2011, juntamente com a Msc. Luciana de Souza Soler – INPE, João Marques Villela – UFSCar/Embrapa e Renê de Oste – Embrapa, Prof^a Dr^a Marlene Cristina Alves – Unesp Ilha Solteira, Prof. Dr. Hélio Ricardo Silva – Unesp Ilha Solteira e Robson Dourado – CATI Ilha Solteira.

Durante esses três dias foi possível verificar todos os pontos de dúvidas para gerar os mapas de uso e ocupação e conversar com seis pessoas, sendo 2 funcionários do CATI de Ilha Solteira, 1 proprietário de terras com pasto e cana-de-açúcar, 2 funcionários de propriedades com pasto e cana-de-açúcar e 1 proprietário de terra em assentamento. A mobilidade na área de estudo ficou mais restrita, pois devido as chuvas que ocorreram nesses dias impossibilitaram o acesso à determinados pontos com carro. Entretanto, o

acesso foi realizado à pé.

A *posteriori*, foi realizado contato por telefone e por e-mail com funcionários da usina de cana-de-açúcar que é abastecida por cana-de-açúcar produzida na MBH-O.

As propriedades em que os funcionários “entrevistados” trabalham possuem 363 ha. e 1.214, 84 ha. e a propriedade do assentado possui 12 ha.

Entretanto, essa não é uma condição imutável, pois depende do preço da arroba do boi. Caso o setor pecuário passe por crise, o arrendamento de terras é uma alternativa. Na ocasião em que foi realizada a visita a campo, a arroba do boi estava bem valorizada.

Em geral, as propriedades com até 50 ha. são fornecedores e acima disso, os proprietários preferem arrendar.

Em áreas de assentamento não ocorre interesse em arrendar terras às usinas, pois os proprietários podem perder o título de concessão de uso. Nos assentamentos, os assentados estão iniciando a organização para implantação de diversos usos como suinocultura, ovinocultura, reflorestamento, mas desde que foi criado, ainda estão desmotivados e produzindo leite e agricultura de subsistência. Os outros assentamentos da região não necessariamente possuem essa mesma dinâmica.

A produtividade média de cana-de-açúcar na MBH-O foi de 88 t/ha. em 2010.

Os impactos notados após a expansão da cana-de-açúcar e relatados foram que com a criação das usinas de cana-de-açúcar na região houve uma melhora ambiental, já que essas devem recuperar as Áreas de Preservação Permanentes – APP's. Por outro lado, há o receio da degradação ambiental

devido à colheita mecanizada, que pode compactar o solo.

Para a reforma do pasto, planta-se milho ou feijão a cada dois anos. Para a rotação com a cana-de-açúcar, usa-se *Crotalaria spectabilis*.

Segundo relatos, a colheita é mecanizada e a queima da cana-de-açúcar é eventual.

As propriedades visitadas que possuem área com cana-de-açúcar são arrendadas. Entretanto, a usina informou que além de arrendar terras ela é abastecida por cana-de-açúcar de fornecedores.

A usina informou que nesta safra não haverá produção de açúcar. A produção de etanol hidratado carburante será de 20 % e de etanol anidro 80%. A cana-de-açúcar é colhida nessa área após 18 meses.

Segue abaixo algumas fotos da MBH-O, Figuras 88 a Figura 94.

Figura 88: Agricultura – área de assentamento na MBH-O

Figura 89: Cana-de-açúcar ao fundo e *Crotalaria spectabilis* na MBH-O

Figura 90: Cana-de-açúcar à esquerda e pasto em estado avançado de degradação à direita na MBH-O

Figura 91: Pastagem na MBH-O

Figura 92: Pastagem degradada na MBH-O

Figura 93: Lagoa com cana-de-açúcar ao fundo na MBH-O

Figura 94: Pequeno lago na nascente com presença de Taboa