



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
EMBRAPA - UFPA – MPEG

PEDRO PEREIRA FERREIRA JÚNIOR

**SIMULAÇÃO DA RESPOSTA HIDROLÓGICA À MUDANÇAS DE USO E
COBERTURA DA TERRA EM UMA BACIA HIDROGRAFICA NO LESTE DA
AMAZÔNIA**

Belém-Pará

2018

PEDRO PEREIRA FERREIRA JÚNIOR

**SIMULAÇÃO DA RESPOSTA HIDROLÓGICA À MUDANÇAS DE USO E
COBERTURA DA TERRA EM UMA BACIA HIDROGRAFICA NO LESTE DA
AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Física do Clima.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa.
Coorientadora: Dra. Luciana de Sousa Soler.

Belém-Pará
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

F383e Ferreira Júnior, Pedro Pereira.
 Simulação da resposta hidrológica à mudanças de uso e cobertura da
terra em uma bacia hidrográfica no leste da Amazônia / Pedro Pereira
Ferreira Júnior, . — 2018.
 200 f. : il. color.
 Orientador(a): Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa
 Coorientação: Prof^a. Dra. Luciana de Sousa Soler
 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará,
Belém, 2018.

1. Modelagem hidrológica. 2. Desflorestamento. 3. Amazônia. I. Título.

CDD 333.174

PEDRO PEREIRA FERREIRA JÚNIOR

SIMULAÇÃO DA RESPOSTA HIDROLÓGICA À MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO LESTE DA AMAZÔNIA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

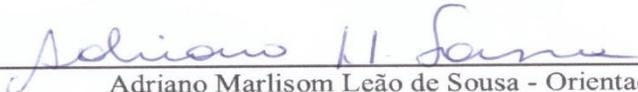
Linha de pesquisa: Física do Clima.

Orientador: **Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa.**

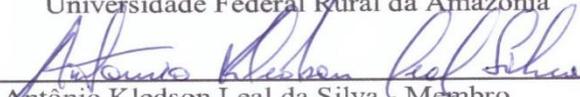
Coorientadora: **Dra. Luciana de Sousa Soler.**

Data da aprovação: 05/10/2018.

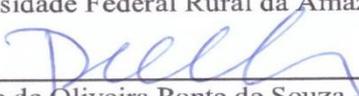
Banca Examinadora:



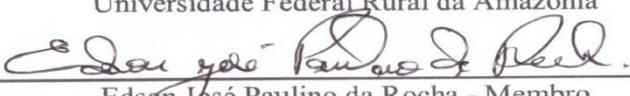
Adriano Marlisom Leão de Sousa - Orientador
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia



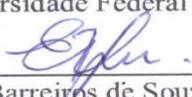
Antônio Kledson Leal da Silva - Membro
Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia



Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza - Membro
Doutor em Agronomia
Universidade Federal Rural da Amazônia



Edson José Paulino da Rocha - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Everaldo Barreiros de Souza - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia e socorro presente na hora da angústia.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é fruto de um processo que contou com a colaboração de várias pessoas. Reservou este espaço para agradecer a algumas delas.

À Deus, sem o qual nada seria possível. Obrigado Senhor, porque em Ti eu sempre encontro acalento, porque Tu estás comigo sempre;

Aos meus pais, Pedro Ferreira e Maria do Socorro, pelo infinito amor, apoio constante, ensinamentos valiosos e toda a luta por minha educação;

Ao meu orientador e coorientadora, Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa e Dra. Luciana de Sousa Soler, pela paciência, dedicação e disponibilidade que sempre tiveram para comigo; pelo incentivo e suporte que dedicaram para que este trabalho fosse realizado; e pelos ensinamentos sobre geoprocessamento, modelagens dinâmica e hidrológica;

Ao Dr. Antônio Kledson Leal da Silva pela disponibilidade e paciência no ensinamento e esclarecimento das modelagens do SWAT e do CLUE-S; pelo incentivo e auxílio dado ao meu estágio sanduíche na *Texas A&M University*;

À Dra. Maria Isabel Vitorino, pelo incentivo a mim e a esta pesquisa; e pelos ensinamentos ministrados de forma clara e objetiva;

Ao Dr. Raghavan Srinivasan pela disponibilidade e ajuda na modelagem do SWAT; e pelo esmero e amizade que a mim dedicou durante minha permanência na *Texas A&M University*;

À Dra. Aline Maria Meiguins de Lima pela compreensão, disponibilidade e paciência sempre que solicitada sob quaisquer ocasiões durante este Doutorado;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos no Brasil e no Exterior;

Aos Doutores Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza e Everaldo Barreiros de Souza pela disponibilidade dos dados meteorológicos do experimento de campo realizado em Paragominas e das simulações climáticas do modelo RegCM4;

Aos colegas Suzianny Salazar e Rodrigo Rafael pelo apoio logístico e pelos ensinamentos sobre sensoriamento remoto, geoprocessamento e cartografia;

A Pedro Marques e Paula Ferreira pelo companheirismo e cumplicidade na vida, sem os quais toda esta caminhada não seria possível; e às colegas de laboratório Jussara Freire e Joelma Murliki pela amizade e bons momentos vividos em College Station, EUA.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista”
(Aldo Novak)

RESUMO

A perda de vegetação na Amazônia vem ocorrendo há algumas décadas e o crescimento das taxas de desflorestamento anual é perceptível. A expansão agrícola é apontada como novo agente nessa dinâmica pela derrubada da vegetação para a pecuária e implantação posterior de agricultura mecanizada. Este trabalho explorou as relações potenciais entre a variabilidade hidrológica e a organização da paisagem na Bacia Hidrográfica do Rio Uraim, no Nordeste do Pará. Os possíveis efeitos das mudanças de uso e cobertura da terra sobre a vazão foram investigados a partir da modelagem hidrológica do *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) combinada às projeções de cenários futuros gerados pelo *Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent* (CLUE-S), ainda, avaliou-se a eficiência do SWAT em simular a vazão mensal quando alimentado por evapotranspiração (ET) do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL). Os resultados mostraram a boa capacidade do SEBAL em estimar a ET sob diferentes usos e coberturas da terra identificados na bacia. O algoritmo apresentou superestimativas, mas boa precisão com os valores obtidos em campo, tendo maior acurácia no período menos chuvoso e quando utilizadas imagens médias de oito dias do MODIS. As simulações de vazão pelo SWAT foram melhores quando aplicadas as estimativas de ET pelo SEBAL, ratificadas pela diminuição dos erros absolutos e relativos e pela calibração eficiente dos parâmetros mais sensíveis. As modelagens foram consideradas de boa a muito boa conforme os coeficientes NSE, RSR e PBIAS encontrados. Quase todas as variáveis utilizadas na modelagem do CLUE-S foram forçantes de mudança de uso e cobertura da terra, principalmente os parâmetros biofísicos. Os cenários projetados indicam expansão agrícola para o setor noroeste da bacia e maior concentração na porção sudoeste. Até 2034, a agricultura aumentará sua área em 93,2 km², correspondendo a 13,4% do total da bacia, o que aponta para uma redução de 34,4% na vazão da estação menos chuvosa e aumento de 38,6% na vazão da estação chuvosa. Os resultados sugerem que a mudança climática pode ter desempenhado um papel mais pronunciado no regime hidrológico do que a própria mudança no uso da terra projetada pelo CLUE-S. Pretende-se, assim, oferecer subsídios para o monitoramento ambiental, informando a respeito de intervenções necessárias, balizando as tomadas de decisão no que tange o uso sustentável dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Desflorestamento. Amazônia.

ABSTRACT

The loss of vegetation in the Amazon has been occurring for some decades and the growth of annual deforestation rates is noticeable. The agricultural expansion is indicated as a new agent in this dynamic by the overthrow of the vegetation for the cattle raising and later implantation of mechanized agriculture. This work explored the potential relationships between hydrological variability and landscape organization in the Uraim River Basin at Northeast of Pará. The possible effects of land use and land cover changes effect on streamflow were investigated from Soil hydrological modeling and Water Assessment Tool (SWAT) combined with the projections of future scenarios generated by the Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent (CLUE-S), the SWAT efficiency was also evaluated in simulating the monthly streamflow when fed by evapotranspiration (ET) of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). The results showed the skill of SEBAL to estimate ET under different land use and land cover identified in the watershed. The algorithm presented overestimations, but good precision with the values measured in the field, having greater accuracy in the dry season and using average eight days MODIS images. The SWAT model streamflow simulations were better when ET estimated by SEBAL were applied, which were confirmed by reduction in absolute and relative errors and by the efficient calibration of the most sensitive parameters. The modeling was considered from good to very good according to the NSE, RSR and PBIAS coefficients found. Almost all the variables used in CLUE-S modeling forced land use and land cover changes, mainly biophysical parameters. The projected scenarios indicate agricultural expansion for the northwestern sector of the watershed and greater concentration in the southwest portion. Agricultural areas will increase its by 93.2 km², corresponding to 13.4% of watershed until 2034, which indicate to a reduction of 34.4% in the streamflow to dry season and an increase of 38.6% in the rainy season. The results suggest that climate change may have played a more pronounced role in the hydrological pattern than the very land use and land cover change projected by CLUE-S. It is intended, therefore, to provide subsidies for environmental monitoring, informing about necessary interventions, targeting the decision-making regarding the sustainable use of water resources.

Keywords: Hydrological modeling. Deforestation. Amazonia.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 - Taxa de desmatamento na Amazônia Legal Brasileira.....	21
Gráfico 2 - Evolução da área desmatada em Paragominas.....	22
Figura 1 - Total desflorestado em Paragominas até 2014.....	22
Gráfico 3 - Área plantada e quantidade colhida de arroz de 1997 a 2014.....	28
Gráfico 4 - Área plantada e produção de soja de 1997 a 2014.....	29
Gráfico 5 - Evolução histórica do rebanho bovino de 1975 a 2013.....	30
Figura 2 - Carta imagem da área de estudo: BHRU e sua rede de drenagem.....	43
Figura 3 - Mapa de solos da BHRU.....	44
Figura 4 - Climatologia mensal da precipitação na BHRU.....	45
Figura 5 - Climatologia trimestral da precipitação na BHRU.....	46
Figura 6 - Climatologia anual da precipitação na BHRU.....	46
Gráfico 6 - Climatologia mensal da precipitação em Paragominas.....	47
Quadro 1 - Processo metodológico aplicado na análise morfométrica.....	50
Quadro 2 - Parâmetros morfométricos calculados para a BHRU.....	50
Figura 7 - Processo para os cálculos morfométricos da bacia hidrográfica.....	51
Figura 8 - Rede de drenagem e sub-bacias da BHRU.....	53
Figura 9 - Rede de drenagem ordenada segundo o método de Strahler (1957).....	54
Figura 10 - Mapa de declividade da BHRU.....	59
Figura 11 - Orientação das vertentes e fluxo superficial nas sub-bacias.....	61
Figura 12 - Distribuição espacial do uso e cobertura da terra para 2004 e 2014.....	63
Gráfico 7 - Área total (km ²) e porcentagens dos usos e cobertura da terra.....	63
Figura 13 - Concentração e área de influência das nascentes na BHRU.....	64
Gráfico 8 - Porcentagem de nascentes associadas aos usos e coberturas da terra.....	65
Figura 14 - Carta imagem da área de estudo e localização das estações de superfície.....	74
Quadro 3 - Dados utilizados para determinação da evapotranspiração via SEBAL.....	76
Quadro 4 - Descrição das características dos produtos orbitais utilizados.....	76
Figura 15 - Saldo de radiação (Rn) estimado pelo SEBAL.....	84
Figura 16 - Processo iterativo para o cálculo do calor sensível pelo SEBAL.....	85
Gráfico 9 - Evapotranspiração diária para os dias da estação chuvosa de 2006.....	88
Gráfico 10 - Evapotranspiração diária para os dias da estação chuvosa de 2007.....	89
Gráfico 11 - Evapotranspiração diária para os dias da estação chuvosa de 2008.....	89
Gráfico 12 - Correlação entre ET ₀ por PM-FAO e ET estimada pelo SEBAL.....	91

Gráfico 13 - Evapotranspiração mensal calculada (a) a partir das imagens médias de 8 dias e (b) imagens MODIS diárias.....	94
Gráfico 14 - ET média mensal estimada pelo SEBAL em 11 anos de dados.....	95
Figura 17 - Evapotranspiração média mensal estimada pelo SEBAL de 2004 a 2011.....	97
Figura 18 - Evapotranspiração sazonal estimada pelo SEBAL em 11 anos de dados.....	98
Gráfico 15 - Evapotranspiração média anual estimada pelo SEBAL considerando os doze meses, apenas a estação chuvosa e a menos chuvosa.....	99
Figura 19 - Variabilidade espacial da evapotranspiração anual de 2004 a 2014.....	100
Figura 20 - Carta imagem da área de estudo e localização.....	112
Figura 21 - Processo de funcionamento do SWAT.....	113
Figura 22 - Localização das fontes dos dados climáticos e de vazão.....	120
Figura 23 - Sub-bacias criadas pelo SWAT para a BHRU.....	121
Figura 24 - Modelo digital de elevação com as cotas altimétricas em metros.....	122
Figura 25 - Mapa de solos da BHRU.....	123
Figura 26 - Uso e cobertura da terra após reagrupamento das classes.....	125
Figura 27 - Mapa de classes de declividade usadas no SWAT.....	126
Quadro 5 - Alguns dos parâmetros de alta sensibilidade do SWAT.....	127
Gráfico 16 - Vazões mensais observadas e simuladas em condições iniciais.....	133
Gráfico 17 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais.....	134
Gráfico 18 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas (sem calibração) para o período de 2003 a 2014.....	134
Figura 28 - Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT.....	136
Quadro 6 - Demanda de ajuste dos parâmetros para a BHRU.....	137
Gráfico 19 - Vazões mensais observadas e simuladas com o modelo calibrado.....	138
Gráfico 20 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais.....	138
Gráfico 21 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas com os parâmetros calibrados.....	139
Gráfico 22 - Vazões mensais observadas e simuladas em condições iniciais.....	141
Gráfico 23 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais.....	141
Gráfico 24 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais.....	142
Figura 29 - Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT.....	143
Gráfico 25 - Vazões mensais observadas e simuladas com o modelo calibrado.....	144
Gráfico 26 - Vazões médias mensais com o modelo calibrado.....	144

Gráfico 27 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas com os parâmetros calibrados.....	145
Figura 30 - Dinâmica espacial do CLUE-S.....	157
Figura 31- Fluxo de informações dentro do modelo CLUE-S.....	158
Figura 32 - Transição hipotética de mudança de uso e cobertura da terra.....	159
Figura 33 - Exemplo de matriz de conversão utilizada no CLUE-S.....	160
Figura 34 - Módulo de alocação do modelo CLUE-S.....	162
Quadro 7 - Orientações para a seleção dos fatores exploratórios no CLUE-S.....	163
Quadro 8 - Parâmetros utilizados nas simulações do CLUE-S para a BHRU.....	164
Figura 35 - Processo de calibração e ajustes no CLUE-S.....	166
Quadro 9 - Descrição dos métodos adotados na análise de acurácia das simulações.....	167
Figura 36 - Distribuição espacial do uso e cobertura da terra para 2004 e 2014.....	169
Gráfico 28 - Mudança de uso e cobertura da terra de 2004 a 2014 na BHRU.....	170
Figura 37 - Distribuição da densidade populacional e da renda mensal familiar.....	172
Gráfico 29 - Evolução da densidade demográfica das populações urbana e rural de Paragominas de 1970 a 2010.....	173
Gráfico 30 - Evolução da densidade demográfica de 1970 a 2013.....	174
Figura 38 - Mapas de distância euclidiana a hidrografia e rodovias.....	174
Figura 39 - Precipitação média dos trimestres mais chuvoso e mais seco da BHRU.....	175
Figura 40 - Mapa de restrição de conversão de 2004 e 2014 para a BHRU.....	176
Gráfico 31- Correlação bivariável entre as classes e as variáveis independentes.....	178
Figura 41 - Mapas real e simulado na etapa de calibração do CLUE-S para a BHRU.....	181
Figura 42 - Projeções de mudanças de uso e cobertura da terra (2015-2034).....	183
Figura 43 - Comparação entre o cenário real de 2014 com a projeção para 2034.....	183
Gráfico 32 - Simulações de vazão mensal para o período de 2015 a 2034.....	185
Gráfico 33 - Vazão média mensal prevista para o período de 2015 a 2034.....	186
Figura 44 - Vazão média mensal prognosticada pelo SWAT de 2015-2034.....	187
Figura 45 - Vazão mensal das estações chuvosas e menos chuvosa até 2034.....	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Medidas dimensionais da BHRU e sub-bacias	52
Tabela 2 - Hierarquia, número e comprimento total dos canais e índice de sinuosidade	55
Tabela 3 - Fator de forma, Coeficiente de compacidade e índice de circularidade	56
Tabela 4 - Densidades hidrográfica, Densidade de drenagem, Extensão do percurso superficial e Coeficiente de manutenção	57
Tabela 5 - Textura topográfica, Índice de rugosidade, Gradiente de canais, Relação de relevo e Altimetria	58
Tabela 6 - Reagrupamento das classes de uso e cobertura da terra.....	62
Tabela 7 - Área total por classe de uso e cobertura da terra na BHRU.....	64
Tabela 8 - Número de nascentes identificadas por classes de uso e cobertura da terra ..	65
Tabela 9 - Instrumentação, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja	75
Tabela 10 - Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r)	87
Tabela 11 - Critérios de interpretação do coeficiente de desempenho (c)	87
Tabela 12 - Período compreendido na determinação da ET	88
Tabela 13 - Desempenho do SEBAL na estimativa diária da evapotranspiração	90
Tabela 14 - Desempenho do SEBAL na estimativa diária da evapotranspiração	90
Tabela 15 - Cenas MODIS usadas para cômputo da ET mensal estimada pelo SEBAL	92
Tabela 16 - Desempenho do SEBAL na estimativa diária da evapotranspiração	93
Tabela 17 - Desempenho do SEBAL na da evapotranspiração mensal	95
Tabela 18 - Evapotranspiração sazonal estimada pelo SEBAL para a BHRU	98
Tabela 19 - Fonte dos dados climáticos de entrada fornecidos para o SWAT.....	120
Tabela 20 - Fonte dos dados climáticos para o gerador climático do SWAT.....	121
Tabela 21 - Sub-bacias e suas respectivas áreas totais	122
Tabela 22 - Classes de tipos de solo usadas e suas respectivas áreas percentuais	123
Tabela 23 - Reagrupamento das classes de uso e cobertura da terra.....	124
Tabela 24 - Representatividade do uso e cobertura da terra na bacia	125
Tabela 25 - Classes de declividade usadas pelo SWAT em %	126
Tabela 26 - Representatividade do uso e cobertura da terra na BHRU.....	126
Tabela 27 - Desempenhos estatísticos para passo de tempo mensal.....	130
Tabela 28 - Eficiência da simulação inicial usando ETP e ET_{SEBAL}	134
Tabela 29 - Parâmetros e intervalos iniciais da análise de sensibilidade e calibração ..	135
Tabela 30 - t-stat e P-Value obtidos pela análise de sensibilidade dos parâmetros	136

Tabela 31 - Parâmetros, métodos, intervalos e valores resultantes da calibração.....	137
Tabela 32 - Eficiência das vazões simuladas com o modelo calibrado.....	139
Tabela 33 - Eficiência da simulação inicial usando evapotranspiração do SEBAL	142
Tabela 34 - <i>t-stat</i> e <i>P-Value</i> obtidos pela análise de sensibilidade dos parâmetros	142
Tabela 35 - Parâmetros, métodos, intervalos e valores resultantes da calibração.....	143
Tabela 36 - Eficiência das vazões simuladas com o modelo calibrado.....	145
Tabela 37 - Reagrupamento das classes de uso e cobertura da terra.....	163
Tabela 38 - Área total por classe de uso e cobertura da terra.....	163
Tabela 39 - Esquema da matriz de confusão adotada para análise das simulações	167
Tabela 40 - Métodos de acurácia adotados para a análise das simulações do CLUE-S	167
Tabela 41 - Mudanças do uso e cobertura da terra na BHRU de 2004 a 2014	169
Tabela 42 - Demanda por uso entre os anos de 2004 e 2014	175
Tabela 43 - Demanda por área para projeção de 2014 e 2034	176
Tabela 44 - Matriz de conversão adotada para a calibração e projeção do modelo	177
Tabela 45 - Regressão logística do melhor modelo de calibração (2004-2014)	179
Tabela 46 - Parâmetros principais dos modelos na calibração e projeção	180
Tabela 47 - Esquema da matriz de confusão adotada para acurácia das simulações	181
Tabela 48 - Dinâmica das mudanças do uso e cobertura da terra para 2034	184
Tabela 49 - Desempenho das previsões mensais (2015-2034) de vazão pelo SWAT ..	186

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	18
2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA, JUSTIFICATIVAS E HIPÓTESES ..	20
3 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	24
4 ORGANIZAÇÃO DA TESE	25
CAPÍTULO I ELEMENTOS TEÓRICOS	26
1.1 Característica socioeconômica de Paragominas, Pará.....	26
1.2 Evolução da produção de soja no Brasil	31
1.3 Impactos das atividades agropecuárias em bacias hidrográficas.....	33
1.4 SEBAL e SWAT na avaliação dos fluxos de massa e energia.....	34
CAPITULO 2 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URAIM: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS	39
1 INTRODUÇÃO	41
2 MATERIAL E MÉTODOS	43
2.1 Localização e caracterização da área de estudo	43
2.2 Determinação dos parâmetros morfométricos.....	49
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
3.1 Análise morfométrica	52
3.2 Orientação das vertentes.....	60
3.3 Uso e cobertura da terra e concentração de nascentes.....	62
4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	66
CAPÍTULO 3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO PARA APLICAÇÃO NA MODELAGEM HIDROLÓGICA	70
1 INTRODUÇÃO	72
2 MATERIAL E MÉTODOS	74
2.1 Localização da área de estudo	74
2.2 Conjuntos de dados utilizados.....	75
2.2 Evapotranspiração por Penman-Monteith FAO	77
2.3 Evapotranspiração estimada pelo SEBAL	77
2.4 Validação dos resultados	86
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88

3.1	Evapotranspiração diária	88
3.2	Evapotranspiração mensal e sazonal	92
3.3	Evapotranspiração anual.....	99
4	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	102
CAPÍTULO 4	SIMULAÇÕES DE VAZÃO UTILIZANDO EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA UMA BACIA ANTROPIZADA NO LESTE DA AMAZÔNIA BRASILEIRA	108
1	INTRODUÇÃO	110
2	MATERIAL E MÉTODOS	112
2.1	Localização da área de estudo	112
2.2	Modelagem hidrológica do SWAT	112
2.3	Simulações hidrológicas por cenário.....	130
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	132
3.1	Experimento 1	132
3.2	Experimento 2	137
4	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	147
CAPÍTULO 5	RESPOSTA HIDROLÓGICA DA VAZÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE USO E COBERTURA DA TERRA ATRAVÉS DE PROJEÇÕES DE CENÁRIOS PARA O FUTURO PRÓXIMO	153
1	INTRODUÇÃO	155
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	156
2.1	Localização da área de estudo	156
2.2	Modelagem dinâmica utilizando o arcabouço CLUE-S.....	156
2.3	Simulações de vazão para o cenário futuro	168
2.4	Sistemas computacionais utilizados neste capítulo	168
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	169
3.1	Dinâmica do uso e cobertura da terra na bacia.....	169
3.2	Identificação das variáveis independentes	171
3.3	Demandas, matriz de conversão, elasticidade e estatísticas	175
3.4	Simulações da etapa de calibração	181
3.5	Experimento 3: projeções de vazão integrando SWAT e CLUE-S.....	185
4	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	190

5 CONCLUSÃO GERAL	195
REFERÊNCIAS	196

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos, a Amazônia tem sido foco de atenção mundial. O interesse por sua sustentabilidade é aumentado pelas crescentes taxas de desflorestamento, que indicam um desmatamento acumulado de 407.675 km² entre 1988 e 2014 de acordo com dados do Projeto Desflorestamento (Prodes), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (INPE, 2015). Neste sentido, a expansão agrícola pode ser apontada como um novo agente na dinâmica do desflorestamento e um problema recorrente tem sido a derrubada da vegetação primária para implantação da pecuária e transformação posterior em áreas de agricultura mecanizada.

No caso da Amazônia Brasileira, na sua porção oriental, grandes extensões de formações florestais vêm sendo removidas há anos para o estabelecimento de culturas agrícolas de subsistência e pastagens (muitas vezes abandonadas após poucos anos de uso), além dos estabelecimentos comerciais/industriais. Esta prática pode estar perturbando o regime hidrológico das várias bacias de drenagem.

Diversos estudos têm demonstrado que a vegetação possui influência direta na dinâmica de nutrientes, na proteção de mananciais e na qualidade e produção da água. Assim, sua remoção altera as taxas de evapotranspiração, de fotossíntese e de precipitação, o que afeta diretamente a disponibilidade de água. Outras pesquisas demonstram que a destruição da floresta para a implantação de atividade agropecuária altera os ciclos hidrogequímicos, os fluxos de calor e de carbono entre superfície terrestre e atmosfera, e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (FIGUEIREDO, 2006; 2008; 2009; 2009; LUIZÃO, 2007). Mudanças no padrão do uso da terra pode promovendo modificações na partição das componentes do balanço de energia, portanto, quantificar sua variabilidade espaço-temporal também se torna imprescindível.

Aprofundar o conhecimento da relação entre as respostas hidrológicas e o desflorestamento permite uma maior compreensão das consequências da dinâmica de uso da terra no ciclo hidrológico, pois pode se constituir com uma ferramenta a mais nos planos de manejo e de uso sustentável previstos nas agendas ambientais. Ainda, fornece a elaboração de cenários como propostas a serem discutidas por câmaras técnicas dos conselhos de meio ambiente, fundamentando suas discussões na proposição de alterações na legislação florestal em vigor, visando uma política conservacionista mais realista e de aplicação mais eficaz.

Alguns estudos têm sido aplicados para atender essas necessidades e uma das ferramentas mais utilizadas é o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), que foi proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998) e utilizado em várias partes do mundo, nos mais distintos tipos de uso e cobertura da terra, podendo citar Bastiaanssen *et al.* (1998), Bastiaanssen *et al.* (1999), Bastiaanssen (2000), Bastiaanssen *et al.* (2001), Bastiaanssen *et al.* (2002), Bastiaanssen *et al.* (2005), Bezerra *et al.* (2008) e Teixeira *et al.* (2009).

Ademais, as componentes do ciclo hidrológico têm sido representadas por modelos numéricos de forma consistente e usados efetivamente no planejamento e gestão dos recursos hídricos, tal como o *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT), proposto por Arnold *et al.* (1996). Isocronamente ao SWAT, o uso do *Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent* (CLUE-S) tem permitido investigar a dinâmica de paisagem na perspectiva de simular cenários (VERBURG, 2002). Seu desenvolvimento tem se tornado uma ferramenta importante para compreender as mudanças de uso da terra, possibilitando a predição de ambientes futuros e suporte ao planejamento de políticas de uso da terra (VERBURG *et al.*, 2004).

Assim, estudos que investiguem os efeitos das mudanças de uso e cobertura da terra, sobretudo pelo desflorestamento, nas diferentes escalas de tempo-espço nas respostas hidrológicas se faz necessário para articular políticas de gestão e planejamentos socioambientais e, enfim, proteger uma parte considerável da floresta Amazônica remanescente, melhorando as condições de vida e respondendo aos anseios da população local.

2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA, JUSTIFICATIVAS E HIPÓTESES

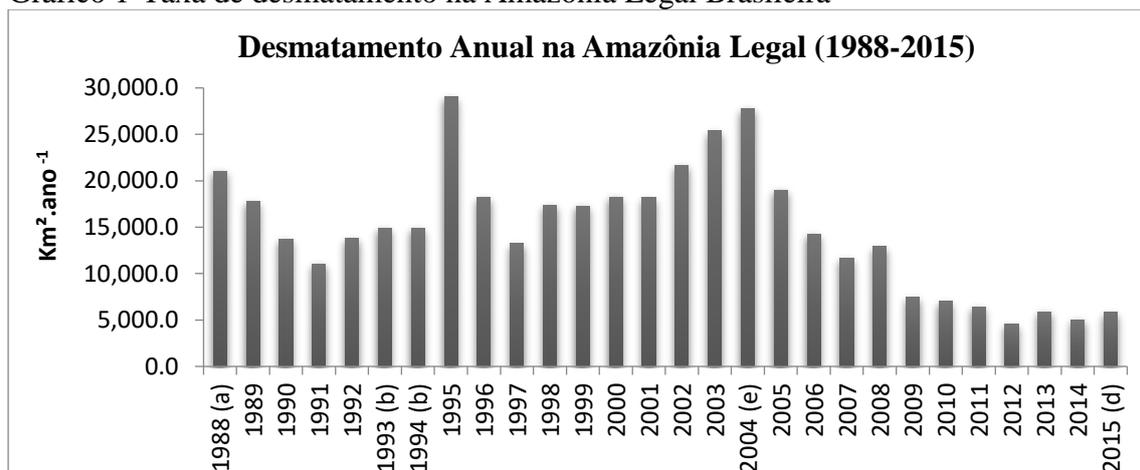
A paisagem atual da Amazônia está dominada por fragmentos de floresta, pastagens e cultivos. A dinâmica de ocupação tem ocasionado redução das áreas de floresta, gerando impactos ecológicos e nos processos hidrológicos e climáticos. A expansão agrícola na região alcançou grandes proporções nas três últimas décadas e a crescente taxa de desmatamento associada sugere que esta é uma nova dinâmica de desflorestamento.

O avanço da fronteira agrícola na Amazônia Legal e a crescente taxa de desmatamento, nestas duas últimas décadas, sugerem que uma nova dinâmica está influenciando o desflorestamento na região, estando relacionada à: i) estratégia de integração da Amazônia ao espaço produtivo brasileiro, aliada à consolidação da política de integração regional da América do Sul durante os dois mandatos do governo FHC, pelos programas *Brasil em Ação* (1996/1999) e *Avança Brasil* (PPA 2000/2003); ii) política macroeconômica de caráter exportadora, que impulsiona atividades econômicas como a pecuária, a exportação de commodities agrícolas e as extrações madeireiras, especialmente ilegais (FEARNSIDE, 2002).

Em 2005, o estudo do IPEA afirmara que os governos estaduais da Amazônia Brasileira estavam incentivando a produção de grãos, inicialmente, sobre áreas do cerrado, de campos naturais, de transição cerrado-floresta ou sobre áreas degradadas de projetos pecuários fracassados; e que a expansão da soja no Brasil não estaria ocorrendo com a incorporação de novas áreas para o cultivo, mas baseada na conversão de áreas degradadas de pastagens, sem a incorporação de áreas “virgens” no cerrado ou na Amazônia. No entanto, pesquisas prognosticavam e sustentavam a forte intensificação da destruição da floresta tropical. Para essa linha, a soja poderia estimular o desmatamento através do “efeito de arrasto” (FEARNSIDE, 2002; FERREIRA et. al, 2005).

Dados divulgados pelo INPE demonstram uma intensificação do desmatamento Amazônia Legal, principalmente no final dos anos 90 e meados dos anos 2000. Entre agosto de 2003 e agosto de 2004, foi registrado 26.130 km² de área desmatada, segunda maior taxa desde 1995 (gráfico 1).

Gráfico 1-Taxa de desmatamento na Amazônia Legal Brasileira

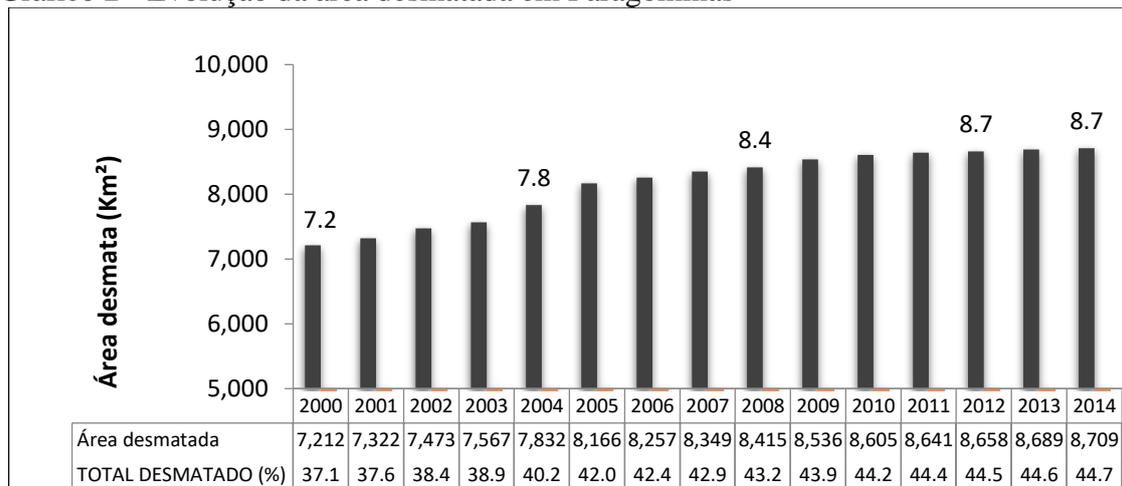


Fonte: adaptado de Prodes/INPE (2015).

Para o Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), o “estoque do desmatamento” teria se esgotado (áreas devastadas) e novas áreas estariam sendo incorporado pelo avanço da fronteira agropecuária, ou seja, todo o avanço estaria ocorrendo sobre vegetação primária da floresta e dos campos naturais (SIPAM, 2005). Portanto, levantou-se a hipótese de uma relação indireta entre a expansão da fronteira agrícola e a elevação das taxas de desmatamento na região, uma vez que a soja vem sendo cultivada nessa região com um ritmo de expansão aumentando desde 2000, paralelamente à intensificação das taxas de desflorestamento (DOMINGUES; BERMAN, 2012; LIMA; BAY, 2005).

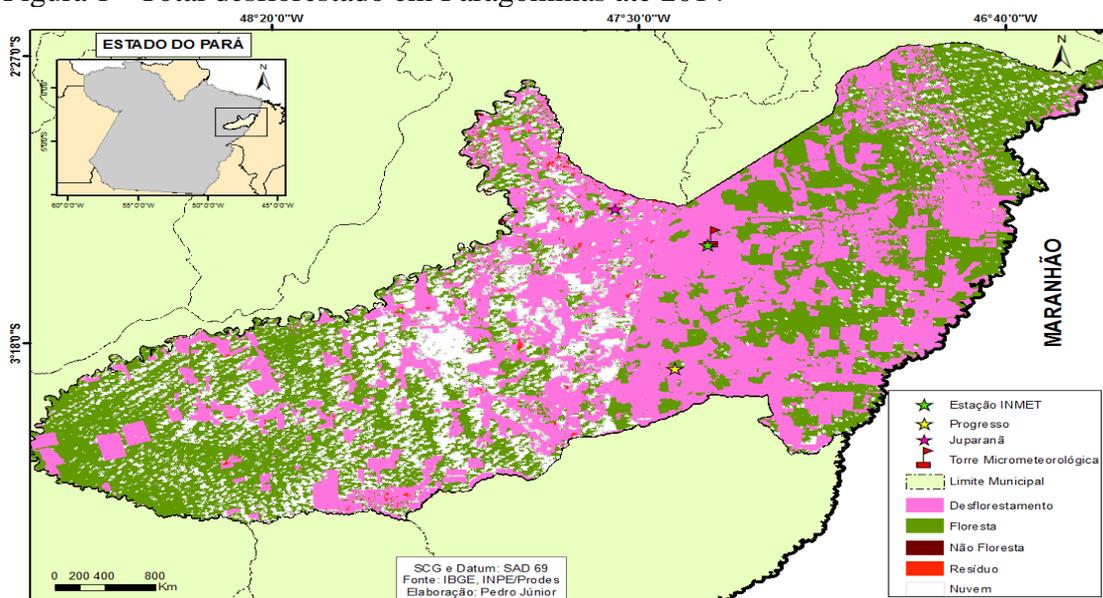
No setor leste da Amazônia, por exemplo, o município de Paragominas vem desenvolvendo sua economia a partir da abertura de pastos sobre florestas para pecuária bovina e produção de culturas graneleiras. Em 2008, possuía 43% de sua área total desflorestada, sendo incluído na lista dos 36 maiores desmatadores do bioma Amazônia, elaborada pelo Ministério do Meio Ambiente. Apesar do incremento de desmatamento ter diminuído nos últimos 6 anos com introdução desta política, Paragominas apresentou ainda um total de 8,7 mil km² de área desmatada ainda em 2014, o que correspondeu a 44,7% do total desmatado (gráfico 2 e figura 1).

Gráfico 2 - Evolução da área desmatada em Paragominas



Fonte: adaptado de Prodes/INPE (2015).

Figura 1 - Total desflorestado em Paragominas até 2014



Fonte: adaptado de Prodes/INPE (2015).

Como visto, a expansão da fronteira agrícola tem contribuído para o acentuado desflorestamento por meio da dinâmica de derrubada da floresta, implantação da pecuária e transformação posterior da área em agricultura mecanizada. Desta forma, o estudo se justifica pela necessidade de referências explicativas e integradas sobre as possíveis implicações hidrológicas e transformações na dinâmica da paisagem que tal processo tem causado no leste da Amazônia Brasileira, demandando estudos que privilegiem o enfoque interdisciplinar, dada a necessidade de pesquisas nesse âmbito para esta porção da Amazônia Legal.

A partir da justificativa e das problemáticas expostas, a linha investigativa que orienta o trabalho testa as seguintes hipóteses:

- i. A resposta hidrológica vazão é afetada pela diminuição da área coberta por vegetação primária e secundária na bacia de drenagem e pela reorganização da paisagem dada as mudanças de uso e cobertura da terra;
- ii. Mudança de uso e cobertura da terra provocam alterações no balanço de energia em escala de bacia hidrográfica e a modelagem do balanço de energia, por técnicas de sensoriamento, permite o aperfeiçoamento das simulações hidrológicas quando assimilados estes resultados em modelos distribuídos;
- i. É possível integrar a dinâmica espacial dos processos de mudanças na paisagem combinando modelagens distintas para prever possíveis impactos nos recursos hídricos.

3 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O intuito do trabalho é explorar as relações potenciais entre a variabilidade hidrológica e a organização da paisagem na bacia, resultado das mudanças do uso da terra. Dados observados são analisados à procura de sinais que possam associar a variabilidade da vazão com a perda de vegetação na bacia.

Então, o objetivo geral deste trabalho é avaliar os possíveis efeitos das mudanças do uso e cobertura da terra na vazão da bacia hidrográfica do Rio Uraim, Paragominas, Pará, advindos principalmente da expansão da fronteira agrícola e pastagem e, assim, fazer projeções da vazão para o futuro próximo.

Como os objetivos específicos tem-se:

- a) Determinar os parâmetros morfométricos para a bacia hidrográfica do Rio Uraim, analisando suas características morfoclimática, afim de criar subsídios para a gestão e planejamento ambiental e como contribuir com o conhecimento para a aplicação deste diagnóstico as outras bacias adjacentes;
- b) Estimar a evapotranspiração (ET) através do algoritmo SEBAL, combinando informações de imagens orbitais e medições de superfície para assimilação na modelagem hidrológica. A acurácia dos resultados será importante para suprir a carência de dados na região, possibilitando que o método seja utilizado nas demais pesquisas de caráter similar;
- c) Calibrar e validar o SWAT para a bacia, simulando a vazão mensal e avalia-lo quanto a assimilação da ET estimada por sensoriamento remoto (resultados do item b). Isto será importante para investigar a sensibilidade do SWAT a este respeito e, assim, aperfeiçoar as simulações de vazão sob diferentes cenários de uso e cobertura da terra;
- d) Através do arcabouço CLUE-S, realizar avaliações de mudanças nos usos da terra em virtude das interações entre a dinâmica espacial e temporal das forçantes dessas mudanças na bacia hidrográfica, na perspectiva de elaborar cenários hipotéticos de uso e ocupação para o futuro, aplicando-os na modelagem hidrológica do SWAT posteriormente para prognosticar o comportamento da vazão.

4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese foi organizada em capítulos que discutem os diferentes estudos aplicados para seu desenvolvimento. Cada capítulo permite sua compreensão em forma independente, mas mantém a complementaridade necessária à estrutura do trabalho, assim, materiais, métodos e resultados são descritos e discutidos em cada capítulo.

- ✓ Capítulo I: descreve conceitualmente, e de maneira breve, alguns aspectos importantes para o entendimento do trabalho;
- ✓ Capítulo II: são apresentadas as análises morfométricas, padrão climatológico da precipitação e outras análises biofísicas para a bacia hidrográfica em estudo;
- ✓ Capítulo III: as estimativas da evapotranspiração pelo SEBAL e avaliação do algoritmo estão contidas neste capítulo;
- ✓ Capítulo IV: contém todos os processos referentes aos experimentos com a modelagem do SWAT desde as simulações iniciais até a validação do modelo;
- ✓ Capítulo V: são discutidas a modelagem dinâmica das mudanças de uso e cobertura da terra pelo CLUE-S e as projeções de cenário hipotéticos, além das previsões de vazão mensal baseadas nesses cenários;
- ✓ Por fim, a conclusão geral da tese e as recomendações são expressas.

CAPÍTULO I ELEMENTOS TEÓRICOS

1.1 Característica socioeconômica de Paragominas, Pará.

Este levantamento faz-se necessário para compreender o contexto político, geográfico e socioeconômico de Paragominas, onde a bacia hidrográfica em estudo está inserida, pois auxiliará na discussão do trabalho nas diversas abordagens. As informações a seguir sobre o histórico de formação do município e o diagnóstico socioeconômico encontram-se em Pinto *et al.* (2009).

Paragominas, em 10 de maio de 1988, através da Lei nº 5.450, no Governo Hélio Mota Gueiros, teve sua área desmembrada para criação do município de Dom Eliseu, antigo povoado chamado Felinto Muller, que foi elevado à condição de distrito, passando a se chamar Dom Eliseu. Sua denominação constitui a abreviação do nome de três Estados: Pará, Goiás e Minas Gerais e, em 1991, o município teve seu território desmembrado para a criação do município de Ulianópolis, sancionado pelo então Governador Jader Barbalho.

O processo de ocupação da área, que mais tarde daria origem ao município de Paragominas, está relacionado ao povoamento do Estado do Pará na década de 50 a partir da abertura de Rodovias e Projetos de Colonização. Foi efetivada com a presença de camponeses que foram os pioneiros na região antes da construção da rodovia Belém-Brasília. Mais tarde, o governo federal divulgou a instalação de uma colônia federal na região, que nunca chegou a se estabelecer, bem como os planos estaduais para a formação de duas colônias naquele território.

Registra-se também que, antes mesmo da chegada dos camponeses, com autorização do Governo do Estado, especuladores de Goiás haviam penetrado na floresta, ao longo do rio Capim, com o objetivo de efetuar levantamentos e titular terras para compradores de Uberaba e Itumbiara, em Minas Gerais. Posteriormente, a proximidade da rodovia BR-010 (Belém-Brasília) provocou uma grande procura pelas terras entre proprietários de Minas Gerais e Espírito Santo, além de companhias de especulação de terras de São Paulo, ao mesmo tempo em que camponeses penetravam na região com o intuito de enfrentar a competição com os “grileiros”, os quais emitiam títulos falsos e os asseguravam através do uso da força.

1.1.1 Agricultura familiar

De acordo com Almeida; Uhl (1996) e Uhl; Almeida (1996), a primeira atividade a se estabelecer na área que hoje é o município de Paragominas foi agricultura de corte-e-queima. Oriundos de São Miguel do Guamá, os colonos chegaram à região na década de 1930, um antigo povoamento de ribeirinhos situado ao norte. Eles migraram em busca de terra e, gradativamente, formaram colônias agrícolas de pequenos produtores. Ainda segundo estes autores, em 1995, já existiam em Paragominas mais de 20 colônias agrícolas com área média de 2.500 hectares cada, ocupando no mínimo 50 mil hectares do município. Algumas dessas colônias se tornaram projetos de assentamento desde então. Formaram-se novas colônias e outras se expandiram à medida que a população se reproduziu e/ou novas famílias se estabeleceram na área. Com base nos dados apresentados por estudos do Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon) em 2009, estima-se que 8,2% (159.600 hectares) de Paragominas estejam sob o domínio de pequenos produtores rurais; 5,7% (110.600 hectares) estejam dentro dos projetos de assentamento; e 2,5% (49.000 hectares) estejam nas colônias agrícolas fora das áreas de assentamento.

As culturas de arroz, feijão, mandioca e milho continuam sendo as mais cultivadas entre os pequenos produtores agrícolas. Essas culturas visam primeiramente garantir a segurança alimentar da família e, quando há excedente de produção, gerar renda monetária para suprir outras necessidades da unidade familiar e produtiva. Dentre esses cultivos agrícolas, a mandioca é a mais amplamente comercializada sob a forma de farinha. Os dados municipais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) referentes ao período de 1997 a 2014 mostram que a lavoura de mandioca esteve em ascensão no município até 2009, quando apresentou uma acentuada queda a partir do ano seguinte.

Referentes ao período de 2000 a 2007, as taxas médias de crescimento da área plantada e da quantidade produzida foram de 15% (+ 29,0%) e 23% (+ 28,4%), respectivamente. Essas taxas evidenciam um considerável aumento de produtividade desse cultivo, pois enquanto em 2000 a produção era de 12 toneladas de mandioca por hectare, em 2008 e 2009 seu rendimento foi de 20 toneladas por hectare. Em 2007, Paragominas produziu 90 mil toneladas de mandioca em uma área de 4.500 hectares, equivalente a 2% da produção do Pará (15ª posição dentre os 143 municípios paraenses).

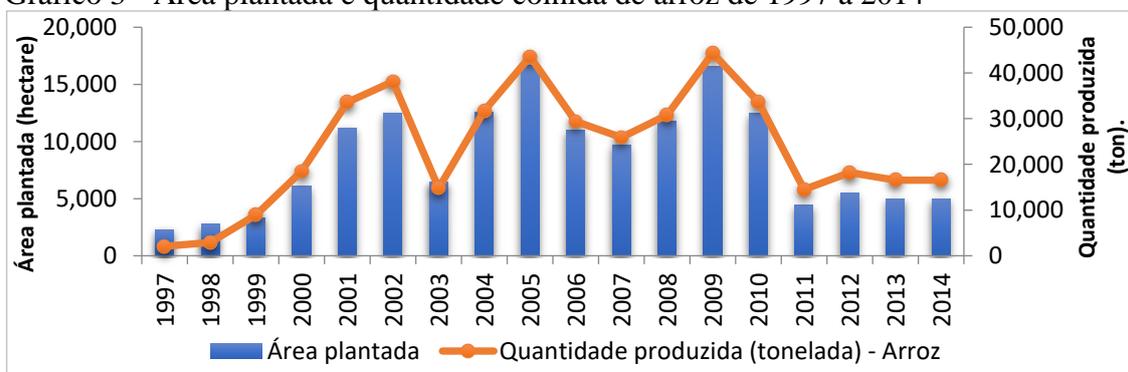
Em 1995 foram identificados plantios de seringueira, laranja, cacau, manga, maracujá e pimenta-do-reino em colônias agrícolas de Paragominas (ALMEIDA; UHL, 1996; TONIOLO; UHL, 1996). Em 2008, este estudo evidenciou a produção de castanha-de-caju, de banana, de goma e de hortaliças nessas colônias.

1.1.2 Arroz, milho e soja

Paragominas obteve destaque a partir do ano 2000 na produção de grãos, especialmente na agricultura de arroz, milho e soja. Aproveitando a abundância de suas áreas já abertas e planas e com um regime pluviométrico bem definido, essas culturas têm apresentado excelentes desempenhos em produção por área, colocando Paragominas entre os maiores produtores de grãos do Pará. O cultivo de grãos (arroz, milho e soja) em Paragominas ocupa aproximadamente 63 mil hectares de terras do município.

A rizicultura ganhou forte impulso em Paragominas a partir de 2000, quando sua produção mais que dobrou de tamanho e se manteve elevada, em torno de 29,4 mil (+ 9,6 mil) toneladas/ano até 2007, com uma taxa média de crescimento anual de 20% para o período de 2001 a 2007. Em 2007, Paragominas produziu quase 26 mil toneladas de arroz com casca (5º maior produtor paraense), com uma área plantada de 9.700 hectares (4ª maior do Estado), resultando em uma produtividade de 2.665 quilos por hectare (4ª maior do Estado). De 2011 a 2014, tanto a área plantada quanto a produção decresceram e mantiveram-se constantes em cerca de 6,0 mil hectares e 13 mil toneladas, respectivamente (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Área plantada e quantidade colhida de arroz de 1997 a 2014



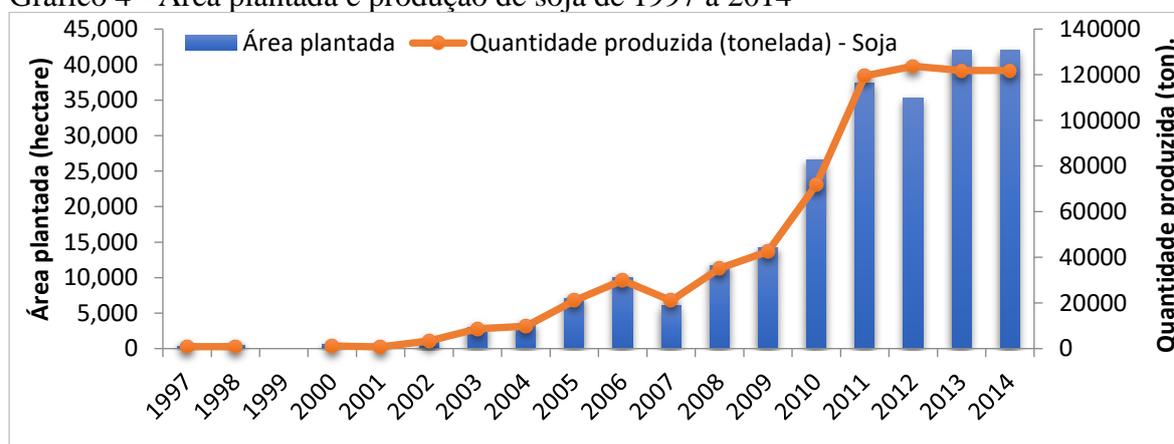
Fonte: Adaptado de IBGE/PAM (2014).

A produção de milho em Paragominas teve um acentuado crescimento a partir de 2000, quando sua produção mais que dobrou de tamanho e se manteve elevada, em torno

de 57 mil (+ 19 mil) toneladas/ano até 2007, com uma taxa média de crescimento anual de 16% para o período de 2001 a 2007. Em 2007, Paragominas foi o maior produtor paraense de milho (em grãos), produzindo 90 mil toneladas, em uma área de 18,5 mil hectares (2ª maior do Estado), resultando em uma produtividade de 48.864 quilos por hectare (2ª maior do Estado). O ápice da produção se deu em 2012 com 121.4 mil toneladas. Nos dois anos que se seguiram houve uma queda brusca na produção e na área plantada, passando a 44 mil toneladas produzidas em 8 mil hectares.

O cultivo de soja é o mais recente dentre as culturas graneleiras praticadas em Paragominas. A sua produção apresentou maior crescimento a partir de 2003, ainda que tenha oscilado bastante ano a ano (gráfico 4). A produção média anual no período de 2003 a 2007 foi de 18 mil (+ 9 mil) toneladas, e a taxa média de crescimento anual foi de 60%. Em 2007, Paragominas produziu 21 mil toneladas de grãos de soja (4º maior produtor paraense), com uma área plantada de 6.000 hectares (4ª maior do Estado); foi o município com maior produtividade do Estado do Pará, com produção de 3,5 toneladas por hectare. A partir do ano seguinte, em 2008, a área plantada e a produção aumentaram significativamente, sendo os anos de 2013 e 2014 o ápice da produção de soja no município com 29 mil toneladas por hectare.

Gráfico 4 - Área plantada e produção de soja de 1997 a 2014



Fonte: adaptado de IBGE/PAM (2014).

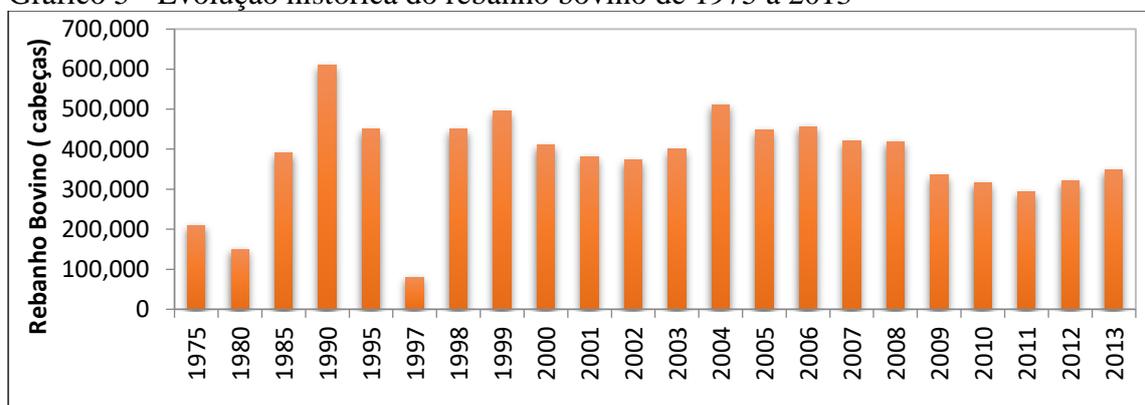
Nos anos 1960, o governo brasileiro com o objetivo de atrair investidores do Sul do Brasil para o Norte ofertou um conjunto de facilidades e benefícios para aqueles que se aventurassem a desbravar a floresta amazônica. Isenção de impostos, empréstimos a juros baixos, terra barata e com mecanismo facilitado de titulação para quem desmatasse sua área (para cada hectare desmatado o ocupante recebia um título equivalente a seis hectares de terra) foram alguns dos incentivos ofertados na época (UHL; ALMEIDA,

1996). Em 2008, havia em Paragominas 1.152 imóveis (pequenos, médios e grandes) com atividade pecuária. Os agricultores familiares costumam manter um pequeno rebanho para a produção de leite, de queijo e/ou como um investimento (TONIOLO; UHL, 1996).

1.1.3 Pecuária

Paragominas se manteve como o maior criador de bovinos do Estado do Pará em número de cabeças durante dez anos consecutivos, de 1983 a 1992, atingindo o seu ápice no início da década de 1990 (gráfico 5). Nos últimos anos, o tamanho do rebanho bovino de Paragominas tem se mantido estável, em torno das 300 mil cabeças, apresentando uma taxa média de crescimento anual de apenas 1% (+13,4%) no período de 2000 a 2007. Em 2007, o município possuía o sexto maior rebanho do Pará, com 419.430 cabeças, equivalente a 3% do rebanho bovino paraense (IBGE/PPM). Ao considerar uma produtividade média de 0,7¹ cabeça por hectare de pastagem, estima-se que a manutenção de um rebanho nas proporções do rebanho de 2007 demande uma área de aproximadamente 600 mil hectares. A partir de 2008, o rebanho bovino apresentou uma queda de quase 100 mil cabeças a menos que os anos anteriores.

Gráfico 5 - Evolução histórica do rebanho bovino de 1975 a 2013



Fonte: adaptado de IBGE/PPM (2014).

¹ Esse índice é uma média ponderada que foi calculada a partir de dados do último Censo Agropecuário do IBGE (1995), que aponta uma lotação média de 1,38 cabeça/hectare nas pastagens mais produtivas da Amazônia, correspondente a 20% do total de pastagens, e dos dados que indicam uma lotação média de 0,5 cabeça/hectare nos demais 80% de pastagens na Amazônia.

1.2 Evolução da produção de soja no Brasil

A cultura de soja começou a se expandir mais intensamente no Brasil na segunda metade dos anos de 1970 impulsionada pela expansão da demanda internacional. Isto atingiu os estados do sul do país, em regiões de ocupação agrícola antiga, onde a soja passara a ocupar áreas antes exploradas com outras lavouras ou áreas de pastagem (DOMINGUES; BERMAN, 2012).

Começou a ser cultivada no Rio Grande do Sul como uma opção de rotação com o trigo. Depois de assentada nesse estado, expandiu-se para o norte, chegando a Santa Catarina, Paraná e São Paulo. A partir da década de 1980, chegou ao cerrado. Estimulada por programas de desenvolvimento do governo do estado de Minas Gerais, a soja já havia atingido os cerrados do Triângulo Mineiro e do oeste do Estado. Ainda de forma incipiente, a lavoura alcançara também zonas de cerrado no centro e no norte de Mato Grosso do Sul e no sudeste de Mato Grosso (MUELLER *et al.*, 2002).

Segundo Siqueira (2004), a cultura ganhou impulso com a expansão da fronteira agrícola em direção ao Centro-Oeste com base nos incentivos dos programas governamentais, como o Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (Polocentro) e pelos atrativos preços internacionais. Além disso, a expansão da soja no cerrado foi estimulada pelos baixos preços da terra e pela política agrícola compensatória dos custos relacionados ao uso de insumos e os custos com a logística para o transporte da produção para os principais centros de consumo e portos do país.

Para Arvor *et al.* (2007), muitos fatores contribuíram para que a soja se estabelecesse como uma importante cultura primeiro no sul do Brasil (anos de 1960 e 70) e, posteriormente, nos cerrados do Brasil central (anos de 1980 e 90). Esse rápido crescimento e o espetacular avanço territorial foram induzidos e favorecidos pelo desenvolvimento tecnológico da pesquisa agropecuária brasileira, que a adaptou às condições do meio tropical.

A partir do final dos anos 90, a soja alcançou as áreas da Amazônia incentivada, principalmente, pelos governos estaduais que promoveram programas de incentivos para o seu desenvolvimento; e graças ao papel da pesquisa no desenvolvimento de variedades de cultivares adaptadas às condições regionais. Na Amazônia, a soja que originalmente teve sua motivação de implantação direcionada para o reaproveitamento das áreas degradadas, terminou por estimular um ciclo de atividades produtivas que se inicia por um processo de apropriação ilegal de áreas para extração madeireira, cedendo lugar, após

a exaustão das florestas, à ocupação por pastos para a pecuária de corte, passando pelo plantio de milho e arroz, para finalmente instalar-se (COSTA, 2010).

Dentre os estados da região norte, o Pará tem apresentado um considerável crescimento na produção de grãos. A produção está concentrada principalmente em três regiões: a região do Baixo Amazonas (engloba os municípios de Santarém e Belterra, com 38,81% da produção de soja do Estado), a região dos municípios de Paragominas, Ulianópolis e Dom Eliseu (nordeste do Estado, com 43,26% da produção) e a região do município de Santana do Araguaia, com 8,8% da produção. Sua expansão no Estado coincide com a intensificação dos conflitos de terra na região do Baixo Amazonas (em áreas próximas a Santarém) entre sojicultores, corretores e outros agentes como os pequenos agricultores familiares e povos e comunidades tradicionais (ALMEIDA, 2012; COSTA, 2010).

Sua introdução no Pará ocorreu na primeira metade da década de 90 como um dos projetos específicos do Plano Operacional de Política Agrícola “Pará Rural”. Nesse plano, o governo adotou a concepção de Polos de Desenvolvimento, três deles envolvendo a produção de grãos, mas especificamente a soja: o Polo Agroindustrial da Soja do sudeste Paraense; o Polo Agroindustrial e Agroflorestal do Oeste Paraense; o Polo Agroindustrial do Nordeste Paraense, com um programa de agroindústria de soja. Foram estruturadas três áreas de produção pelo incentivo do governo estadual: inicialmente nas áreas de cerrado localizadas ao sul do estado especificamente no município de Redenção, e posteriormente nas regiões de Santarém e na BR010 (Belém-Brasília), no município de Paragominas.

Com exceção de Santana do Araguaia, que vem recebendo influência para a expansão da infraestrutura de armazenagem do Mato Grosso e da possibilidade de asfaltamento da BR-158, as outras duas regiões estão intrinsecamente associadas com a existência de infraestrutura de transporte já instalada. No caso do Baixo-Amazonas, a existência do Porto de Cargill inaugurado em 2003 e a possibilidade de pavimentação da BR-163 criaram condições apropriadas para a expansão da cultura nas áreas onde a mecanização é permitida pela topografia. Em relação à região de Paragominas e municípios adjacentes, a proximidade da ferrovia Carajás-Itaqui e a localização estratégica às margens da Belém-Brasília também favorecem a exportação do grão pelo porto de Itaqui, no Maranhão (GAMA *et al.*, 2004).

1.3 Impactos das atividades agropecuárias em bacias hidrográficas

Recentemente, estudos socioambientais conduzidos pela EMBRAPA e instituições parceiras têm demonstrado impactos negativos da introdução das atividades agropecuárias em áreas de floresta primária e como essas atividades têm implicado na qualidade das águas em microbacias da Amazônia, podendo ser citados os estudos de Figueiredo (2009), Figueiredo *et al.* (2006), Kato *et al.* (2004), Lima *et al.* (2007), Venturieri *et al.* (2005), Vieira *et al.* (2007) e Watrin (2007).

Considerando a recente expansão do agronegócio de grãos na Amazônia, essas pesquisas têm avaliado a técnica de plantio direto como mitigadora da entrada de nutrientes nos igarapés e na água subterrânea. Alterações na hidroquímica de pequenos igarapés relacionados à expansão da fronteira agrícola já têm sido detectadas nos municípios do Nordeste Paraense. O estudo de Barroso *et al.* (2011) revelou que a composição química das águas fluviais de pequenos igarapés está sendo influenciada pelas práticas agrícola adotadas em sua área de drenagem, demonstrado principalmente pelos sinais hidrogeoquímicos ocasionados por práticas de derruba-e-queima, fertilização química, fertirrigação, uso de água fluvial pelos bovinos e conversão de floresta em pastagem.

O impacto do uso do fogo na agricultura amazônica é outra questão que tem sido muito avaliada por diversos estudos, como os de Barlow *et al.* (2012), Vieira *et al.* (2005) e Zarin *et al.* (2004). Neste âmbito, muitas outras demonstram como a alternativa ao uso do fogo na agricultura amazônica pode ajudar na proteção dos recursos hídricos; e que a técnica de preparo por meio de corte-e-trituração ocasiona menor lixiviação e perdas de nutrientes dos solos para as águas subterrâneas e superficiais.

Na bacia do Igarapé Cumarú, município de Igarapé-Açu (PA), a dinâmica de água e nutrientes em duas microbacias (uma onde a derruba-e-queima era efetuada; e outra onde a prática conservacionista evitava o uso do fogo por meio do corte-e-trituração da biomassa vegetal) foi avaliada por Figueiredo (2007). As maiores transferências de nutrientes foram observadas dos solos para o igarapé, principalmente Ca e Mg. Medidas da química das águas de escoamento superficial corroboraram essa interpretação, uma vez que as concentrações de nutrientes foram maiores nas áreas queimadas. Os resultados confirmam os aspectos ambientalmente positivos da prática alternativa ao uso do fogo, a qual vem sendo testada e recomendada pela EMBRAPA na região amazônica.

Alguns estudos hidrológicos e hidrobiogeoquímicos têm sido realizados em áreas de agricultura familiar, onde é utilizada a prática de preparo para plantio por meio da derruba-e-queima da vegetação secundária. Em relação ao papel das florestas ripárias como filtros dos nutrientes que entram no igarapé, originados das florestas e pastagens presentes nas áreas drenadas dessas bacias em Paragominas, Figueiredo (2007) constatou a existência de uma função tampão das matas ciliares quando avaliou a composição química da água subterrânea da área ripária com pastagens e florestas. Foram encontradas menores concentrações de cátions e ânions nas águas subterrâneas de floresta em relação às de pastagens nas margens dos igarapés.

Dos estudos citados, podem-se abordar as seguintes questões: i) nos sistemas fluviais, a conversão de florestas em pastagens altera as formas e padrões de ciclagem do carbono e nutrientes; ii) os tipos e usos dos solos determinam as respostas destes sistemas. A importância relativa do processamento interno nos rios e igarapés e das interações destes com as zonas ribeirinhas e com os ecossistemas terrestres adjacentes é outra questão que tem se buscado responder.

1.4 SEBAL e SWAT na avaliação dos fluxos de massa e energia

Tendo em vista que as alterações no padrão do uso do solo, também promovem mudanças na partição das componentes do balanço de energia, torna-se possível se quantificar as implicações da mudança do uso da terra por meio das variações temporais das componentes do balanço de energia. De uma maneira simples, pode-se dizer que a retirada da cobertura vegetal de uma área tem como consequência a redução de fluxo de calor latente e o aumento do fluxo de calor sensível, gerando aumento nas temperaturas da superfície e do ar. Para se estimar as diferentes componentes do balanço de energia a superfície com imagens de satélites, alguns algoritmos tem sido formulados, dentre eles o SEBAL, proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998) e sendo posteriormente aprimorado por Allen *et al.* (2002).

Tradicionalmente, o levantamento e a qualificação dos fatores de uso e ocupação das terras são dificultados por demandarem fluxos expressivos de informações, que requerem alocação, detalhamentos, organização, interpretação e, principalmente, armazenamento adequado que assegure a confiabilidade do banco de dados geográficos. O algoritmo SEBAL necessita de poucos dados de superfície e de imagens de satélite nas bandas visível, infravermelho próximo e infravermelho termal (BASTIAANSEN *et al.*,

1998; BASTIAANSEN, 2000). É um algoritmo semiempírico que promove a parametrização do balanço de energia e fluxos de superfície baseado em alguns dados locais e medições espectrais de satélites. É necessário que os canais visíveis, infravermelho próximo e infravermelho termal sejam tomados como dados de entrada para o processo.

De acordo com Bastiaanssen (2000), apesar de o algoritmo ser fundamentado em formulações empíricas, os resultados da validação do mesmo em experimentos de campo tem mostrado que o erro relativo na fração evaporativa foi de 20%, 10% e 1% nas escalas de 1, 5 km e 100 km, respectivamente. O autor supracitado espera que o SEBAL apresente melhores resultados em escala regional, como também em áreas com superfície heterogênea.

Aynew (2003) fez uso deste para calcular a evaporação diária do *Ethiopian Rift Lakes* e das áreas circunvizinhas. O autor observou que a estimativa da evaporação dos lagos ocorreu com uma confiança maior do que a evapotranspiração das áreas em redor, uma vez que os processos físicos envolvidos na evaporação da superfície líquida são mais fáceis de serem obtidos usando-se satélites, do que aqueles envolvidos na evapotranspiração da superfície heterogênea do solo. O autor afirma a importância do algoritmo SEBAL em estudos dos recursos hídricos em regiões que apresentam escassez ou ausência total de dados.

Kimura *et al.* (2007) comentam que o SEBAL vem sendo bastante testado em áreas irrigadas em diferentes partes do globo, porém poucas referências são encontradas quando se investiga a estimativa da evapotranspiração da vegetação nativa de regiões semiáridas. Os autores supracitados aplicaram e validaram o SEBAL na radiância espectral, no NDVI, SAVI, IAF, reflectância, albedo no topo da atmosfera, emissividade da superfície, albedo da superfície, temperatura da superfície, radiação de onda longa ascendente radiação de onda longa radiação de onda curta descendente, balanço de radiação à superfície, estimativa da ET diária de vegetação nativa em bacia na região de *Loess Plateau of China* empregando procedimento descrito por Allen *et al.* (1998) e Bastiaanssen (1998). Os resultados obtidos mostraram uma taxa de evapotranspiração para as áreas de pastagens semelhantes às taxas registradas nas áreas irrigadas; enquanto que as áreas de agricultura de sequeira apresentaram taxas iguais às registradas nas áreas cobertas por arbustos de porte pequeno à médio. Nesta região, os valores da ET diária obtidos pelo algoritmo SEBAL foram ligeiramente melhores do que os da fração evaporativas.

Para identificar a eficácia de uso do recurso água na agricultura irrigada, Albari *et al.* (2007) avaliaram quatro sistemas de irrigação em áreas da bacia *Zayandeh Rud*, Esfahan, Irã. Neste estudo, os sistemas foram avaliados como um todo, apesar de que apenas as informações sobre as dotações de água tenham sido empregadas. A avaliação de cada sistema foi definida pela produtividade da água, ou seja, produção de kg de biomassa por metros cúbicos evaporados. As produtividades mais elevadas, em torno de $0,72 \text{ kg.m}^{-3}$, foram registradas nos sistemas que tinham como fonte hídrica, águas superficiais.

No que se refere aos recursos hídricos, a utilidade de um modelo hidrológico, de acordo com Klemes (1986), deve estar na sua capacidade de sintetizar informações hidrológicas necessárias em uma tomada de decisão, dentro do escopo do gerenciamento e planejamento de recursos hídricos. Estas informações tratam, entre outros aspectos, da estimativa do escoamento superficial, a vazão líquida do canal principal e a produção de sedimentos associados a um ou mais eventos de precipitação. A simulação da perda de solo proporciona o planejamento conservacionista (preventivo) para seu controle.

Machado (2002) aplicou o modelo SWAT na microbacia do Ribeirão Martins, localizada no município Piracicaba, São Paulo, para o uso atual e outros dois diferentes cenários: o primeiro cenário considerava apenas a mata ciliar e o segundo levava em conta áreas íngremes com a existência de vegetação nativa. Como resultado, o autor verificou que a produção de sedimentos é mais significativa no quadro atual, com sutil diferença apresentada pelo primeiro cenário, enquanto que o segundo cenário apresentou uma elevada proteção do solo contra o processo de erosão.

Uzeika (2009) executou o modelo SWAT na bacia hidrográfica de Arvorezinha, no Rio Grande do Sul, para três diferentes cenários. Os resultados mostraram que o escoamento superficial foi pouco sensível ao segundo e terceiro cenários, porém o segundo cenário apresentou uma produção de sedimentos cerca de 40% superior. Os autores mostraram que as práticas de manejo do solo são importantes como medidas de controle de erosão, bem como assegurou a assimilação do modelo com respeito a práticas de conservação. O primeiro cenário não apresentou volumes significativos de escoamento superficial, tampouco de produção de sedimentos.

Arabi *et al.* (2008) avaliaram as respostas de sete práticas de manejo do solo na agricultura, na parte alta da bacia, e três técnicas de coberturas de canal em uma pequena bacia ($7,3 \text{ km}^2$) frente à produção de escoamento superficial, sedimentos, nutrientes e pesticidas. Seus resultados tornaram possível a observação da sensibilidade do modelo

perante os diferentes manejos, e com isto apontar as melhores práticas para a conservação do solo. Por outro lado, Minoti (2006) trabalhou considerando o cenário hipotético da vegetação nativa e com toda a área com a monocultura da cana de açúcar. Os resultados mostraram que a vegetação nativa promoveu uma elevada proteção do solo, com um resultado muito baixo da produção de sedimentos ao passo que o cenário da cobertura do solo com cana-de-açúcar promoveu as maiores perdas de solo.

1.5 Modelagem aplicada à dinâmica de uso e cobertura da terra

Nesta tese os conceitos como “cobertura da terra”, “uso da terra” e “mudança do uso e cobertura da terra” surgirão e para facilitar a compreensão estes conceitos são definidos a seguir.

1.5.1 Cobertura do solo: a composição biofísica da superfície terrestre, ou seja, a cobertura da terra composta por características físicas, químicas, ecológicas ou biológicas da superfície terrestre.

1.5.2 Uso da terra: é caracterizado por planejamentos, atividades e insumos que as pessoas executam em uma cobertura de solo para produzi-lo, mudá-lo ou mantê-lo. O uso do solo e a cobertura do solo não são sinônimos.

1.5.3 Mudanças do uso e cobertura do solo: é o aumento ou diminuição da área coberta por um tipo de uso ou cobertura da terra, podendo. O uso da terra pode modificar a cobertura do solo de três formas.

a) Conversão: mudança qualitativa da cobertura da terra para outro tipo, como desmatamento ou desflorestação converte florestas em áreas agrícolas;

b) Modificação: a cobertura da terra é modificada na sua estrutura ou função sem mudar a cobertura para outro tipo. Modificações do uso da terra podem envolver variações na intensidade do uso e alterações nas características e atributos, como áreas urbanas de nível socioeconômico alto para um nível baixo.

c) Manutenção: as condições do solo são mantidas contra agentes externos.

Similarmente, para a mudança do uso do solo definem-se os seguintes tipos:

Os modelos de uso e cobertura da terra são internacionalmente conhecidos como *Land Use and Cover Change* (LUCC). Eles são utilizados para estimar mudanças e seus impactos e auxiliam pesquisas que buscam entendimento sobre as causas e consequências dessas alterações (VELDKAMP; LAMBIN, 2001; VERBURG, 2004).

Segundo Mas *et al* (2011), as etapas da modelagem dinâmica espacial podem ser definidas a partir de cinco procedimentos, conforme Mas *et al* (2011) destaca: (1) cálculo da área de cada transição; (2) determinação das probabilidades de mudança; (3) componente que assinala a localização das mudanças; (4) eventualmente um módulo espacial que simula os padrões espaciais das mudanças e (5) um procedimento que permita comparar o mapa de referência com o mapa simulado.

A seguir são apresentados os resultados, subdivididos em capítulos, que discutem os diferentes estudos aplicados para seu desenvolvimento.

CAPITULO 2 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URAIM: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Resumo

O levantamento morfométrico se consolida como ferramenta essencial a estudos aplicados em bacias hidrográficas por permitir diagnósticos de forma rápida e precisa. O conhecimento destas características é importante para o planejamento ambiental e gestão integrada dos recursos hídricos. Assim, aplicou-se o estudo morfométrico para a bacia hidrográfica do Rio Uraim, localizada entre os municípios de Paragominas e Nova Esperança do Piriá, Estado do Pará, Brasil. Abordaram-se os aspectos descritivos, análise linear, areal e outras. Os resultados mostraram que é uma bacia de ordem 5 e tem natureza dendrítica. Sua forma favorece o processo de escoamento superficial, não sendo sujeita a enchentes em condições climáticas normais. Tem relevo predominantemente plano e o valor da relação de bifurcação demonstra que ela possui mediano grau de dissecação do relevo. Apesar da grande quantidade de ramificação da sua rede de drenagem, é uma bacia com sistema pouco desenvolvido. O Polígono de Voronoi permitiu identificar as áreas de influência de cada ponto de nascente e sua concentração, assim, duas sub-bacias (SB06 e SB07) mostraram exercer grande influência sobre o comportamento hidrológico da bacia, reforçados pelos altos índices pluviométricos nas escalas mensal e anual sobre estas duas porções. A dinâmica de uso e cobertura da terra na bacia reflete o padrão da ocupação da Amazônia oriental, onde a tomada do espaço territorial se faz de forma desorganizada e acelerada, pois 45 % da BHRU é ocupada por áreas antropizadas, onde 44,5% das nascentes estão inseridas. Com estes resultados, pode-se determinar possíveis degradações ambientais bem como definir medidas prioritárias e emergências para sua gestão, principalmente em função do uso e cobertura da terra indevida no entorno do Rio Uraim, associado a alguns trechos de drenagens, como por exemplo a ausência de vegetação, o que pode provocar erosão hídrica e a ocorrência de enxurradas, potencializada pela rápida saturação dos solos.

Palavras-chave: Análise morfométrica. Bacia hidrográfica. Rio Uraim. Amazônia.

CHAPTER 2 MORPHOMETRIC MEASUREMENTS TO THE URAIM RIVER BASIN: A CONTRIBUTION TO THE STUDIES IN ENVIRONMENTAL SCIENCES

Abstract

The morphometric measurement is consolidated as an essential tool for studies applied to river basins for allowing rapid and precise diagnosis. Knowledge of these characteristics is important for environmental planning and integrated management of water resources. Thus, morphometric analyzes were applied to the Uraim River Basin (URB), located in Paragominas and Nova Esperança do Piriá, Pará, Brazil. Results showed that it is a 5th order stream basin and has a dendritic nature. Its shape favors the surface runoff process and is not subject to flooding under normal climatic conditions. It has predominantly flat relief and the value of bifurcation ratio shows that it has medium degree of relief dissection. Despite the large amount of branching of its drainage network, it is a basin with an underdeveloped system. The Voronoi Polygons identified the areas of influence of each river source as well as its concentration, so SB06 and SB07 watersheds showed great influence on the hydrological pattern of the basin, reinforced by the high rainfall amount in the monthly and annual scales. Land use and land cover demonstrated the pattern of occupation in the Eastern Amazon, where the territorial space is taken in a disorganized and accelerated manner, since 45% of the URB is occupied by anthropized areas, which 44.5% of the river sources are inserted. These results allow to determine probable environmental degradations in the basin, as well as to define priority measures and emergencies for its management, mainly due to the improper land use and land cover around the Uraim river, as for example, the absence of vegetation that can cause water erosion and the occurrence of floods, potentiated by the rapid saturation of the soils.

Keywords: Morphometric measurements. Watersheds. Uraim River. Amazon.

1 INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas são unidades fundamentais para a gestão da terra e da água, sendo identificadas como unidades de planejamento administrativo para fins de conservação dos recursos naturais (VITTALA *et al.*, 2008). Seus componentes coexistem em permanente e dinâmica interação, respondendo às interferências naturais e antrópicas, o que afeta os ecossistemas como um todo (SOUZA; FERNANDES, 2000).

O conhecimento desses componentes e de suas interações é fundamental para o uso racional dos recursos naturais. Assim, análises morfométricas detalhadas em bacias hidrográficas revelam indicadores físicos específicos capazes de criar mecanismos para a gestão e planejamento ambiental, principalmente aqueles vinculados aos efeitos do desmatamento (ALVES; CASTRO, 2003; SREEDEVI *et al.*, 2009).

A morfometria refere-se aos aspectos quantitativos do relevo como altitude, declividade e formas de terreno, o que possibilita aplicações em estudos de avaliação de fragilidade e vulnerabilidade dos ambientes. Esse tipo de análise foi introduzido por Horton (1945) visando entender a configuração e a evolução das bacias e de suas redes de drenagem. O referido autor apresentou as leis principais da composição da drenagem, demonstrando novos parâmetros e interpretações para o arranjo dos elementos que as compõem.

De acordo com Singh (1990), as características morfométricas contém informações importantes sobre sua formação e desenvolvimento porque todos os processos hidrológicos ocorrem dentro da própria bacia. O pico da vazão e a intensidade dos processos erosivos podem ser previstos com melhor insight e precisão a partir de uma avaliação morfométrica. Além disso, em bacias onde informações sobre solo, geologia, geomorfologia e etc. são escassas, a análise morfométrica fornece uma alternativa muito boa para entender os fatores subjacentes que controlam seu comportamento hidrológico.

Os atributos utilizados na composição dos parâmetros morfométricos são divididos em lineares, zonais e hipsométricos e essa divisão é condicionada pela natureza dos dados necessários para sua geração e pelo tipo de interpretação possível de ser realizada (CHRISTOFOLLETTI, 1980).

Com o avanço da tecnologia computacional e utilizando a técnica do Sistema de Informações Geográficas (SIG), a avaliação morfométrica tem sido mais precisa e seus parâmetros avaliados com mais facilidade e melhor acurácia. Tais técnicas atuam como ferramentas poderosas e flexíveis para a manipulação e análise de informações espaciais

porque permitem a compreensão da dinâmica local e regional, principalmente quando o ambiente em questão está sofrendo alterações em parte de seu curso d'água (DAAR; ROMSHOO, 2013; SINGH, 1990).

Como se sabe, nas últimas décadas, o domínio da pecuária e da agricultura em substituição da vegetação original ao longo da Amazônia brasileira tem resultado em inúmeras mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo, causando problemas no escoamento superficial, no transporte de sedimentos do solo para a água, erosão, assoreamento e eutrofização (FIGUEIREDO, 2008; NEILL *et al.*, 2001).

No município de Paragominas, Leste da Amazônia Brasileira, grandes áreas de floresta primária foram suprimidas cedendo lugar para pastos e extensos plantios. Atualmente, a vegetação resume-se em extensas áreas de vegetação secundária em diversos estágios de desenvolvimento. Além disso, uma grande porção da malha urbana do município é cortada pelo Rio Uraim, o que permite a população ter maior proximidade e necessidade de uso desse recurso para os mais variados fins (CORREA, 2017).

De acordo com a Secretária de Saneamento de Paragominas (SANEPAR), o Rio Uraim é essencial para o desenvolvimento dos serviços de saneamento realizados no município, uma vez que viabiliza a captação da água para o abastecimento público, assim como o lançamento dos efluentes domésticos tratados nas estações. Desse modo, as ações preventivas e os cuidados com este corpo hídrico representam, além de uma atitude sustentável e consciente com o meio ambiente, um ato fundamental para o desenvolvimento da sociedade de Paragominas (SANEPAR, 2017).

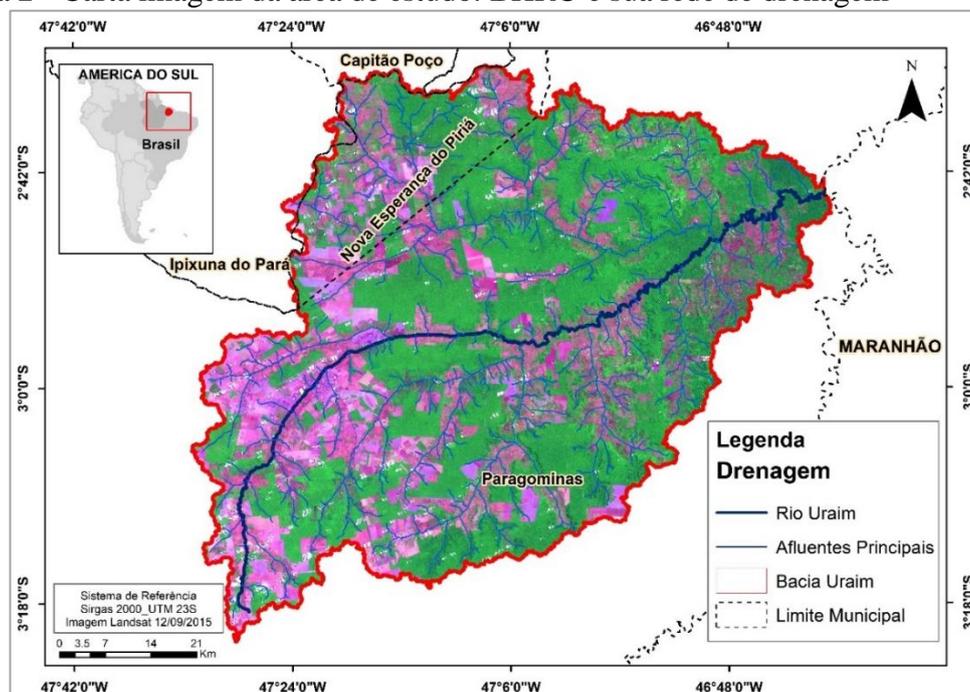
Para municípios em desenvolvimento, a possibilidade de contar com o aporte de informações desta natureza se constitui como uma alternativa real de avaliar as implicações ambientais decorrentes do planejamento (ou da falta dele). Partindo desta abordagem conceitual, este estudo objetiva determinar os parâmetros morfométricos da Bacia Hidrográfica do Rio Uraim (BHRU) para que se conheçam suas condições morfométricas e que os resultados obtidos contribuam para futuras ações de conservação e/ou recuperação da mesma.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo é focado na Bacia Hidrográfica do Rio Uraim, distribuída entre os municípios de Paragominas e Nova Esperança do Piriá, mesorregião do Nordeste Paraense. De acordo com SANEPAR, ela possui uma área em torno de 5.000 km² e ocupa aproximadamente 22% da área total de Paragominas; tem vinte e sete rios que deságuam em seu leito, contribuindo para sua vazão média anual de 268.424 m³/h. O Rio Uraim é o principal curso d'água presente em Paragominas, sendo responsável pelo abastecimento de 80% de água no município (SANEPAR). O mapa de localização da área de estudo é mostrado na figura 2.

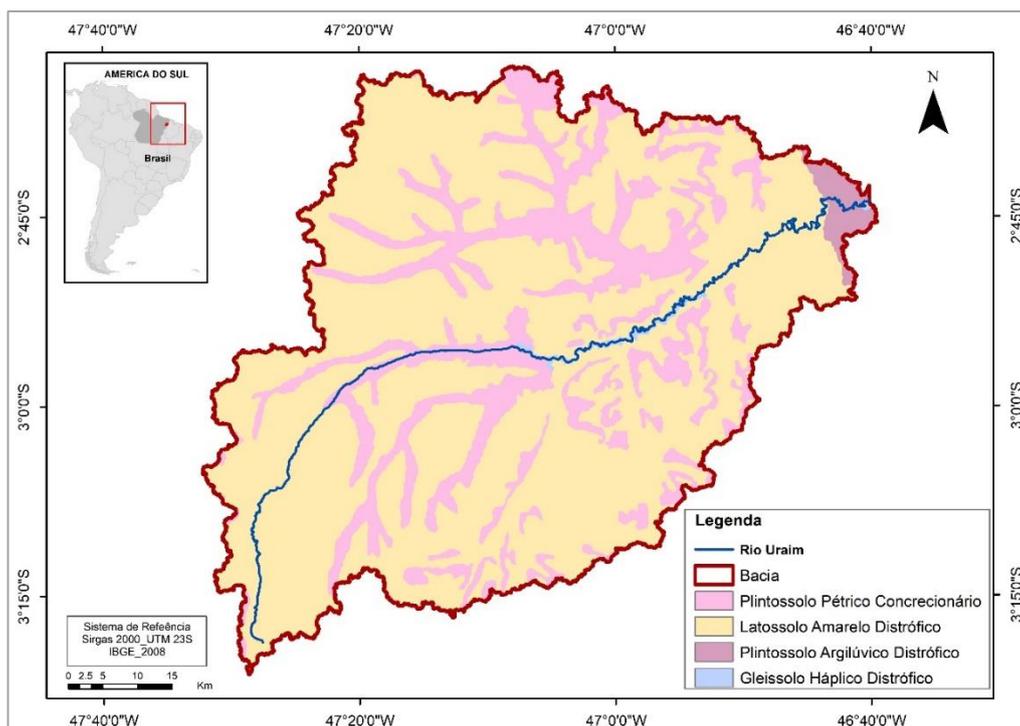
Figura 2 - Carta imagem da área de estudo: BHRU e sua rede de drenagem



Fonte: do autor.

Em relação à classificação de solos, a BHRU possui várias associações, em grande maioria denominados como latossolo amarelo, desenvolvidos no topo e declive superiores de terraços durante o Terciário e Quaternário (EMBRAPA, 2002). Outros tipos de solos são gleissolo háplico, plintossolo pétrico e plintossolo argilúvico. Para Rodrigues (2003), os solos de Paragominas, em sua maioria, são de baixa fertilidade natural, porém, de boas propriedades físicas. (figura 3).

Figura 3 - Mapa de solos da BHRU

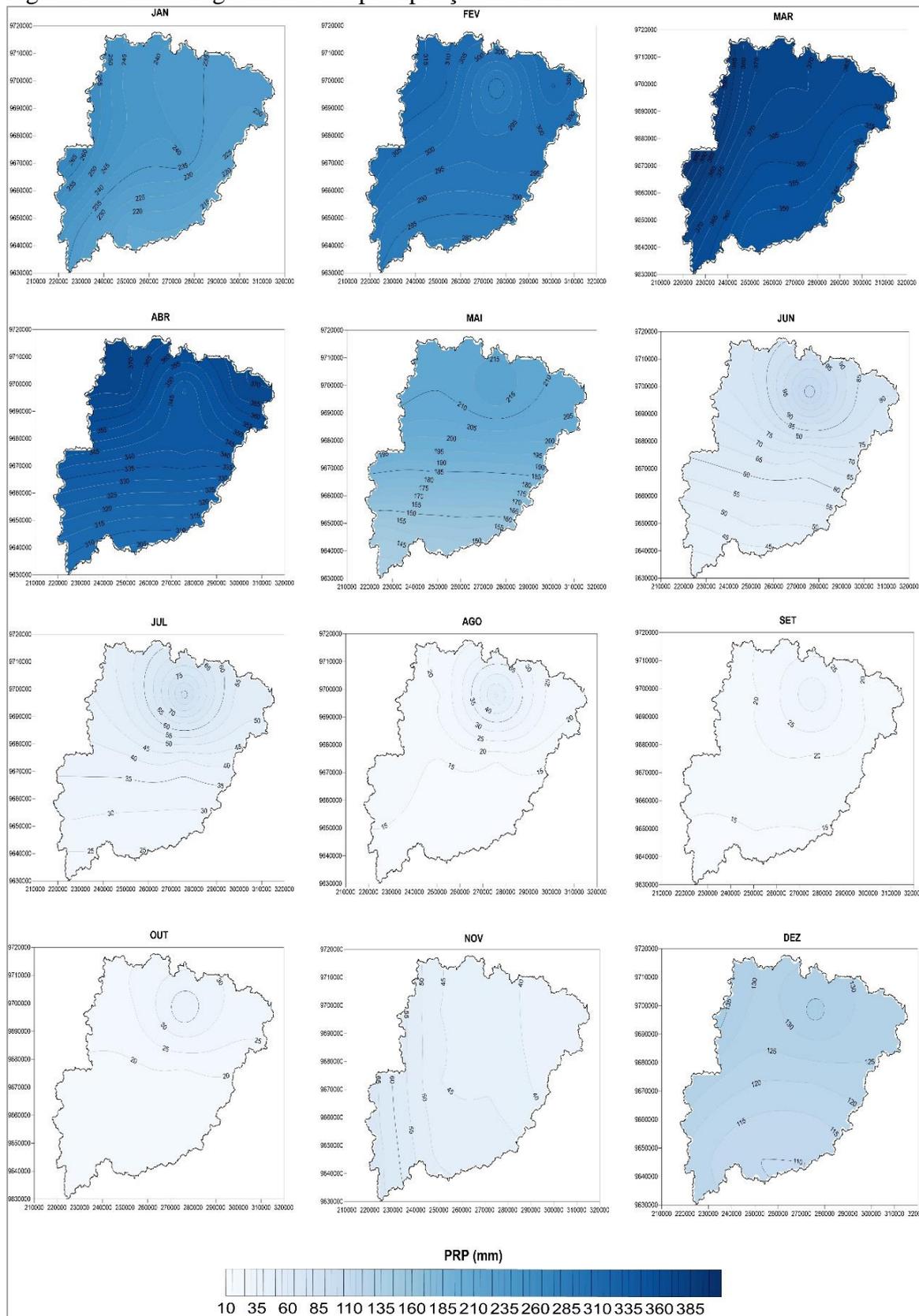


Fonte: do autor.

Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Aw, caracterizado como tropical chuvoso com estação seca bem definida. As temperaturas médias do ar variam de 25,6 °C a 27,8°C, com médias elevadas durante todo o ano. A umidade relativa do ar é alta, com média anual em torno de 80%. De acordo com Martins (2013), o índice pluviométrico encontra-se com valores entre 2.250 mm a 2.500 mm anuais e apresenta duas estações bem definidas, uma chuvosa (dezembro a maio, com excedente hídrico de 282 mm) e outra menos chuvosa (junho a novembro, a qual mostra um déficit hídrico de 512 mm).

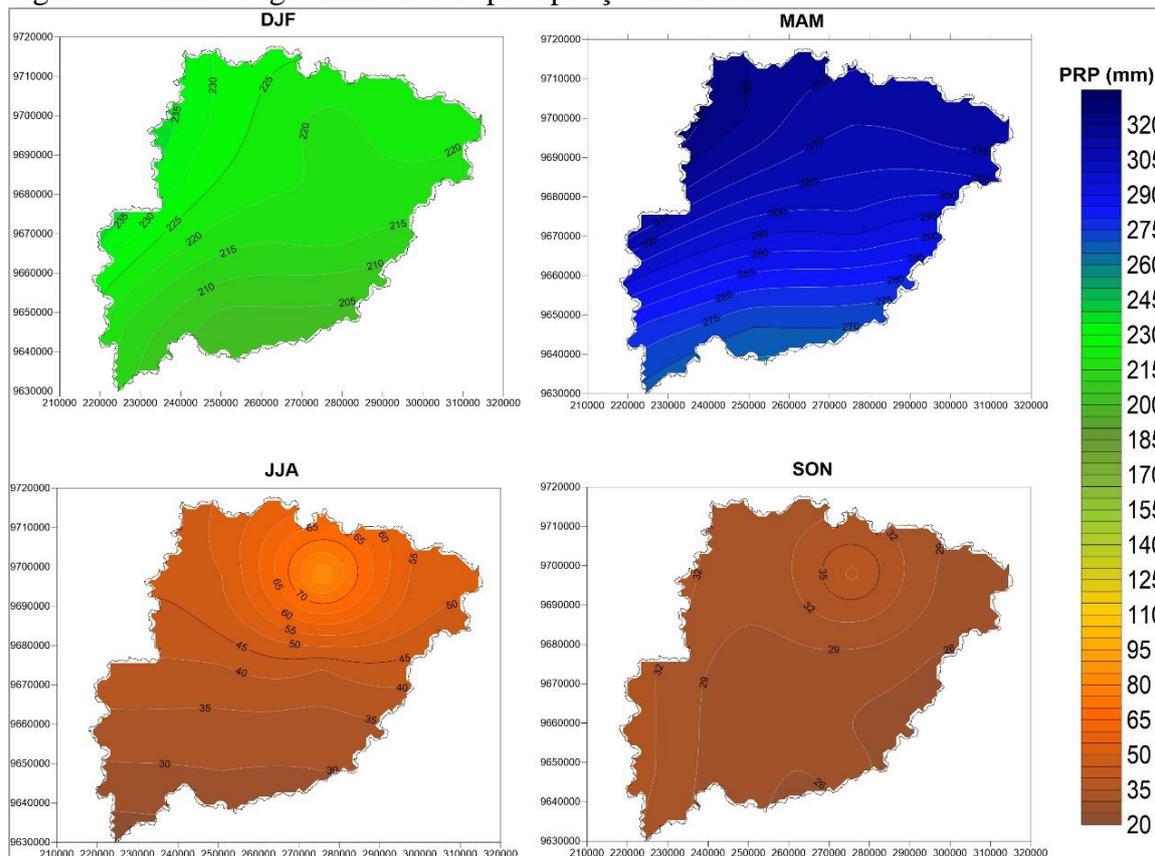
As climatologias mensal, sazonal e anual da precipitação para a bacia foram geradas a partir dos dados de 99 estações de superfície espalhadas em todo o Estado do Pará, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agência Nacional das Águas (ANA) e estão ilustradas nas figuras 4, 5 e 6. O gráfico 6 apresenta a climatologia mensal da precipitação para o município de Paragominas, correspondendo aos dados das estações Sede municipal (02°59'25\"/>

Figura 4 - Climatologia mensal da precipitação na BHRU



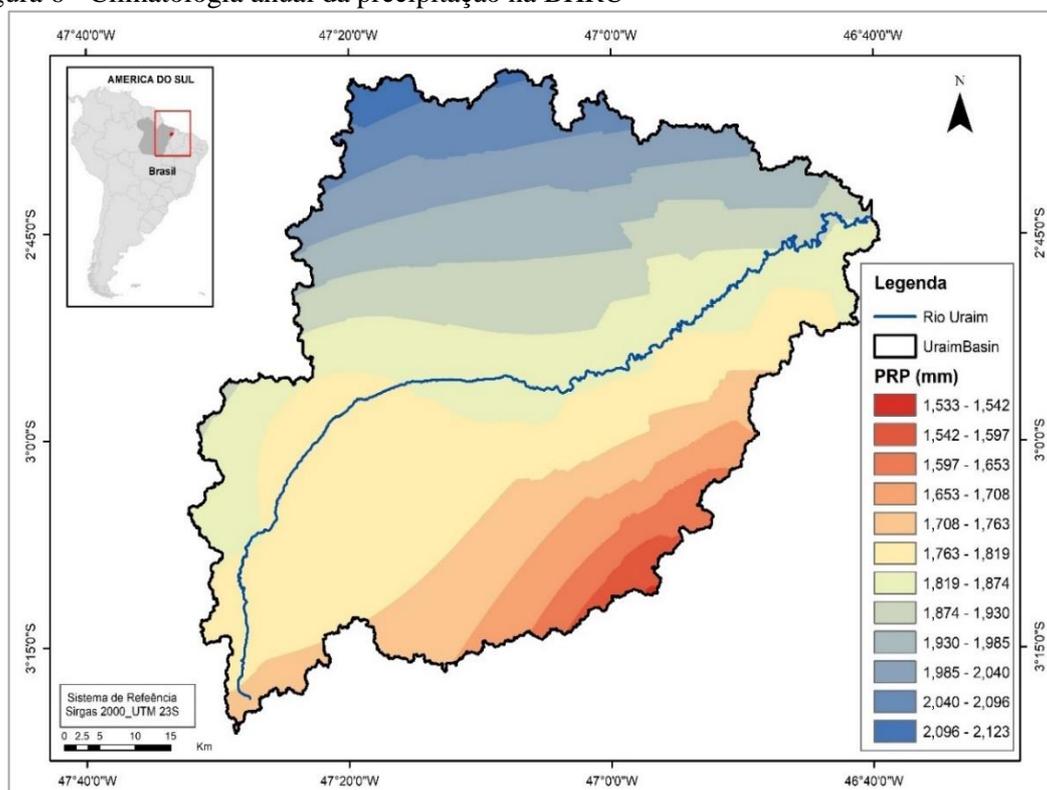
Fonte: do autor.

Figura 5 - Climatologia trimestral da precipitação na BHRU



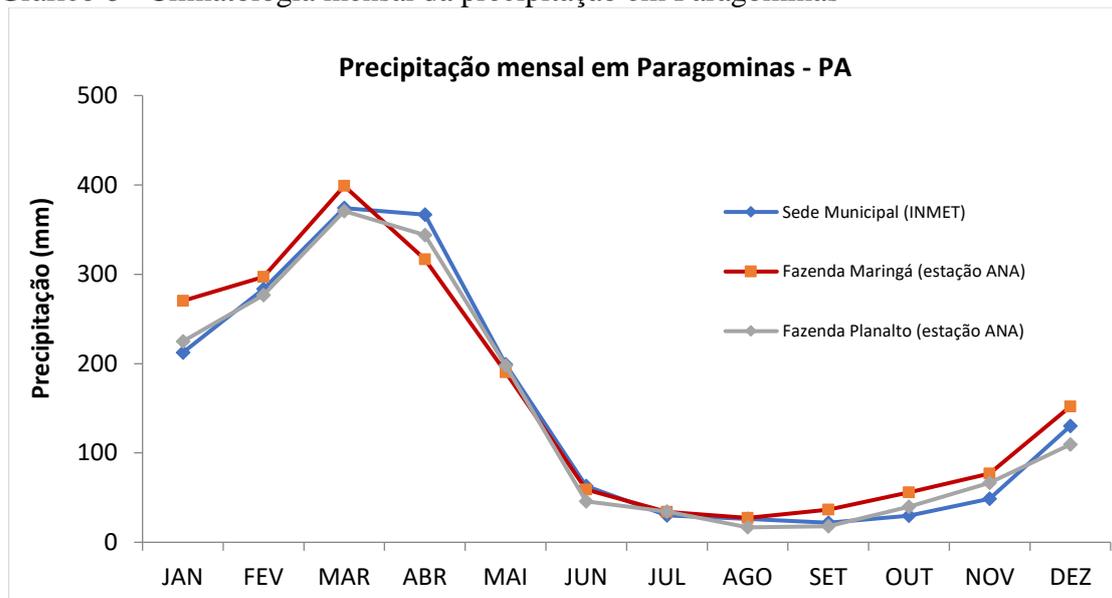
Fonte: do autor.

Figura 6 - Climatologia anual da precipitação na BHRU



Fonte: do autor.

Gráfico 6 - Climatologia mensal da precipitação em Paragominas



Fonte: do autor.

Os resultados encontrados corroboram com os de Martins (2013) para esta região. A pluviosidade média anual em Paragominas foi de aproximadamente 1.900 mm. A estação mais chuvosa inicia em dezembro e finaliza em maio, sendo o trimestre março-abril-maio o de maior volume pluviométrico, isto pode implicar em grandes excedentes hídricos e elevadas taxas de escoamento superficial neste período. De maneira geral, as variabilidades sazonal e anual mostram-se fortemente decorrentes das interações com as condições oceânicas, principalmente do Atlântico Tropical, o qual implica diretamente na duração e intensidade da estação chuvosa desta região do Estado Paraense (figuras 4 e 5 e gráfico 6).

Com relação a variabilidade espaço-temporal da precipitação na BHRU, existe um gradiente meridional no campo de precipitação anual bastante característico, onde a porção norte (sul) apresenta os máximos (mínimo) de chuvas (figura 6). Durante o período chuvoso, a maior parte dos estados da Amazônia mostra média de precipitação acumulada entre 600 mm e 2100 mm, com máximos principais sobre uma grande região que engloba a porção oeste, centro e sul (Amazonas, Acre, Rondônia, Mato Grosso, Tocantins e sul do Pará) e a porção oriental (sul do Amapá, leste do Pará e norte do Maranhão) (FIGUEROA; NOBRE, 1990). O período menos chuvoso, em grande parte da Amazônia, caracteriza-se pela baixa pluviosidade e longos períodos de estiagem, as quais atingem principalmente o Acre, Rondônia, Mato Grosso, Tocantins, centro sul do Maranhão, e sul do Amazonas e do Pará. A chuva neste período ocorre em forma de pancadas isoladas e em áreas esparsas (SOUZA; AMBRIZZI, 2003).

É interessante notar que a precipitação mensal apresenta um gradiente bastante acentuado no trimestre de junho-julho-agosto e um padrão zonal, principalmente nos meses de março, abril e maio. De acordo com Cohen *et al.* (1989), a ocorrência de sistemas de mesoescala, como as linhas de instabilidade, pode ser responsável por até 45% da precipitação na parte Leste do Pará, o que explicaria o padrão pluviométrico na estação menos chuvosa da BHRU.

Segundo Souza; Ambrizzi (2003), Souza *et al.* (2004) e Souza; Rocha (2006), a maior parte da precipitação anual ocorre entre as estações de verão e outono austral, tipicamente de dezembro a maio em associação aos padrões de circulação atmosférica quase-estacionários de grande escala associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

Embora com valores altos, a precipitação no Leste da Amazônia Brasileira sofre variações acentuadas, principalmente pelas modulações de sistemas meteorológicos que se processam desde a escala local até a grande escala, tais como os cumulonimbus isolados, linhas de instabilidade, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), entre outros (MOTA; SOUZA, 1996; OLIVEIRA; FITZJARRALD, 1994).

Amanajás; Braga (2012) determinaram os principais padrões da precipitação na Amazônia Oriental, associando-os aos principais sistemas meteorológicos que atuam na região, a partir da precipitação mensal de 128 postos pluviométricos. Os resultados mostraram existir três padrões pluviométricos que explicaram 92% da variância total dos dados. A primeira, estação chuvosa, é influenciada diretamente pela atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal mecanismo gerador de chuvas no norte da região. A segunda, estação de transição, está associada a eventos de grande e mesoescala, tal como a ZCIT e as Linhas de Instabilidade. A terceira estação, a menos chuvosa, evidencia a influência da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul, associada à penetração de sistemas frontais oriundos da região Sul e Sudeste do Brasil, bem como sistemas de escala local. A pesquisa sugere que as oscilações interanuais da precipitação sazonal são principalmente devidas à variabilidade climática associada aos eventos ENOS e de Dipolo do Atlântico. Os autores caracterizaram quatro regiões de chuvas homogêneas de acordo com as variabilidades sazonais e interanuais de precipitação na Amazônia Oriental.

2.2 Determinação dos parâmetros morfométricos

A primeira etapa se deu a partir de levantamento bibliográfico para selecionar os modelos de cálculos que pudessem atingir os objetivos propostos. A partir disto, a base de dados foi composta de material cartográfico vetorial, produtos de sensores remotos e modelo digital de elevação (MDE). Utilizou-se imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de aproximadamente 90 metros de resolução espacial (reamostradas para 30 metros), formato *GEOTIFF* de 16 *bits*, unidade de altitude em metros, disponibilizado gratuitamente pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

A geração do MDE foi importante porque possibilitou a delimitação da bacia hidrográfica pela análise dos topos das curvas de nível, além da extração da rede de drenagem (vetorial), das sub-bacias e áreas de influências (polígonos), extração das nascentes, declividade, informações de relevo, etc. Toda base foi georreferenciada utilizando o *Datum World Geodetic System* 1984 (WGS84) e projetada no sistema *Universal Transversa de Mercator* (UTM), fuso 23 sul.

Os demais materiais cartográficos em formatos *shapefiles* foram obtidos de diversas fontes, a saber: classificação dos solos (ZEE-PA, 2008), divisão geopolítica (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2012), uso e cobertura da terra (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2015), dentre outros.

As características morfométricas foram mensuradas com base nos estudos de Horton (1945), Smith (1950), Müller (1953), Schumm (1956), Strahler (1952) e Christofletti (1980), sendo determinados os parâmetros dimensionais, de composição da rede de drenagem, do padrão de drenagem e do relevo para a bacia e suas sub-bacias. A hierarquia fluvial, que consiste no processo de estabelecer a classificação de determinado curso d'água no conjunto total de uma bacia hidrográfica, foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Horton (1945) modificada por Strahler (1952), a qual considera os canais de 1ª ordem como àqueles que não apresentam ramificações; canais de 2ª ordem quando recebem dois de primeira ordem, e assim por diante.

Primeiramente, as características dimensionais foram determinadas adotando a metodologia de Horton (1945) e Strahler (1952), as quais serviram de base para o cálculo dos demais parâmetros. Os quadros 1 e 2 resumem conceitualmente cada parâmetro analisado.

Quadro 1 - Processo metodológico aplicado na análise morfométrica

Característica dimensional	Descrição
Área (A)	Toda a área drenada pelo conjunto do sistema fluvial incluída entre seus divisores topográficos projetada em plano horizontal, expressa em km ² . (HORTON, 1945).
Perímetro (P)	Comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas, expresso em km. (SMITH, 1950).
Comprimento axial da bacia (L _b)	Maior dimensão linear que a bacia apresenta num eixo transversal ao por ela formado, expresso em km. (STRAHLER, 1958).
Comprimento do rio principal (Cl)	Distância vale ao longo do canal fluvial da desembocadura até uma determinada nascente, onde o canal de maior ordem é o rio principal, expresso em km. (HORTON, 1945).
Comprimento vetorial do rio principal (L _v)	Linha reta que une a foz até o ponto extremo sobre a linha do divisor de águas, seguindo a direção aproximada do vale principal, expresso em km. (SCHUM, 1956).

Fonte: do autor.

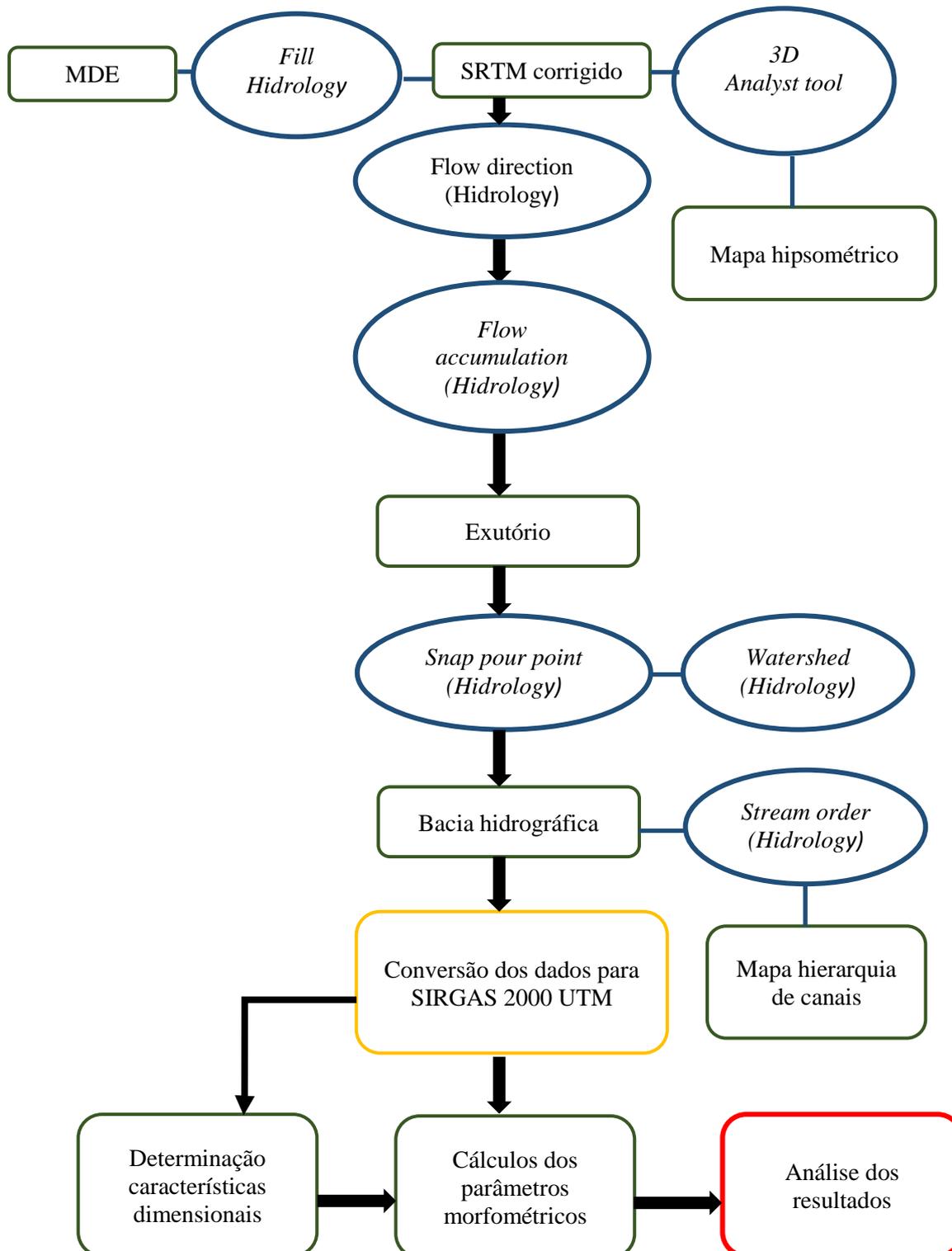
Quadro 2 - Parâmetros morfométricos calculados para a BHRU

Parâmetro	Equação	Referência
Coefficiente de compacidade	$K_c = \frac{0.28P}{A^{0.5}}$	Garcez & Alvarez (1998)
Fator de forma	$K_f = \frac{A}{L_b^{0.5}}$	Horton (1932).
Índice de circularidade	$I_c = 12,57 \frac{A}{P^2}$	Miller (1953)
Índice de sinuosidade	$I_s = \frac{Cl}{L_v}$	Schumm (1977)
Densidade hidrográfica	$D_h = \frac{N_u}{A}$	Christofoletti (1969)
Gradiente de canais	$G_c = \frac{H_{máx}}{Cl}$	Horton (1945); Freitas (1952)
Relação de relevo	$R_r = \frac{\Delta H}{Cl}$	Schumm (1956)
Densidade de drenagem	$D_d = \frac{\sum L_u}{A}$	Horton (1945)
Coefficiente de manutenção	$C_m = \frac{1}{D_d}$	Schumm (1956)
Índice de rugosidade	$I_r = \Delta H \times D_d$	Strahler (1958).
Extensão do percurso superficial	$E_{ps} = 100 \frac{1}{2D_d}$	Horton (1945).
Textura da topografia	$T_t = 10^{0,219649+1,115 \log D_d}$	França (1968)
Relação de bifurcação	$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$	Horton (1945)

Fonte: do autor. H_{máx} é a elevação máxima; ΔH é a amplitude altimétrica; L_u é o comprimento total dos canais; N_u é o número total de canais de certa ordem fluvial.

Conforme a figura 7, a metodologia deste capítulo pode ser resumida nas etapas em: (i) tratamento da imagem SRTM; (ii) delimitação automatizada da bacia; (iii) cálculo dos atributos morfométricos; e (iv) análises dos resultados.

Figura 7 - Processo para os cálculos morfométricos da bacia hidrográfica



Fonte: do autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise morfométrica

3.1.1 Aspectos dimensionais

A tabela 1 apresenta as características dimensionais da BHRU. Observou-se que a bacia possui uma área total de drenagem de 5.112,76 km², com perímetro e comprimento axial de 714,06 km e 114,60 km respectivamente. Delimitou-se sete sub-bacias, as quais variaram entre 283,88 km² a 1.864,08 km² em área, sendo a sub-bacia SB07 e SB06 as de menor e maior área, respectivamente. Devido a irregularidade no formato das sub-bacias, os perímetros não acompanharam a tendência das áreas, portanto, a bacia de menor e maior perímetro foram SB04 (110,3 km) e SB06 (359,75 km), respectivamente.

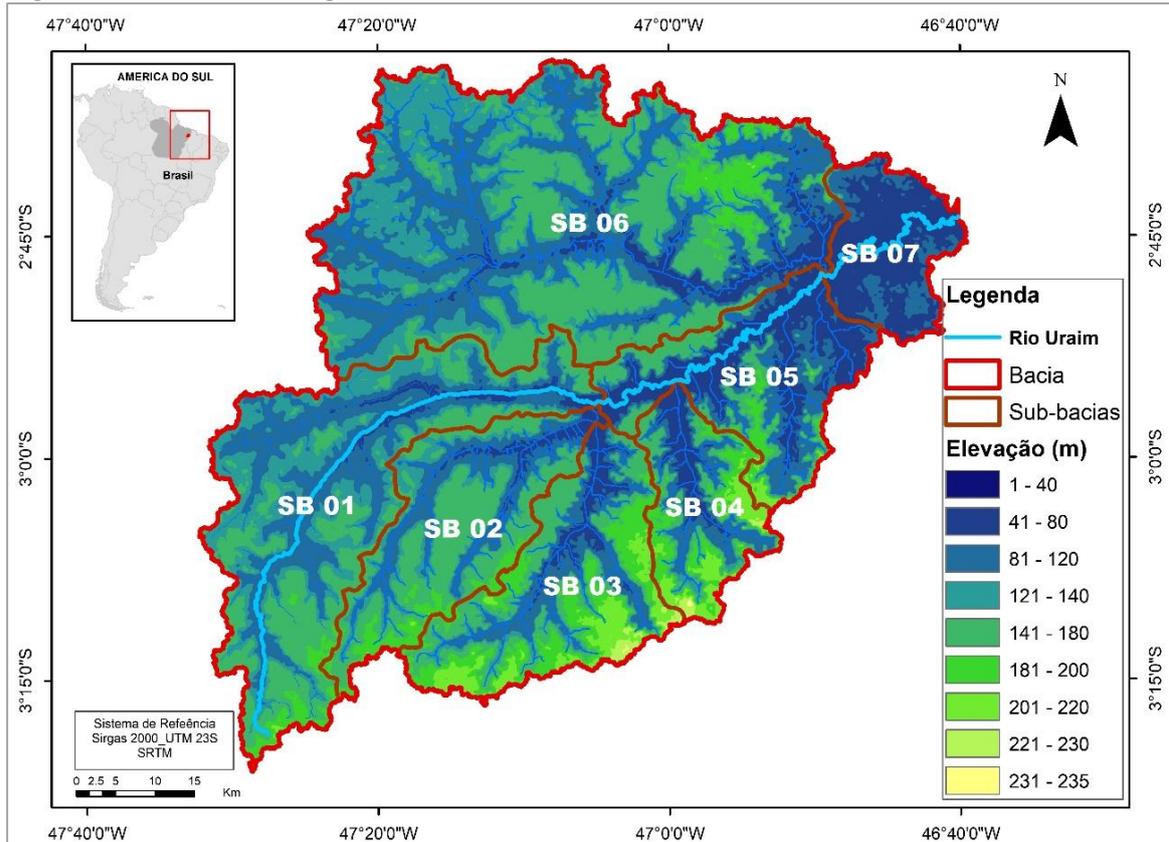
Tabela 1- Medidas dimensionais da BHRU e sub-bacias

Bacia e sub-bacias	Área (km ²)	Perímetro (km)	Comprimento axial (km)	Comprimento do canal principal (km)	Comprimento vetorial do canal principal (km)
SB01	1.011,35	293,54	61,50	82,81	59,02
SB02	537,53	152,86	49,27	57,08	44,84
SB03	592,98	168,22	40,02	45,11	36,88
SB04	318,79	110,30	29,29	29,66	27,86
SB05	504,15	153,44	33,40	54,81	32,69
SB06	1.864,08	359,75	62,28	92,01	55,19
SB07	283,88	117,63	18,90	43,00	18,40
BHRU	5.112,76	714,06	114,60	180,74	108,41

Fonte: do autor.

O sistema de drenagem é constituído por 634 canais, sendo o Uraim o rio principal com extensão de 180,74 km e comprimento vetorial de 108,41 km. Quanto aos seus tributários (ramificações), eles perfazem um total de 1.926,5 km, com canais de comprimento mínimo, médio e máximo de 0,057 km, 4,82 km e 92,33 km, respectivamente. Verifica-se que, embora a área da SB07 seja menor do que a área da SB04, o rio principal na SB07 é mais sinuoso, o que aumentará o tempo de concentração do escoamento em sua calha, atenuando a vazão de pico no exutório. Este comportamento pode ser esclarecido por conta do comprimento do rio principal e o comprimento axial serem maiores na SB07 do que na SB04. A figura 8 apresenta as sub-bacias e suas respectivas rede de drenagens, além da elevação em metros.

Figura 8 - Rede de drenagem e sub-bacias da BHRU



Fonte: do autor.

3.1.2 Hierarquia fluvial, Relação de bifurcação (R_b) e Índice de sinuosidade (I_s)

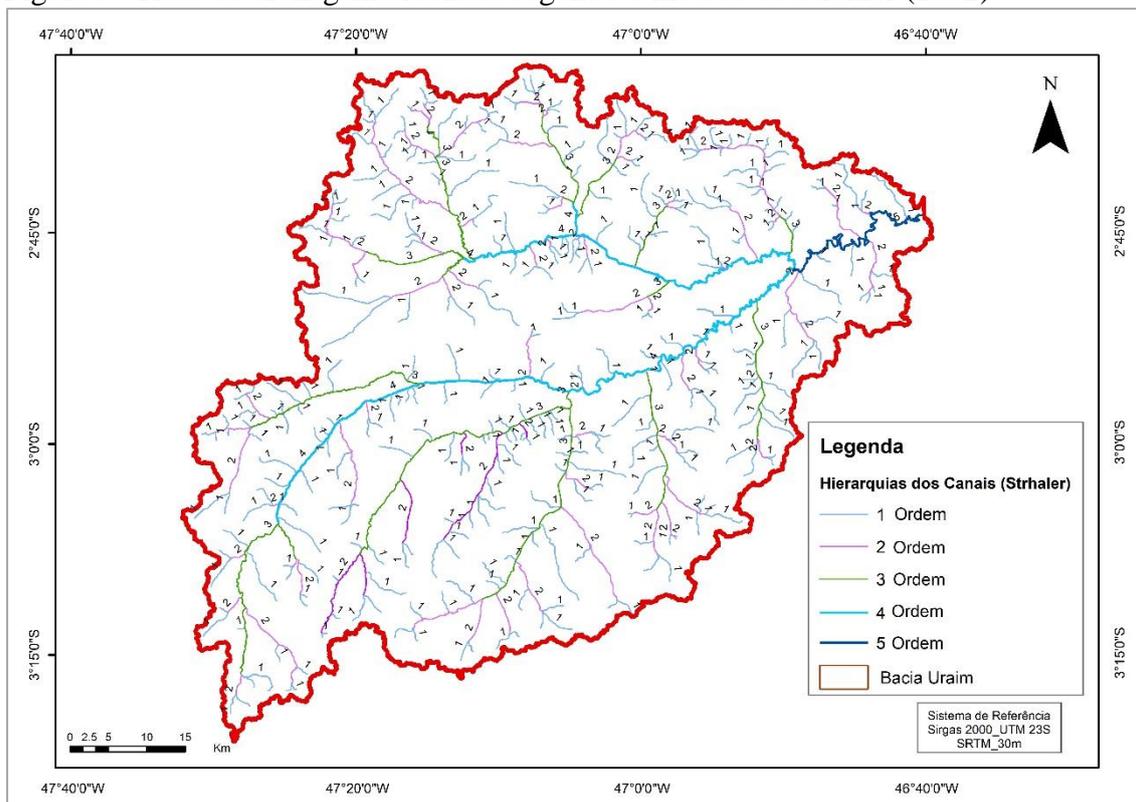
O padrão da drenagem constatado é do tipo dentrítico por se assemelhar a configuração de uma árvore. Este padrão se desenvolve sobre estruturas rochosas de resistência uniforme ou em estruturas sedimentares horizontalmente distribuídas (CHRISTOFLETTI, 1980).

A ordenação de canais revelou que o sistema de drenagem tem grau de ramificação de 5ª ordem e isto facilita a identificação de importantes aspectos. A BHRU possui 336 canais de 1ª ordem, 143 canais de 2ª ordem, 91 canais de 3ª ordem, 54 canais de 4ª ordem e 10 canais de 5ª ordem. Com relação aos canais de 1ª ordem, observa-se que são médios e mostram 3 km de comprimento em média. Já os de 2ª e 3ª ordens são relativamente menores, tendo comprimentos médios de 2,79 km e 2,88 km, respectivamente.

Avaliando a rede de drenagem em relação às dimensões das sub-bacias, nota-se tendência de haver maior extensão dos cursos de água nas maiores sub-bacias, sendo a SB01 e SB06 as que apresentam maior quantidade de canais e comprimento total da rede

de drenagem. A mesma tendência é verificada no total dos tributários de 1ª ordem e pode ser atribuída à área de captação da precipitação que, associada às classes de solo e ao relevo, permite que o escoamento superficial gerado escave a rede de drenagem nos pontos de menor resistência à ação cisalhante de escoamento sobre o solo (CALIL *et al*, 2012). A figura 9 mostra a hierarquia fluvial da bacia.

Figura 9 - Rede de drenagem ordenada segundo o método de Strahler (1952)



Fonte: do autor.

A razão de bifurcação (R_b) apresentou valor médio de 2,75 e corrobora com o que afirmam Horton (1945) e Strahler (1952), ou seja, a relação de bifurcação nunca pode ser inferior a 2,0. Este resultado não permaneceu precisamente constante de uma ordem para outra por conta da possibilidade das variações na geometria das sub-bacias, mas tendeu a ser constante. O fato de ter apresentado valor de R_b baixo indica que há um pico hidrográfico de atraso, ou seja, a bacia não possui pico com potencial para inundações repentinas durante eventos de tempestade (HOWARD, 1990; RAKESH *et al*, 2000). Além do mais, infere-se que a BHRU tem solos permeáveis, pois quanto maior é o valor de R_b , o solo será menos permeável (FRANÇA, 1968).

A sinuosidade (I_s) variou de 1,0 a 4,0 e rios com uma sinuosidade acima (abaixo) de 1,5 são chamados sinuosos (médio sinuosos) (WOLMAN; MILLER, 1964). Nas sub-bacias SB01, SB02, SB03 e SB04 foram inferiores a 1,5 e indica tendências para canais

retilíneos. O curso principal da BHRU e SB05, SB06, SB07 apresentaram Is superiores a 1,5 e são, portanto, tortuosos. Assim, isto pode aumentar o tempo de concentração em sua calha, reduzindo o pico de cheia na bacia. As informações estão dispostas na tabela 2.

Tabela 2 - Hierarquia, número e comprimento total dos canais e índice de sinuosidade

Bacia e sub-bacias	Canais 1ª ordem	Canais 2ª ordem	Canais 3ª ordem	Canais 4ª ordem	Canais 5ª ordem	Total de canais	Comprimento total dos canais (km)	Índice de Sinuosidade
SB01	69	23	18	20		130	337,39	1,4
SB02	40	12	13			65	204,99	1,3
SB03	34	13	10			57	198,68	1,2
SB04	20	10	8			38	113,06	1,1
SB05	33	9	9	16		67	211,51	1,7
SB06	127	69	33	18		247	710,86	1,7
SB07	13	7			10	30	109,97	2,3
BHRU	336	143	91	54	10	634	1926,50	1,7

Fonte: do autor.

É importante destacar que a ordem da drenagem e a relação de bifurcação estão relacionados com o potencial de uso dos recursos naturais, portanto, estas informações são relevantes ao planejamento do uso e ocupação da bacia, uma vez que quanto mais ramificada for a rede de drenagem maior será sua eficiência na integração entre os diversos componentes e processos que ocorrem no interior da mesma.

3.1.3 Fator forma (K_f), Coeficiente compacidade (K_c) e Índice de circularidade (I_c)

O fator de forma (K_f) da BHRU foi igual a 0,39 e isto demonstra que a mesma possui formato mais alongado, ou seja, baixa tendência a enchentes repentinas (VILLELA; MATTOS, 1975). Com exceção da SB07, as demais apresentaram baixos valores de K_f . Isto permite entender que, por ser alongada e estreita, há menor possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão em condições climáticas normais. Ademais, a contribuição dos tributários atinge o curso d'água principal em vários pontos ao contrário do que ocorreria se fosse uma bacia com tendência circular (tabela 3).

Tabela 3 - Fator de forma, Coeficiente de compacidade e índice de circularidade

Bacia e sub-bacias	Fator de forma	Coeficiente de compacidade	Índice de circularidade
SB01	0,27	2,58	0,15
SB02	0,22	1,85	0,29
SB03	0,37	1,93	0,26
SB04	0,37	1,73	0,33
SB05	0,45	1,91	0,27
SB06	0,48	2,33	0,18
SB07	0,79	1,95	0,26
BHRU	0,39	2,80	0,13

Fonte: do autor.

A bacia apresentou coeficiente de compacidade (K_c) de 2,80 e os valores variaram entre 1,73 e 2,58 nas sub-bacias. Com relação ao índice de circularidade (I_c), os valores mostraram-se baixos para a bacia ($I_c = 0,13$) e variação de 0,17 a 0,33 nas sub-bacias. Os resultados reafirmam sua forma alongada, seu bom processo de escoamento e uma menor concentração na descarga dos tributários, pois estes se dão distribuídos ao longo de vários pontos do rio principal. Os valores de K_c permitem estimar um longo tempo de concentração da água precipitada no interior da BHRU e uma baixa tendência a enchentes, uma vez que estão bem acima da unidade.

3.1.4 Densidade hidrográfica (D_h), Densidade de drenagem (D_d), Extensão do percurso superficial (E_{ps}) e Coeficiente de manutenção (C_m)

Os resultados das densidades de hidrográfica e de drenagem, extensão do percurso superficial e do coeficiente de manutenção estão dispostos na tabela 4. O parâmetro que representa a distância média percorrida pelas enxurradas antes de encontrar um canal permanente é a extensão do percurso superficial e o resultado obtido para a bacia foi de 132,7 m e variação entre 119,2 m e 149,2 m nas sub-bacias, indicando que a BHRU pode ter uma textura grosseira, pois apresenta um considerável espaçamento entre os seus canais.

Tabela 4 - Densidades hidrográfica, Densidade de drenagem, Extensão do percurso superficial e Coeficiente de manutenção

Bacia e sub-bacias	D_h (canais.km ⁻²)	D_d (km.km ⁻²)	E_{ps} (m)	C_m (km ² .km ⁻¹)
SB01	0,13	0,37	133,99	2,68
SB02	0,12	0,38	131,11	2,62
SB03	0,10	0,34	149,23	2,98
SB04	0,12	0,35	140,98	2,82
SB05	0,13	0,42	119,18	2,38
SB06	0,13	0,38	131,11	2,62
SB07	0,11	0,39	129,07	2,58
BHRU	0,12	0,38	132,70	2,65

Fonte: do autor.

A densidade hidrográfica é um índice que fornece o número de rios por quilômetro quadrado de área hidrológica e, neste estudo, o valor encontrado para a bacia foi de aproximadamente 0,12 canais/km² conectados entre si e capazes de drenar água superficial desta área. De acordo com a classificação de Lollo (1995), pode-se considerar uma bacia de baixa densidade hidrográfica, pois sua frequência de canais é menor que 3 canais/km². Com relação à densidade de drenagem, o resultado de 0,38 km/km² indica uma baixa capacidade de drenagem, ou seja, com sistema pouco desenvolvido apesar da grande quantidade de ramificações da sua rede (BELTRAME, 1994).

Os valores baixos de D_d nas sub-bacias revelam que elas podem ser compostas de material subsuperficial permeável, com boa cobertura vegetal e baixo relevo, resultando em mais capacidade de infiltração e são bons locais para recarga de água subterrânea (LUO, 2000).

Já o coeficiente de manutenção de 2,65 km²/km revela que nessa bacia é necessária uma área de 2,65 km² para manter ativo um 1 km de canal fluvial. Com esse dado, é possível estimar qual seria a área necessária para a manutenção de 1 m de curso fluvial perene, o que permite raciocinar sobre o balanço hidrodinâmico da bacia.

3.1.5 Textura topográfica (T_t), Índice de rugosidade (I_r), Gradiente de canais (G_c), Relação de relevo (R_r) e Altimetria

O levantamento de dados altimétricos, textura topográfica, índice de rugosidade e relação de relevo estão mostrados na tabela 5. Amplitude altimétrica corresponde à diferença entre a foz e a maior altitude situada num determinado ponto da área da bacia. Os resultados demonstram que a bacia apresenta 118,0 m de altitude média dos pixels do MDE, variando de 1,0 m (altitude mínima) a 235,0 m (altitude máxima). A declividade

mínima e máxima encontradas foram 0% (relevo plano) e 26,93% (relevo fortemente ondulado), com uma média de 2,72 % descritiva de um relevo predominantemente plano.

Tabela 5 - Textura topográfica, Índice de rugosidade, Gradiente de canais, Relação de relevo e Altimetria

Bacia e sub-bacias	T_t (km)	I_r (m.km ⁻¹ .km ⁻²)	G_c (m.km ⁻¹)	R_r (m.km ⁻¹)	Amplitude altimétrica (m)	Altitude média (m)	Elevação máxima (m)	Elevação mínima (m)
SB01	0,55	76,83	2,5	2,49	206	104	207	1
SB02	0,57	54,99	3,6	2,53	144	132	204	60
SB03	0,49	77,03	5,2	5,10	230	119	234	4
SB04	0,52	82,92	7,9	7,88	234	118	235	1
SB05	0,63	88,82	4,0	3,86	212	114	220	8
SB06	0,57	79,32	2,3	2,26	208	105	209	1
SB07	0,58	72,19	4,4	4,33	186	94	187	1
BHRU	0,56	88,10	1,3	1,29	234	118	235	1

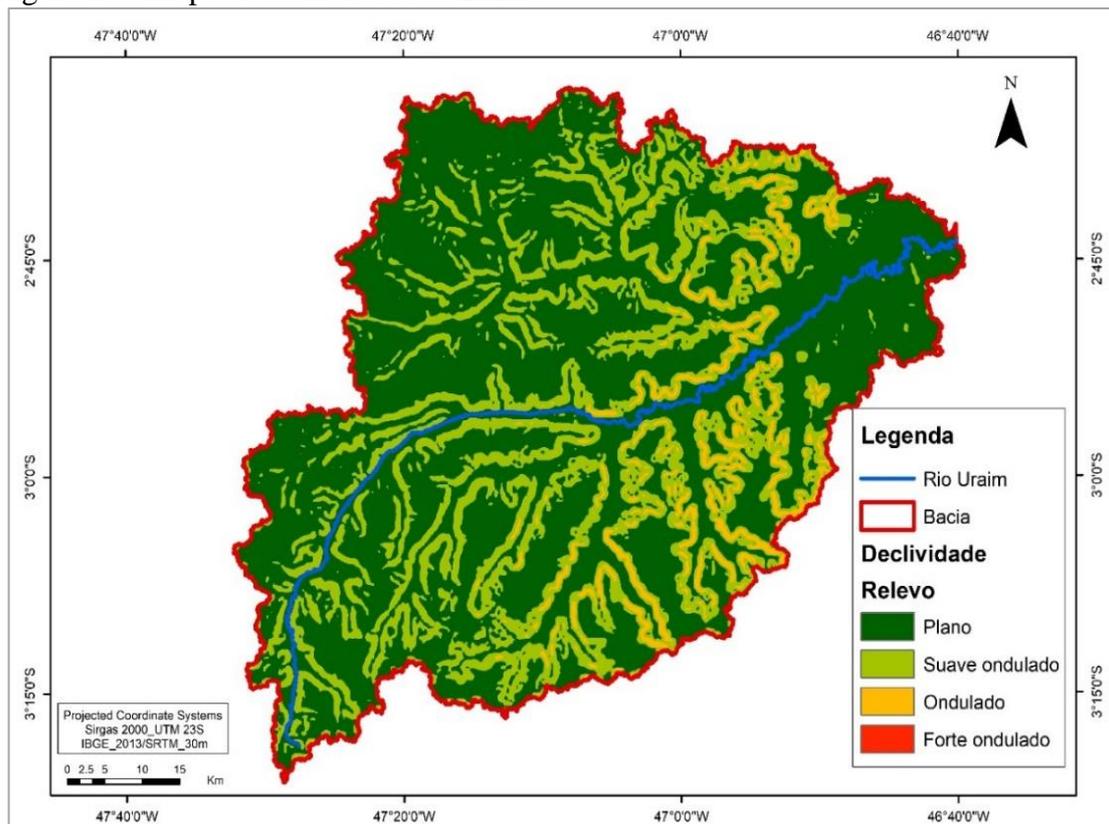
Fonte: do autor.

Essas variações no declive do relevo podem estar relacionadas com a quantidade de luz incidente, temperaturas, pressão e a umidade relativa do ar. Em altitudes elevadas a temperatura é baixa e apenas uma pequena quantidade de energia é utilizada para evaporar água, ao passo que quase toda a energia absorvida é usada na evaporação da água em altitudes baixas, fazendo com que haja mais evaporação.

Podendo ser expressa em porcentagem ou em grau (100% correspondem a 45° de inclinação), o gradiente de canais (G_c) tem a finalidade de encontrar a declividade média do canal analisado. Neste estudo, o valor de G_c para a bacia foi 1,3 m/km, indicando que a BHRU possui canais com moderada capacidade de escoamento ao se considerar a totalidade da bacia. Entretanto, os maiores valores foram observados nas sub-bacias SB03 e SB04, onde a variação altimétrica e cotas acentuadas de declividade tem percentuais de gradiente (% declividade média) mais elevados.

A textura de topografia foi de 0,56 km com variação entre 0,49 km a 0,63 km nas sub-bacias, sendo assim, é definida como uma bacia de textura grosseira conforme classifica França (1968). Isto indica o poder de entalhamento topográfico pelos rios e o grau erosivo da área (CHRISTOFOLETTI, 1969). Os índices de rugosidade demonstram que a bacia possui um moderado risco de degradação, pois mesmo apresentando relevo plano, há uma considerada variação entre a cabeceira e a seção de referência, com desníveis associados à sua rede de drenagem. Os valores da relação de relevo encontrados foram de 1,29 m/km para a bacia e variação de 2,26 m/km a 7,88 m/km nas sub-bacias, ratificando seu padrão plano. A figura 10 mostra a distribuição da declividade na BHRU.

Figura 10 - Mapa de declividade da BHRU



Fonte: do autor.

A declividade relaciona-se com a velocidade em que se dá o escoamento superficial, afetando o tempo que a água da chuva leva para concentrar-se nos leitos fluviais da rede de drenagem (VILLELA; MATOS, 1975), assim, os picos de enchente, infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos vai depender da rapidez com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia. Portanto, ainda que a bacia não apresente índices morfométricos que a classifique como suscetível a enchentes, o predomínio de baixas declividades pode se constituir num indicativo de elevada possibilidade de enchentes, sobretudo por se tratar de áreas com inclinações inferiores a 6% e conectadas com a rede de drenagem em sua grande maioria. Esta constatação reforça o pressuposto de VALERIANO (2008), ao associar a declividade do terreno como uma variável básica para a segmentação de áreas em praticamente todos os procedimentos de planejamento territorial.

Diante dos expostos, fica claro que o conhecimento sobre a declividade representa um dos parâmetros mais significativos ao planejamento e gestão de uso dos recursos naturais de uma bacia hidrográfica, à medida que é tocante à relação entre as diversas formas e caminhos que a água pode assumir ao entrar no sistema da bacia hidrográfica, exercendo influência sobre a distribuição da cobertura vegetal, processos erosivos e

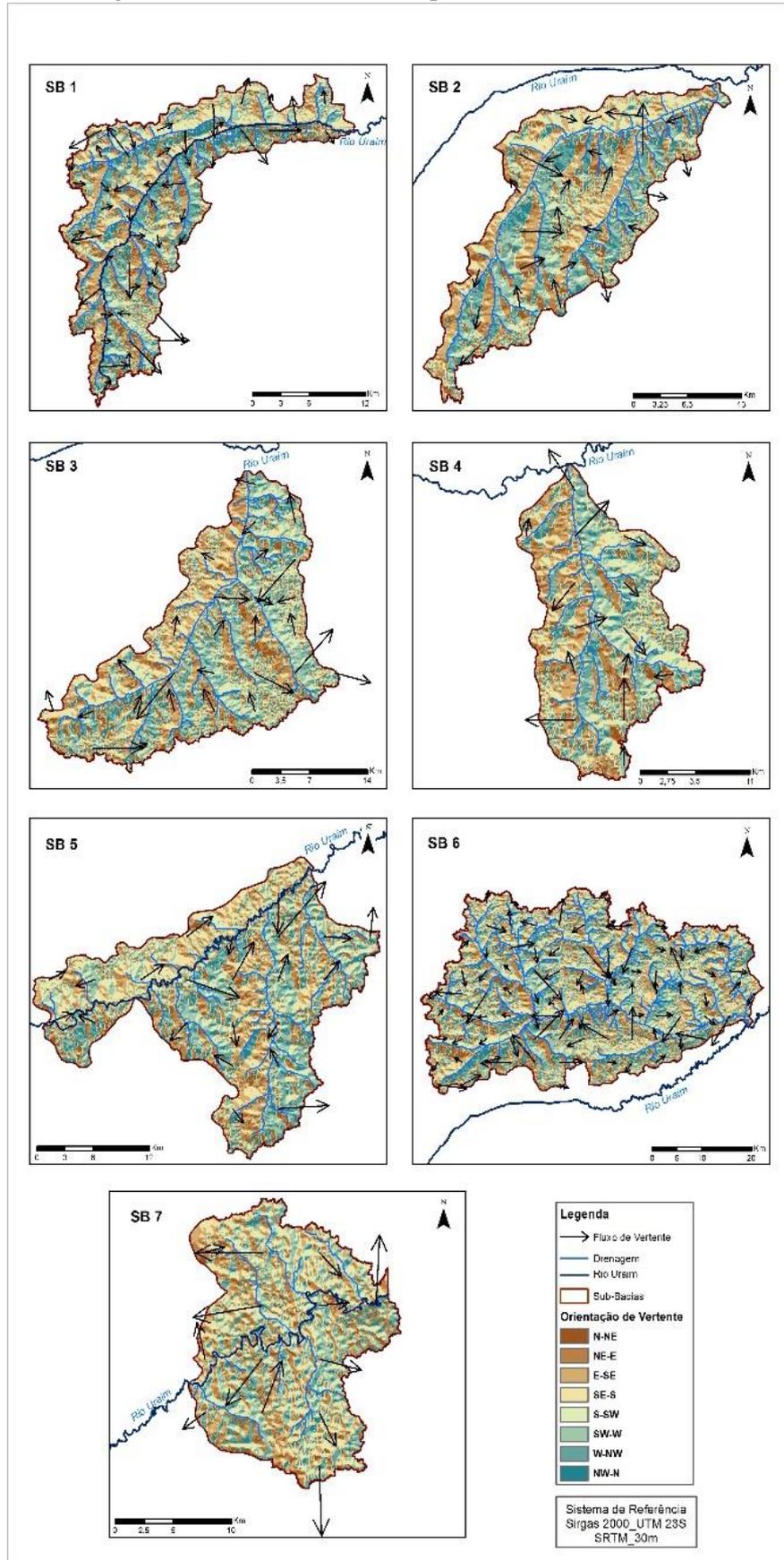
pedogênicos, exposição à luz solar e interação humana em práticas como a agricultura. Sousa *et al.* (2016) ainda enfatiza que é a declividade que influencia na quantidade e qualidade da água absorvida pelo solo e/ou evapotranspirada para a atmosfera ou escoada na rede de drenagem, pois é fator que interfere na velocidade do escoamento e na quantidade de infiltração e evapotranspiração, além do aumento no potencial de transporte de sedimento das porções mais elevadas do relevo.

3.2 Orientação das vertentes

A orientação de vertentes pode ser definida como o ângulo azimutal correspondente à maior inclinação do terreno, no sentido descendente e é expressa de 0 a 360 graus (AMBDATA, 2011). Ela compõe, juntamente com a declividade, a geometria de exposição da superfície do terreno em representações sob esquema de relevo. O objetivo do mapa de orientação de vertentes (figura 11) é demonstrar a direção da variação de declividade, ou seja, a orientação da vertente do terreno.

Verifica-se uma complexidade na disposição das vertentes na BHRU, justificada pelos vários sentidos de escoamento de fluxo para a bacia. Entretanto, destacam-se vertentes orientadas predominantemente nos sentidos N-NE, NE-E. Para Lepsch (2002), as superfícies próximas ao trópico tendem a apresentar vertentes voltadas para o norte mais quentes e secas que as para o sul. É válido ressaltar que essas vertentes recebem uma quantidade de radiação solar muito superior do que as voltadas para o sul, favorecendo maior intemperismo das mesmas. Como ressalta Cunha (2016), essas características podem estar associadas à presença de solos arenosos combinados com escassos fragmentos de cobertura vegetal decorrente das atividades da pecuária extensiva sem práticas conservacionistas, promovendo a aceleração dos processos erosivos na bacia.

Figura 11 - Orientação das vertentes e fluxo superficial nas sub-bacias



Fonte: do autor.

3.3 Uso e cobertura da terra e concentração de nascentes

As mudanças de uso e cobertura da terra são apontadas por vários estudos como causadoras de danos ambientais à medida que a floresta é convertida a outros usos. A dinâmica de uso e cobertura da terra entre 2004 e 2014 foi analisada a partir dos dados do TerraClass, do INPE. Em resumo, o Terra Class é um projeto que gera dados espacialmente explícitos, qualificando os desflorestamentos na Amazônia Legal em 12 categorias distintas, com destaque para vegetação secundária, agricultura anual e pastagens. Para alcançar os objetivos da tese, foi feita uma reclassificação agrupando algumas classes na mesma categoria, a saber (tabela 6).

Tabela 6 - Reagrupamento das classes de uso e cobertura da terra

Mapa TerraClass (2004 e 2014)	Mapa da tese
Agricultura anual	Agricultura anual
Área Urbana + Outros	Outros
Pasto com solo exposto + Pasto limpo + Pasto sujo + Mosaico de ocupações	Pastagem
Floresta + Vegetação secundária	Floresta

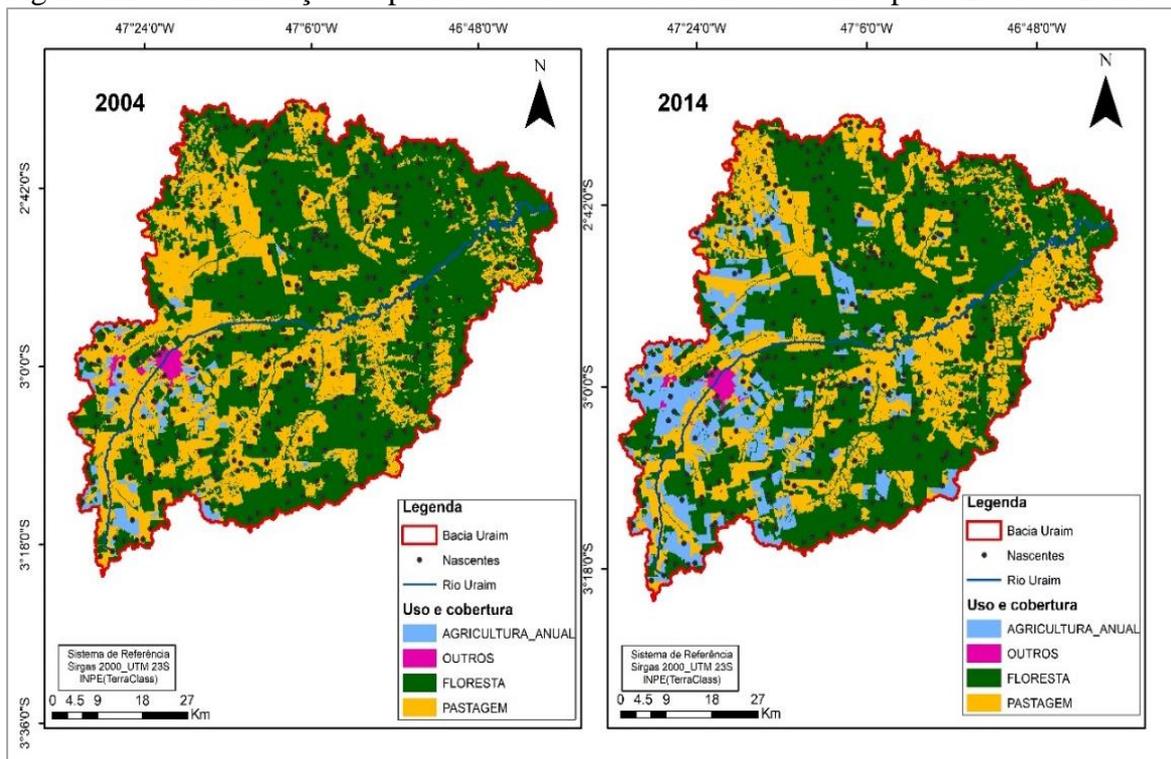
Fonte: do autor.

Analisando os dados de uso e ocupação da terra entre 2004 e 2014, percebe-se perda significativa de floresta e pastagem, e aumento da agricultura anual principalmente sobre as áreas de pasto. Em 2004, agricultura anual representava 2,67% (136,6 km²) da área total da bacia, ao passo que em 2014 totalizava 11,57% (591,36 km²), isto é, um aumento de 454,6 km² em onze anos. De acordo com o Terra Class (INPE, 2014), a taxa média de crescimento da área ocupada com agricultura anual foi de 8% ao ano entre 2004 e 2014 em toda a Amazônia Legal.

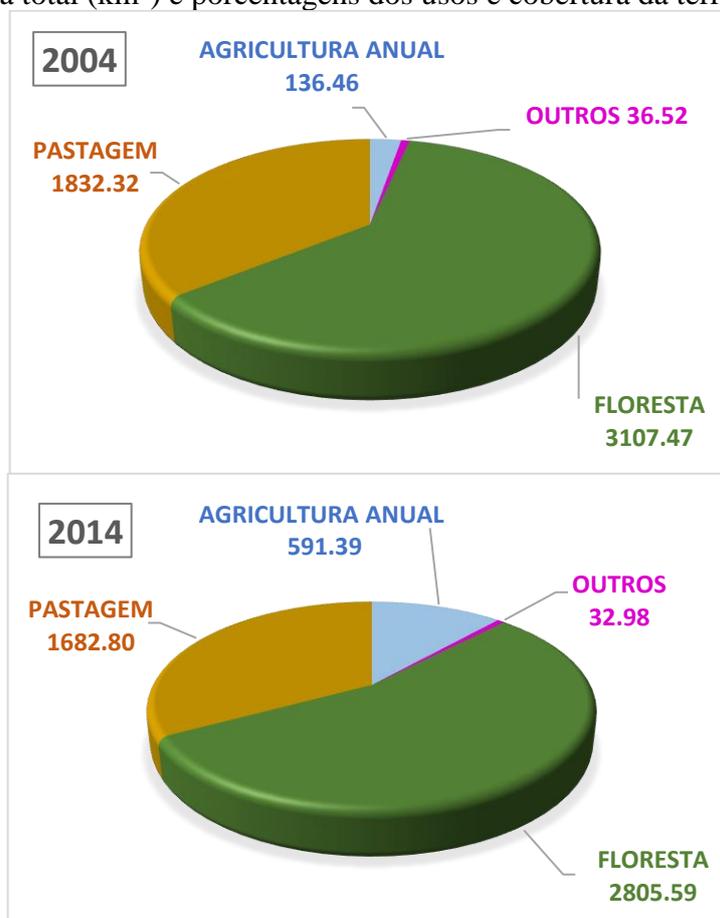
Apesar disso, as pastagens continuaram sendo o tipo de uso predominante dentro da bacia, corroborando com as estatísticas do projeto, o qual destacou a participação proporcional de pastagens estável em aproximadamente 65% nos vários mapeamentos durante esta década. Segundo Feanrside (2005), quando ocorre a conversão de floresta para um outro tipo de uso, os impactos são negativos, como perda de biodiversidade, degradação das florestas e das áreas de bacias hidrográficas. O comportamento da demais classes pode ser visualizado no gráfico 7 e na figura 12.

Ao avaliar as mudanças de uso e cobertura da terra em Paragominas, utilizando dados do projeto Terra Class, Sousa *et al.* (2017) mostraram que grande parte das áreas de floresta foi convertida para pasto (3%); e do total de incremento da área de agricultura, 66% foi originário da classe de pasto, demonstrando que as dinâmicas estão baseadas na consolidação da agricultura e pecuária como variáveis na matriz econômica do município.

Figura 12 - Distribuição espacial do uso e cobertura da terra para 2004 e 2014



Fonte: do autor.

Gráfico 7 - Área total (km²) e porcentagens dos usos e cobertura da terra

Fonte: do autor.

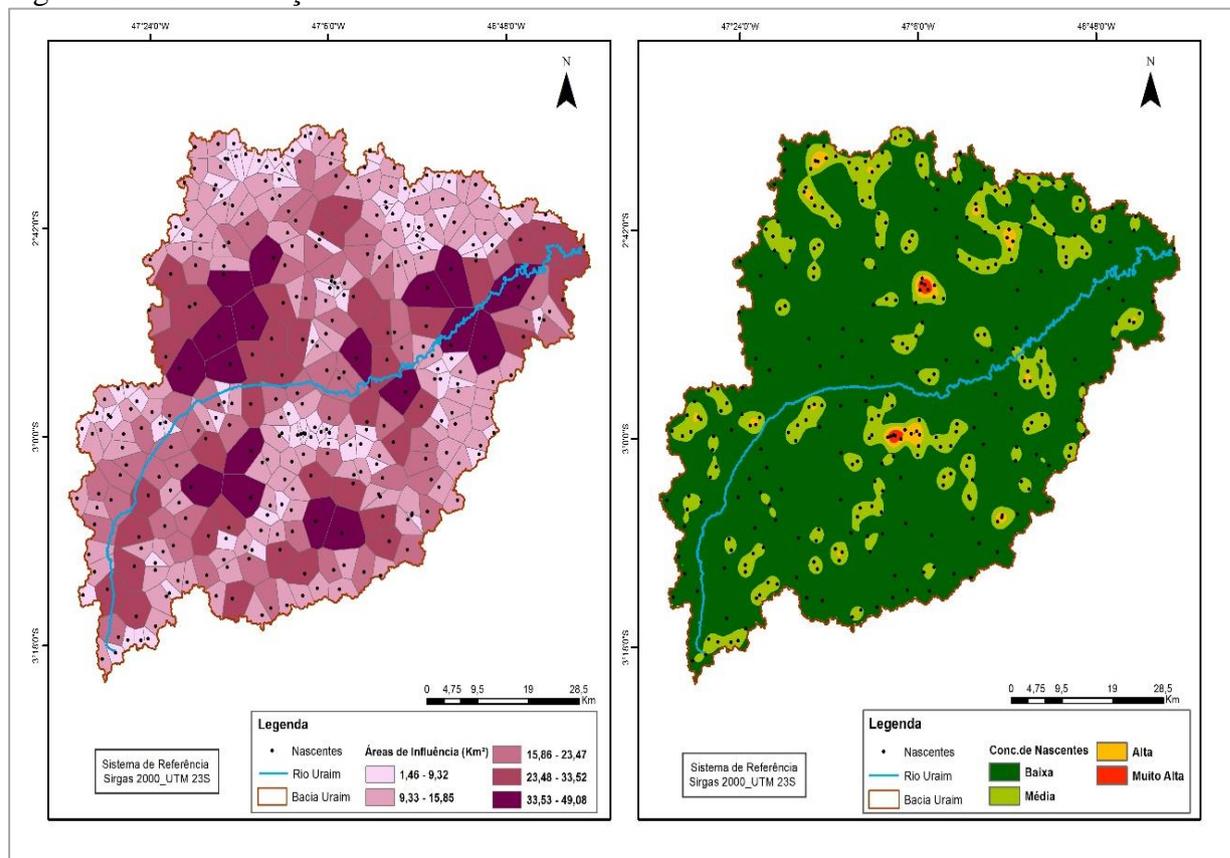
Tabela 7 - Área total por classe de uso e cobertura da terra na BHRU

Classe	Área 2004 (km ²)	(%)	Área 2014 (km ²)	(%)
Agricultura anual	136,46	2,7	591,39	11,6
Floresta	3.107,47	60,8	2.805,59	54,9
Pastagem	1.832,32	35,8	1.682,80	32,9
Outros	36,52	0,7	32,98	0,6
Total	5.112,76	100,0	5.112,76	100,0

Fonte: do autor.

Como última análise, delimitaram-se os polígonos de influência (método de Voronoi) e concentrações de nascentes (figura 13) na bacia. No total, foram identificadas 336 nascentes, as quais possuem áreas de influência que variam de 1,46 km² a 49,08 km². No intervalo que vai de 30 km² a 49,08 km², identificaram-se 13 nascentes totais na SB06 e SB07. Ainda, nestas sub-bacias observam-se os maiores polígonos de influência e concentração de nascentes e infere-se, portanto, que elas podem exercer maior contribuição no regime hidrológico da BHRU, inclusive, é nesta porção da BHRU que grandes volumes pluviométricos são observados nas escalas mensal, sazonal e anual, como mostrados nos mapas da variabilidade espaço-temporal das chuvas.

Figura 13 - Concentração e área de influência das nascentes na BHRU



Fonte: do autor.

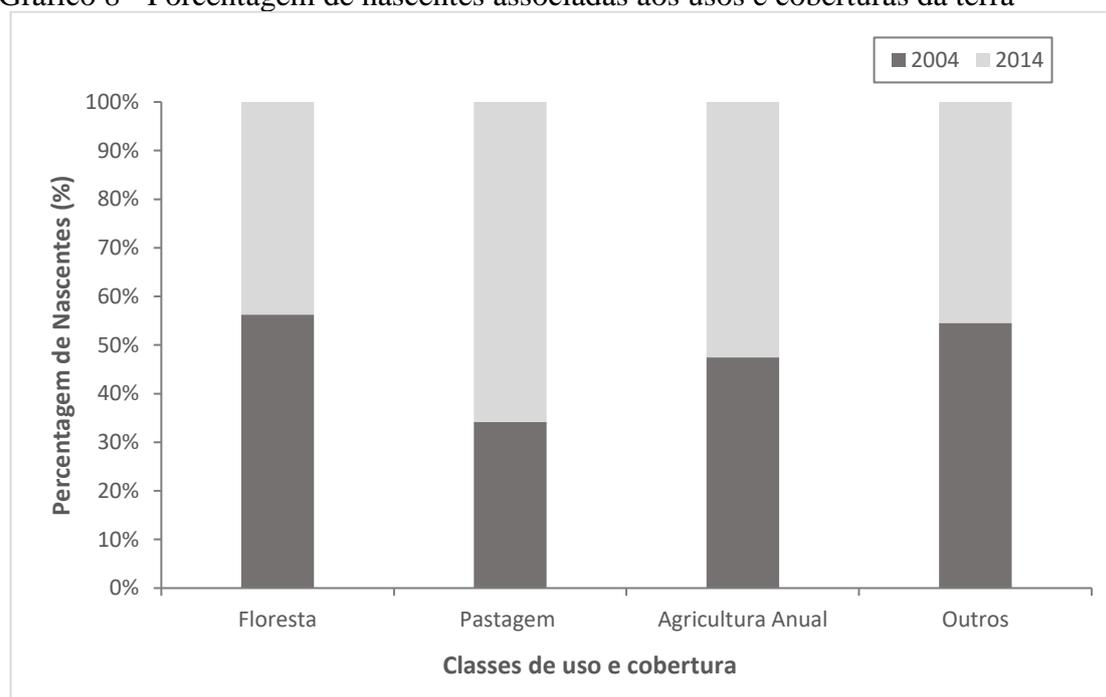
Ao analisar os pontos de nascentes sobre a distribuição de uso e cobertura da terra em 2014, identificaram-se que 186 nascentes (55,4%) estavam em áreas de florestas, 104 nascentes (31,0%) em áreas de pastagem, 41 nascentes (12,2%) em áreas de agricultura anual e 4 nascentes (1,5%) sobre outras áreas. Desta forma, define-se que 55,4% das nascentes se encontravam inseridas em 2.805,59 km² de vegetação. Já para as áreas antropizadas (correspondente a 44,6% do total na BHRU), foram identificadas 150 nascentes.

Tabela 8 - Número de nascentes identificadas por classes de uso e cobertura da terra

Classe	Nascentes (2004)	(%)	Nascentes (2014)	(%)
Agricultura anual	37	11,0	41	12,2
Floresta	239	71,1	186	55,4
Pastagem	54	16,1	104	31,0
Outros	6	1,8	5	1,5
Total	336	100,0	336	100,0

Fonte: do autor.

Gráfico 8 - Porcentagem de nascentes associadas aos usos e coberturas da terra



Fonte: do autor.

4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

As bacias hidrográficas têm sido adotadas como unidades físicas de reconhecimento, caracterização e avaliação na gestão dos recursos hídricos, pois são áreas de captação natural da água e de diversas atividades humanas. A Bacia Hidrográfica do Rio Uraim apresenta índices que revelam seu bom desempenho no escoamento superficial, não estando sujeita a enchentes em eventos climáticos normais. Apesar disso, o predomínio de baixas declividades pode constituir-se num indicativo de possibilidade de enchentes, sobretudo, por possuir áreas com inclinações inferiores a 6% e conectadas com a rede de drenagem em sua grande maioria. Ademais, os índices de rugosidade demonstram que a BHRU tem um moderado risco de degradação porque há uma considerada variação entre a cabeceira e a seção de referência mesmo sendo predominantemente plana. Entretanto, é preciso cautela ao analisar estes resultados de forma não integrada a estudos de susceptibilidades, por exemplo. Recomenda-se, portanto, que sejam aplicadas metodologias que permitam uma análise mais conjunta para determinar possíveis áreas críticas à susceptibilidade, principalmente onde a densidade demográfica na bacia é mais acentuada, como nas áreas urbanas. Ademais, é importante que sejam levantados outros dados como sistemas de esgotos, existência de barragens, etc., de modo a correlacioná-los com as áreas mais suscetíveis a inundações, a respeito do que aconteceu em março de 2018 no município de Paragominas. Como produto, este trabalho pode servir de instrumento de apoio associado a políticas públicas eficientes, podendo reduzir danos aos municípios via adoção de medidas de controle compatíveis com a comunidade local, considerando os aspectos ambiental, econômico e social.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v.33, n.2, p.117-127, 2003.
- AMANAJÁS, J. C; BRAGA, C. C. B. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.4, 423 - 434, 2012.
- AMBDATA INPE. **Variáveis ambientais para modelos de distribuição de Espécies**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/Ambdata>>. Acesso em 15/03/2016.
- BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação**. Florianópolis: UFSC, v.1, 112 p. 1994.
- CALIL, P. M. Caracterização geomorfométrica e do uso do solo da Bacia Hidrográfica do Alto Meia Ponte, Goiás. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiente**. vol.16, n. 4. Campina Grande. 2012.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. v. 2. São Paulo, 1980.
- COHEN, J. C. P. *et al.* Aspectos climatológicos das linhas de instabilidades da Amazônia. **Climanálise**, v. 4, n. 11, p. 34-39, 1989.
- CORREA, D. L. **Análise da susceptibilidade a inundações na bacia hidrográfica do rio Uraim, Paragominas-Pa**. Dissertação (Mestrado). 2017. 150 f. Instituto de Geociências, Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2017.
- CUNHA, E. R. Sensoriamento remoto e SIG aplicados ao mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do córrego Indaiá- MS. **GEOUSP**, v.19, n.3, p.360-646. 2015.
- DAR, R. A. R. C; ROMSHOO, S. A. Morphotectonic and lithostratigraphic analysis of intermontane Karewa basin of Kashmir Himalayas, India. **Journal of Mountain Science**, v. 10, n. 1, p. 731–741, 2013.
- EMBRAPA. Caracterização e avaliação da potencialidade dos solos do Município de Paragominas - Estado do Pará. **Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Oriental**. Belém-Pará. 2002.
- FRANÇA, G. V. **Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba**. 1968. 151 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.
- FIGUEROA, S.N; NOBRE, C. Precipitation distribution over central and western tropical South América. **Climanálise**, v.5, n.6, p. 36-48, 1990.
- FREITAS, R. O. Textura de drenagem e sua aplicação geomorfológica. **Bol. Paul. Geogr.**, São Paulo, n.11, p.53-57, 1952.
- HOWARD, A. D. Role of hypsometry and planform in basin hydrologic response. **Hydrological Processes**, vl. 4, n. 4, pp. 373–385, 1990.

- HORTON, R. E. Drainage basin characteristics. **American Geophysics Union Trans**, v.13, p. 350-361. 1932.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, p. 807-813, 1945.
- GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1988.
- LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. **Oficina de textos**. v.1, n.1, 2002.
- LUO, W. Quantifying Groundwater-Sapping Landforms with a Hypsometric Technique. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**. v. 105, n. 81, p. 1685-1694. 2000
- MARTINS. H. D. Mapeamento da cobertura do solo de Paragominas-PA com imagens de satélite de alta resolução: aplicações para o Cadastro Ambiental Rural (CAR). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n. 16. 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** INPE. p.1283-1284. 2013.
- MILLER, V.C. A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristic in the Clinch Mountain area, **Technical Report**, Dept. Geology, Columbia University. 1953.
- MOTA, M. A. S; SOUZA, P. F. S. Influência da precipitação nas características termodinâmicas da atmosfera durante um mês seco. *In*: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos do Jordão-SP, 1996. **Anais...** p. 1136-1138, 1996.
- NEILL, C. *et al.* Deforestation for pasture alters nitrogen and phosphorus in small Amazonian streams. **Ecological Applications**, v. 11, n. 6, p. 1817–1828. The Ecological Society of América. 2001.
- OLIVEIRA, A. P.; FITZJARRALD D.R. The Amazon River Breeze and the local boundary-layer: 2. **Linear Analysis And Modeling. Bound-Layer Meteorology**. n. 67, p.75- 96, 1994.
- RAKESH, K. A. K.*et al.* GIS based morphometric analysis of Ajay river basin up to Srarath gauging site of South Bihar. **Journal of Applied Hydrology**, vol. 14, no. 4, pp. 45–54, 2000.
- RODRIGUES, T. E *et al.* Caracterização e classificação dos solos do município de Paragominas, Estado do Pará. **Embrapa Amazônia Oriental**. n.162, p. 1-49. 2003.
- SANEPAR**- Agência de Saneamento de Paragominas. Bacia do Rio Uraim. Disponível em: <http://saneparagominas.com.br/agua/bacia_uraim/>. Acesso em: 12/05/2018.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Ambos, **New Jersey: Geological Society of America Bulletin**, 67, 597-646. 1956
- SCHUMM, S. A. The fluvial system. **Jonh Wiley & Sons**, New York, 338f. 1997.
- SINGH, N. Geomorphology of Himalayan rivers (a case study of Tawi basin), **Jammu Tawi**. 1990.
- SMITH, K. G. Standars for grading texture of erosional topography. **Am. J. Sci.**, New York, v. 248, p. 655-668, 1950.

SOUSA, L. M. *et al.* Avaliação do uso e cobertura da terra em Paragominas e Ulianópolis-PA, utilizando dados do projeto TerraClass. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 3, n. 69, p. 421-431. 2017.

SOUSA, F. R. C *et al.* Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Tapuio (Ceará-Brasil). **REGNE**, v. 2. 2016.

SOUZA, E. B. Principais mecanismos dinâmicos associados a variabilidade de precipitação diária sobre a Amazônia oriental durante a estação chuvosa. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, FORTALEZA - CE. Anais...SBMET*, 2004.

SOUZA, E. B; AMBRIZZI, T. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. **Climanálise**. Disponível em: <http://cptec.inpe.br/products/cliamanalise/artigos/artcien2.shtml/>. 2003. Acesso em 01/01/2017.

SOUZA, E. B; ROCHA, E. J. P. Diurnal variations of rainfall in Bragança - PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3^a, p. 142-152, 2006.

SOUZA, E. R; FERNANDES, M. R. Sub-bacias hidrográficas: unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais. **Revista Informe Agropecuário**, v. 21, n. 207, p. 15-20, 2000.

SREEDEVI, P. D. *et al.* Morphometric Analysis of a Watershed of South India Using SRTM Data and GIS. **Journal Geological Society of India**, v.73, 543-552, 2009.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geol. Soc. América Bulletin**, 1952.

STRAHLER, A. N. **Quantitative geomorphology**. In: FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). Encyclopedia of geomorphology. New York: Reinhold Book, 1958. p. 898-912.

TERRA CLASS. Disponível em http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/dados_terraclass.php Acesso em 25/10/2015.

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72p., 2008.

VILLELA, S. M; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. **Editora Mc Graw Hill.**, 245p. 1975.

VITTALA, S. S *et al.* Prioritization of sub-watersheds for sustainable development and management of natural resources: Na integrated approach using remote sensing, GIS and socio-economic data. **Current Science**, Índia, v.95, n.3, 2008.

WOLMAN, M. G; MILLER, J. P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes, **Journal of Geology**, n. 68, p. 54-74. 1964.

CAPÍTULO 3 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO PARA APLICAÇÃO NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Resumo

Por meio das componentes do balanço de radiação (R_n) e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), as trocas de energia na interface solo-planta-atmosfera são fundamentais para a modelagem hidrológica. Assim, esta pesquisa estimou o comportamento espaço-temporal da evapotranspiração (ET) para a bacia hidrográfica do Rio Uraim (BHRU), utilizando o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) para posterior assimilação na modelagem do *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT). Foram usados produtos do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), medições meteorológicas de superfície, estimativas de evapotranspiração de referência (ET_0) por Penman-Monteith/FAO (PM-FAO), além de avaliação Estatística por oito métodos diferentes. Os resultados mostraram boa a capacidade do SEBAL em estimar a ET nas diferentes escalas de tempo, distinguindo sua variabilidade espacial para os distintos usos e coberturas da terra identificados na bacia. Apesar do SEBAL superestimar a ET, os resultados apresentaram uma boa concordância com os valores obtidos por PM-FAO segundo a avaliação estatística e em comparação aos outros valores reportados pela literatura para a Amazônia. O erro relativo médio na escala diária variou de 18% a 38% e de 2% a 20% quando utilizadas imagens diárias e médias de oito dias do MODIS, respectivamente. Isto indica que os produtos médios de 8 dias são melhores para determinação da ET pelo SEBAL. Na escala mensal, as estimativas apresentaram ET maiores na estação menos chuvosa, variando de $4,2 \text{ mm.dia}^{-1}$ a $4,7 \text{ mm.dia}^{-1}$. Sazonalmente, a ET média foi de $4,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ ($3,8 \text{ mm.dia}^{-1}$) para a estação menos chuvosa (chuvosa). Este padrão identificado pelo algoritmo mostrou-se coerente com a sazonalidade da ET registrada para o Leste da Amazônia por outros autores. Na escala anual, o algoritmo capturou a variabilidade espacial da ET e revelou uma tendência de decréscimo em $0,50 \text{ mm.ano}^{-1}$ entre 2004 a 2014, o que pode estar relacionado as perdas significativas de vegetação primária e secundária na bacia. Os resultados deste trabalho reiteram a capacidade do SEBAL em propiciar a variabilidade espaço-temporal da ET para diferentes usos e ocupações da terra, demonstrando a potencialidade da metodologia e, quando aplicado a dados temporal e espacial de alta resolução, pode ser rotineiramente utilizada como ferramenta fundamental no monitoramento de necessidades hídricas.

Palavras-chave: Evapotranspiração. MODIS. Modelagem hidrológica. SEBAL.

CHAPTER 3 EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATED BY REMOTE SENSING FOR APPLICATION IN HYDROLOGICAL MODELING

Abstract

Using components of the net radiation (Rn), latent heat (LE), sensitive heat (H) and soil heat (G) fluxes, energy exchanges at the soil-plant-atmosphere interface are fundamental for hydrological modeling. Thus, this study estimated the spatial-temporal behavior of evapotranspiration (ET) for the Uraim River basin (URB), using the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) for later assimilation in Soil and Water Assessment Tools (SWAT). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products, surface meteorological measurements, reference evapotranspiration (ET₀) estimated by Penman-Monteith/FAO (PM-FAO) and Statistical evaluation by eight different methods were used. The results showed the skill of SEBAL to estimate the ET at the different time scales, distinguishing its spatial variability in the different land use and land cover in the basin. Although SEBAL overestimated ET, the results showed a good agreement with the values obtained by PM-FAO and others reported in the literature for this region. The mean relative error on the daily scale varied from 18% to 38% and from 2% to 20% when using daily and average eight-day images from MODIS, respectively. This indicates that the 8-day average products are better for determination of ET by SEBAL. In the monthly scale, the estimates presented higher ET in the less rainy season, ranging from 4.2 mm.day⁻¹ to 4.7 mm.day⁻¹. ET was 4.5 mm.day⁻¹ for the less rainy and 3.8 mm.day⁻¹ for the rainy season. This pattern generated by the algorithm was consistent with the ET seasonality recorded for the Eastern Amazon in other studies. On the annual scale, SEBAL captured the spatial variability of ET and showed a trend of decreasing in 0.50 mm.year⁻¹ from 2004 to 2014, which may be related to the significant losses of primary and secondary vegetation in the basin (301, 88 km²). The results of this work reiterate SEBAL's skills to provide spatial-temporal variability of ET for different land use and land cover, demonstrating the potential of the methodology, so when applied to high resolution temporal and spatial data it can be routinely used as a tool in the monitoring of water.

Keywords: Evapotranspiration. MODIS. Hydrological modeling. SEBAL.

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficaz dos recursos hídricos tem importância social e ambiental, e a sustentabilidade de um ambiente pode estar comprometida na sua ausência. Fragmentação de ecossistemas, perda da biodiversidade e escassez dos recursos hídricos são alguns problemas ligados às mudanças de uso e cobertura da terra na Amazônia Oriental. Portanto, monitorar os componentes mais importantes do ciclo hidrológico, especialmente a evapotranspiração (ET), é vital para o gerenciamento da água nas bacias hidrográficas.

A quantificação precisa da ET é essencial para identificar suas variações espaço-temporais, melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar o efeito das mudanças de uso e cobertura da terra no balanço de água (ORTEGA FARIA *et al.*, 2009). Apesar de haver várias maneiras para sua obtenção, deve-se considerar os métodos práticos e precisos, pois mesmo baseados em princípios físicos, muitas metodologias teóricas apresentam limitações quanto à instrumentação, o que pode restringir a sua utilização (CUNHA, 2013).

Na pequena escala, a quantificação da ET pode ser obtida por medições com lisímetros, cintilômetros, covariância de vórtices turbulentos, métodos como Penman-Monteith e outros. Na Amazônia, Entretanto, a sua variabilidade espacial é grande e maneiras mais avançadas de medi-la, como por meio de covariância de vórtices turbulentos, pode não ser o mais representativo numa escala de bacias hidrográficas. Nesse sentido, a determinação da ET tem sido amplamente estudada combinando medições meteorológicas de superfície com informações advindas de técnicas de sensoriamento remoto.

Um dos algoritmos que mais tem sido aplicado a essa finalidade é o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (BASTIAANSEN, 1995), que possibilita o cálculo do fluxo de calor latente como resíduo da equação clássica do balanço de energia. Este algoritmo tem sido aplicado em diversos ecossistemas do mundo porque necessita de poucas informações climáticas de superfície, além de fornecer os resultados na escala *pixel a pixel* por períodos mais curtos e sobre uma área grande (ALLEN *et al.*, 2005; BASTIAANSEN, 2000; MORSE *et al.*, 2000; TEIXEIRA, 2008).

A ET estimada pelo SEBAL apresenta boa confiabilidade na escala mensal. De acordo com Bastiaansen (2000), os resultados da validação do algoritmo têm mostrado que o erro relativo na fração evaporativa é de 20%, 10% e 1% nas escalas de 1 km, 5 km

e 100 km, respectivamente. Sua acurácia global para escala diária em áreas da ordem de 100 ha é de $\pm 15\%$. A acurácia típica deste algoritmo é de 85% para um dia, subindo para 95% em escala sazonal, e 96% a acurácia anual para grandes bacias (BASTIAANSEN *et al.*, 2005).

Uma vez que a ET representa cerca de 75% do total precipitado sobre superfície continental (ALLEN *et al.*, 1998), o seu mapeamento utilizando o SEBAL pode fornecer dados relevantes apropriadas para uso em modelos hidrológicos distribuídos porque consegue capturar a variabilidade da ET nas diferentes escalas de tempo e espaço. Esta abordagem é importante principalmente sobre bacias hidrográficas com forte histórico de mudanças de uso e cobertura da terra e onde as informações ambientais são escassas, como aquelas situadas a Leste da Amazônia Brasileira, inseridas no arco do desflorestamento.

Em Paragominas, mudanças na cobertura florestal tem sido causada principalmente pelo domínio da pecuária e da agricultura. A bacia do Rio Uraim, importante para o abastecimento hídrico do município, encontra-se bastante antropizada, tendo a sua ocupação ocorrida, sobretudo, a partir do início da década de 80, com formação de pastagens. Portanto, mapear a ET sobre esta área torna-se necessário porque a bacia vem experimentando mudanças importantes na sua paisagem e nas propriedades físico-químicas do solo, as quais podem estar influenciando na vazão, no escoamento superficial e no transporte de sedimentos do solo para a água.

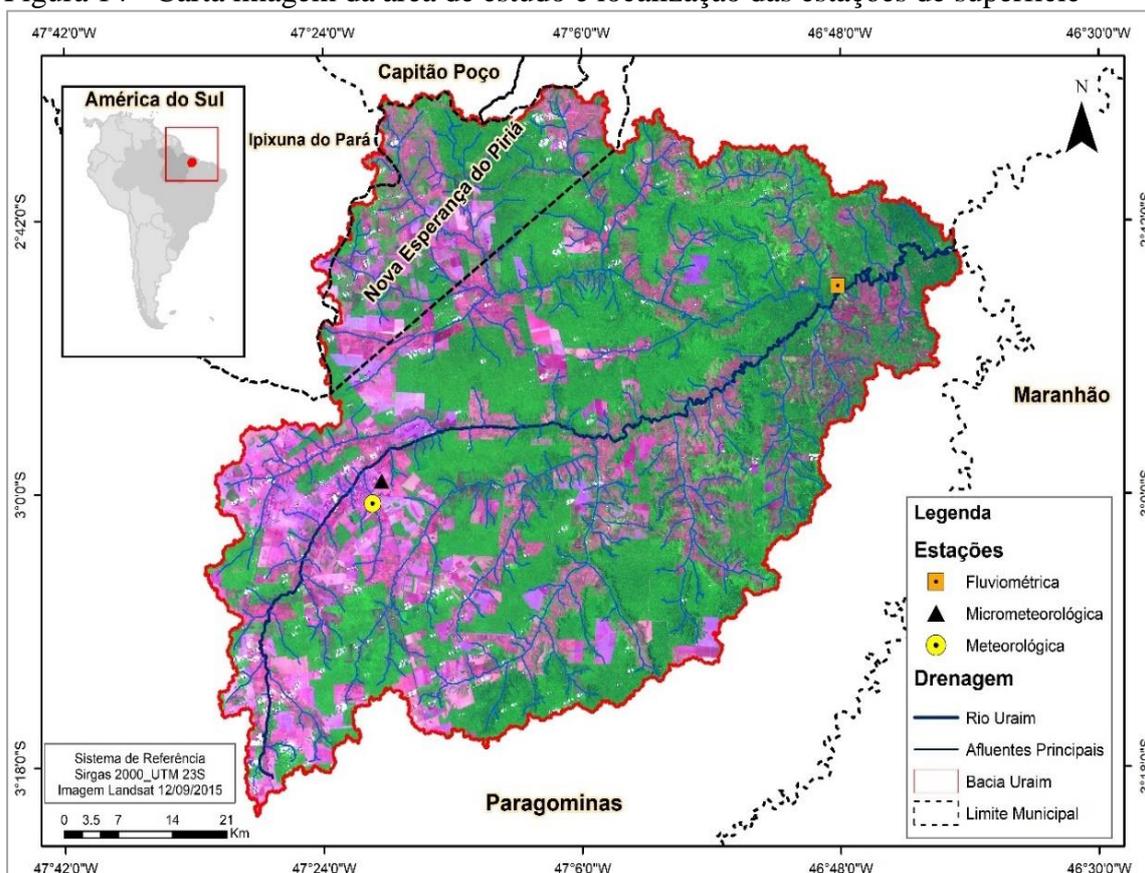
Diante do exposto, o objetivo deste capítulo é estimar a evapotranspiração da bacia hidrográfica do Rio Uraim através do algoritmo SEBAL nas diferentes escalas de tempo, validando os resultados a partir da comparação com aqueles estimados pelo método Penman-Monteith FAO. Assim, pretende-se fornecer informações para a gestão hídrica da bacia ao utilizar estes resultados como input nas modelagens hidrológicas como as realizadas pelo *Soil Water Assessment Tools* (SWAT) para, se possível, aperfeiçoá-lo no tocante as simulações de vazão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Uraim, mesorregião do Nordeste Paraense, foi determinada como área de estudo. De acordo com os resultados obtidos no capítulo I, é uma bacia de 5ª ordem e natureza dendrítica; sua forma favorece o processo de escoamento superficial e tem relevo predominantemente plano. O uso e cobertura da terra reflete o padrão da ocupação na Amazônia oriental, com 45% ocupada por áreas antropizadas, principalmente com pastagens e agricultura anual. Possui uma estação chuvosa de dezembro a maio, e outra menos chuvosa de junho a novembro. Apresenta quatro tipos de solo, tendo predominância de latossolo amarelo distrófico. A figura 14 apresenta os limites da bacia e a localização das estações de superfície, as quais forneceram dados meteorológicos necessários para a geração e análise dos resultados.

Figura 14 - Carta imagem da área de estudo e localização das estações de superfície



Fonte: do autor.

2.2 Conjuntos de dados utilizados.

Para a estimativa de evapotranspiração pelo SEBAL, utilizaram-se os dados meteorológicos da estação de superfície do INMET, localizada na sede municipal de Paragominas (02°59'25" S; 47°24'28" O; 113 m), além de informações de imagens orbitais do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). A validação dos resultados do algoritmo foi baseada na comparação com a evapotranspiração calculada pelo método Penman-Monteith FAO (PM-FAO) através de dados pertencente a um experimento de campo sobre área particular de produção de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), durante meses da estação chuvosa de 2006, 2007 e 2008. Tais dados foram obtidos por uma torre com 3 metros de altura (02°59'08" S; 47°19'57" O; 122 m) em uma área de 200 ha de plantio.

Os vários instrumentos meteorológicos e seus sensores foram conectados a um datalogger CR10X (*Campbell Scientific, Inc.*) e a um multiplexador AM416 (*Campbell Scientific, Inc.*). As medidas dos dados durante o experimento foram realizadas a cada 10 segundos, fornecendo totais e médias a cada 10 minutos. Uma completa descrição deste experimento e seus principais resultados podem ser obtidos em Souza *et al.* (2012), Souza *et al.* (2013) e Souza *et al.* (2016). A tabela 9 lista os instrumentos, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada usados para a determinação da ET por PM-FAO.

Tabela 9 - Instrumentação, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja

Variável meteorológica	Instrumento, fabricante (modelo)	Nível (m)
Radiação global incidente	Piranômetros <i>Kipp & Zonen</i> (CMP3)	2,45
Saldo de radiação	NR Lite (<i>Campbell Sci.</i>)	2,45
Temperatura do ar	Termo-higrômetro <i>Vaisala</i> (HMP45A) PT100 resistores	0,5 e 1 e 2
Umidade relativa	Termo-higrômetros <i>Vaisala</i> (HMP45A)	0,5 e 1 e 2
Precipitação	Pluviômetro TB4	3,9
Fluxo de calor no solo	Placa de fluxo <i>Hukseflux</i> (HFP01SC-L)	-0,1 e 0,1
Velocidade do vento	<i>Cup Anemometers vector R.M. Young</i>	0,5 e 1 e 2

Fonte: adaptado de Souza *et al.* (2012) e Souza *et al.* (2013).

A utilização dos produtos MODIS deve-se pela resolução temporal, todavia, em resolução espacial os outros satélites podem se sobressair. Possui alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4µm do espectro eletromagnético. Essas bandas permitiram o desenvolvimento inicial de 44 produtos MODIS. Os quadros 3 e 4 resumem o conjunto de dados utilizados para geração da ET pelo SEBAL.

Quadro 3 - Dados utilizados para determinação da evapotranspiração via SEBAL

Origem	Descrição	Fonte
Superfície	Variáveis meteorológicas como temperaturas mínima, máxima e média do ar, umidade relativa, precipitação diária, velocidade e direção do vento.	INMET
Orbital	Imagens MODIS, na grade de 2°x2° para o mesmo período dos dados coletados em superfície. Os produtos utilizados foram refletância da superfície (MOD09), temperatura da superfície (MOD11) e índices de vegetação (MOD13).	http://www.modisland.gsfc.nasa.gov

Fonte: do autor.

Quadro 4 - Descrição das características dos produtos orbitais utilizados

Produto	Característica
MOD09	Tem resolução espacial de 500m; é derivada das bandas 1 e 2 no nível 1B da superfície da terra. É uma estimativa da refletância espectral da superfície terrestre, para cada banda, que seria medida próximo ao solo, desprezando os efeitos atmosféricos. Um processo de correção é aplicado a todos os pixels que passam pelo controle de qualidade do nível 1B, reduzindo os efeitos dos gases atmosféricos, de aerossóis e de nuvens pouco espessas. O produto é processado para todo globo diariamente usando o nível 2G 250m Pointer Files (MODPTQKM), localizando a refletância nível 2 da superfície (MOD09) em uma grade geográfica. A qualidade dos dados do produto MOD09GQK é fornecida em três níveis diferentes: para cada pixel, banda espectral e todo o arquivo da imagem (VERMOTE; VERMEULEN, 1999).
MOD11	Utiliza a radiância (MOD021KM), a geolocalização (MOD03), a máscara de nuvens (MOD35L2), a qualidade da cobertura do terreno (MOD12Q1) e a neve (MOD10L2) como dados de entrada. O arquivo de saída contém o SDSs de TST (temperatura da superfície), a garantia de qualidade (QA) dos pixels, o erro em TST, as emissividades das bandas 31 e 32, os ângulos zenitais, resolução espacial de 1 km, atributos locais e globais. Utiliza o algoritmo <i>split-window</i> TST, que tem sido validado com dados do sensor <i>MODIS Airborne Simulator</i> (MAS) e medições de campo e o algoritmo dia/noite de temperaturas, que foi projetado especificamente para o sensor MODIS (WAN; LI, 1997). A precisão do algoritmo MODIS TST é de 1 km.
MOD13	Contém, entre outros dados, as imagens NDVI em composições de 16 dias com resolução espacial de 500m. Essas composições são geradas através do modelo de refletância bidirecional de <i>Walthall</i> (BRDF), quando o número de imagens sem nuvens do conjunto é maior que 5. Os parâmetros do modelo BRDF são utilizados para normalizar e interpolar a refletância de superfície no ângulo de visada ao nadir. Quando o número de imagens sem nuvens é menor que 5, é utilizado o modelo <i>Constraint View angle Maximum Value Composite</i> (CV-MVC), através do qual são registrados os maiores valores de NDVI da série para um determinado pixel. Assim, fatores como nebulosidade, variações do ângulo de iluminação, vapor de água, aerossóis etc., são minimizados (CARROLL <i>et al.</i> , 2004).

Fonte: do autor.

2.2 Evapotranspiração por Penman-Monteith FAO

Existem vários métodos para estimar ET, mas suas performances variam já que a maioria apresenta empirismo em sua concepção (SENTELHAS *et al.*, 2010). O método de Penman-Monteith FAO (equação 1) foi escolhido para estimar a evapotranspiração de referência (ET_0) porque apresenta superioridade em relação aos outros métodos (CAI *et al.*, 2007; GAVILAN *et al.*, 2007; XING *et al.*, 2008). É baseado em processos físicos e, explicitamente, incorpora os parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 237} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)}$$

Equação 1

onde: ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm.d^{-1}); R_n é o saldo de radiação à superfície da cultura ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); G é densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); T é a temperatura do ar a 2 metros de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade de vento a 2 metros de altura (m.s^{-1}); e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). As equações padronizadas para o cálculo de todos os parâmetros da equação 1 estão em Allen *et al* (1998).

O método PM-FAO passou a ser recomendado para determinar a ET_0 mesmo considerando que, em condições climáticas especiais, pode levar a erros próximos a 30% (WIDMOSER, 2009). Allen *et al.* (1998) sugerem procedimentos para estimativa de dados climáticos ausentes porque muitas vezes o uso deste método é limitado pela falta de algumas variáveis de entrada. Como alternativa para a estimativa da evapotranspiração quando apenas os dados de temperatura do ar são disponíveis nas estações meteorológicas, estes autores propõem o uso da equação de *Hargreaves* (HARGREAVES; SAMANI, 1985).

2.3 Evapotranspiração estimada pelo SEBAL

O balanço de energia determinado pelo algoritmo necessita de poucas informações da superfície, sendo a ET estimada como o resíduo da equação do balanço de energia, contabilizando-se a diferença entre o saldo de radiação na superfície (R_n), o fluxo de calor para o solo (G) e o fluxo de calor sensível (H) (equação 2).

$$\lambda ET = R_n - G - H$$

Equação 2

onde: λET é o fluxo de calor latente (W.m^{-2}); R_n é o saldo de radiação a superfície (W.m^{-2}); G é o fluxo de calor no solo (W.m^{-2}); H é o fluxo de calor sensível (W.m^{-2}).

R_n é computado considerando a radiação de onda curta incidente na superfície, a radiação da atmosfera que incide sobre a superfície e a radiação emitida pela superfície.

$$R_n = R_s \downarrow (1 - \alpha) + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \epsilon_{sup})R_L \downarrow$$

Equação 3

onde: $R_s \downarrow$ é a radiação de ondas curtas incidentes ($W.m^{-2}$); α é o albedo de superfície (adimensional); $R_L \downarrow$ é a radiação de ondas longas incidentes ($W.m^{-2}$); $R_L \uparrow$ é a radiação de ondas longas emitidas ($W.m^{-2}$) e ϵ_{sup} é a emissividade térmica da superfície (adimensional).

A radiação de ondas curtas incidente na superfície é o fluxo direto e difuso da radiação solar que alcança realmente a superfície da terra (W/m^2). É calculada pela equação 4 em condições de céu sem nuvens, como uma constante para a utilização do tempo da imagem.

$$R_s \downarrow = S \times \cos(S_{zen}) \times dr \times \tau_{sw}$$

Equação 4

onde: S é a constante solar ($1367 W.m^{-2}$); $\cos(S_{zen})$ é o co-seno do ângulo de incidência solar (S_{zen}); dr corresponde à distância relativa Terra-Sol e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, que é função da altitude do local de medição.

A radiação de ondas longas incidentes é o fluxo descendente da radiação térmica da atmosfera ($W.m^{-2}$). É computada usando a equação de Stefan-Boltzmann.

$$R_L \downarrow = \epsilon_{atm} \times \sigma \times T_{ar}^4$$

Equação 5

A radiação de ondas longas refletidas é o fluxo de radiação térmica emitida da superfície da terra à atmosfera, computada usando a equação de Stefan-Boltzmann.

$$R_L \uparrow = \epsilon_{sup} \times \sigma \times T_{sup}^4$$

Equação 6

$$\epsilon_{atm} = 0.85(-\ln\tau_{sw})^{0.09}$$

Equação 7

$$\epsilon_{sup} = 1.009 + 0.047(\ln NDVI)$$

Equação 8

onde: ϵ_{atm} é a emissividade atmosférica (adimensional); ϵ_{sup} é a emissividade da superfície (adimensional); σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}/K^4$); T_{ar} é temperatura do ar (K) obtida dos dados medidos na torre; T_{sup} é a temperatura da superfície (K) obtida do produto MOD11 descrito anteriormente.

O fluxo de calor no solo é a taxa de armazenamento de calor no solo e na vegetação devido à condução térmica. O modelo SEBAL computa primeiramente a relação G/R_n usando a equação empírica 9, desenvolvida por Bastiaanssen (2000) para o meio-dia.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_{sup}}{\alpha (0.0038 \alpha + 0.0074 \alpha^2) \times (1 - 0.98 \times NDVI^4)}$$

Equação 9

onde: G é calculado multiplicando o valor de R_n e é expresso em $W.m^{-2}$.

O fluxo de calor sensível (H) é a taxa de perda de calor pela convecção e/ou condução, devido a um gradiente de temperatura. É computado usando a equação 10 para o transporte de calor.

$$H = \frac{\rho_a c_p dT}{R_{ah}}$$

Equação 10

onde: ρ_a é a densidade do ar ($kg.m^{-3}$); C_p é o calor específico do ar (o produto entre os dois é $1004 J.kg^{-1}/K$); dT é a diferença de temperatura entre duas alturas (z_1 e z_2); R_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s.m^{-1}$).

O fluxo de calor sensível é função da diferença de temperatura, da rugosidade da superfície e da velocidade do vento. A equação 10 é difícil de resolver porque há dois parâmetros desconhecidos, R_{ah} e dT . Para facilitar este cômputo, utiliza-se os pixéis onde os valores de confiança para H podem ser previstos e dT estimada para os pixéis, e a velocidade do vento pode ser estimada em uma dada altura.

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor (R_{ah}) é computada para uma atmosfera neutra (equilíbrio neutro é quando a parcela deslocada possui a mesma densidade que o ar que a envolve, ou seja, $\gamma = \gamma_d$).

$$R_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_{0h}}\right)}{u^* k}$$

Equação 11

onde: Z_{ref} corresponde à altura de referência acima de uma fonte ou sumidouro de calor, entre as quais existe uma resistência aerodinâmica ao transporte de calor (m); Z_{0h} corresponde ao comprimento de rugosidade aerodinâmica para o transporte de calor (igual a 0,1m); k corresponde a constante de von Karman (0,41); enquanto que u^* é a velocidade de fricção ($m.s^{-1}$).

A velocidade da fricção (u^*) é computada usando a lei logarítmica do vento para circunstâncias atmosféricas neutras.

$$u^* = \frac{k u_x}{\ln\left(\frac{Z_x}{Z_{0m}}\right)}$$

Equação 12

onde: k é constante de von Karman; u_x é a velocidade do vento ($m.s^{-1}$) na altura Z_x ; Z_{0m} é o comprimento de rugosidade da vegetação (em metros). O Z_{0m} é uma medida do arrasto friccional da camada de ar que interage com a superfície, estimada conforme a equação 13.

$$Z_{0m} = 0.12h$$

Equação 13

onde: h é a altura da vegetação (em metros).

Em função da velocidade de fricção, pode-se calcular a velocidade do vento a uma altura acima do dossel da vegetação, na qual se assume que os efeitos da rugosidade da superfície possam ser desprezados. Esta altura é referida como “altura de mistura”, onde é adotado 100m como referência. U_{100} é calculado usando uma equação rearranjada.

$$U_{100} = \frac{u^* \ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right)}{k}$$

Equação 14

onde: U_{100} corresponde à velocidade do vento para “altura de mistura”.

Supondo que a velocidade U_{100} é constante para toda a área, podemos estimar u^* para todos os pixels da imagem, definido como “altura de mistura” não afetada pelas características de superfície.

$$u^* = \frac{k U_{100}}{\ln\left(\frac{100}{Z_{0m}}\right)}$$

Equação 15

onde: o Z_{0m} é o comprimento de rugosidade estimado para cada pixel da imagem, estimado a partir do NDVI, conforme a equação 16.

$$Z_{0m} = \text{Exp}(3.157 \times \text{NDVI} - 2.818)$$

Equação 16

Depois do cômputo dos valores de u^* para cada pixel da imagem, pode-se estimar a resistência aerodinâmica. A diferença de temperatura é determinada por meio de um processo iterativo de calibração, consistindo na seleção de dois pixels (quente e frio). Para determinar do fluxo de calor sensível máximo, usa-se a temperatura do pixel mais quente.

$$H_{\max} = R_n(T_{\text{supmax}}) - G(T_{\text{supmax}})$$

Equação 17

Onde: H_{\max} corresponde ao fluxo de calor sensível máximo (W.m^{-2}); $R_n(T_{\text{supmax}})$ corresponde à radiação líquida referente ao pixel de maior temperatura (W.m^{-2}); $G(T_{\text{supmax}})$ corresponde ao fluxo de calor no solo para o pixel de maior temperatura em (W.m^{-2}).

Para determinar o gradiente máximo e o gradiente mínimo de temperatura do ar em um pixel quente e em um pixel frio, respectivamente, Bastiaanssen (1995) sugere as seguintes expressões:

$$dT_{\text{ar}}(T_{\text{supmax}}) = \frac{H_{\max} R_{ah}(T_{\text{supmax}})}{\rho_a c_p}$$

$$dT_{ar}(T_{supmin}) = 0$$

Equações 18 e 19

Onde: $dT_{ar}(T_{supmax})$ e $dT_{ar}(T_{supmin})$ correspondem ao gradiente máximo e mínimo de temperatura do ar presente na imagem, respectivamente; $R_{ah}(T_{supmax})$ corresponde à resistência aerodinâmica ao transporte de calor referente ao pixel de temperatura máxima (m/s).

Para a Determinação do fluxo de calor sensível do pixel central da imagem, pixel âncora e demais pixéis, utilizou-se as equações descritas em Bastiaanssen (1995):

$$H_{central} = \rho_a c_p \frac{dT_{arcentral}}{R_{ahcentral}}$$

$$dT_{arcentral} = a + b \times T_{sup}$$

$$b = \frac{dT_{ar}(T_{supmax})}{T_{supmax} - T_{supmin}}$$

$$a = -b \times T_{supmin}$$

Equações 20, 21, 22 e 23

onde: $H_{central}$ é o fluxo de calor sensível do pixel central; $dT_{arcentral}$ é o gradiente de temperatura do ar, presente na imagem referente ao pixel central; $R_{ahcentral}$ é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor do pixel central; T_{supmax} e T_{supmin} são as temperaturas da superfície referentes ao pixel da imagem de maior e menor temperatura, respectivamente.

Para o cômputo do H é necessário determinar o dT_{ar} próximo à superfície, que na realidade, é de difícil obtenção. Entretanto, para obter esse gradiente é necessário o conhecimento do H, que por sua vez é o que se deseja calcular. Para resolver esta equação, Bastiaanssen (1995) propõe uma solução que evita a consideração de que a temperatura da fonte de calor seja igual à temperatura radiativa da superfície.

A diferença entre a temperatura da fonte de calor e a temperatura do ar (dT_{ar}) é determinada para um pixel da imagem de satélite onde o fluxo de calor sensível é considerado máximo, e considerado igual a zero para um pixel onde esse fluxo é considerado zero. Esses pixels são identificados pela maior e menor temperatura da superfície, respectivamente, encontradas em uma determinada área selecionada na imagem. No pixel onde a temperatura da superfície é máxima, o fluxo de calor latente é considerado igual a zero e o fluxo de calor sensível é expresso pela equação 17.

No pixel onde a temperatura da superfície é mínima, o fluxo de calor sensível é considerado igual à zero, e conseqüentemente o gradiente vertical de temperatura do ar, também é zero. Posteriormente, a diferença em questão (dT_{ar}) é determinada para o pixel

de interesse, relativo à área de estudo, por meio de uma expressão linear que relaciona a temperatura radiativa da superfície com dT_{ar} , de acordo com as equações 20, 21, 22 e 23.

A partir do cômputo do gradiente de temperatura da imagem, determina-se o H de cada imagem, de acordo com a equação 10. Os valores do H determinados inicialmente, segundo Bastiaanssen (1998a), não representam de forma adequada o valor real do H para cada pixel. Portanto, uma solução baseada em um processo iterativo (Teoria de Monin-Obukhov), descreve um perfil mais geral da velocidade vertical por levar em consideração os efeitos da rugosidade e da estabilidade térmica. Para identificar as condições reais de estabilidade atmosférica, utilizou o comprimento de Monin-Obukhov.

$$L = \frac{\rho_a c_p u^{*3} T_{sup}}{g k H_{central}}$$

Equação 24

onde: L é o comprimento de Monin-Obukhov (metros); g aceleração da gravidade (9.81 m.s^{-2}). Os valores de L definem as condições da estabilidade da atmosfera. Se $L < 0$ é atmosfera instável; se $L > 0$, a atmosfera é estável e se $L = 0$ a atmosfera é dada como neutra.

Para o cômputo da correção atmosférica segundo Monin-Obukhov, no transporte de momentum em condições de instabilidade atmosférica, utilizou-se à proposta de Paulson (1970) e Webb (1970), que estão descritas nas equações 25 a 33.

Para as condições de atmosfera instável ($L < 0$)

$$\Psi_{m(100m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + X_{(100m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + X_{(100m)}^2}{2} \right) - 2 \arctan(X_{(100m)}) + 0.5\pi$$

$$\Psi_{m(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + X_{(2m)}^2}{2} \right)$$

$$\Psi_{m(0.1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + X_{(0.1m)}^2}{2} \right)$$

Equações 25, 26 e 27

onde:

$$X_{100m} = \left(1 - 16 \frac{100}{L} \right)^{0.25}$$

$$X_{2m} = \left(1 - 16 \frac{2}{L} \right)^{0.25}$$

$$X_{0.1m} = \left(1 - 16 \frac{0.1}{L} \right)^{0.25}$$

Equações 28, 29 e 30

Para as condições de atmosfera estável ($L > 0$);

$$\Psi_{m(100m)} = -5 \left(\frac{100}{L} \right)$$

$$\Psi_{h(2m)} = -5\left(\frac{2}{L}\right)$$

$$\Psi_{h(0.1m)} = -5\left(\frac{0.1}{L}\right)$$

Equações 31, 32 e 33

Para as condições de atmosfera neutral $L=0$

$$\Psi_m \text{ e } \Psi_h = 0$$

Após o cômputo da instabilidade atmosférica, o novo valor corrigido da velocidade da fricção e resistência aerodinâmica é determinado para cada iteração sucessiva como:

$$u_{\text{corrig}}^* = \frac{kU_{100}}{\ln\left(\frac{100}{Z_{\text{om}}}\right) - \Psi_{m(100m)}}$$

Equação 34

$$Rah_{\text{corrig}} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) - \Psi_{h(2m)} + \Psi_{h(0.1m)}}{k \times u_{\text{corrig}}^*}$$

Equação 35

onde: $\Psi_{m(100m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte do momentum em 100 m; $Z_2 = 2m$ e $Z_1 = 0.1 m$, $\Psi_{h(2m)}$ e $\Psi_{h(0.1m)}$ são correções da instabilidade para o fluxo de calor em 2 metros e 0.1 metros.

O valor de H corrigido foi obtido após as correções das condições iniciais assumidas de estabilidade atmosférica. Portanto, determinou-se a velocidade de fricção corrigida e um novo valor de resistência aerodinâmica, que foi utilizado até 5 repetições do processo, partindo-se do cálculo de dT. Todo processo foi executado no programa SPRING versão 5.5.0, disponibilizado gratuitamente pelo INPE.

O cálculo do fluxo de calor latente instantâneo (valor instantâneo para o horário da passagem satélite em $W.m^{-2}$) foi computado para cada pixel usando a equação 2. Transformou-se este valor instantâneo de $W.m^{-2}$ em $mm.h^{-1}$ utilizando a equação 36.

$$EVT_{\text{inst}} = \frac{3600 \times \lambda ET}{\lambda}$$

Equação 36

onde: EVT_{inst} é a evapotranspiração instantânea ($mm.h^{-1}$); 3600 é a conversão de segundos para hora; λ é o calor latente de vaporização e/ou o calor absorvido quando um quilograma de água evapora ($2,45MJ.kg^{-1}$).

A partir do resíduo do balanço de energia, estimou-se a fração evaporativa (λ) (equação 37) e a ET diária (ET_{24h} $mm.dia^{-1}$) (equação 38). Segundo Crago (1996), λ possui uma característica importante que é sua regularidade e constância em dias sem

cobertura de nuvens. Assim, admite-se que seu valor instantâneo representa adequadamente seu valor diurno, possibilitando analisar a variabilidade espacial do processo de et e estimar o valor diário em larga escala.

$$\lambda = \frac{LE}{R_n - G}$$

Equação 37

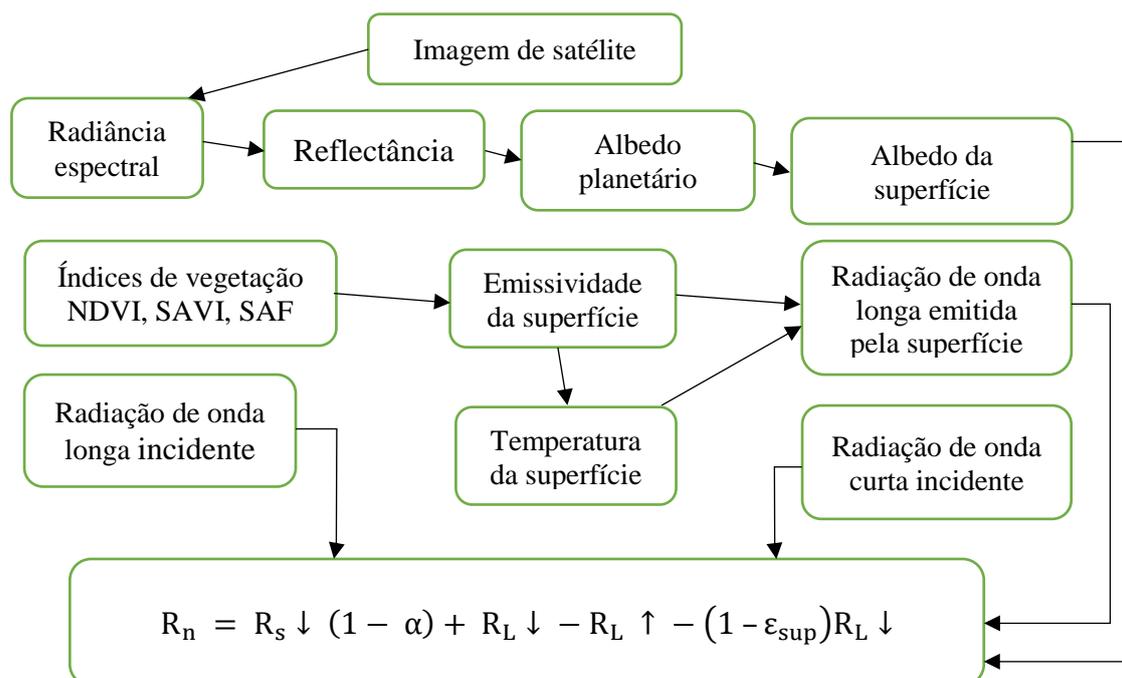
$$ET_{24h} = \frac{86400 \times \lambda \times R_{n24h}}{\lambda}$$

Equação 38

onde: λ é o calor latente de vaporização da água (MJ.kg^{-1}); LE é o fluxo de calor latente (W.m^{-2}); R_n é o saldo de radiação (W.m^{-2}); G o fluxo de calor para o solo (W.m^{-2}); R_{n24h} é o saldo de radiação médio diário (W.m^{-2}), estimado a partir da função senoidal proposta por Bisht *et al* (2005), baseado em Lagouarde & Brunet (1983).

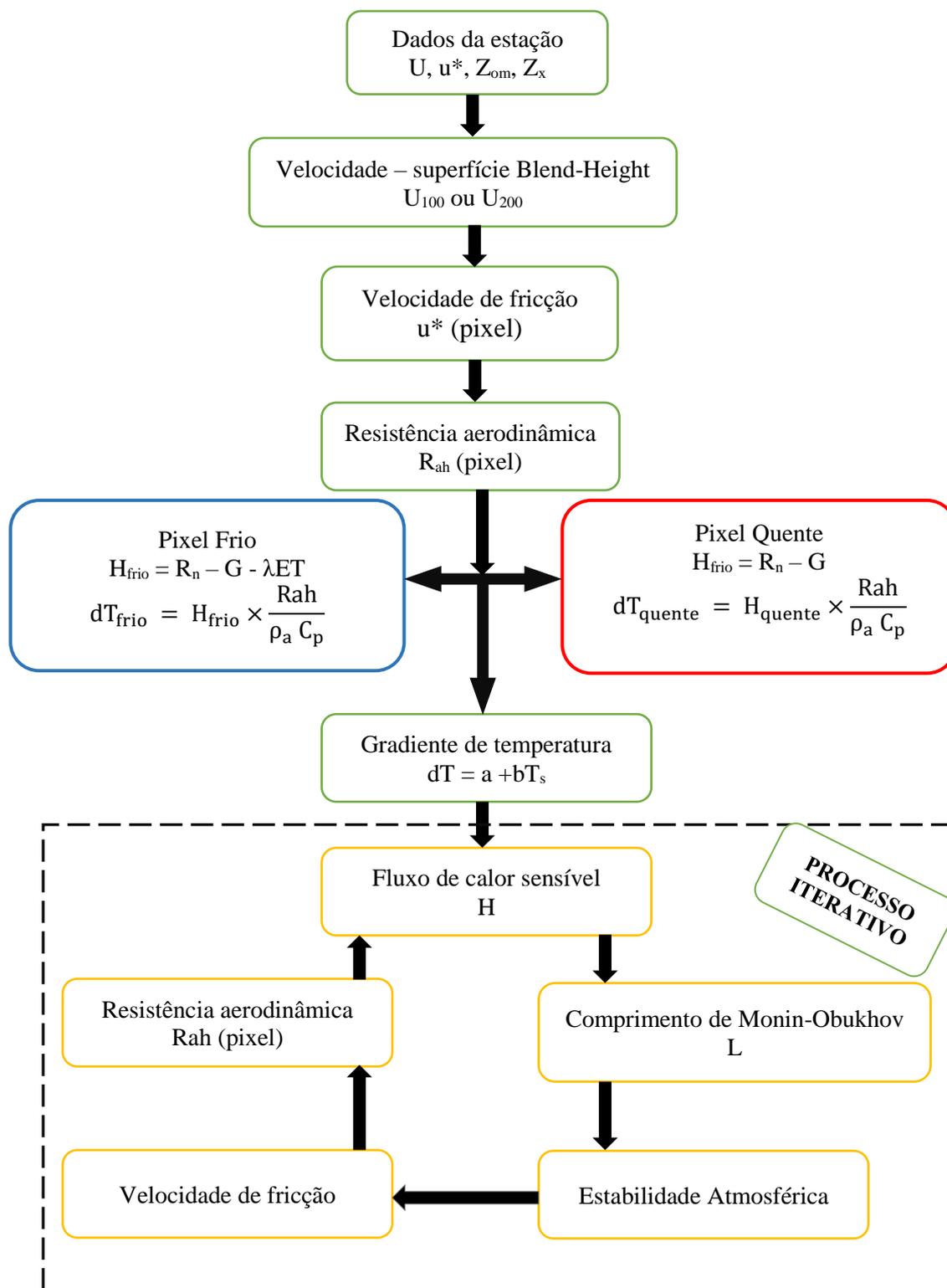
O resumo das rotinas para determinar o balanço de energia e evapotranspiração via SEBAL é apresentada pelas figuras 15 e 16.

Figura 15 - Saldo de radiação (R_n) estimado pelo SEBAL.



Fonte: do autor.

Figura 16 - Processo iterativo para o cálculo do calor sensível pelo SEBAL



Fonte: do autor.

2.4 Validação dos resultados

Os resultados foram avaliados pela correlação entre ET estimadas por PM-FAO e SEBAL, baseando-se nos indicadores: raiz do erro quadrático médio (REQM), erro absoluto médio (EAM), erro relativo médio (ERM), erro padrão de estimativa (EPE), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT *et al*, 1985) e coeficiente de confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). A classificação do desempenho se baseou no indicador estatístico c .

$$\text{REQM} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)^2}{N}\right)}$$

Equação 39

$$\text{EAM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i|$$

Equação 40

$$\text{ERM} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right|$$

Equação 41

$$\text{EPE} = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{N - 1}}$$

Equação 42

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N O_i \cdot P_i)^2}{\sum_{i=1}^N O_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N P_i^2}$$

Equação 43

$$r = \sqrt{R^2}$$

Equação 44

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| - |O_i - \bar{O}|)^2} \right]$$

Equação 45

$$c = r \times d$$

Equação 46

onde: N é o número de observações; O_i corresponde ao valor de ET_o calculado pelo método padrão PM-FAO (mm.dia^{-1}); P_i é o valor de ET_o estimado pelo algoritmo SEBAL (mm.dia^{-1}); \bar{O} é média de ET_o estimada pelo método padrão (mm.dia^{-1}).

Os valores de correlação de Pearson (r) foram interpretados conforme Hopkins (2000), enquanto o coeficiente de confiança (c) foi classificado de acordo com Camargo; Sentelhas (1997), evidenciados nas tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 - Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r)

Coeficiente de correlação (r)	Classificação
0,0 a 0,1	Muito baixa
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito alta
0,9 a 1,0	Quase perfeita

Fonte: adaptado de Hopkins (2000).

Tabela 11 - Critérios de interpretação do coeficiente de desempenho (c)

coeficiente de desempenho (c)	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,75 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mal
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: adaptado de Camargo; Sentelhas (1997).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui são apresentados os resultados de evapotranspiração estimada pelo SEBAL nas escalas diária, mensal, sazonal e anual. Na escala diária, a acurácia do algoritmo é verificada pela análise comparativa entre ET do SEBAL e ET_0 calculada por PM-FAO; nas escalas mensal, sazonal e anual, os resultados de Negrón-Juarez (2007) e de ET real (ET_r) contidos em Silva (2016) foram usados como referência para comparação. Por ter sido estimada usando dados medidos em superfície, aqui a ET_0 pelo método PM-FAO será referida como evapotranspiração observada (ET_{OBS}).

3.1 Evapotranspiração diária

A estimativa diária da ET via SEBAL foi determinada utilizando os produtos MOD09GA/V006 (cena diária), MOD11A1/V006 (cena diária) e MOD13A1/V006 (cena média de 16 dias). O período da análise é ilustrado na tabela 12.

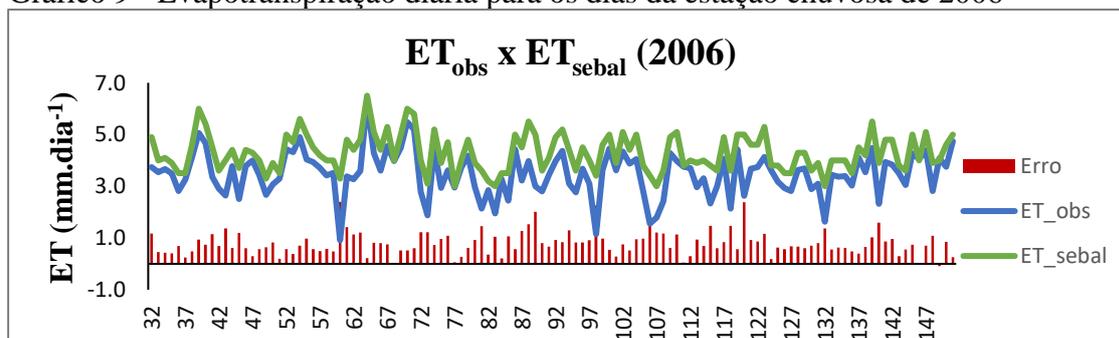
Tabela 12 - Período compreendido na determinação da ET

Início	Dia Juliano	Fim	Dia Juliano
01/02/2006	032	31/05/2006	151
01/02/2007	032	31/05/2007	151
08/02/2008	038	31/05/2008	152

Fonte: do autor.

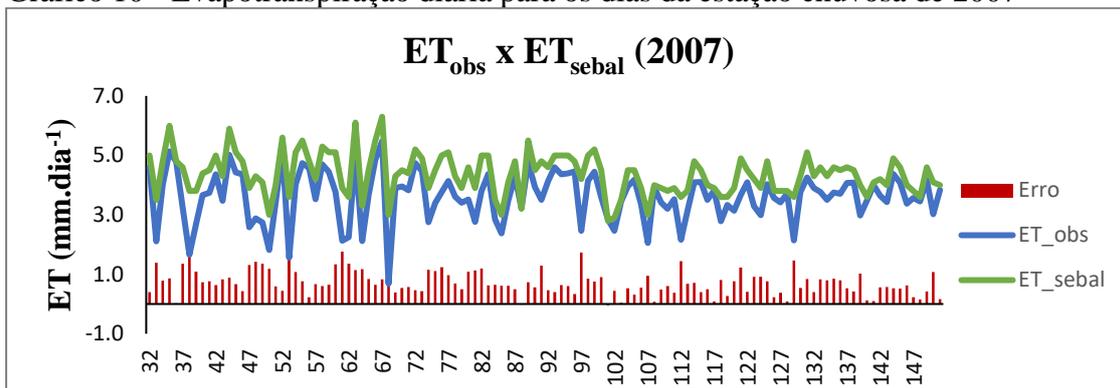
Os gráficos 9, 10 e 11 apresentam os resultados estimados pelo SEBAL e por PM-FAO para os dias da estação chuvosa de 2006, 2007 e 2008, respectivamente. No geral, a evapotranspiração do SEBAL mostrou-se coerente com os valores reportados para a Amazônia pelos estudos de Costa *et al.* (2010), Negrón Juárez (2007), Rocha *et al.* (2004), Souza Filho *et al.* (2005) e Shuttleworth (1984;1984;1988). Os valores de ET_{SEBAL} variaram de 3,7 a 4,6 mm.dia^{-1} . Assim, o algoritmo mostrou-se capaz de reproduzir com boa precisão a variabilidade da ET, principalmente nos dias de fevereiro e março para 2006 e 2007.

Gráfico 9 - Evapotranspiração diária para os dias da estação chuvosa de 2006



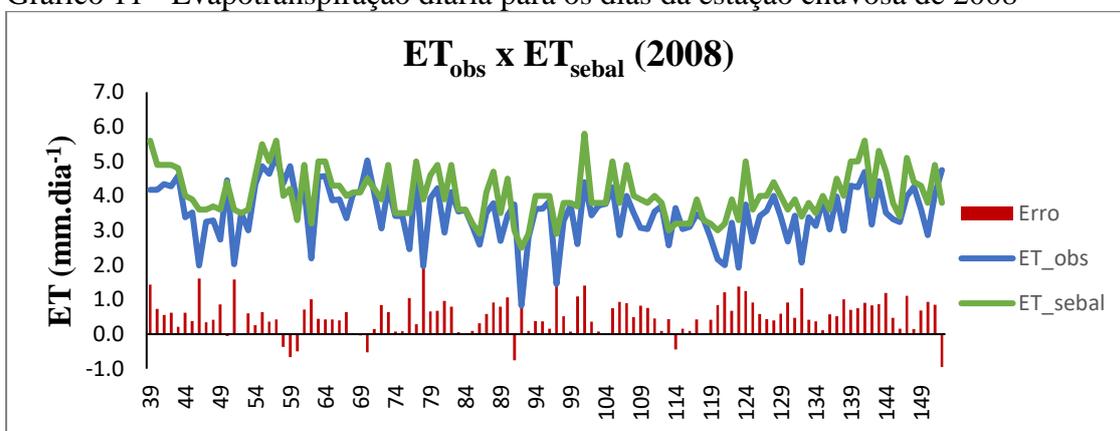
Fonte: do autor.

Gráfico 10 - Evapotranspiração diária para os dias da estação chuvosa de 2007



Fonte: do autor.

Gráfico 11 - Evapotranspiração diária para os dias da estação chuvosa de 2008



Fonte: do autor.

É possível observar que a ET do SEBAL foi superestimada em comparação ao método PM-FAO para quase todos os meses, principalmente em março e abril dos anos analisados. Essa superestimativa do algoritmo é semelhante àquela reportada por Ferreira Júnior (2012) Ferreira Junior *et al.* (2013), Sousa (2015). Estes autores mostraram que o SEBAL pode superestimar, em média, até 1,1 mm.dia⁻¹ a evapotranspiração na escala diária.

Ainda com relação aos resultados diários estimados pelo SEBAL, os indicadores estatísticos testados mostram que o algoritmo apresentou o melhor ajuste para os dias dos meses fevereiro e março de 2006 e 2007, tendo sido classificados como “bom” conforme o coeficiente de confiança ou desempenho (c), além de terem apresentado os maiores valores de correlação de Pearson (r), do coeficiente de determinação (R²) e do índice de concordância de Willmott (d) (tabela 13 e gráficos 12).

Tabela 13 - Desempenho do SEBAL na estimativa diária da evapotranspiração

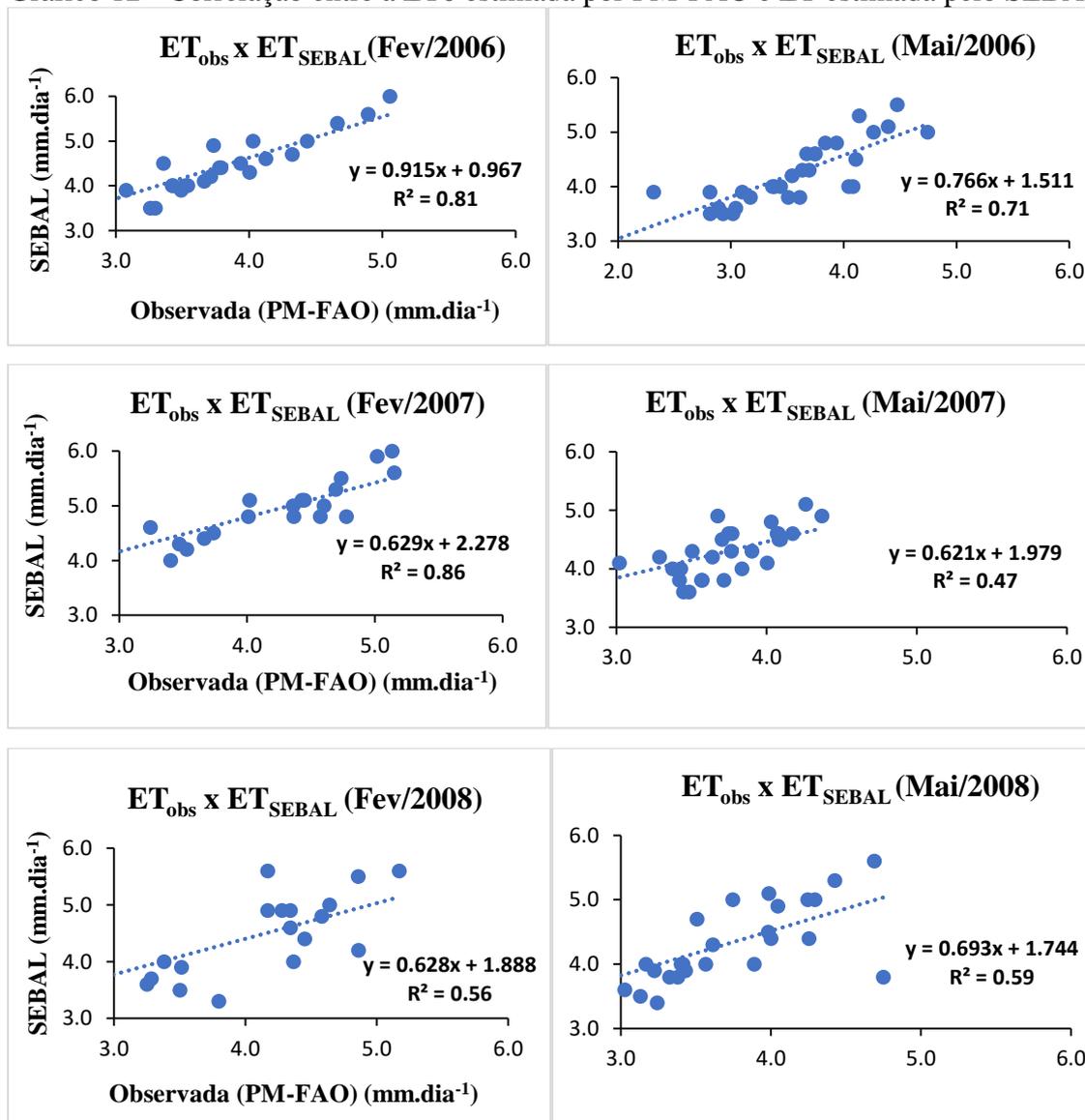
Período	ET	a	B	R	R ²	d	c	Classificação
Fev/2006	4,3 ± 0,7	0,967*	0,915*	0,90	0,81	0,76	0,69	Bom
Mar/2006	4,4 ± 0,9	1,850*	0,728*	0,88	0,77	0,78	0,68	Bom
Abr/2006	4,3 ± 0,6	2,332*	0,583*	0,82	0,67	0,66	0,54	Sofrível
Mai/2006	4,2 ± 0,6	1,511*	0,766*	0,84	0,71	0,71	0,60	Sofrível
Fev/2007	4,6 ± 0,7	2,278*	0,629*	0,93	0,86	0,75	0,70	Bom
Mar/2007	4,5 ± 0,8	1,802*	0,742*	0,89	0,80	0,76	0,68	Bom
Abr/2007	4,2 ± 0,7	1,388*	0,778*	0,83	0,69	0,77	0,64	Mediano
Mai/2007	4,2 ± 0,4	1,979*	0,621*	0,69	0,47	0,58	0,40	Péssimo
Fev/2008	4,3 ± 0,7	1,888*	0,628*	0,75	0,56	0,78	0,58	Sofrível
Mar/2008	4,1 ± 0,6	1,814*	0,631*	0,73	0,53	0,76	0,55	Sofrível
Abr/2008	3,7 ± 0,7	1,587*	0,668*	0,78	0,61	0,77	0,60	Sofrível
Mai/2008	4,2 ± 0,6	1,744*	0,693*	0,77	0,59	0,69	0,53	Sofrível

Fonte: do autor. ET é a evapotranspiração média diária ± desvio padrão (mm.dia⁻¹), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), coeficiente de concordância (d), coeficiente de confiança e desempenho (c) e classificação do desempenho do algoritmo baseado no coeficiente c. * Significativo a nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Tabela 14 - Desempenho do SEBAL na estimativa diária da evapotranspiração

Mês/Ano	ET	ERM	EPE	REQM	EAM	Erro Padrão	Classificação
Fev/2006	4,3 ± 0,7	19,0	0,73	0,72	0,66	0,13	Bom
Mar/2006	4,4 ± 0,9	35,0	1,06	1,04	0,90	0,17	Bom
Abr/2006	4,3 ± 0,6	38,0	1,11	1,09	0,96	0,12	Sofrível
Mai/2006	4,2 ± 0,6	22,0	0,79	0,77	0,69	0,11	Sofrível
Fev/2007	4,6 ± 0,7	33,0	1,04	1,03	0,91	0,14	Bom
Mar/2007	4,5 ± 0,8	35,0	1,00	0,99	0,81	0,15	Bom
Abr/2007	4,2 ± 0,7	19,0	0,73	0,72	0,60	0,12	Mediano
Mai/2007	4,2 ± 0,4	17,0	0,70	0,69	0,60	0,07	Péssimo
Fev/2008	4,3 ± 0,7	19,0	0,75	0,74	0,60	0,16	Sofrível
Mar/2008	4,1 ± 0,6	18,0	0,71	0,70	0,54	0,12	Sofrível
Abr/2008	3,7 ± 0,7	25,0	0,74	0,72	0,57	0,12	Sofrível
Mai/2008	4,2 ± 0,6	23,0	0,81	0,80	0,73	0,11	Sofrível

Fonte: do autor. ET é a evapotranspiração média diária ± desvio padrão (mm.dia⁻¹), ERM é o erro relativo médio (%), EPE é o erro padrão de estimativa (mm dia⁻¹), EAM é o erro absoluto médio (mm.dia⁻¹), REQM é a raiz do erro quadrático médio (mm dia⁻¹), erro padrão em relação à média e classificação do desempenho do algoritmo baseado no coeficiente c.

Gráfico 12 - Correlação entre a ET₀ estimada por PM-FAO e ET estimada pelo SEBAL

Fonte: do autor.

É interessante ressaltar que o algoritmo demonstrou desempenho considerado de “péssimo” a “mediano” para os dias de abril e maio dos três anos em análise, conforme a classificação de Camargo; Sentelhas (1997) e isto pode estar relacionado ao fato de que é justamente nestes meses onde se observam os maiores índices pluviométricos da bacia, isto é, os principais sistemas precipitantes da região atuam de forma significativa e, por consequência, a presença considerável de nebulosidade nas cenas das imagens MODIS pode ter limitado a eficiência do SEBAL em simular a variável em questão.

Ainda nessa escala de estimativa, os resultados podem ser considerados bastante concordantes entre si porque os erros absolutos médios foram inferiores a 1,0 mm dia⁻¹, tal qual os encontrados por Trezza (2002). Apesar disso, os erros relativos médios variaram de 17% a 28% e podem ser considerados altos, pois é ideal que valores de ERM

sejam em torno de 10%, como reportou Trezza (2002) ao ter comparado medidas lisimétricas com resultados obtidos pelo SEBAL aplicado a imagens de sete datas entre os anos de 1989 e 1991 no Estado Americano de Idaho. Ainda assim, os resultados estatísticos mostraram que mesmo com essa variação no ERM, pode-se considerar que o SEBAL possui boa precisão em simular os fluxos diários da ET para a BHRU.

Os erros padrões de estimativas e erros absolutos médios variaram entre 0,70 e 1,11 mm.dia⁻¹ e 0,54 e 0,96 mm.dia⁻¹, respectivamente. A exemplo desta tese, Hemakumara *et al* (2003) também obtiveram resultados similares para a ET e Wang *et al.* (2005) encontraram erros absolutos menores, na ordem de 0,5 mm dia⁻¹. Por outro lado, Bezerra *et al.* (2008) demonstraram as diferenças para valores horários e diários sendo inferiores a 10% ratifica a potencialidade e sensibilidade do algoritmo em estimar a variabilidade da ET nesta escala temporal.

3.2 Evapotranspiração mensal e sazonal

A evapotranspiração mensal de 2004 até 2014 foi determinada utilizando os produtos MOD09A1, MOD11A2 e MOD13A1, que são imagens médias de 8 dias, 8 dias e 16 dias, respectivamente. As datas das cenas estão dispostas na tabela 15.

Tabela 15 - Cenas MODIS usadas para cômputo da ET mensal estimada pelo SEBAL

Data da cena	Dia Juliano	Data da cena	Produtos
01/01/Ano*	001	01/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
17/01/Ano*	017	17/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
02/02/Ano*	033	02/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
18/02/Ano*	049	18/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
05/03/Ano*	065	06/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
21/03/Ano*	081	22/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
06/04/Ano*	097	07/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
22/04/Ano*	113	23/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
08/05/Ano*	129	09/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
24/05/Ano*	145	25/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
09/06/Ano*	161	10/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
25/06/Ano*	177	26/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
11/07/Ano*	193	12/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
27/07/Ano*	209	28/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
12/08/Ano*	225	13/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
28/08/Ano*	241	29/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
13/09/Ano*	257	14/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
29/09/Ano*	273	30/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
15/10/Ano*	289	16/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
31/10/Ano*	305	01/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
16/11/Ano*	321	17/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
02/12/Ano*	337	03/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1
18/12/Ano*	353	19/01/Ano**	MOD09A1, MOD11A2, MOD13A1

Fonte: do autor. Ano* refere-se aos anos bissextos 2004, 2008 e 2012. Ano** aos anos 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013 e 2014.

Na escala mensal, a precisão dos resultados foi avaliada em comparação com os valores de ET_0 estimados por PM-FAO e pela evapotranspiração real (ET_r) por *eddy covariance* em um plantio de palma de óleo (dados contidos em Silva (2015)). Para a escala sazonal, os achados de Negrón Juárez (2007) serviram como referência. Este autor apresentou análises de evapotranspiração nas estações chuvosa e menos chuvosa pela técnica de *eddy covariance* para 10 sítios em diferentes pontos da Amazônia.

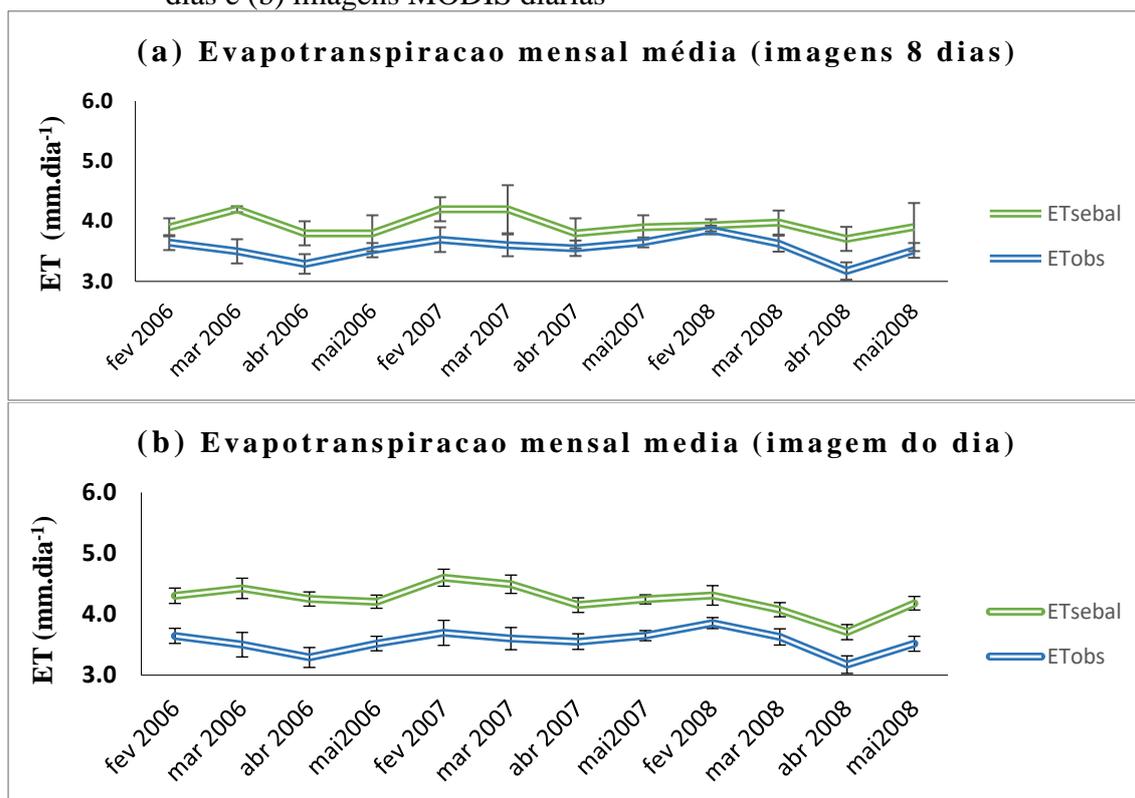
Os gráficos 13 apresenta a estimativa da ET mensal pelo SEBAL para os meses fevereiro a maio de 2006, 2007 e 2008. Observa-se que o algoritmo foi capaz de reproduzir com melhor precisão a variabilidade mensal da ET quando se empregaram imagens médias de 8 dias, se comparadas às estimativas do SEBAL utilizando cenas diárias. Isto pode estar relacionado ao fato de que os produtos médios de 8 dias possuem melhor processo de correção aplicado a todos os pixels que passam pelo controle de qualidade do nível 1B, o que reduz os efeitos dos gases atmosféricos, de aerossóis e de nuvens pouco espessas. Ademais, foram utilizadas somente duas imagens por mês para caracterizar as estimativas mensais, o que pode ter mascarado a amplitude máxima e mínima da ET durante estes meses. A tabela 16 ilustra a diferença entre os valores do EAM, ERM e REQM para os dois diferentes processos de estimativa.

Tabela 16 - Desempenho do SEBAL na estimativa diária da evapotranspiração

Mês/Ano	SEBAL (imagens diárias)				SEBAL (imagens 8 dias)			
	ET	ERM	EAM	REQM	ET	ERM	EAM	REQM
Fev/2006	4,3 ± 0,7	19,0	0,73	0,72	3,9 ± 0,2	7,0	0,25	0,25
Mar/2006	4,4 ± 0,9	35,0	1,06	1,04	4,2 ± 0,1	20,0	0,70	0,70
Abr/2006	4,3 ± 0,6	38,0	1,11	1,09	3,8 ± 0,3	16,0	0,51	0,51
Mai/2006	4,2 ± 0,6	22,0	0,79	0,77	3,8 ± 0,4	8,0	0,28	0,28
Fev/2007	4,6 ± 0,7	33,0	1,04	1,03	4,2 ± 0,3	14,0	0,51	0,51
Mar/2007	4,5 ± 0,8	35,0	1,00	0,99	4,2 ± 0,6	17,0	0,60	0,60
Abr/2007	4,2 ± 0,7	19,0	0,73	0,72	3,8 ± 0,4	7,0	0,25	0,25
Mai/2007	4,2 ± 0,4	17,0	0,70	0,69	3,9 ± 0,3	7,0	0,25	0,25
Fev/2008	4,3 ± 0,7	19,0	0,75	0,74	3,9 ± 0,1	2,0	0,08	0,08
Mar/2008	4,1 ± 0,6	18,0	0,71	0,70	4,0 ± 0,3	10,0	0,35	0,35
Abr/2008	3,7 ± 0,7	25,0	0,74	0,72	3,7 ± 0,3	17,0	0,53	0,53
Mai/2008	4,2 ± 0,6	23,0	0,81	0,80	3,9 ± 0,6	11,0	0,39	0,39

Fonte: do autor. ET é a evapotranspiração média diária ± desvio padrão (mm.dia^{-1}), ERM é o erro relativo médio (%), EAM é o erro absoluto médio (mm.dia^{-1}), REQM é a raiz do erro quadrático médio (mm dia^{-1}).

Gráfico 13 - Evapotranspiração mensal calculada (a) a partir das imagens médias de 8 dias e (b) imagens MODIS diárias



Fonte: do autor. As barras correspondem ao erro padrão.

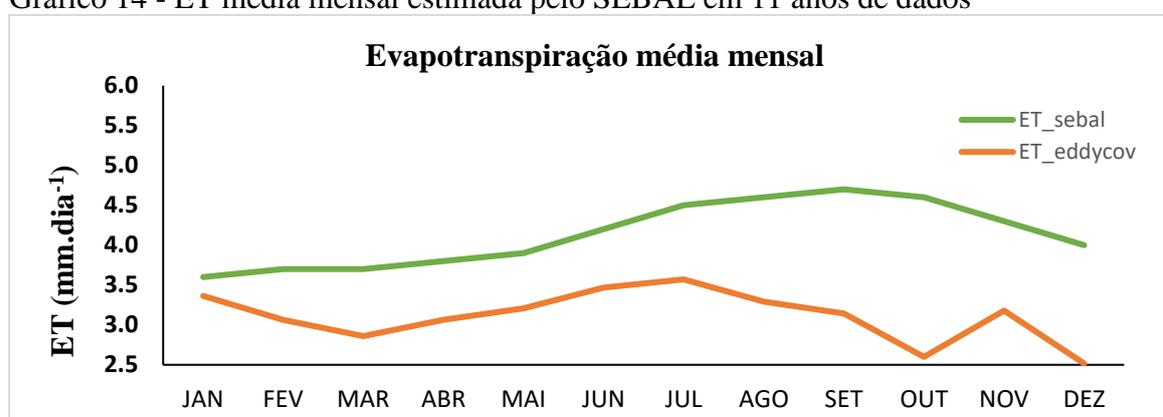
Os resultados demonstraram entre 2% a 20% de erro relativo médio e um mínimo (máximo) de 0,08 mm.dia⁻¹ (0,70 mm.dia⁻¹) de erro absoluto médio, reforçando o fato de que as imagens médias de 8 dias são melhores para estimar a evapotranspiração no algoritmo, no entanto, pode existir uma limitação para estudos que buscam caracterizar a variabilidade da ET em escalas de tempo menores, como sub-mensal, diária ou horária. Ao estimar a ET empregando imagens médias de 8 dias, Oliveira *et al.* (2014) obteve resultados com nível de precisão satisfatório resultando em EAM, ERM e REQM iguais a 0,40 mm.dia⁻¹, 9,63% e 0,51 mm.dia⁻¹ respectivamente, concluindo que foi possível, não obstante a intensa presença de nuvem na região, obter com precisão a evapotranspiração real diária na Bacia do Rio Tapacurá, com o algoritmo SEBAL.

Os resultados desta tese condizem com os de Nagler *et al.* (2005), que utilizaram o SEBAL e obtiveram valores de evapotranspiração variando de 4 a 5 mm.dia⁻¹ no Estado do Novo México, Estados Unidos, em superfície coberta com Tamarisk. Apesar das limitações no uso das imagens médias de 8 dias em análises de escala temporal menor, a maior qualidade destes produtos pode otimizar o custo-benefício para estudos de grandes áreas e larga escala de tempo, como é o caso deste trabalho, pois diminui o tempo de

processamento das imagens desde a aquisição, tratamento, recorte e importação até as rodadas das simulações do SEBAL e, ainda assim, os resultados podem ser satisfatórios.

O gráfico 14 apresenta a evapotranspiração mensal estimada para 11 anos de dados (2004 a 2014), utilizando os produtos MOD09A1, MOD11A2 e MOD13A1, comparada a ET_r obtida por *eddy covariance*, médias mensais de 2006 a 2014 (dados em Silva, 2016). De maneira geral, a evapotranspiração estimada pelo SEBAL revela uma superestimativa em relação à evapotranspiração obtida em campo, principalmente nos meses da estação menos chuvosa. Neste período, o erro relativo médio variou entre 21% a 77%, apresentando EAM entre $0,73 \text{ mm.dia}^{-1}$ a $2,00 \text{ mm.dia}^{-1}$.

Gráfico 14 - ET média mensal estimada pelo SEBAL em 11 anos de dados



Fonte: do autor. As barras correspondem ao erro padrão em relação ao valor médio.

Tabela 17 - Desempenho do SEBAL na da evapotranspiração mensal

Mês	ET_r (Silva, 2016)	ET_{SEBAL}	EAM	ERM	REQM
Janeiro	3,4	3,6	0,24	7,0	0,24
Fevereiro	3,1	3,6	0,64	21,0	0,64
Março	2,9	3,7	0,84	29,0	0,84
Abril	3,1	3,8	0,74	24,0	0,74
Mai	3,2	3,9	0,69	22,0	0,69
Junho	3,5	4,2	0,73	21,0	0,73
Julho	3,6	4,5	0,93	26,0	0,93
Agosto	3,3	4,6	1,31	40,0	1,31
Setembro	3,1	4,7	1,56	50,0	1,56
Outubro	2,6	4,6	2,00	77,0	2,00
Novembro	3,2	4,3	1,12	35,0	1,12
Dezembro	2,5	4,0	1,48	59,0	1,48

Fonte: do autor. ET_r é a evapotranspiração real por eddy covariance (mm.dia^{-1}), ERM é o erro relativo médio (%), EAM é o erro absoluto médio (mm.dia^{-1}) e REQM é a raiz do erro quadrático médio (mm dia^{-1}).

O SEBAL estimou as maiores taxas evapotranspirativas para os meses da estação menos chuvosa, em média $4,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ com variação entre $4,2 \text{ mm.dia}^{-1}$ a $4,7 \text{ mm.dia}^{-1}$; para os meses da estação chuvosa, a ET variou entre $3,6 \text{ mm.dia}^{-1}$ a $4,0 \text{ mm.dia}^{-1}$, com média de $3,8 \text{ mm.dia}^{-1}$. Estes resultados mostraram-se coerentes com os valores

registrados para o Leste da Amazônia por Negrón Juárez (2007), Rocha *et al.* (2004), Souza Filho *et al.* (2005), apresentando as maiores taxas evapotranspirativas de junho a dezembro. Este padrão foi semelhante aos valores encontrados por Ferreira Júnior *et al.* (2012) quando estes autores utilizaram o SEBAL para espacializar a ET_r em uma floresta primária na Amazônia Oriental.

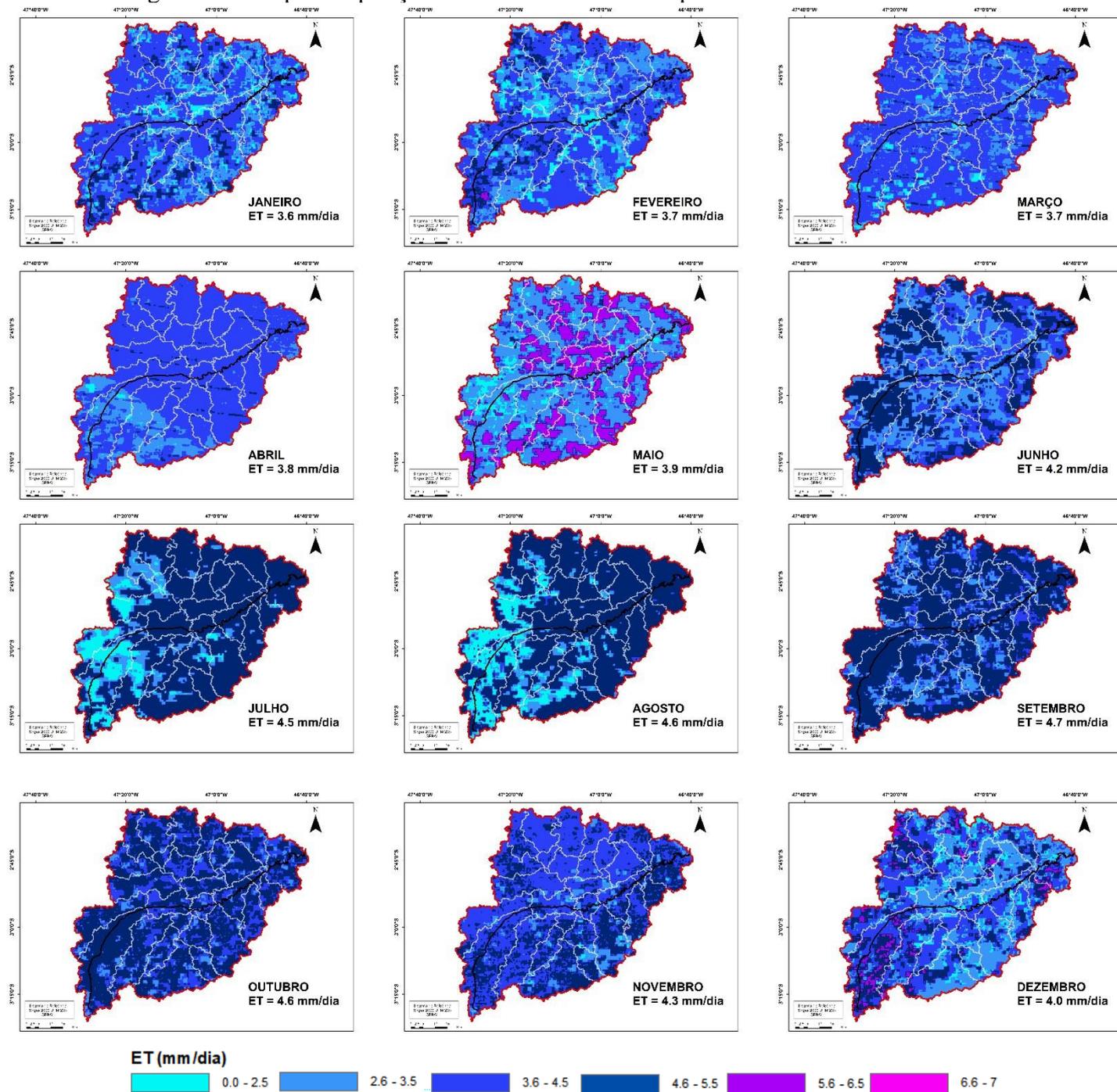
Segundo Negrón Juárez (2007), a ET nos diversos pontos da Amazônia varia de $2,5 \pm 0,4$ a $4,1 \pm 0,4$ mm.dia⁻¹ na estação chuvosa e de $3,8 \pm 0,6$ a $4,3 \pm 0,9$ mm.dia⁻¹ durante a estação menos chuvosa. Ao investigarem a variabilidade temporal e espacial do ciclo da evapotranspiração usando medições de fluxo de eddy covariance em oito diferentes torres do LBA na Amazônia, Hasler; Avissar (2007) concluíram que esta variável apresenta forte sazonalidade nas regiões próximas ao Equador (2°-3° S), com aumento durante a estação seca e decréscimo na estação chuvosa.

Nesta mesma perspectiva de compreender o comportamento mensal da ET, Fitzjarrald (1988) e Shuttleworth *et al.* (1984) usaram o modelo de Penman-Monteith e mostraram que a ET sobre a floresta tropical na Amazônia Central (Manaus) é cerca de 3,5 mm.dia⁻¹ e aumenta na estação seca concorrentemente com o saldo de radiação. Estas pesquisas indicam ainda que, na escala anual, metade da precipitação que cai na floresta retorna para a atmosfera por evapotranspiração e que entre 20% e 25% da ET é um resultado da evaporação de água interceptada pela própria floresta.

Os estudos de Rocha *et al.* (2004) e Souza-Filho *et al.* (2005) mostraram resultados de ET por *eddy covariance* para a região de Santarém e Caxiuanã, no Estado do Pará, respectivamente. Em ambas as pesquisas, os autores demonstraram que os maiores valores de ET aconteceram durante a estação seca, seguindo o maior saldo de radiação e déficit de pressão de vapor. Costa *et al.*, (2010) analisaram a evapotranspiração para três sítios sazonalmente chuvosos e dois sítios sazonalmente secos da Amazônia. Os autores demonstraram que a evapotranspiração é maior na estação seca do que na estação chuvosa, tendo como principal controlador o saldo de radiação à superfície. No entanto, essas análises indicaram também que há diferentes fatores controlando a sazonalidade da ET, como outros controles ambientais e de vegetação.

A figura 17 apresenta o comportamento médio mensal médio da ET especializada pelo SEBAL para a BHRU. Nela, percebe-se o aumento da variável a partir do mês de junho e decréscimo com o início da estação chuvosa, além da variabilidade espacial característica da bacia, com maiores valores nas áreas de floresta primária e menores em regiões onde a pastagem e área urbana são identificadas.

Figura 17 - Evapotranspiração média mensal estimada pelo SEBAL de 2004 a 2011



Fonte: do autor.

Recentemente, von Randow; von Randow (2011) quantificaram as taxas de evapotranspiração em dois diferentes sítios com pastagem na Amazônia e avaliaram as diferenças entre eles. De acordo com os autores, em ambos os sítios a evapotranspiração diminui durante a estação seca. O decréscimo é maior no sítio do sudoeste da Amazônia, enquanto que no sítio da Amazônia Central, o decréscimo é menos pronunciado. Durante a estação seca, a evapotranspiração média é em torno de $2,2 \pm 0,6 \text{ mm.dia}^{-1}$ na Amazônia

Central e $2,4 \pm 0,6 \text{ mm.dia}^{-1}$ no sudoeste da Amazônia; na estação chuvosa, estes valores são $2,1 \pm 0,6 \text{ mm.dia}^{-1}$ na Amazônia Central e $3,5 \pm 0,8 \text{ mm.dia}^{-1}$ na Amazônia Sudoeste. Os autores concluíram que a principal razão desta diferença é a menor disponibilidade de energia na estação seca na Amazônia Central, combinado com um menor índice de área foliar neste sítio durante o ano todo.

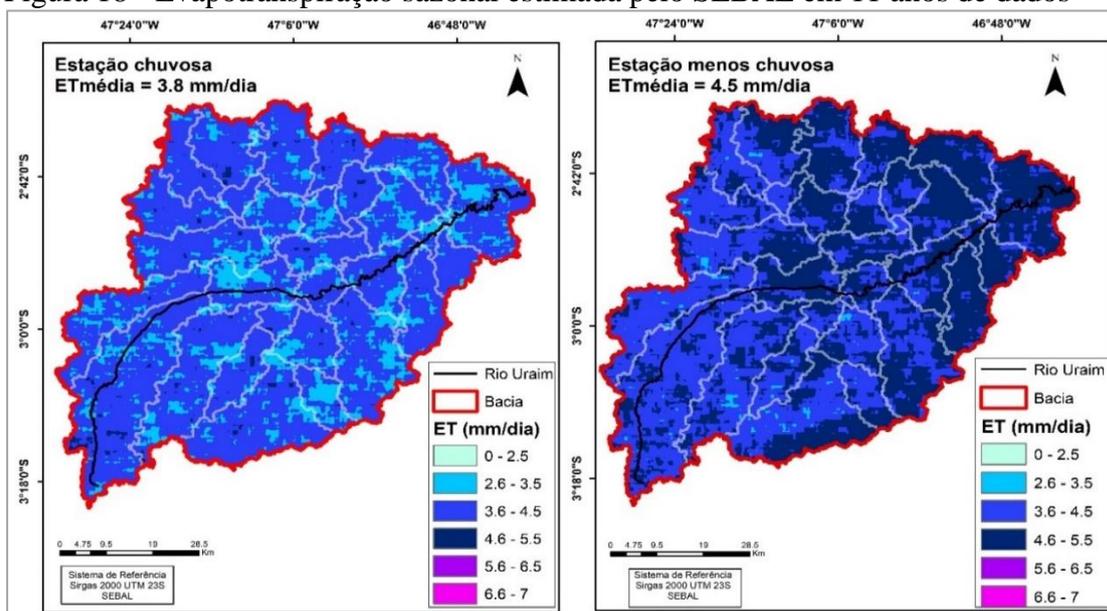
A figura 18 mostra a evapotranspiração média da estação chuvosa e menos chuvosa em 11 anos de estimativa pelo SEBAL. Ratifica-se que a ET é maior (menor) na estação menos chuvosa (estação chuvosa) em média $4,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ ($3,8 \text{ mm.dia}^{-1}$), concordantes com o que se observa na região. Além disso, fica evidente que o algoritmo consegue capturar a variabilidade espacial da ET em toda a bacia, principalmente na estação menos chuvosa. Isto pode ser explicado porque (i) a variação sazonal no padrão da evapotranspiração coincide com o aumento do saldo de radiação, portanto, o SEBAL é capaz de simular com eficiência o principal controlador da ET, que é o saldo de radiação à superfície; (ii) o fato da região situar-se na faixa equatorial e da ausência significativa de nebulosidade, a radiação global incidente é maior, a região experimenta pouca influência dos sistemas precipitantes e, conseqüentemente, há boas imagens MODIS para processarem seus produtos nas simulações do algoritmo.

Tabela 18 - Evapotranspiração sazonal estimada pelo SEBAL para a BHRU

Estação	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Média
Chuvosa	4,0	4,1	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,6	3,5	3,5	3,4	3,8
Menos	4,6	4,5	4,7	4,7	4,6	4,4	4,5	4,4	4,3	4,3	4,2	4,5

Fonte: do autor.

Figura 18 - Evapotranspiração sazonal estimada pelo SEBAL em 11 anos de dados



Fonte: do autor.

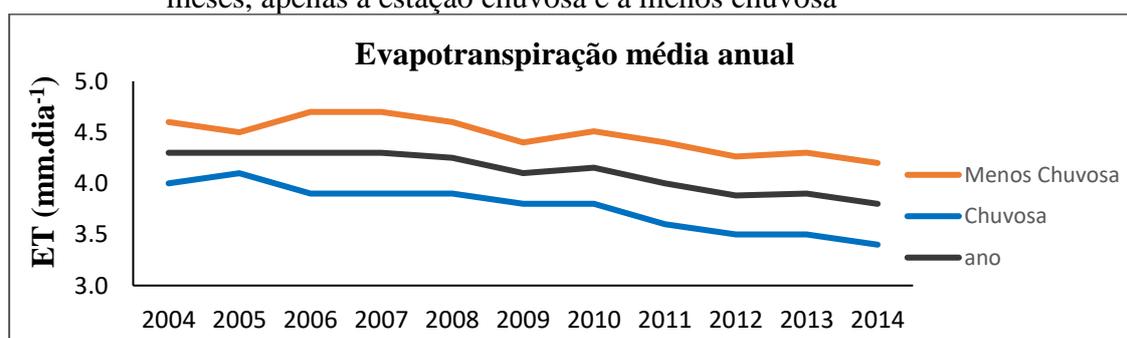
Outro fato que explica a manutenção das altas taxas de ET no período menos chuvoso é que a reposição de umidade do solo durante os meses da estação chuvosa normalmente fornece água suficiente para manter altas taxas de ET mesmo nos meses mais secos, suavizando os impactos dos déficits de precipitação neste período de pouca disponibilidade hídrica (NEGRÓN JUARÉZ *et al.*, 2007). Isto é, o armazenamento de umidade do solo disponível para absorção da raiz pode ser suficiente para manter a taxa de evapotranspiração igual ou até mesmo maior do que na estação chuvosa (MALHI *et al.*, 2002; NEPSTAD *et al.*, 1994; SOMMER *et al.*, 2002). Em outras palavras, se o déficit de chuvas durante a estação chuvosa for muito grande, resultará num armazenamento reduzido no reservatório de umidade do solo, o que pode indicar um possível impacto de baixa precipitação na estação seca subsequente.

3.3 Evapotranspiração anual

A ET anual de 2004 até 2014 foi determinada a partir dos valores dos mapeamentos mensais desta variável. O gráfico 15 e a figura 19 apresentam comportamento da ET obtido pelo SEBAL.

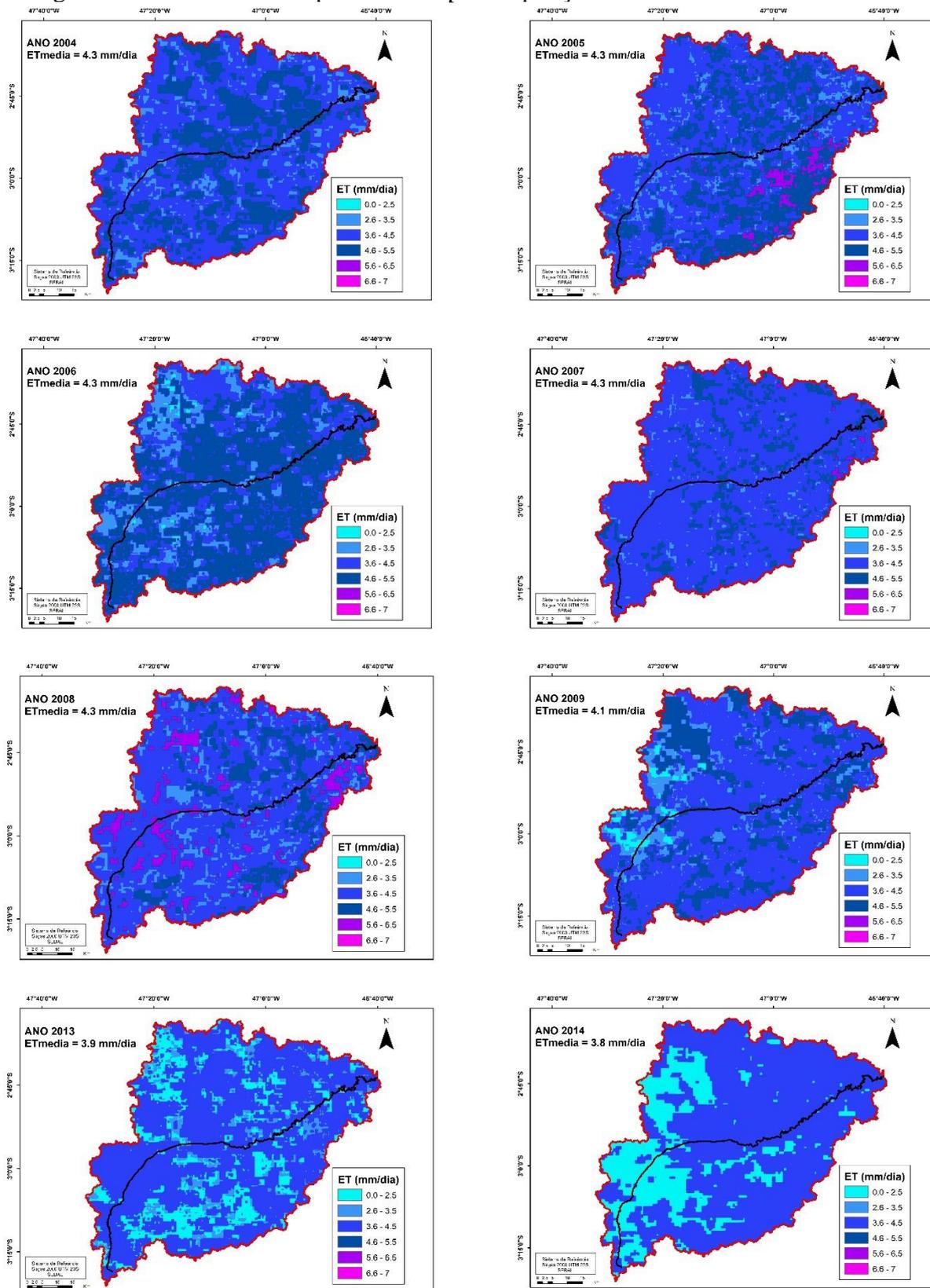
No geral, a evapotranspiração anual média foi de 4,1 mm.dia⁻¹, com mínimo de 3,8 mm.dia⁻¹ e máximo de 4,3 mm.dia⁻¹. O algoritmo foi capaz de capturar sua variabilidade espacial e revelou uma tendência de decréscimo da ET em média 0,5 mm de 2004 a 2014. Isto pode estar relacionado as perdas significativas de vegetação primária e secundária na bacia, aproximadamente 302 km² entre 2004 e 2014. Este resultado reitera a capacidade do SEBAL em propiciar a variabilidade espacial da ET para diferentes usos e ocupações da terra, pois dentro do processo da estimativa da ET, avalia-se a variabilidade espacial de variáveis biofísicas como albedo superficial e planetário, índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), índice de área foliar (IAF), emissividade e temperatura de superfície, etc.

Gráfico 15 - Evapotranspiração média anual estimada pelo SEBAL considerando os doze meses, apenas a estação chuvosa e a menos chuvosa



Fonte: do autor.

Figura 19 - Variabilidade espacial da evapotranspiração anual de 2004 a 2014



Fonte: do autor.

Dentro desse contexto, Silva *et al.* (2005) determinaram o balanço de radiação à superfície em três áreas com diferentes uso e ocupação da terra utilizando o SEBAL: áreas irrigadas, de vegetação nativa (Caatinga) e parte da área urbana de Petrolina, PE e Juazeiro, BA. Os autores concluíram que esta técnica produziu valores dos componentes do balanço de radiação consistentes com observações realizadas do balanço radiativo, capturando as diferenças das superfícies destas áreas.

Utilizando essa mesma concepção de aplicabilidade do algoritmo, Moreira (2007) avaliou o balanço de radiação e seus os componentes, além da evapotranspiração horária em três regiões distintas no estado do Ceará, Nordeste do Brasil. O autor concluiu que na estimativa do saldo de radiação, dos componentes do balanço de energia e da ET, o SEBAL se mostrou bastante eficiente, apresentando a existência de uma variabilidade local e regional na evapotranspiração.

Visando comprovação a eficiência do algoritmo em determinar os componentes do balanço de energia à superfície e do processo da estimativa da evapotranspiração real diária pelo SEBAL para diferentes superfícies, Silva; Bezerra (2006) realizaram uma pesquisa no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho, às margens do rio São Francisco em Petrolina-PE. O estudo concluiu que o algoritmo apresenta um grande potencial de aplicação prática para a região, necessitando apenas de mais informações como um mapa de uso e ocupação da terra, bem como campanhas experimentais com a finalidade de aferir os resultados e parametrizar as diferentes variáveis envolvidas no cálculo dos componentes do balanço de energia à superfície pelo modelo.

Silva *et al.* (2012), objetivando mapear e validar a evapotranspiração real e determinar o volume de água utilizado no projeto de irrigação de São Gonçalo, PB, no Semiárido brasileiro, com auxílio do sensoriamento remoto, também aplicaram o SEBAL e validaram com o método de estimativa do método PM-FAO. Nas áreas irrigadas, a ET_{SEBAL} variou de 4,4 a 5,6 mm.dia⁻¹. Na área de sequeiro, a ET_{SEBAL} apresentou valor diário mínimo (máximo) de 0,6 mm (1,7 mm). As diferenças obtidas, com uso das duas técnicas, resultaram em REQM, ERM e EAM iguais a 0,53 mm, 9,46% e 0,43 mm, respectivamente. Nas áreas irrigadas, a ET_r representou 85% do saldo de radiação e, nas de sequeiro, apenas 12,5%, devido à baixa quantidade de água disponível para evapotranspirar.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As crescentes taxas de desflorestamento na Amazônia requerem cada vez mais amplo entendimento sobre possíveis impactos disto nos recursos hídricos. Portanto, os resultados contidos neste capítulo foram fundamentais para conhecer a demanda evapotranspirométrica a nível de bacia, pois ela é altamente variável no tempo e no espaço. As informações revelaram aspectos indispensáveis no planejamento e manejo de recursos hídricos da BHRU, uma vez que nela existe forte presença de produção agrícola e isto representa uma porcentagem importante da economia do Estado do Pará. Os resultados mostraram a capacidade do SEBAL em fornecer a variabilidade espacial da ET para diferentes usos da terra na bacia. Apesar de não ser o foco, o algoritmo capturou a variabilidade espacial do saldo de radiação a superfície e o cômputo do balanço de energia possibilitou observar quantitativamente e espacialmente as formas diferenciadas do uso da radiação líquida pelos diferentes tipos de cobertura da terra. Os maiores valores de R_n foram identificados nas áreas de vegetação primária, seguido de agricultura anual e pastagem, ou seja, indica que a perda de vegetação na bacia pode ter alterado a capacidade da superfície em reter energia para os processos de evapotranspiração e para o aquecimento do ar e do solo e, como consequência, pode modificar o clima local. O SEBAL é uma ferramenta alternativa, principalmente em áreas que possuem ausência ou poucas redes de observação em superfície como a Amazônia Brasileira. Entretanto, esta técnica apresenta algumas limitações, como o método empírico muito simples de correção atmosférica para estimar o albedo, a subjetividade na escolha dos pixels âncoras e erros na temperatura da superfície estimada pode gerar impacto nas estimativas de calor sensível (H), além dos efeitos do ângulo de visada de algumas cenas que podem provocar um desvio de vários graus na temperatura da superfície. É importante citar que os baixos erros relativos obtidos aqui não representam uma validação perfeita do SEBAL, pois o próprio método padrão (PM-FAO) usado para validação dos resultados pode apresentar erros devido a falhas decorrentes de manutenção dos instrumentos. O fato de ter sido aplicado a uma região úmida e o SEBAL ter sido desenvolvido para condições de clima árido e semiárido, Machado *et al.* (2014) cita que uma maneira de melhorar as estimativas do algoritmo seria usar a metodologia proposta por Trezza (2002), que propõe aplicar o balanço hídrico quando há registro de incidência de chuvas nos 5 ou 6 dias que antecedem ao imageamento, pois é provável que existam resíduos de umidade do solo e a seleção do pixel quente pode ser comprometida.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G *et al.* Surface Energy balance algorithm for land (SEBAL): advanced training and user's manual. **Idaho Implementation**, v.1, 98 f. 2002.
- ALLEN, R. G. *et al.* A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 251-268. 2005
- ALLEN, R. G *et al.* Crop evaporation (irrigation and drainage). Roma: FAO, 1998. n. 56, 301 f. 1998.
- BASTIAANSEN, W.G.M. *et al.* **Regionalization of surface flux density and moisture indicators in composite terrains**. Tese (Doutorado). 1995. 273 f. Wageningen Agricultural University, Netherland. 1995.
- BASTIAANSEN, W.G.M. *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation, **Journal of Hydrology**, v. 212, n. 213, p. 198-212. 1998.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100. 2000.
- BASTIAANSEN, W.G.M *et al.* Managing scarce water resources in Asia: the nature of the problem and can remote sensing help? **Irrig. Drain. Syst.** v. 19, n 3, p. 269-284. 2005.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p. 305-317. 2008
- BISHT, G. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 52-67. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.014. 2005.
- CAI, J. Estimating reference evapotranspiration with the FAO penman–monteith equation using daily weather forecast messages. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 145, p. 22–35, 2007.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARROLL, M.L *et al.* 250m MODIS normalized difference vegetation index. **Collection 4**, University of Maryland, College Park, Maryland. 2004

COSTA, M. H *et al.* Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: Are the wet and seasonally dry rain forests any different? **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 2010.

CRAGO, R. D. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. **Journal of Hydrology**, v. 180, n. 4, p. 173-194. 1996.

CUNHA, P. C. R *et al.* A eficiência de métodos para cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**. Goiânia, v.43, n.2, p. 114-122, 2013.

FERREIRA JUNIOR, P. P. **Evapotranspiração regional utilizando imagens orbitais para a Amazônia Oriental**. Dissertação (Mestrado). 2012. 97 f. Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2012.

FERREIRA JUNIOR, P. P. *et al.* Estimativa de evapotranspiração no Leste da Amazônia usando SEBAL. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 56, n. 1, p. 33-39. 2013

FITZJARRALD *et al.* Turbulent transport observed above the Amazon forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n.2, p. 1551–1563. 1988.

GAVILAN, P. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: impact on penman–monteith reference ET estimates in semiarid regions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 89 n. 3, p. 275–286. 2007.

HASLER, N.; AVISSAR, R. *et al.*, What controls evapotranspiration in the Amazon basin? **Journal of Hydrometeorology**. v. 8, p. 380-395. 2007.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A., Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v.1 n.2, p.96–99, 1985.

HEMAKUMARA, H. M. *et al.* Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. **Agricultural Water Management**. v. 58, p. 109-122. 2003.

HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient: a new view of statistics. 2000**. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 15/09/2016

LAGOURADE JP, BRUNET Y. A simple model for estimating the daily upward longwave surface radiation flux from NOAA–AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14 (5), p. 907-925. 1983.

MACHADO, C. C *et al.* Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM - Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Rev. bras. meteorol.** v. 29, n.1. 2014.

MALHI, Y. *et al.* Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 107, n. 20, 2002.

MOREIRA, L.C.J.; **Estimativa da evapotranspiração horária usando o algoritmo SEBAL e imagens do Landsat 5-TM**. Monografia. 2001. 91 f. Universidade Federal do Ceará. 2007.

MORSE, A. *et al.* Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River Basin of Idaho through remote sensing – Final Report. **Idaho Department of Water Resources** – University of Idaho. 2000

NAGLER, P. L. *et al.* Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. **Remote Sensing of Environment**, v.97, p.337-351, 2005.

NEGRÓN JUÁREZ, R. I. *et al.* Control of dry season evapotranspiration over Amazonian forest as inferred from observations at a Southern Amazon forest. **Journal of Climate**, n. 20, p. 2827-2839. 2007.

NEPSTAD, D. C. *et al.* The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, n. 372, p. 666–669. 1994.

OLIVEIRA, E. A. **Métodos para análise de concordância: simulação e aplicação a dados de evapotranspiração**. Tese (Doutorado). 2014. Escola Superior de Agricultura. Piracicaba, São Paulo. 2014.

OLIVEIRA, L. M. M. *et al.* Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste Brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.10, p.1039–1046, 2014.

ORTEGA-FARIAS, S. *et al.* Special issue on evapotranspiration measurement and modeling, New York, **Irrigation Science**, v. 28 n. 1, p. 1–3, 2009

PAULSON, C.A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Appl. Meteorology**, n. 9, p.857-861. 1970.

ROCHA, H. R. *et al.* Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia, **Ecol. Appl.**, v. 14, n. 4, p. 22–S32. 2004.

SENTELHAS, P.C. *et al.* Evaluation of FAO penman–monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SILVA, A. K. L. **Impacto da expansão da palma de óleo sobre o escoamento superficial e produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas não monitoradas dos Rios Bujaru e Mariquita no Nordeste do estado do Pará, Amazônia oriental.** Tese (Doutorado). 2016. 319 f. Escola de Engenharia e São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo. 2016.

SILVA, B. B *et al.* Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p.243-252, 2005.

SILVA, B. B; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, SP, v.14, p.1-10, 2006.

SILVA, B.B *et al.* Evapotranspiração e estimativa da água consumida no perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.47, n.9, p.1218-1226, set. 2012.

SOMMER, R *et al.* Transpiration and canopy conductance of secondary vegetation in the eastern Amazon. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 112, n.2, p. 103-121. 2002.

SOUZA, A. M. L *et al.* Evapotranspiration from remote sensing to improve the SWAT model in eastern Amazonia. **Floresta e Ambiente**. v. 22, n. 4, p. 456-464. 2015.

SOUZA, P. J. O. P *et al.* Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.1, p.65–73, 2010.

SOUZA, P. J. O. P *et al.* Impactos do avanço da soja no balanço de radiação no leste da Amazônia. **Acta Amazonica**, v.43, p.169-178, 2013.

SOUZA, P. J. O. P *et al.* Sazonalidade no balanço de energia em áreas de cultivo de soja na Amazônia. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p.548-557, 2012.

SOUZA, P. J. O. P *et al.* Consumo hídrico da soja no Nordeste Paraense. **Irriga, Botucatu**, edição Especial, p. 218-231, 2016.

SOUZA FILHO, J. D. *et al.* Control mechanisms of the seasonal variation of transpiration in a northeast Amazonia tropical rainforest (in Portuguese), **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 223-229. 2005.

SHUTTLEWORTH, W.J. *et al.* Observations radiation exchange above and below Amazonian Forest. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, n.110, v.466, p. 1163 – 1169, 1984.

SHUTTLEWORTH, W. J *et al.* Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. **Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society**, v. 110, n. 466, p. 1143-1162. 1984.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation from Amazonian rainforest. **Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences**, v. 233, n. 1272, p. 321-346. 1988.

TEIXEIRA *et al.* Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the low-middle São Francisco river basin, Brazil. Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462-476. 2009.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with standardized ground control**. Tese (Doutorado). 2002. 247 f. Utah State University. Logan. 2002.

VERMOTE, E. F; VERMEULEN, A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09), **ATBD**, v. 4. 1999.

VON RANDOW, R. C. S.; VON RANDOW, C. Evapotranspiration of deforested areas in central and southwestern Amazonia. **Theor Appl Climatol**. DOI 10.1007/s00704-011-0570-1. 2011.

WAN, Z.; LI, Z. L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MOIS data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v.35, n.4, pp.980-996. 1997.

WANG, J., KIMURA, R.; BASTIAANSEN, W. Monitoring ET with Remote Sensing and the Management of Water Resources on a Basin Scale, *In*: 11th CERES INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING. **Anais...** Chiba, Japan. 2005.

WEBB, E. K. Profile relationships: the log-linear range, and extension to strong stability. **Quart. J. Roy. Meteorology. Soc.** v. 96, p. 67-90. 1970.

WIDMOSER, P. A discussion on and alternative to Penman–Monteith equation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 96, p. 711–721, 2009.

WILLMOTT, C. J. *et al.* Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005. 1985.

XING, Z *et al.* Validating evapotranspiration equations using bowen ratio in New Brunswick. **Maritime Canada. Sensors**, Lausanne, n. 8. p. 412–428, 2008.

CAPÍTULO 4 SIMULAÇÕES DE VAZÃO UTILIZANDO EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA UMA BACIA ANTROPIZADA NO LESTE DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Resumo

Produtos de sensoriamento remoto (SR) tem se tornado uma fonte indispensável de dados de entrada para a modelagem ambiental e hidrológica através de estimativas de parâmetros como evapotranspiração (ET), índice de área folia (IAF) e outros derivados de imagens de satélites. O objetivo deste capítulo foi simular as vazões mensais para a BHRU testando diferentes cenários e métodos de estimativas de ET para aplicação no *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Antes da primeira simulação, foram modificados alguns dados no banco do SWAT para representar realisticamente as características da bacia. A série de vazão observada foi dividida em período de calibração (2003-2009) e validação (2010-2014), onde utilizou-se o algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2) e o SWAT-CUP em ambas as etapas. Os resultados mostraram que o SWAT simulou satisfatoriamente o comportamento médio mensal da vazão, demonstrando que ao aplicar a ET do SEBAL em vez da ET potencial (ETP) por Penman-Monteith, as simulações apresentam erros absolutos e relativos médio menores. Um dos principais desafios enfrentados pela modelagem do SWAT é a calibração eficiente dos parâmetros, assim, a melhora na precisão das simulações de vazão após as modificações dos parâmetros mais sensíveis ficou comprovada pelos valores dos erros relativos médios (ERM) que passaram de 170% para 21% na estação chuvosa; e de 94% para 24% na estação menos chuvosa no modelo 2004. Na mesma perspectiva, o modelo de 2014 diminuiu o ERM de 172% para 30% e 91% para 12% na estação chuvosa e menos chuvosa, respectivamente. Os modelos calibrados foram considerados de “bom” a “muito bom” conforme a classificação de Moriasi *et al* (2007) para os coeficientes NSE, RSR e PBIAS encontrados. Conclui-se, portanto, que o SWAT é eficiente em simular a vazão mensal para esta bacia e a assimilação da ET pelo SEBAL tem impacto positivo, pois pode capturar as diferenças nos tipos de uso e cobertura da terra da bacia. Ressalta-se a necessidade de mais aplicações como esta para investigar, principalmente, cenários de mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra na Amazônia, considerando uma série de dados observados com mais períodos úmidos e secos.

Palavras-chave: Amazônia. Modelagem hidrológica. Sensoriamento remoto.

CHAPTER 4 STREAMFLOW SIMULATION USING REMOTE SENSING EVAPOTRANSPIRATION TO A DEGRADED WATERSHED IN BRAZILIAN EASTERN AMAZON

Abstract

Remote sensing (SR) products have become an indispensable source of input data for environmental and hydrological modeling through estimates of parameters such as evapotranspiration (ET), leaf area index (LAI) and other derived from satellite imagery. The objective of this chapter was to simulate the monthly flows to the BHRU, testing different scenarios and methods of ET estimation for application in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Before the first simulation, some data were modified in the SWAT bench to represent realistically the characteristics of the basin. The observed flow series was divided into a calibration period (2003-2009) and validation (2010-2014), where the Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2) and SWAT-CUP algorithm were used in both steps. The results showed that the SWAT simulated the average monthly streamflow satisfactorily with the initial conditions and demonstrating that when applied the ET estimated by SEBAL instead of Potential Evapotranspiration (EPT) by Penman-Monteith, the simulations present a lower mean relative and absolute errors. One of the main challenges faced by the hydrological modeling of SWAT is the efficient calibration of the parameters, thus, the improvement in the accuracy of the flow simulations after the modifications in the most sensitive parameters was proven by the values of the mean relative errors (MRE) that decreased from 170% to 21 % in the less rainy season, and from 94% to 24% in the less rainy season in the 2004 model. In the same perspective, the 2014 model reduced MRE from 172% to 30% and 91% to 12% in the rainy and less rainy season, respectively. The calibrated models were considered "good" to "very good" according to the Moriasi *et al* (2007) classification for the NSE, RSR and PBIAS coefficients found. It is concluded, therefore, that the SWAT is efficient in simulating the monthly flow for this basin and the assimilation of the ET by SEBAL has a positive impact, since it can provide the differences in the types of land use and land cover for the basin. It is worth mentioning the need for more applications such as this one to investigate, mainly, scenarios of climate change and land use and land cover changes in the Amazon, considering a series of data observed with more wet and dry periods.

Keywords: Amazon. Hydrological modeling. Remote sensing. SWAT.

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do poder computacional, o desempenho de modelos hidrológicos melhorou significativamente e os resultados das suas simulações tornaram-se uma parte essencial no gerenciamento de bacias hidrográficas. Por sua vez, o sensoriamento remoto (SR) fornece informações temporais dinâmicas e espacialmente explícitas sobre as características da superfície terrestre (ZHANG *et al.*, 2011). Assim, a implementação de seus dados em modelos hidrológicos pode ser de grande benefício, especialmente para bacias hidrográficas com baixa disponibilidade de dados.

A maioria dos estudos usa produtos de SR para definir a geometria, rede de drenagem e uso da terra de uma bacia hidrográfica. No entanto, nas últimas décadas, tem crescido pesquisas que parametrizam variáveis hidrológicas, como índice de área foliar (IAF) ou umidade do solo através de técnicas de sensoriamento remoto (BOEGH *et al.*, 2004). O uso destes dados de SR para calibrar ou avaliar um modelo hidrológico, porém, tem sido estudado apenas por poucos pesquisadores.

A evapotranspiração detectada remotamente tem importante resolução espacial e temporal e pode ser usada para estimar parâmetros relacionados ao balanço hídrico do solo (ALLEN *et al.*, 2007a; 2007b; IMMERZEL; DROOGERS, 2008). Alguns estudos têm integrado dados de sensoriamento remoto na calibração de modelos hidrológicos, obtendo melhoria do desempenho de previsão de vazões (MUTHUWATTA *et al.*, 2009; SOUSA, 2015; ZHANG *et al.*, 2009).

Alguns algoritmos têm sido formulados para viabilizar a compreensão dos processos evaporativos, dentre os quais cita-se o SEBAL (BASTIAANSEN *et al.*, 1995) utilizado em várias partes do mundo, nos mais distintos tipos de uso e cobertura da terra (BASTIAANSEN *et al.*, 1998a; BASTIAANSEN, 2000; BEZERRA *et al.*, 2008; TEIXEIRA, 2009). Ele avalia as trocas de energia na interface solo-vegetação-atmosfera por meio das componentes do balanço de radiação e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e para o solo (G).

Já as componentes do ciclo hidrológico têm sido representadas por modelos numéricos de forma consistente e usados efetivamente no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Dentre os modelos disponíveis para a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas destaca-se o SWAT, que foi desenvolvido para verificar os efeitos resultantes das modificações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo,

bem como na produção de sedimentos, tendo sido estudado e difundido amplamente pelos trabalhos de Arnold *et al.* (1996; 1998; 1999).

O SWAT tem se tornado uma ferramenta familiar para estudantes, professores e profissionais brasileiros, os quais têm aplicado o modelo em diversos estudos hidrológicos e de avaliação das bacias hidrográficas no País. Um dos primeiros registros encontrados sobre o uso do SWAT no Brasil data de 1999. Desde então, o modelo tem sido utilizado em diversos estudos acadêmicos em várias regiões brasileiras (GARBOSSA *et al.*, 2011).

Garbossa *et al.* (2011) revisou trabalhos de 1999 a 2010 e identificou que 74 trabalhos com o uso do modelo, resultando numa distribuição de 51% nos estados de São Paulo, Santa Catarina e Paraná, sendo 43% sobre sedimentos, 41% sobre vazões e 16% na simulação de carga de poluentes. Bressani *et al.* (2015) mostrou mais de 100 trabalhos entre 1999 a 2014, mas poucos publicados em periódicos.

Alguns propósitos e aplicações estão relacionados a sintetizar eventos hidrológicos passados, melhorar o entendimento sobre os processos hidrológicos, prever eventos futuros, avaliar os efeitos na bacia hidrográfica em função de mudanças no uso e cobertura da terra e no clima (BEVEN, 2001; KLEMES, 1986). A adequação e verificação da eficiência do SWAT é dada pelos processos de calibração e validação, onde os parâmetros existentes no modelo são ajustados a partir da comparação com dados medidos em campo.

A calibração do modelo SWAT pode ser executada manualmente ou com softwares como o SWAT *Calibration Uncertainty Procedure* (SWAT-CUP). Ele foi desenvolvido para apoiar usuários na calibração e tem cinco métodos diferentes: GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*), ParaSol (*Parameter Solution*), MCMC (*Markov Chain Monte Carlo*), PSO (*Particle Swarm Optimization*) e SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) (ABBASPOUR, 2013).

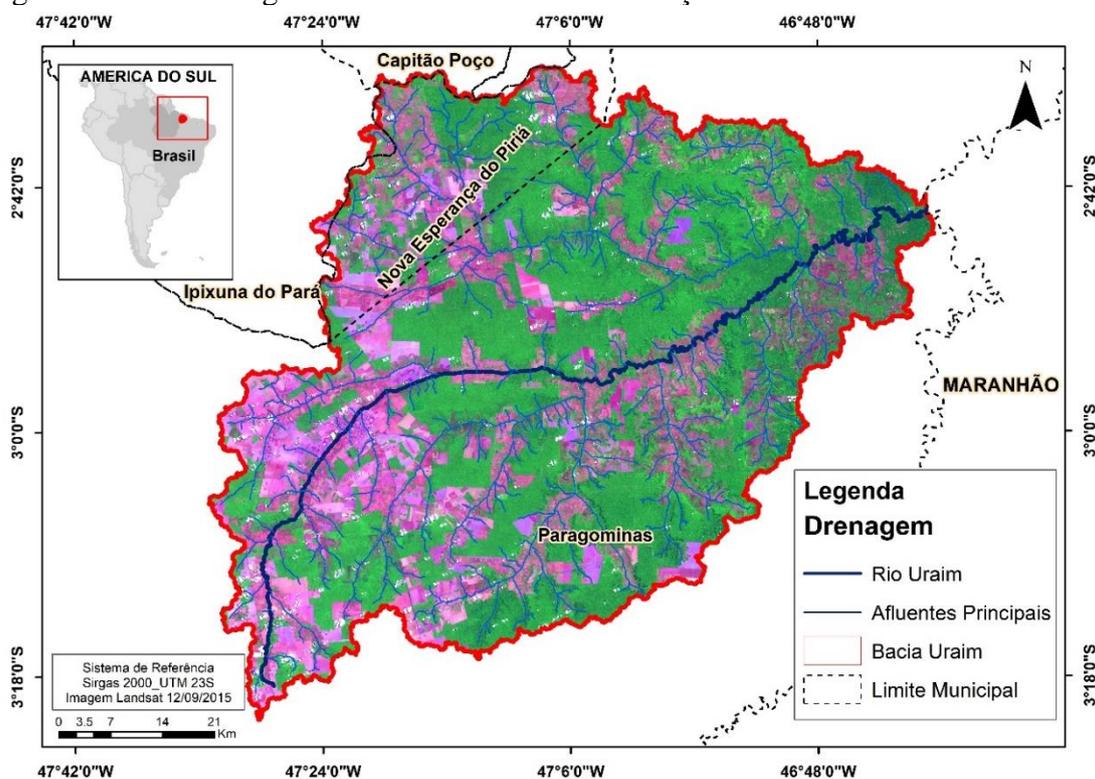
Tendo em vista as alterações no padrão do uso da terra na Bacia hidrográfica do Rio Uraim e a crescente disponibilidade e uso de produtos remotamente detectados, este estudo objetiva investigar o impacto da assimilação da evapotranspiração baseada em sensoriamento remoto (ET estimada pelo SEBAL) na simulação da vazão mensal pelo SWAT. Além de avaliar o desempenho do modelo para dois cenários de uso e cobertura da terra distintos e, posteriormente, utilizar-se-a os melhores parâmetros calibrados nas previsões de vazão para o futuro próximo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

Assim como nos capítulos anteriores, a bacia hidrográfica do Rio Uraim continua a ser determinada como área de estudo. Sua forma e relevo plano favorecem o processo de escoamento superficial, onde 45% de sua área é ocupado por pastagens e agricultura anual. As chuvas são abundantes de dezembro a maio, decrescendo de junho. O latossolo amarelo distrófico é predominante na bacia. A figura 20 apresenta área de estudo.

Figura 20 - Carta imagem da área de estudo e localização



Fonte: do autor.

2.2 Modelagem hidrológica do SWAT

As simulações de vazão foram elaboradas a partir do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e as descrições seguintes constituem-se como um resumo metodológico do modelo, fundamentadas nos manuais elaborados por Neitsch *et al.* (2005b; 2005c) e encontradas nos estudos de Nunes (2013) e Silva (2016).

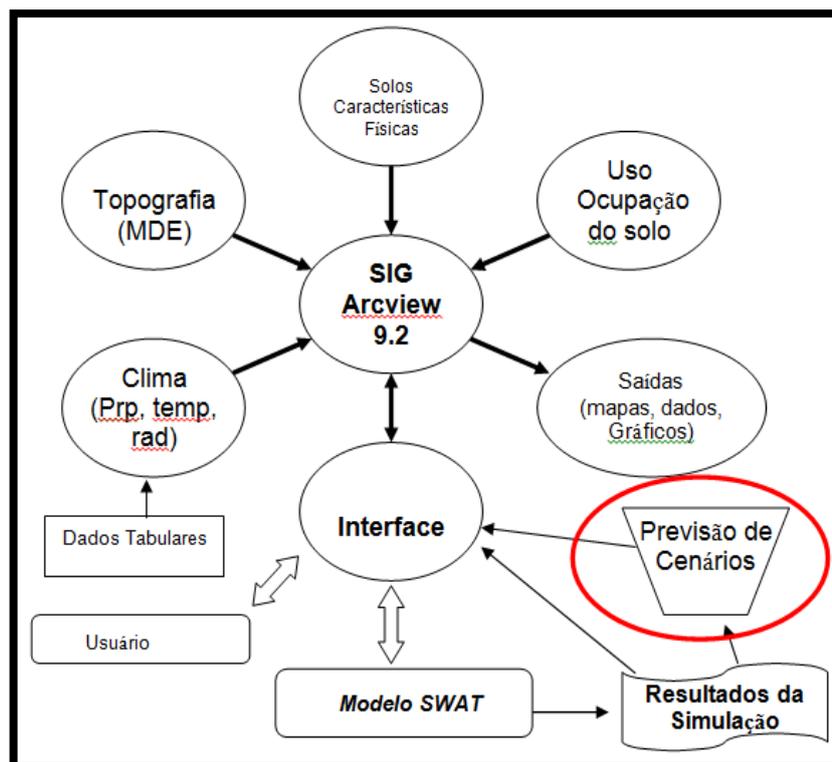
O SWAT é do tipo semi-distribuído e foi desenvolvido pelo USDA *Agricultural Research Service* e *Texas A&M University AgriLife Research* para análise dos impactos

das alterações no uso da terra sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água. Arnold *et al* (1996) apresentaram a primeira versão modelo, entretanto, o mesmo vem sendo continuamente modificado, incluindo melhor representação dos processos simulados.

Nele, a bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias, permitindo refletir as diferenças de tipo de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo. Isto possibilita a subdivisão de centenas a milhares de células (cada célula representa uma sub-bacia).

No aspecto temporal, o SWAT trabalha com passo de tempo diário em seus processos, assim, a maior parte dos dados a serem inseridos no modelo devem ter frequência diária, principalmente as séries históricas de dados climáticos. Com relação às respostas das simulações do modelo, podem ser diárias, mensais ou anuais de acordo com a opção do usuário antes de iniciar uma simulação. A figura 21 apresenta os módulos do SWAT e seu processo de funcionamento.

Figura 21 - Processo de funcionamento do SWAT



Fonte Adaptada de Machado (2002).

Os principais processos simulados pelo modelo SWAT nas sub-bacias requerem uma grande quantidade de parâmetros de entrada que se relacionam com as características físicas da bacia. O modelo é livre, gratuito e possui uma interface que facilita o trabalho

com imagens georreferenciadas; contempla a parte de produção de água (superficial e subterrânea), tanto na forma líquida quanto na forma de vapor.

O SWAT divide a simulação hidrológica nas fases terrestre e canal. Na fase terrestre, o modelo processa os resultados em sete módulos (clima, hidrologia, cobertura vegetal/crescimento de plantas, erosão, nutrientes, pesticidas e manejo). A fase canal contempla os fenômenos envolvidos na propagação do escoamento e comportamento dos sedimentos e nutrientes recebidos da fase anterior, desde o percurso ao longo do curso d'água até a seção de controle.

2.2.1 Fase terrestre

Seu ciclo hidrológico é baseado na equação do balanço hídrico (equação 47).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Equação 47

onde: SW_t é a quantidade final de água no solo (mm); SW_0 é a quantidade inicial de água no solo (mm); t é o tempo (dias); R_i é a precipitação (mm); Q_i é o escoamento superficial (mm); ET_i é a evapotranspiração (mm); P_i é a percolação (mm); QR_i é o fluxo de retorno (escoamento de água no interfluxo, sobre a superfície do terreno, após emergir da superfície, ocorrida através da ascensão capilar, em mm).

a) Clima

O SWAT requer dados diários de precipitação (PRP), temperatura máxima do ar (TMAX), temperatura mínima do ar (TMIN), radiação solar (RS), velocidade do vento (VV) e umidade relativa do ar (UR). O modelo possui um gerador climático (WGEN_user) capaz de estimar os valores diários a partir de médias mensais, tornando possível o preenchimento de possíveis falhas na série de dados.

b) Hidrologia

- Escoamento Superficial

Utiliza-se dois métodos, efetuado para cada unidade de resposta hidrológica: (i) uma modificação do método “curva número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS), que considera os diferentes tipos de ocupação do solo; (ii) o método *Green and Ampt* (GREEN; AMPT, 1911), onde o escoamento superficial ocorrerá quando a taxa de

aplicação de água no solo ultrapassar a taxa de infiltração. O método CN é expresso pela seguinte equação 48.

$$Q_s = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)}$$

Equação 48

onde: Q_s é o escoamento acumulado ou excesso de chuva (mm); R é a precipitação diária (mm); I_a são as perdas iniciais que incluem o armazenamento superficial, a interceptação e a infiltração (mm); S é o parâmetro de retenção, expresso pela equação 49.

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

Equação 49

Onde: CN é a curva número para o dia, dada em função da sub-bacia, permeabilidade, declividade, tipo e uso do solo e histórico de umidade do solo. Para Sousa (2010), CN vai variar de forma não linear de 1 (para o murchamento) e 100 (para a saturação).

- Infiltração/água no solo

Com o método de CN, usado para cálculo do escoamento superficial, não é possível modelar a infiltração de forma direta. Assim, assume-se que a água infiltrada é dada pela diferença entre a PRP e o escoamento superficial. Do todo que infiltra, parte evapora ou é destinada ao metabolismo das plantas, e a outra porção esco lateralmente até alcançar o curso d'água. A água pode ainda percolar até uma camada mais profunda e recarregar o aquífero. No SWAT o parâmetro que controla a quantidade de água disponível para as plantas é dado pela equação 50.

$$AWC = FC - WP$$

Equação 50

onde: WAC é a capacidade de água disponível para as plantas (mm); FC é a quantidade de água relativa à capacidade de campo; WP é a quantidade de água no ponto de murchamento permanente.

- Percolação

Quando se tem uma camada do solo em que a quantidade de água ultrapassa a capacidade de campo, ocorre a percolação (equação 51).

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left[1 - \exp \left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right) \right]$$

Equação 51

onde: $W_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola para uma camada inferior em um determinado dia (mm); $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável de água no solo em um determinado dia (mm); Δt é a extensão do passo de tempo (h); TT_{perc} é a duração da percolação (h).

- Escoamento lateral.

Quando a água percola verticalmente e acha uma camada impermeável, ela se acumula, forma uma zona saturada dando origem ao escoamento lateral. O modelo calcula isto através do armazenamento cinemático desenvolvido por SLOAN *et al.* (1983) (equação 52).

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2 SW_{ly,excess} K_{sat} slp}{\phi_d L_{hill}} \right)$$

Equação 52

onde: Q_{lat} é a descarga de água da rampa de saída (mm.dia⁻¹); $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável da água armazenada na zona saturada da rampa por unidade de área (mm); K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm.h⁻¹); slp é a declividade da rampa (m.m⁻¹); ϕ_d é a porosidade drenável da camada de solo (mm.mm⁻¹); L_{hill} é o comprimento da rampa (m).

É possível promover um atraso para o escoamento lateral no caso de sub-bacias com tempos de concentração maiores que um dia. Para isso usa-se o parâmetro LAT_TTIME, caso seja necessário.

- Evapotranspiração

A evaporação da água do solo e a transpiração das plantas estão relacionadas à E_{tp} e ao índice de área foliar (IAF). O SWAT oferece três métodos para o cálculo da E_{tp} : Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), Priestley-Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972) e Hargreaves (HARGREAVES; SAMANI, 1985). Para o estudo utilizou-se os dados de ET_o obtidos no capítulo via SEBAL, além do método de Penman-Monteith do próprio SWAT, expresso pela equação 53.

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_{air} C_p \left(\frac{e_z^0 - e_z}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)}$$

Equação 53

onde: λE é a densidade do fluxo de calor latente (MJ.m².d⁻¹); Δ é a declividade da curva pressão-temperatura do vapor de saturação; R_n é a radiação líquida (MJ.m⁻².d⁻¹); ρ_{air} é a densidade do ar (Kg.m⁻³); C_p é o calor específico a pressão constante (MJ.Kg⁻¹.°C⁻¹); e_z^0 é a pressão do vapor de saturação do ar à altura z (Kpa.°C⁻¹); e_z é a pressão do vapor do ar à altura z (Kpa); γ é a constante

psicrométrica ($0,062 \text{ Kpa.}^\circ\text{C}^{-1}$); r_c é a resistência do dossel vegetativo (s.m^{-1}); e r_a é a resistência de difusão da camada de ar (s.m^{-1}).

Por *default*, o modelo faz distribuições entre as camadas de forma que 5% desta demanda sejam extraídas dos primeiros 10 mm do solo e outros 95% do restante sejam extraídas dos primeiros 100 mm do solo quando se tem demanda evaporativa para o solo. LUBITZ (2009) sugere que se utilize da ferramenta ESCO (coeficiente de compensação da evaporação do solo) para casos em que se necessite extrair mais da demanda evaporativa de camadas mais profundas do solo.

- Águas Subterrâneas

Águas subterrâneas são aquelas em camadas saturadas. No SWAT, modela-se dois sistemas: o aquífero raso (ars), que contribui com escoamento para o canal; e o aquífero profundo (a água que chega até o aquífero profundo é eliminada do sistema). O ars é dado pela equação 54.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh}$$

Equação 54

onde: $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no ars no dia i (mm); $aq_{sh,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no ars no dia $i-1$ (mm); $w_{rchrg,sh}$ é a quantidade de recarga entrando no ars no dia i (mm); Q_{gw} é o escoamento de base ao canal no dia i (mm); w_{revap} é a quantidade de água indo para a zona não saturada do solo em resposta às deficiências de água no dia i (mm); $w_{pump,sh}$ é a quantidade de água retirada do ars por bombeamento no dia i (mm).

É recomendável incorporar o parâmetro GW_DELAY caso queira simular um atraso que possa acontecer entre o momento em que a água sai do perfil do solo e entra no aquífero raso. No entanto, este parâmetro é apenas estimado, já que o SWAT não o mede diretamente. Recomenda-se o RCHRG_DP para determinar a quantidade de recarga que será encaminhada ao aquífero profundo. Já o parâmetro GWQMN é usado quando se quer determinar um limiar pré-estabelecido para o cálculo do escoamento de base, uma vez que só é permitido alcançar o canal se a água armazenada no aquífero raso exceder este limiar definido anteriormente. O escoamento de base é calculado pela equação 55.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \exp\left[(-\alpha_{gw} \Delta t + w_{rchrg,sh}(1 - \exp(-\alpha_{gw} \Delta t))\right]$$

Equação 55

onde: $Q_{gw,i}$ é o escoamento de base ao canal no dia i (mm); $Q_{gw,i-1}$ é o escoamento de base ao canal no dia $i-1$ (mm); α_{gw} é a constante de recessão do escoamento de base; Δt é o passo de tempo (1 dia); $w_{rchrg,sh}$ é a quantidade de recarga entrando no ars no dia i (mm).

O ALPHA_BF é identificado no SWAT como o parâmetro α_{gw} , podendo ser obtido de forma mais precisa através dos dados de vazão (equação 56).

$$\alpha_{gw} = \frac{2,3}{BDF}$$

Equação 56

onde: BDF é o número de dias de escoamento de base para a bacia.

No SWAT, o revap refere-se à água que alcançou o aquífero raso podendo retornar à zona não saturada por capilaridade ou através da ação de raízes profundas de algumas plantas. Assim, deve-se definir o limite que a água não deve ultrapassar no ars para que ocorra este fenômeno, através da ferramenta REVAP_MN. Ocorrendo isto, o modelo remove esta parte do cálculo de água subterrânea, através da equação 57.

$$w_{revap, mx} = \beta_{rev} E_0$$

Equação 57

onde: $w_{revap, mx}$ é a máxima quantidade de água que está sendo movida para a zona não saturada em resposta à deficiência hídrica (mm); β_{rev} é o coeficiente revap (GW_REVAP); E_0 é a E_{ip} para o dia (mm).

2.2.2 Fase canal

Nesta fase, as perdas podem ocorrer por evaporação, transmissão através do leito ou pela remoção de água para uso humano ou agrícola e as entradas são propiciadas através da PRP direta sobre o curso d'água e por descargas pontuais. O SWAT utiliza duas formas para simular a propagação do escoamento: um método que usa um coeficiente de armazenamento variável (WILLIAMS, 1969); e outro que é o de *Muskingum* (McCARTHY, 1939), que modela o volume ao longo do canal através da combinação dos armazenamentos. O volume total é dado pela equação 58.

$$V_{stored} = K(X q_{in} + (1 - X)q_{out})$$

Equação 58

onde: V_{stored} é o volume de armazenamento (m^3); q_{in} é a taxa de entrada do escoamento ($m^3.s^{-1}$); q_{out} é a taxa de descarga ($m^3.s^{-1}$); K é a constante de armazenamento para o canal (s); X é o fator de ponderação, que pode variar entre 0 e 0,5, sendo comum o uso de 0,2 para rios. O valor de K é calculado de acordo com a equação 59.

$$K = \frac{1000 L_{ch}}{C_k}$$

Equação 59

Onde: L_{ch} é o comprimento do canal (km); C_k é a celeridade ($m.s^{-1}$), corresponde à velocidade que propaga minha vazão. É definida segundo a equação 60.

$$C_k = \frac{5}{3} \left(\frac{R_{ch}^{2/3} \times slp_{ch}^{1/2}}{n} \right)$$

Equação 60

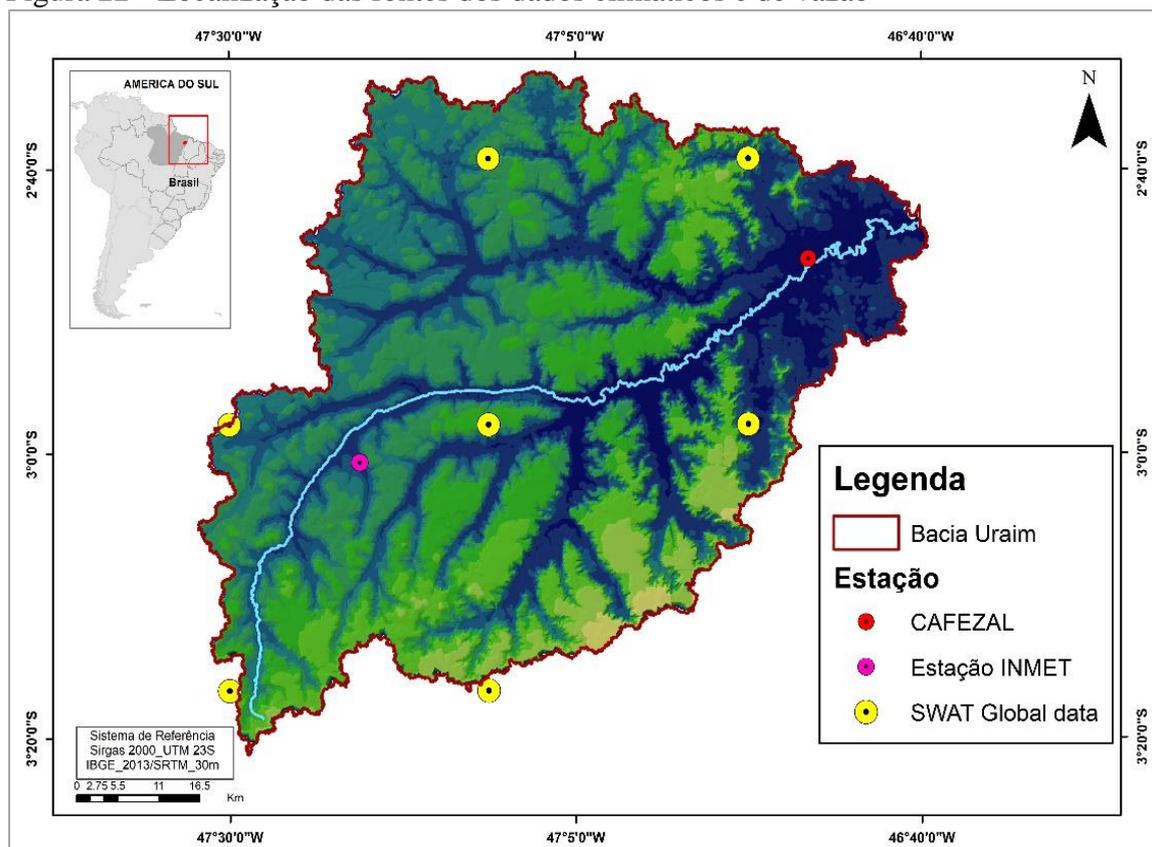
onde: R_{ch} é o raio hidráulico para uma determinada profundidade de escoamento (m); slp_{ch} é a declividade ao longo do canal ($m.m^{-1}$); n é o coeficiente de rugosidade de *Manning* (parâmetro que se utiliza de métodos estatísticos para definir a rugosidade de um rio) para o canal (TUCCI, 2005).

2.2.3 Dados de entrada no SWAT

As informações espaciais fornecidas foram o MDE, mapas de solo e de uso e cobertura da terra, ET estimada pelo SEBAL, além de uma série de dados tabulares relacionados ao solo e ao clima. O passo inicial ocorre na geração dos planos de informação (PIs) e na entrada dos dados em pontos de grades e dos PIs necessários.

Os dados climáticos diários foram disponibilizados pela estação meteorológica do INMET (02°59'25" S; 47°24'28" O; 113 m) e pelo *Global Weather Data for SWAT* (GWDS), totalizando oito pontos dentro da bacia. A série de vazão diária foi fornecida pela estação fluviométrica 32360000-Cafezal (02°46'18" S; 46°48'10" O), responsabilidade da ANA (figura 22).

Figura 22 - Localização das fontes dos dados climáticos e de vazão



Fonte: do autor.

Tabela 19 - Fonte dos dados climáticos de entrada fornecidos para o SWAT

Fonte	ID	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Série
GWDS	PCP1	-2.654	-46.875	54	2000-2014
GWDS	PCP1	-2.654	-47.188	83	2000-2014
GWDS	PCP3	-2.654	-46.875	103	2000-2014
GWDS	PCP4	-2.654	-47.188	70	2000-2014
GWDS	PCP5	-2.654	-47.500	100	2000-2014
GWDS	PCP6	-3.278	-47.188	126	2000-2014
GWDS	PCP7	-3.278	-47.500	200	2000-2014
INMET	PCP8	-2.990	-47.408	113	2000-2014

Fonte: do autor.

O SWAT requer também a constituição do gerador climático (*WGEN_user*), que fornece informações ao modelo para realizar o preenchimento de falhas. Este é composto de um conjunto de parâmetros mensais calculados a partir dos dados de precipitação (mm), temperaturas máxima e mínima (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C) e velocidade do vento ($m.s^{-1}$). Os 7 pontos de coleta do GWDS forneceram os dados necessários para os cálculos dos parâmetros que compuseram as 7 *WGEN_user* utilizadas neste estudo.

Tabela 20 - Fonte dos dados climáticos fornecidos para o gerador climático do SWAT

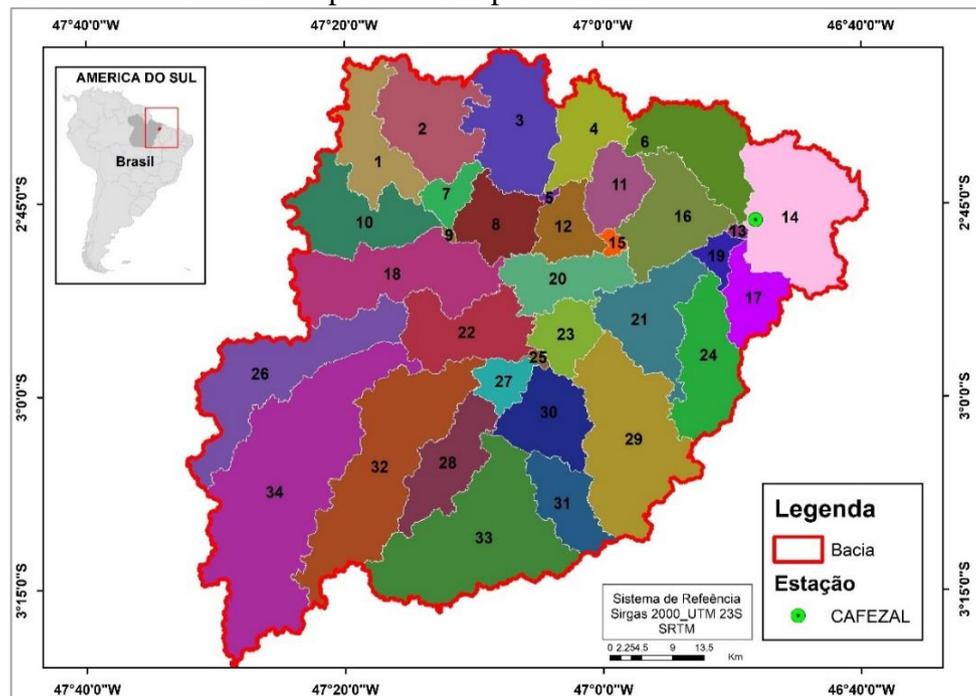
Fonte	ID	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Série
GWDS	PCP1	-2.654	-46.875	54	1980-2014
GWDS	PCP1	-2.654	-47.188	83	1980-2014
GWDS	PCP3	-2.654	-46.875	103	1980-2014
GWDS	PCP4	-2.654	-47.188	70	1980-2014
GWDS	PCP5	-2.654	-47.500	100	1980-2014
GWDS	PCP6	-3.278	-47.188	126	1980-2014
GWDS	PCP7	-3.278	-47.500	200	1980-2014

Fonte: do autor

a) Subdivisões da BHRU

Gerados automaticamente pelo SWAT a partir do MDE, os pontos de confluência do rio foram critérios para a divisão das sub-bacias. O SWAT subdividiu a BHRU em 34 sub-bacias (figura 23). A sub-bacia 14, com área total de 283,8 km² (tabela 21), foi escolhida para a verificação da vazão simulada por possuir o único posto de medição, a estação 32360000 – Cafezal, em toda área de estudo.

Figura 23 - Sub-bacias criadas pelo SWAT para a BHRU



Fonte: do autor.

As URH's foram definidas a partir dos mapas de solo, de uso e cobertura da terra e de declividade, totalizando 1.075 URH's (tabela 21). A geração dessas URH's permitiu determinar a dominância de cada categoria de solo, uso e cobertura da terra e declividade dentro da bacia. Isto melhora a precisão das simulações porque permite ao SWAT

transmitir diferenças de evapotranspiração e de outras condições hidrológicas do terreno com distintas características.

Tabela 21 - Sub-bacias e suas respectivas áreas totais

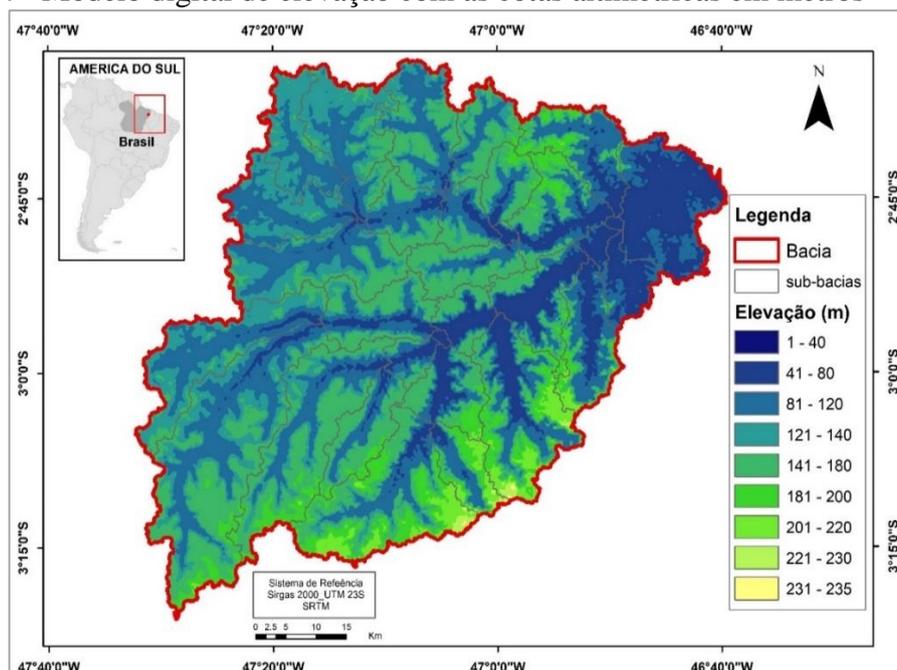
Sub-bacias	Área (km ²)	Sub-bacias	Área (km ²)	Sub-bacias	Área (km ²)
SB01	143,1	SB13	5,2	SB25	5,9
SB02	179,9	SB14	283,8	SB26	261,0
SB03	201,2	SB15	10,3	SB27	46,7
SB04	116,9	SB16	166,7	SB28	130,7
SB05	3,9	SB17	85,2	SB29	318,2
SB06	170,6	SB18	250,7	SB30	128,2
SB07	41,6	SB19	27,3	SB31	99,0
SB08	106,0	SB20	115,5	SB32	355,6
SB09	3,1	SB21	162,4	SB33	369,0
SB10	173,5	SB22	160,3	SB34	587,9
SB11	84,8	SB23	76,6	Total	5.112,7
SB12	77,0	SB24	165,2		

Fonte: do autor.

b) Modelo digital de elevação (MDE)

O MDE (figura 24) apresentou altitudes entre 1 e 235 metros, com média de 118 metros. A BHRU tem predominantemente relevo plano, sendo mais acentuado na porção sul. Utilizou-se imagens SRTM de aproximadamente 90 metros de resolução espacial, disponibilizado gratuitamente pela EMBRAPA e reamostradas para 30 m, pois o SWAT necessita que todas as cartas envolvidas tenham a mesma resolução espacial.

Figura 24 - Modelo digital de elevação com as cotas altimétricas em metros



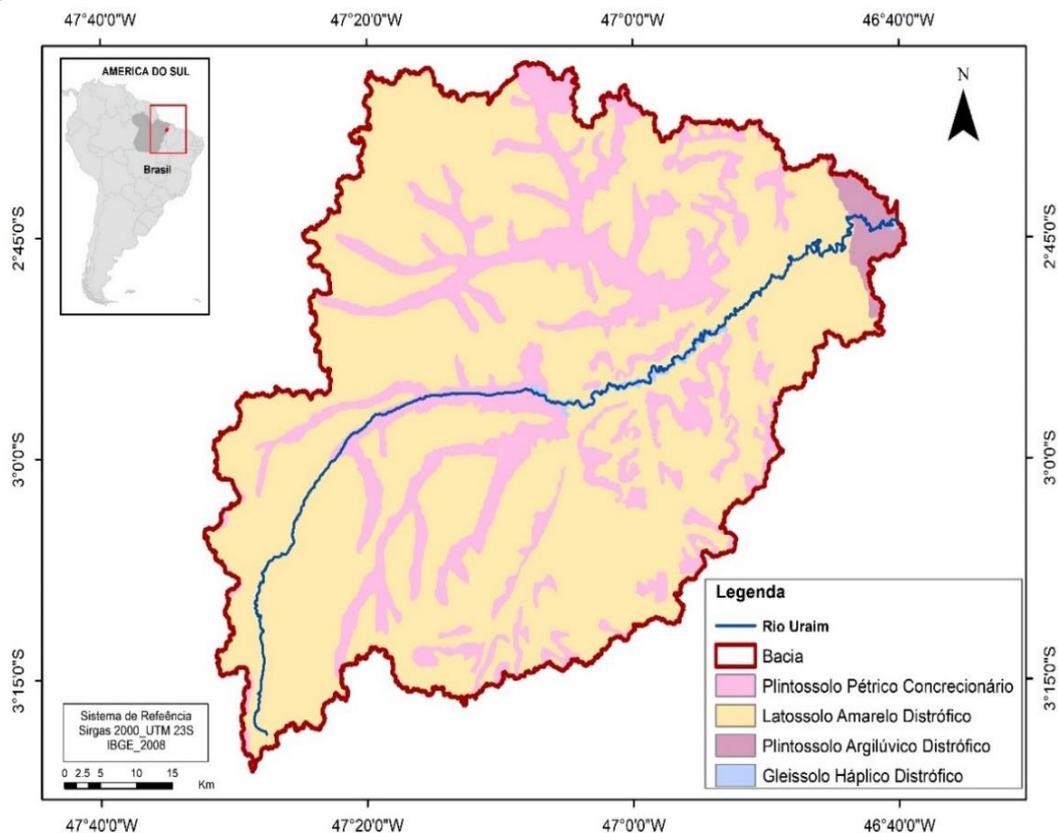
Fonte: do autor.

c) Mapa pedológico

O SWAT necessita de um banco de dados tabulares preenchido com valores para o número de camadas do solo, grupo hidrológico, máxima profundidade da raiz no perfil do solo, fração de porosidade, albedo e etc. Utilizou-se informações físico-químicas de perfis de solo disponibilizados pelo Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos (PROVAM, 1990). O Grupo hidrológico de cada solo foi definido conforme Sartori *et al.* (2005a; 2005b) e o mapeamento vetorial dos solos é do ZEE-PA.

Resumidamente, a bacia possui várias associações em grande maioria denominados como LATOSSOLO AMARELO distrófico (LAd) e outros três tipos de solos em proporção menor, sendo eles GLEISSOLO HÁPLICO distrófico (GXbd), PLINTOSSOLO PÉTRICO concrecionário (FFc) e PLINTOSSOLO ARGILÚVICO distrófico (FTd). De acordo com Rodrigues (2003), os solos desta região são de baixa fertilidade natural, porém, de boas propriedades físicas em sua maioria.

Figura 25 - Mapa de solos da BHRU.



Fonte: do autor.

Tabela 22 - Classes de tipos de solo usadas e suas respectivas áreas percentuais

Código SWAT	Tipo de solo	Área (%)
FFC	Plintossolo pétrico concrecionário	23.1
FTD	Plintossolo argilúvico distrófico	1.5
LAD	Latossolo amarelo distrófico	74.8
GXBD	Gleissolo háplico distrófico	0.6
Total		100,0

Fonte: do autor.

d) Mapa de uso e cobertura da terra

A distribuição do uso e cobertura da terra foi informada ao modelo a partir dos mapas do Terra Class (INPE, 2012; INPE, 2014). Os anos base são 2004 e 2014, sendo que o mapa de 2004 representa o estado inicial de simulação, com poucas áreas de agricultura anual; e o mapa de 2014 representa o estado com forte expansão agrícola. Posteriormente, aplicou-se ao SWAT os mapas de uso e cobertura da terra dos cenários futuros para 2034, gerados com o arcabouço CLUE-S (capítulo V).

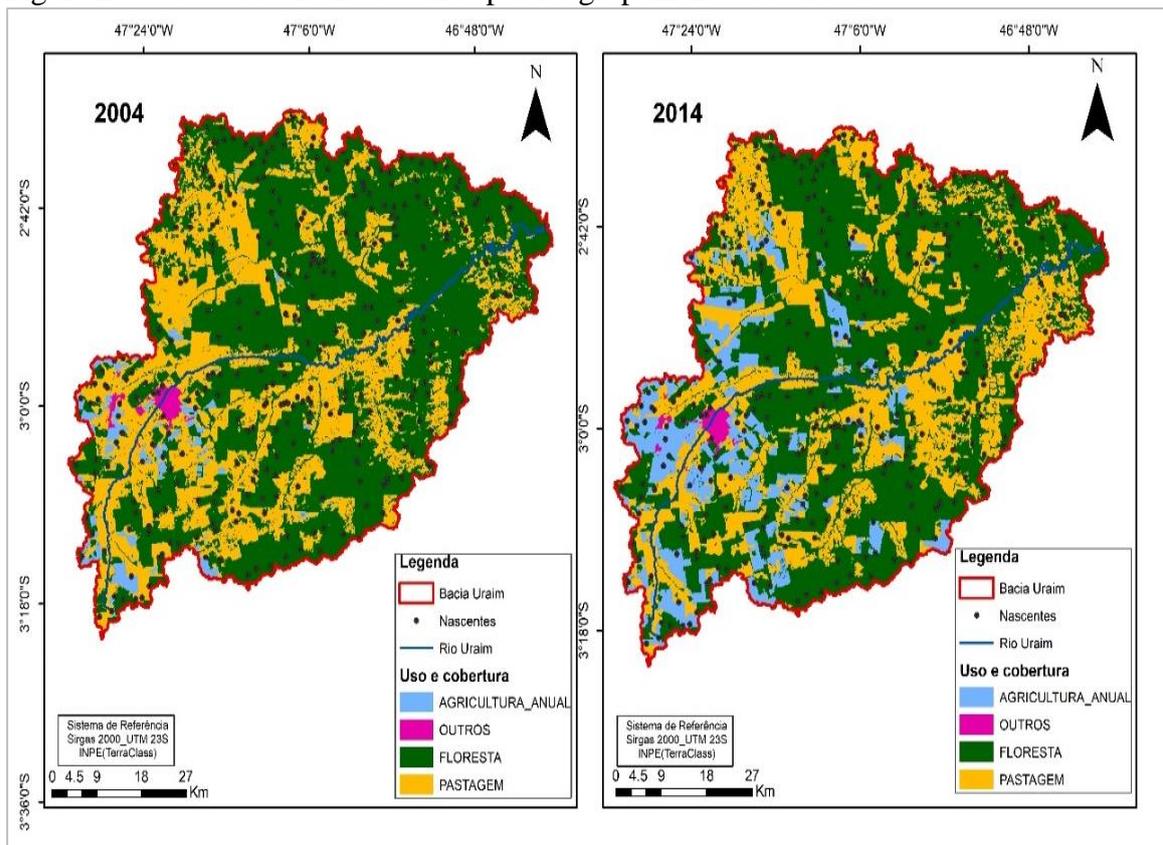
Inicialmente, estes mapas possuíam nove classes, no entanto, agruparam-se algumas delas afim de facilitar as análises na modelagem hidrológica do SWAT e da modelagem dinâmica espacial de uso e cobertura da terra no capítulo V (tabela 23).

Tabela 23 - Reagrupamento das classes de uso e cobertura da terra

Mapa TerraClass (2004 e 2014)	Mapa SWAT
Agricultura anual	Agricultura anual
Área Urbana + Outros	Urbana
Pasto com solo exposto + Pasto limpo + Pasto sujo + Mosaico de ocupações	Pastagem
Floresta + Vegetação secundária	Floresta

Fonte: do autor.

Figura 26 - Uso e cobertura da terra após reagrupamento das classes



Fonte: adaptado de Terra Class/INPE (2014).

Tabela 24 - Representatividade do uso e cobertura da terra na bacia

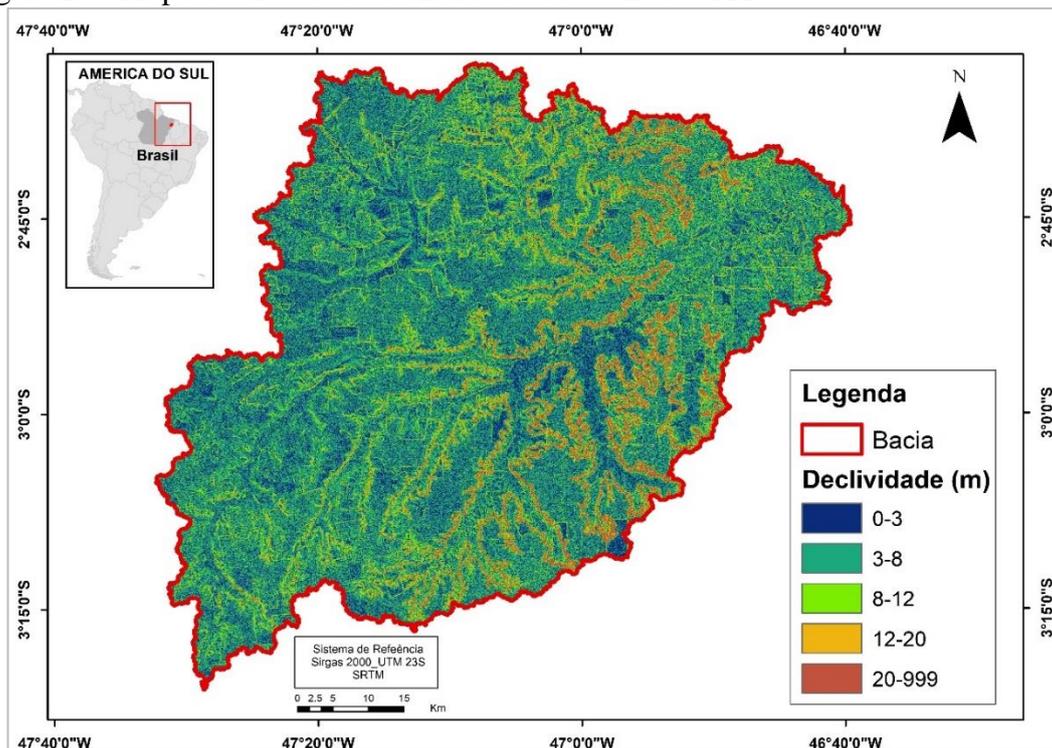
Código SWAT	Reagrupamento Terra Class	Área (%)
AGRL	Agricultura anual	11,56
URBN	Outros	0,64
PAST	Pastagem	32,40
FRSE	Floresta	55,40
Total		100,0

Fonte: do autor.

e) Classes de declividade

A figura 27 apresenta a distribuição da declividade na bacia. O SWAT permite até cinco classes de declividade, as quais foram determinadas de acordo com os intervalos que sugere a EMBRAPA (tabela 25).

Figura 27 - Mapa de classes de declividade usadas no SWAT



Fonte: do autor.

Tabela 25 - Classes de declividade usadas pelo SWAT em %

Declividade	Área (Km ²)	Área (%)
0-3	1.240,6	24,3
3-8	2.646,9	51,8
8-12	645,8	12,6
12-20	355,3	6,9
> 20	224,1	4,4
Total	5.112,7	100,0

Fonte: do autor.

Alguns parâmetros específicos do banco de dados foram adaptados à BHRU antes das simulações iniciais. Mantiveram-se como *default* os parâmetros de canal (.rte), manejo (.mgt), lagos e reservatórios (.pnd), uso da água (.wus) e água subterrânea (.gw). Ajustou-se o coeficiente de rugosidade de Manning (OV_N), o índice máximo de área foliar (BLAI) e o albedo (ALB). BLAI e ALB foram estimados por sensoriamento remoto (SR), e os valores de OV_N foram obtidos de Neitsch *et al.* (2005).

Tabela 26 - Representatividade do uso e cobertura da terra na BHRU

Classe	Default		Estimado por SR	
	ALB	BLAI	ALB	BLAI
AGRL	0,13	3,0	0,15	4,9
URBN	0,13	2,0	0,10	0,1
PAST	0,13	3,0	0,19	4,1
FRSE	0,13	5,0	0,14	5,2

Fonte: do autor.

2.2.4 Análise de sensibilidade, calibração e validação

Análises de sensibilidade, calibração e validação foram feitas para ajustar as curvas de vazão porque, apesar de o SWAT utilizar parâmetros que descrevem fisicamente os processos, as vezes eles não respondem ao comportamento da bacia. Essas análises foram feitas utilizando o *software* SWAT-CUP, pois é de livre acesso e tem de código aberto, o que possibilita modificar seu sistema caso necessário. Dirigidos por quatro tipos de algoritmos, os procedimentos podem ser usados através do *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE61), *Parameter Solution* (ParaSol), *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2) e *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) (ABBASPOUR *et al.*, 2013).

a) Sensibilidade

A análise de sensibilidade é o processo de determinação da taxa de variação da resposta do modelo em relação à variação dos parâmetros de entrada (MORIASI *et al.*, 2007). Portanto, nesta etapa foram identificados os parâmetros mais sensíveis do modelo para posterior refinamento da calibração. Machado (2002) aponta que o SWAT é sensível a mais de 100 variáveis e, para Kannan *et al.* (2007), os métodos mais satisfatórios são aqueles que fazem variar valores de certo parâmetro de acordo com a amplitude apropriada para ele. Aqueles de maior sensibilidade estão descritos no manual do SWAT, podendo-se citar aqui (quadro 5):

Quadro 5 - Alguns dos parâmetros de alta sensibilidade do SWAT

Parâmetro	Definição
ALPHA_BF	Taxa na qual a água subterrânea retorna aos rios (dias)
CANMX	Máximo armazenamento do dossel (mm)
CN2	Curva número
ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo
GW_DELAY	Tempo de atraso das águas subterrâneas
GWQMN	Profundidade da água subterrânea para o retorno do fluxo (mm)
GW_REVAP	Controla a quantidade de água que se move para a zona das raízes
RCHRG_DP	Fração de percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero
REVAP_MN	Profundidade de água no aquífero para haver percolação (mm)
SLSUBBASIN	Comprimento de rampa médio para a sub-bacia (m)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1})
SURLAG.	Coefficiente de atraso do escoamento superficial

Fonte: do autor.

O algoritmo SUFI-2 (ABBASPOUR *et al.*, 2004) do SWAT-CUP foi aplicado para fazer a análise de sensibilidade dos parâmetros de maneira global e a sequência das etapas está descrita em Abbaspour (2013). Neste algoritmo, a avaliação global dos parâmetros é dada pelo *t-stat* e *p-value*, sendo o primeiro uma medida de sensibilidade em que os maiores valores absolutos (positivo ou negativo) representam maior sensibilidade; e o segundo é uma avaliação da significância, onde os valores mais próximos de 0 são os mais confiáveis.

A forma de avaliação do SUFI-2 fornece uma sensibilidade relativa para cada parâmetro, pois todos eles são alterados ao mesmo tempo de modo que a modificação da resposta do modelo não se deve a alteração de um único parâmetro. Em caso de avaliação de um parâmetro específico, deve haver um grande número de combinações que permitirão a composição de diferentes amostras para calcular a análise de sensibilidade global.

Abbaspour (2013) sugere que seja realizada de 500 a 1000 simulações para determinar a análise de sensibilidade global. Finalizada esta etapa, os parâmetros foram ranqueados conforme o resultado de *p-stat* e *p-value*, identificando os mais sensíveis e selecionando-os para aplicação da calibração do modelo.

b) Calibração e validação

A calibração é uma forma de parametrizar o modelo para uma dada localização a fim de reduzir incertezas das simulações e/ou previsões (ARNOLD *et al.*, 2012a). Esta etapa foi realizada na sequência da análise de sensibilidade, considerando os parâmetros mais sensíveis identificados.

Novamente, o algoritmo SUFI-2 do SWAT-CUP foi aplicado para fazer a calibração do modelo. Este método é referido como semiautomático porque permite que o usuário verifique e altere os valores dos *rangers* dos parâmetros escolhidos, de modo a incluir seu conhecimento pessoal no controle dos processos hidrológicos (ARNOLD *et al.*, 2012a).

Forneceu-se ao SWAT-CUP a série de vazão mensal observada no posto fluviométrico 32360000–Cafezal (sub-bacia 14). Esta série contempla o período de 2000 a 2014, onde os anos para calibração (2000 a 2009) e a validação (2010 a 2014) do modelo foram definidos de acordo com a disponibilidade dos dados. Para garantir que o ciclo

hidrológico fosse simulado corretamente, o aquecimento do modelo foi determinado para três anos, isto é, de 2000 a 2002.

A função objetivo escolhida para analisar o grau de relação entre os dados simulados e os dados observados de vazão média mensal foi a relação entre a raiz do erro médio quadrático (RMSE) e o desvio padrão dos dados observados (RSR). Dada pela equação 61, a função RSR padroniza a RMSE usando o desvio padrão dos dados observados e combina ambos com um índice de erro (MORIASI *et al.*, 2007). Para os resultados desta função, quanto mais próximo de 0, melhor será a simulação.

$$RSR = \frac{RMSE}{DP_{obs}} = \frac{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}]}{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{med})^2}]}$$

Equação 61

onde: O_i são os dados observados num tempo i ; S_i são dados simulados num tempo i ; O_{med} é a média observada.

Foram avaliadas por meio da função RSR as simulações de uma mesma iteração e para a simulação com menor (e melhor) valor RSR foram calculadas outras estatísticas de avaliação, cita-se: coeficientes de determinação (R^2), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e percentual de tendência (PBIAS). O R^2 (equação 62) descreve a linearidade entre os dados observados e simulados por meio da proporção entre suas variâncias. Valores de R^2 acima de 0,5 são aceitáveis (MORIASI *et al.*, 2007).

$$R^2 = \left(\frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - O_{med})(S_i - S_{med}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{med})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - S_{med})^2} \right)$$

Equação 62

onde: O_i são os dados observados num tempo i ; S_i são dados simulados num tempo i ; O_{med} é a média observada; S_{med} é a média simulada.

O coeficiente NSE (equação 63) avalia a qualidade da disposição dos pontos plotados entre dados observados e simulados em relação a uma linha 1:1 (MORIASI *et al.*, 2007), varia de $-\infty$ a 1. Os valores próximos a 1 são melhores.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{med})^2} \right)$$

Equação 63

onde: O_i são os dados observados num tempo i ; S_i são dados simulados num tempo i ; O_{med} é a média observada.

O PBIAS (equação 64) mede a tendência média dos dados simulados serem superiores ou inferiores aos seus respectivos dados observados (MORIASI *et al.*, 2007).

Resultados positivos (negativos) indicam que o modelo está subestimando (superestimando) a simulação. Quanto mais próximo de 0 for o PBIAS, a acurácia da simulação é melhor.

$$\text{PBIAS} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) 100\%$$

Equação 64

onde: O_i são os dados observados num tempo i ; S_i são dados simulados num tempo i .

As novas simulações foram executadas adotando-se os valores de acordo com as saídas do *new parameters* no SWAT-CUP, sugerindo novos intervalos para os parâmetros simulados. Assim, ao calibrar o modelo, executaram-se novas rodadas já com os parâmetros ajustados para a validação.

c) Avaliação da eficiência

As estatísticas R^2 , NSE, PBIAS e RSR também serviram para avaliar o acerto das vazões simuladas pelo SWAT antes e após a etapa calibração-validação. O desempenho do modelo foi analisado conforme os valores propostos por Moriasi *et al* (2007) para estudos em passo de tempo mensal (tabela 27). As estatísticas foram aplicadas tanto na calibração como na validação. Resultados de R^2 acima de 0,5 são aceitáveis (MORIASI *et al.*, 2007).

Tabela 27 - Desempenhos estatísticos para passo de tempo mensal

RSR	NSE	PBIAS	DESEMPENHO
$0,00 \leq \text{RSR} \leq 0,50$	$0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	Muito bom
$0,50 < \text{RSR} \leq 0,60$	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$	Bom
$0,60 < \text{RSR} \leq 0,70$	$0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	Satisfatório
$\text{RSR} > 0,7$	$\text{NSE} \leq 0,5$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$	Insatisfatório

Fonte: Barbarotto Júnior (2014).

2.3 Simulações hidrológicas por cenário

O SWAT pode ser utilizado para analisar as condições atuais da bacia, recuperar comportamentos passados, prever eventos futuros ou para avaliar impactos produzidos por modificações no meio físico ou em seus parâmetros e séries, permitindo o estudo do comportamento da bacia perante essas modificações propostas.

As simulações objetivaram identificar a relação entre os diferentes cenários de uso e cobertura da terra sobre a resposta hidrológica vazão. Para isso, quantificou-se a vazão a partir de três cenários. A calibração foi aplicada apenas para o modelo usando o mapa de 2004. Os parâmetros calibrados foram utilizados nos modelos que usaram os mapas de 2014 e 2034. Os resultados de ET via SEBAL foram usados em todos os experimentos.

2.3.1 Experimento 1

Nesta etapa, a grande maioria dos parâmetros do SWAT foi mantida como *default*, tendo a modificação de alguns parâmetros básicos, conforme descritos anteriormente. Dada a primeira rodada do modelo, aplicou-se a verificação estatística para analisar o comportamento inicial quanto às estimativas de vazão. Neste experimento foi testada a eficiência do SWAT em simular a vazão com a evapotranspiração potencial por Penman-Monteith e com a assimilação da ET estimada pelo SEBAL. O mapa base foi referente ao uso e cobertura da terra de 2004.

2.3.2 Experimento 2

Foram processadas as simulações de vazão apenas com a assimilação da ET via SEBAL. O SWAT-CUP foi empregado para as análises de sensibilidade, calibração e validação com base no mapa de uso e cobertura da terra de 2004. Neste experimento, buscou-se obter um valor de NSE superior a 0,5 como critério para a qualidade da calibração. A calibração foi feita tendo como base a vazão da sub-bacia 14. Foi testada a mesma sequência metodológica para o cenário do mapa de 2014 (forte expansão agrícola). Os parâmetros foram modificados no ArcSWAT conforme os valores encontrados com o modelo de 2014. Deste modo, o ArcSWAT atualizou seus parâmetros de forma calibrada, estando pronto para a simulação da vazão usando o mapa projetado pelo CLUE-S.

2.3.3 Experimento 3

Após o modelo ser calibração e validado de forma satisfatória no experimento 2, os parâmetros achados também foram usados nas simulações de vazão para o cenário futuro (2015-2034) projetado pelo arcabouço CLUE-S (capítulo V desta tese).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui são apresentados os resultados dos experimentos 1 e 2, onde os processos de simulação inicial, calibração, validação e eficiência do modelo são demonstrados. Os resultados simulados pelo SWAT são comparados aos mensurados pela estação fluviométrica da ANA na sub-bacia 14 de 2003-2014. Portanto, especificamente, buscou-se simular séries de vazões coerentes com aquelas reportadas para a região e, assim, contribuir para projeções futuras (experimento 3 contido no capítulo V).

A análise central dos resultados está na avaliação do comportamento da vazão mensal simulada em relação à observada. Para Tucci (2002), isso reduz o erro de análise por razão da vazão média ser a maior vazão que pode ser regularizada, permitindo a avaliação dos limites superiores do uso da água de um manancial para aplicação aos seus diferentes usos múltiplos (TUCCI, 2002).

3.1 Experimento 1

Na simulação inicial, os dados de clima, as características físicas do solo e alguns parâmetros como o coeficiente de rugosidade de *Manning* (OV_N), o índice máximo de área foliar (BLAI) e o albedo (ALB) foram modificados no banco de dados do SWAT para que o modelo se adequasse às características físicas da bacia. Para os demais parâmetros usou-se o *default*. Foram feitas simulações utilizando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL (ET_{SEBAL}) e Evapotranspiração potencial por Penman-Monteith calculada pelo próprio SWAT (aqui mencionada como ETP). Os dados de precipitação correspondem ao período de 2000 a 2014, com três anos de aquecimento.

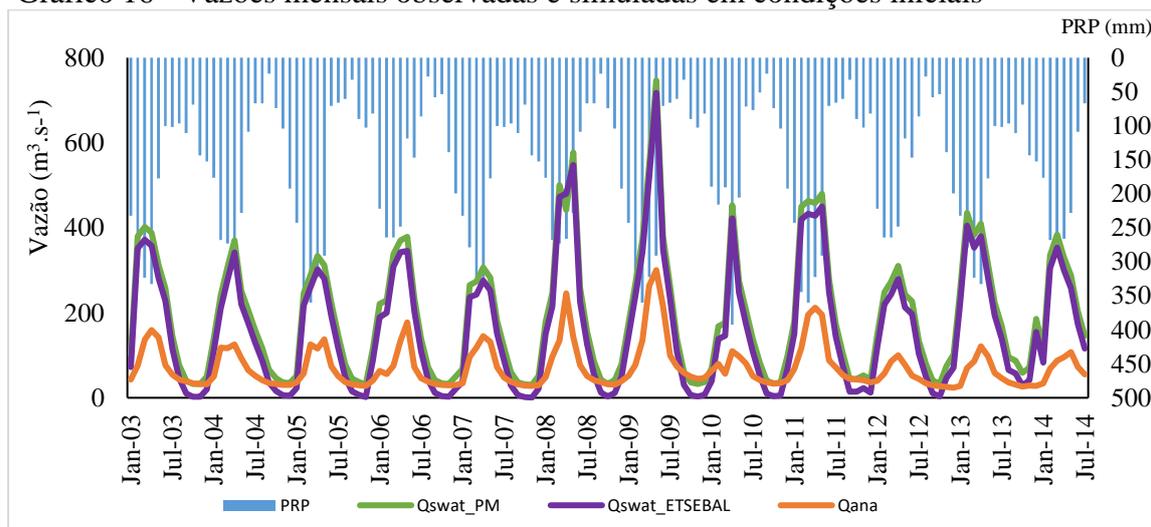
No geral, o SWAT respondeu satisfatoriamente ao comportamento da precipitação e simulou bem a sazonalidade da vazão na sub-bacia nesta etapa inicial, com boa resposta qualitativa, mesmo superestimando as vazões de pico no período chuvoso e subestimando-as na estação menos chuvosa. Este padrão foi observado quando o modelo utilizou tanto a ETP quanto a ET_{SEBAL} .

O erro relativo médio (ERM) para a estimativa da vazão média anual foi de 174% e 131%, com erro absoluto médio (EAM) de $121,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $91,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o modelo utilizando ETP e ET_{SEBAL} , respectivamente. Em outras palavras, o SWAT estimou com maior precisão a vazão média anual com a assimilação da evapotranspiração por

sensoriamento remoto. Entretanto, observou-se a dificuldade do modelo em obter um bom desempenho com as condições iniciais.

Nunes (2013), Silva (2016) e Sousa (2015), identificaram essa dificuldade inicial e apontaram como uma possível relação com o escoamento superficial e de base. Apesar da superestimativa, o SWAT não gerou atraso nem adiantamento significativos na subida e descida da curva de vazão (gráfico 16).

Gráfico 16 - Vazões mensais observadas e simuladas em condições iniciais



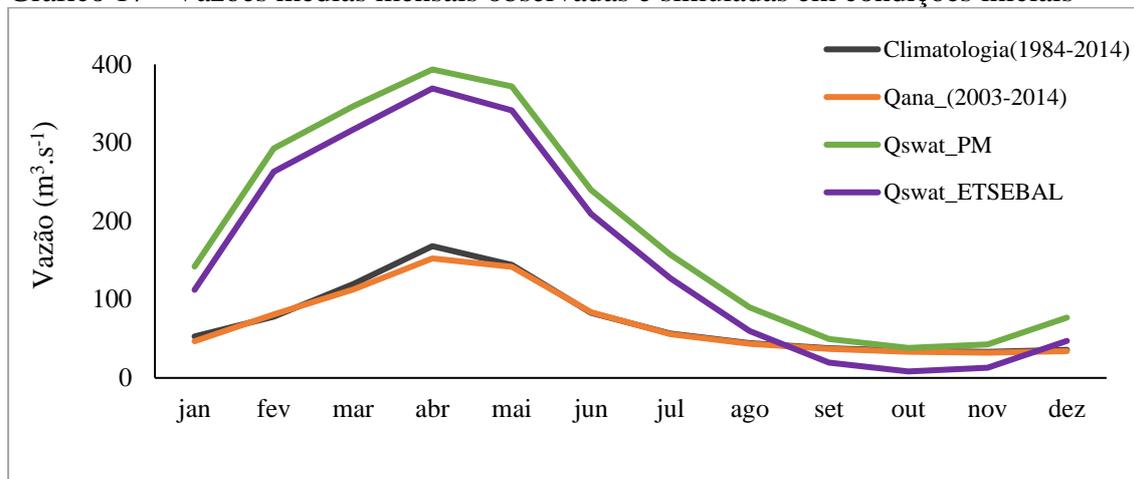
Fonte: do autor. PRP é a precipitação média dos oito pontos (INMET + 7 pontos do GWDS); Qana é a vazão média observada; Qswat_PM é a vazão simulada pelo SWAT usando ETP pelo método Penman-Monteith; Qswat_ETSEBAL é a vazão simulada usando a evapotranspiração do SEBAL.

O gráfico 17 ilustra os resultados referentes à vazão média mensal simulada e mensurada. Para as vazões simuladas da estação chuvosa, os valores foram ERM de 204% ($178,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de EAM) e 170% ($153,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de EAM) quando o SWAT usou ETP e ET_{SEBAL} , respectivamente. As vazões simuladas nos meses menos chuvosos obtiveram ERM de 105% ($58,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de EAM) usando ETP e ERM de 94% ($49,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de EAM) usando ET_{SEBAL} . Portanto, na escala mensal, as simulações do SWAT se mostraram mais precisas para a estação menos chuvosa e quando o modelo assimilou a ET estimada por sensoriamento remoto.

A maior acurácia das simulações de vazão para a estação menos chuvosa pode estar relacionada ao fato de que os resultados de ET estimados pelo SEBAL terem sido mais precisos nos meses menos chuvosos da bacia, como foi discutido no capítulo III. Apesar disso, segundo a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), fica clara a necessidade de calibração devido ao desempenho insatisfatório do modelo em condições

iniciais, conforme ratifica os resultados estatísticos de NSE, PBIAS, RSR e R^2 . (tabela 28 e gráfico 18).

Gráfico 17 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais



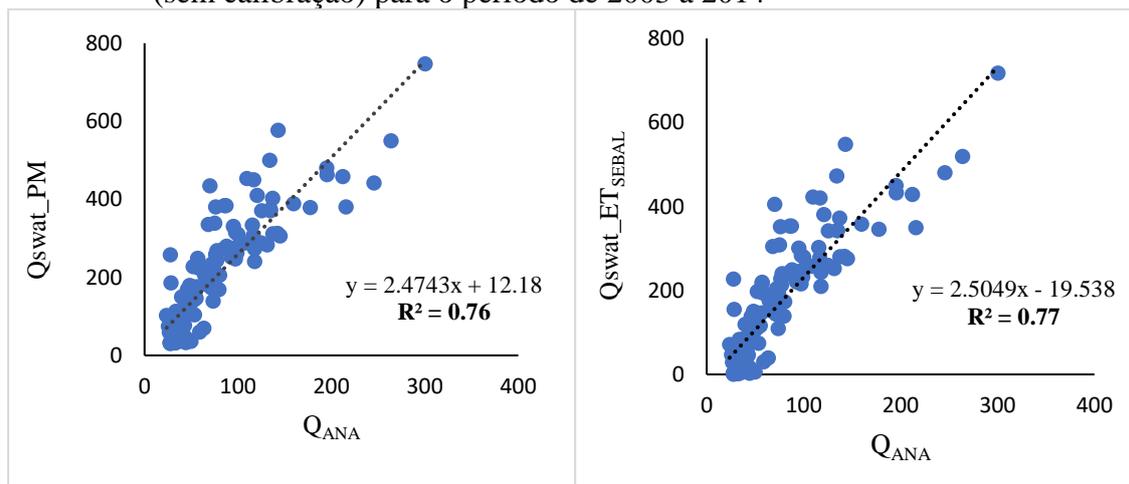
Fonte: do autor. Climatologia é a vazão média observada de 1984 a 2014; Qana (2003-2014) é a vazão média observada de 2003 a 2014; Qswat_PM é a vazão simulada pelo SWAT usando a evapotranspiração potencial por método Penman-Monteith; Qswat_ET_{SEBAL} é a vazão simulada usando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL.

Tabela 28 - Eficiência da simulação inicial usando ETP e ET_{SEBAL}

	Total (2003-2014)			Calibração (2003-2009)			Validação (2010-2014)		
	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS
ETP	-8,5	3,1	-164,2	-6,2	2,7	-144,5	-15,2	4,0	-198,7
ET _{SEBAL}	-6,2	2,7	-123,5	-4,5	2,3	106,2	-11,1	3,5	-153,7

Fonte: do autor.

Gráfico 18 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas (sem calibração) para o período de 2003 a 2014



Fonte: do autor. Q_{ANA} é a vazão média mensal observada; Qswat_PM é a vazão média simulada pelo SWAT utilizando a evapotranspiração potencial estimada por Penman-Monteith; Qswat_ET_{SEBAL} é a vazão média mensal simulada pelo SWAT utilizando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL.

Feita a análise das simulações iniciais, algumas demandas de calibração foram ajustadas para a obtenção de um resultado mais adequado a bacia, cita-se:

- ✓ redução do volume total de escoamento;
- ✓ redução e regularização do escoamento de base e ajuste da curva de recessão;
- ✓ aumento da evapotranspiração para ajustar diminuir a superestimativa da vazão;
- ✓ redução do escoamento superficial para ajustar a vazão de pico.

Após a realização do primeiro experimento, foi elaborada a análise de sensibilidade. Aplicaram-se, então, os procedimentos de seleção de parâmetros para análise de sensibilidade e calibração. Os 14 parâmetros escolhidos foram indicados pelo Doutor Raghavan Srinivasan, da *Texas A&M University*, e seus respectivos intervalos iniciais adotados a partir da aplicação feita por Silva (2016) (tabela 29).

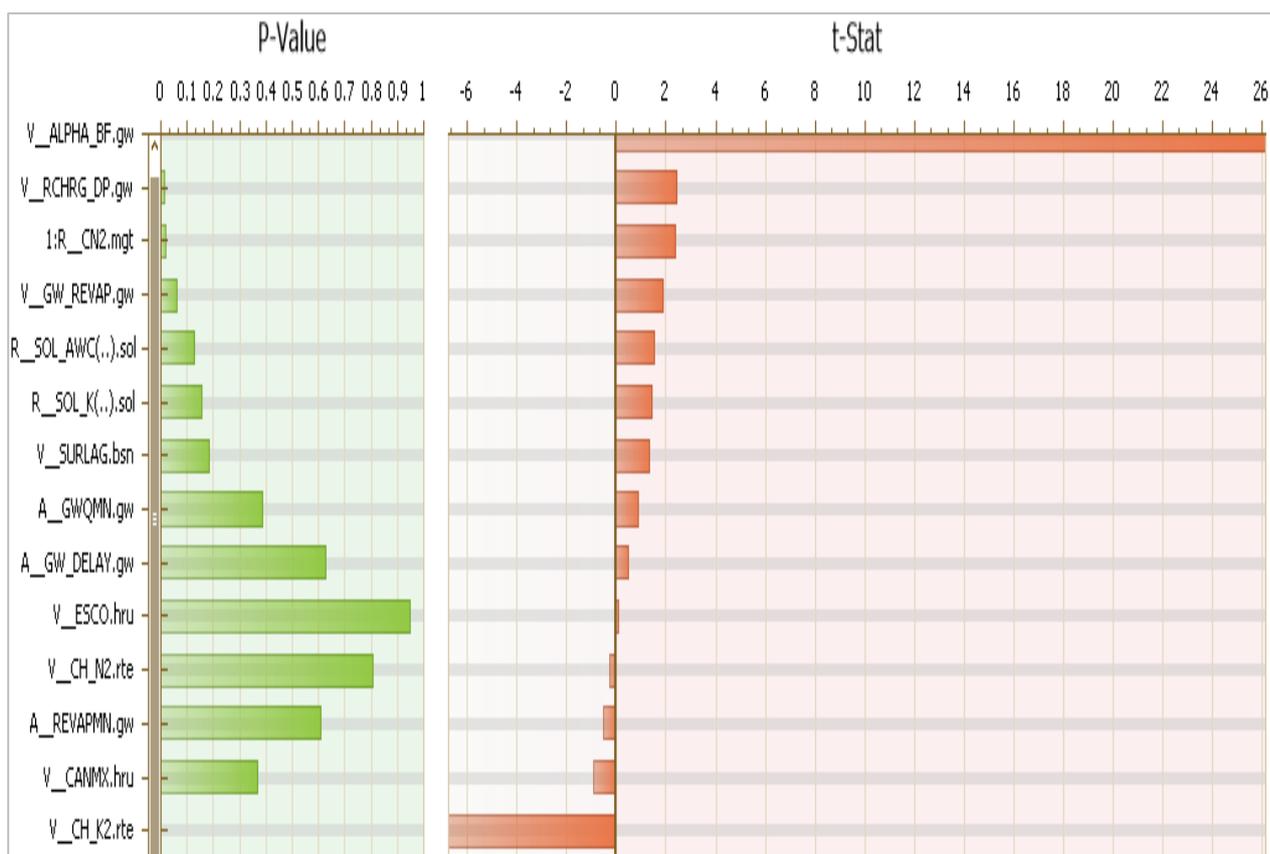
A análise de sensibilidade foi executada no SWAT-CUP, aplicando 500 iterações, para o período de 2003 a 2009. Os parâmetros foram modificados utilizando os métodos: multiplicação (r), substituição (v) e soma (a) e os resultados relativos à análise de sensibilidade são ilustrados a seguir (figura 28 e tabela 30).

Tabela 29 - Parâmetros e intervalos iniciais da análise de sensibilidade e calibração

Parâmetro	Descrição	Intervalo
(v) ESCO.hru	Fator de compensação de evaporação do solo	0,5 a 0,95
(v) CANMX.hru	Armazenamento máximo no dossel	0,0 a 30,0
(v) ALPHA_BF.gw	Constante de recessão do fluxo de retorno	0,0 a 1,0
(v) CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal	0,0 a 10,0
(v) CH_N2.rte	Coefficiente de Manning para o canal principal.	-0,01 a 0,2
(v) GW_REVAP.gw	Coefficiente que controla a taxa de transferência de água do aquífero raso para a zona de raízes.	0,02 a 0,2
(v) SURLAG.bsn	Coefficiente de atraso do escoamento superficial	0,01 a 24,0
(v) RCHRG_DP.gw	Fração de percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero profundo (fração).	0,0 a 1,0
(r) CN2.mgt	Curva número inicial para a condição de umidade II	-0,1 a 0,1
(r) SOL_AWC.sol	Capacidade de água disponível na camada de solo	-0,05 a 0,05
(r) SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada (mm/h);	-0,05 a 0,05
(a) GW_DELAY.gw	Tempo de atraso de águas subterrâneas (dia).	-30,0 a 60,0
(a) GWQMN.gw	Profundidade limite de água no aquífero raso requerida para o escoamento de retorno ocorrer	-1000 a 1000
(a) REVAPMN.gw	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer revap	-1000 a 1000

Fonte: adaptado de Silva (2016).

Figura 28 - Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT



Fonte: do autor.

Tabela 30 - t-stat e P-Value obtidos pela análise de sensibilidade dos parâmetros

Parâmetro	t-Stat	P-Value
(v) ALPHA_BF.gw	26,14	0,00
(v) CH_K2.rte	-6,76	0,00
(v) RCHRG_DP.gw	2,45	0,02
(r) CN2.mgt	2,38	0,02
(v) GW_REVAP.gw	1,87	0,06
(r) SOL_AWC.sol	1,53	0,13
(r) SOL_K.sol	1,42	0,16
(v) SURLAG.bsn	1,33	0,19
(v)CANMX.hru	-0,90	0,37
(a) GWQMN.gw	0,87	0,39
(a) REVAPMN.gw	-0,51	0,61
(a) GW_DELAY.gw	0,50	0,63
(v) CH_N2.rte	-0,25	0,81
(v) ESCO.hru	0,07	0,95

Fonte: do autor.

Dadas as análises de sensibilidade, definiu-se que todos os 14 parâmetros seriam usados no processo de calibração. As demandas de modificações previstas para ajuste do modelo são demonstradas no quadro 6.

Quadro 6 - Demanda de ajuste dos parâmetros para a BHRU

Redução do volume de escoamento Total	Redução e regularização do escoamento de base e recessão da curva
ESCO CN2 CANMX RCHRG_DP SOL_AWC	ALPHA_BF GWQMN GW_REVAP GW_DELAY

Fonte: do autor.

3.2 Experimento 2

Após identificarem-se os parâmetros a serem modificados, foram determinadas a calibração (2003-2009), validação (2010-2014) e analisada a eficiência das simulações do SWAT utilizando somente as simulações de vazão pelo modelo com a ET_{SEBAL}, uma vez que o SWAT respondeu melhor quando simulou o comportamento mensal da vazão utilizando este método.

A calibração foi realizada no passo mensal, totalizando 84 amostragens de vazão da sub-bacia estudada, através do SWAT-CUP de forma semiautomática por 300 iterações, usando os 14 parâmetros definidos no experimento 1. A tabela 31 apresenta os resultados dos melhores ajustes para os parâmetros.

Tabela 31 - Parâmetros, métodos, intervalos e valores resultantes da calibração

Parâmetro	SWAT-CUP			
	Valor máximo	Valor mínimo	Valor Filtrado	Valor calibrado
(v) ESCO.hru	0,55	0,36	0,41	0,41
(v) CANMX.hru	91,89	47,23	56,24	56,24
(v) ALPHA_BF.gw	0,54	-0,12	0,08	0,08
(v) CH_K2.rte	12,04	6,33	10,24	10,24
(v) CH_N2.rte	0,21	0,16	0,20	0,20
(v) GW_REVAP.gw	0,32	0,17	0,27	0,27
(v) SURLAG.bsn	15,18	7,13	14,09	14,09
(v) RCHRG_DP.gw	0,73	0,18	0,48	0,48
(r) CN2.mgt	-0,04	-0,15	-0,05	0,95
(r) SOL_AWC.sol	0,05	0,007	0,02	1,02
(r) SOL_K.sol	0,04	-0,02	-0,01	0,99
(a) GW_DELAY.gw	146,59	58,44	116,74	116,74
(a) GWQMN.gw	1236,30	244,20	1221,42	1221,42
(a) REVAPMN.gw	1533,89	330,07	677,17	677,17

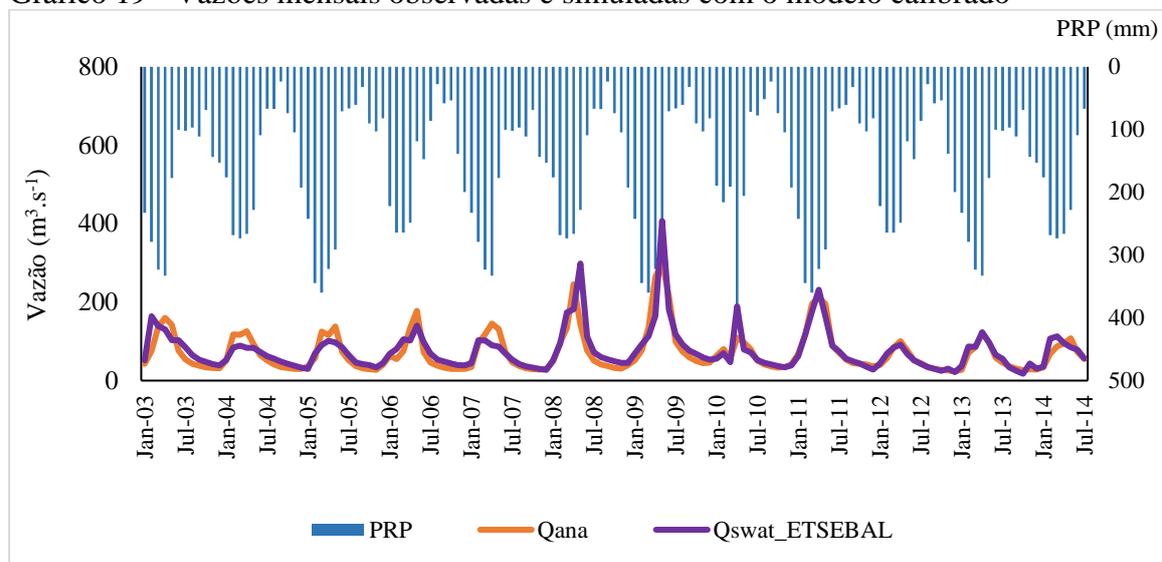
Fonte: do autor. Nota: r é a mudanças relativa ao valor de *default* (multiplicado por 1 + r).

No geral, os resultados das simulações mensais da vazão revelaram que as alterações nos parâmetros permitiram que o SWAT simulasse com maior precisão a sazonalidade da vazão na sub-bacia, com boas respostas qualitativa e quantitativas. O

modelo calibrado respondeu satisfatoriamente ao comportamento da precipitação e apresentou um erro relativo médio de apenas 9%, com $6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de erro absoluto médio para a estimativa da vazão média anual de longo período.

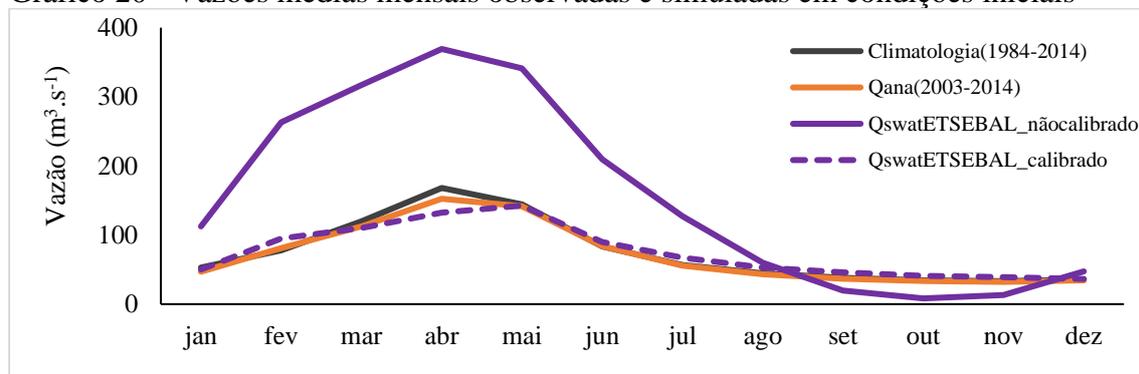
As vazões de pico no período chuvoso foram simuladas com maior precisão (21% de erro relativo médio e $22,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de erro absoluto médio). As simulações da vazão média para os meses menos chuvosos apresentaram ERM de 24% EAM de $10,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Apesar de subestimar e superestimativa em alguns eventos, o modelo não gerou atraso nem adiantamento significativos na subida e descida da curva de vazão (gráficos 19 e 20).

Gráfico 19 - Vazões mensais observadas e simuladas com o modelo calibrado



Fonte: do autor. PRP é a precipitação média dos oito pontos (INMET + 7 pontos do GWDS); Qana é a vazão média observada; Qswat_ETSEBAL é a vazão simulada usando a evapotranspiração do SEBAL.

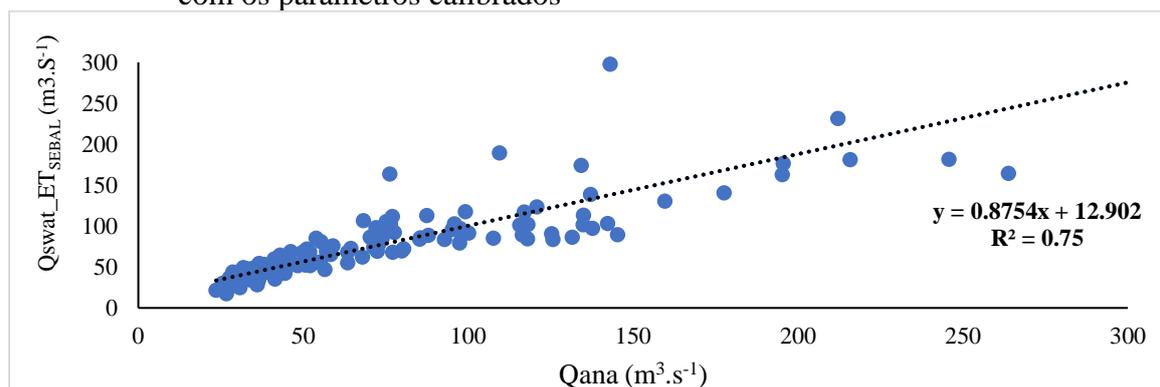
Gráfico 20 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais



Fonte: do autor. Climatologia é a vazão média observada de 1984 a 2014; Qana (2003-2014) é a vazão média observada de 2003 a 2014; Qswat_ETSEBAL_nãocalibrado é a vazão simulada usando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL no modelo em condições iniciais; Qswat_ETSEBAL_calibrado é a vazão simulada usando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL no modelo com parâmetros modificados.

Baseado nos resultados estatísticos de NSE, PBIAS, RSR e R^2 , conforme a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), o desempenho do modelo pode ser considerado “muito bom” para o período total, “bom” para o tempo da calibração e “muito bom” no período da validação (tabela 32), ratificando a melhora das simulações de vazão quando aplicados os parâmetros ajustados.

Gráfico 21 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas com os parâmetros calibrados



Fonte: do autor.

Tabela 32 - Eficiência das vazões simuladas com o modelo calibrado

ET _{SEBAL}	Total (2003-2014)			Calibração (2003-2009)			Validação (2010-2014)		
	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS
	0,7	0,5	-5,4	0,7	0,6	-7,0	0,9	0,4	-2,4

Fonte: do autor.

Em síntese, os resultados aqui obtidos com a assimilação da ET do SEBAL no SWAT são coerentes e aceitáveis quando comparados aos resultados observados e relatados pela literatura. A respeito de poucas pesquisas que utilizam a evapotranspiração por sensoriamento remoto na modelagem hidrológica, cita-se o estudo de Sousa (2015), o qual apresentou valores de NSE entre 0,57 a 0,84 (0,69 a 0,77) na simulação diária (simulação mensal) ao inserir a evapotranspiração pelo SEBAL no modelo. A vazão simulada após essa assimilação dos dados de ET, reduziu-se o erro percentual de 13% para 3% na vazão diária e de 9% para 7% na escala mensal.

A melhora nas simulações de vazão pelo SWAT após as modificações nos parâmetros mais sensíveis já era esperada. No Brasil, alguns trabalhos foram realizados aplicando o SWAT como ferramenta para os estudos hidrológicos e de produção de sedimentos, tais quais os de Machado (2002), Neves (2005), Oliveira (1999) e Silva (2016).

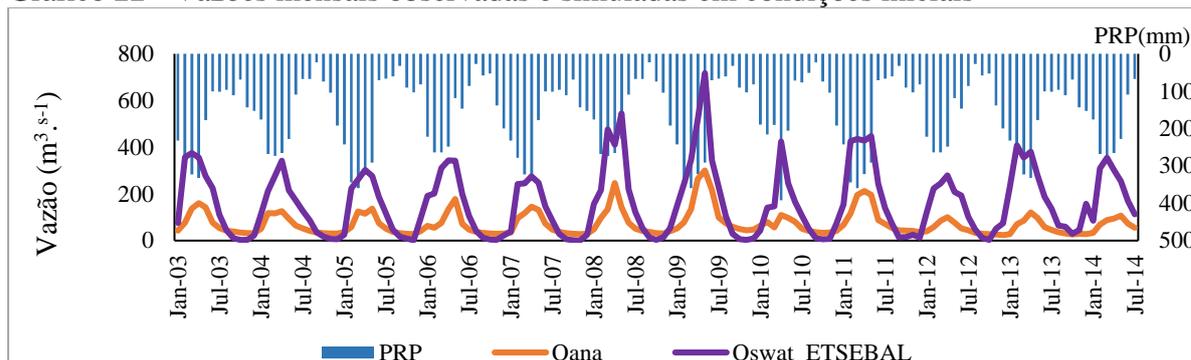
A otimização nas simulações de vazão quando aplicados os parâmetros modificados também foi também reportada por Nunes (2013) quando calibrou o modelo com dados médios mensais de vazão para o Rio Capim, no Pará, de 2000 a 2010. O autor identificou valores de NSE entre 0,59 a 0,87 para todo o período investigado. Esta pesquisa observou ainda que, em termos percentuais, a vazão mensal simulada apresentou redução no seu erro de estimativa entre 18% a 26 %.

Neste mesmo contexto, Silva (2016) aplicou parâmetros modificados para o SWAT após calibrá-lo em duas sub-bacias não monitorada no Leste da Amazônia. O autor identificou valores de NSE entre 0,55 a 0,93, demonstrando a satisfatória capacidade do modelo em reproduzir o ciclo da vazão para a região. Esta pesquisa relata ainda o bom grau de eficiência do SWAT em estimar a evapotranspiração nas unidades de resposta hidrológica das sub-bacias analisadas.

A continuidade do experimento II deu-se ao simular o comportamento da vazão utilizando um cenário mais atual de uso e cobertura da terra, com forte presença da agricultura (mapa Terra Class 2014). A sequência metodológica seguiu todos os processos até aqui discutidos, utilizando somente o modelo usando resultados de ET pelo SEBAL.

Para o cenário de forte expansão agrícola, o SWAT respondeu satisfatoriamente ao padrão da precipitação na bacia, simulando qualitativamente bem a sazonalidade da vazão. Observou-se uma superestimativa (subestimativa) das vazões de pico (vazões mínimas) na estação chuvosa (menos chuvosa). Apesar disso, o modelo não gerou atraso nem adiantamento na subida e descida da curva de vazão. A vazão média anual apresentou erro relativo e absoluto médios de 130% e $91,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. O gráfico 22 ilustra o comportamento das simulações geradas pelo modelo em condições iniciais.

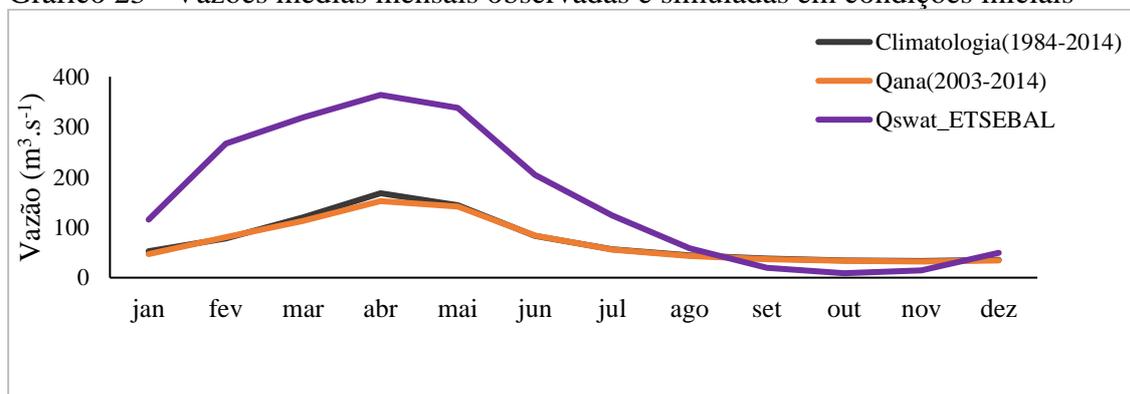
Gráfico 22 - Vazões mensais observadas e simuladas em condições iniciais



Fonte: do autor. PRP é a precipitação média dos oito pontos (INMET + 7 pontos do GWDS); Qana é a vazão média observada; Qswat_ETSEBAL é a vazão simulada usando a evapotranspiração do SEBAL.

A vazão média mensal nos meses da estação chuvosa (menos chuvosa) foi superestimada (subestimada), principalmente de janeiro a maio (setembro a novembro) quando comparadas ao comportamento climatológico (1984-2014) e ao padrão médio de 2003 a 2014 (gráfico 23). O modelo indicou erro relativo médio de 172% para os meses chuvosos e 91% para os meses menos chuvosos. Com relação aos erros absolutos, em média, foram $153,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $47,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para a estação chuvosa e menos chuvosa, respectivamente (gráfico 23).

Gráfico 23 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais



Fonte: do autor. Climatologia é a vazão média observada de 1984 a 2014; Qana (2003-2014) é a vazão média observada de 2003 a 2014; Qswat_ETSEBAL é a vazão simulada usando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL.

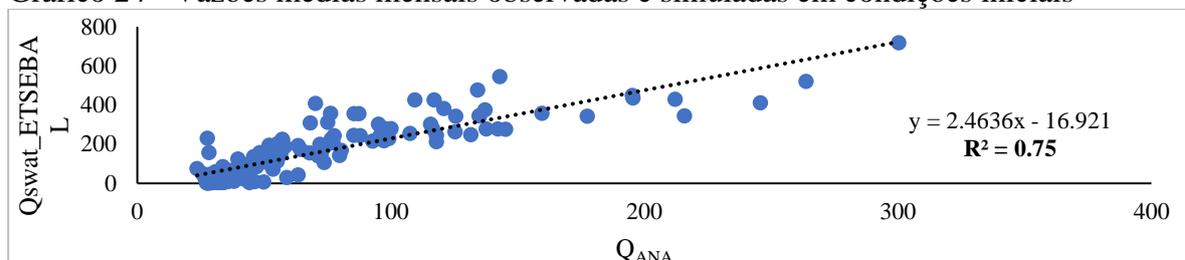
Os valores de NSE variaram de -11,2 a -4,4 e RSR de 2,3 a 3,5; enquanto o PBIAS de -123,0 a -153,9. Assim, com base na classificação proposta por Moriasi (2007), houve necessidade de calibração do modelo (gráfico 24 e tabela 33).

Tabela 33 - Eficiência da simulação inicial usando evapotranspiração do SEBAL

ET _{SEBAL}	Total (2003-2014)			Calibração (2003-2009)			Validação (2010-2014)		
	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS
	-6,1	2,7	-123,0	-4,4	2,3	-105,3	-11,2	3,5	-153,9

Fonte: do autor.

Gráfico 24 - Vazões médias mensais observadas e simuladas em condições iniciais



Fonte: do autor. Q_{ANA} é a vazão média mensal observada; Q_{swat_ETSEBA} é a vazão média mensal simulada pelo SWAT utilizando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL.

Após as análises das simulações iniciais, as demandas de calibração foram ajustadas para a obtenção de um resultado mais adequado a bacia, conforme realizado anteriormente. Assim, elaborou-se a análise de sensibilidade selecionando os parâmetros mais sensíveis para uso na etapa de calibração. Os parâmetros escolhidos e seus respectivos intervalos iniciais adotados foram os mesmos da etapa anterior, e rodados no SWAT-CUP com 500 iterações, igualmente modificando-os pelos métodos: multiplicação (r), substituição (v) e soma (a) (tabela 34 e figura 29).

Tabela 34 - *t-stat* e *P-Value* obtidos pela análise de sensibilidade dos parâmetros

Parâmetro	<i>t-stat</i>	<i>P-Value</i>
(v) ALPHA_BF.gw	15,24	0,00
(v) GW_REVAP.gw	-1,34	0,18
(r) SOL_K.sol	-1,26	0,21
(r) CN2.mgt	1,14	0,25
(v) CH_N2.rte	-0,82	0,41
(v) RCHRG_DP.gw	-0,77	0,44
(v) ESCO.hru	0,68	0,50
(a) GWQMN.gw	-0,56	0,58
(v) CANMX.hru	-0,40	0,69
(v) SURLAG.bsn	0,38	0,71
(a) GW_DELAY.gw	-0,36	0,72
(a) REVAPMN.gw	-0,28	0,78
(r) SOL_AWC.sol	-0,24	0,81
(v) CH_K2.rte	0,23	0,81

Fonte: do autor.

Figura 29 - Resultado da análise de sensibilidade dos parâmetros do SWAT



Fonte: do autor.

Após análises de sensibilidade, os 14 parâmetros definidos foram usados no processo de calibração e as demandas de modificações previstas para ajuste do modelo foram as mesmas adotadas anteriormente. A tabela 35 mostra os melhores resultados.

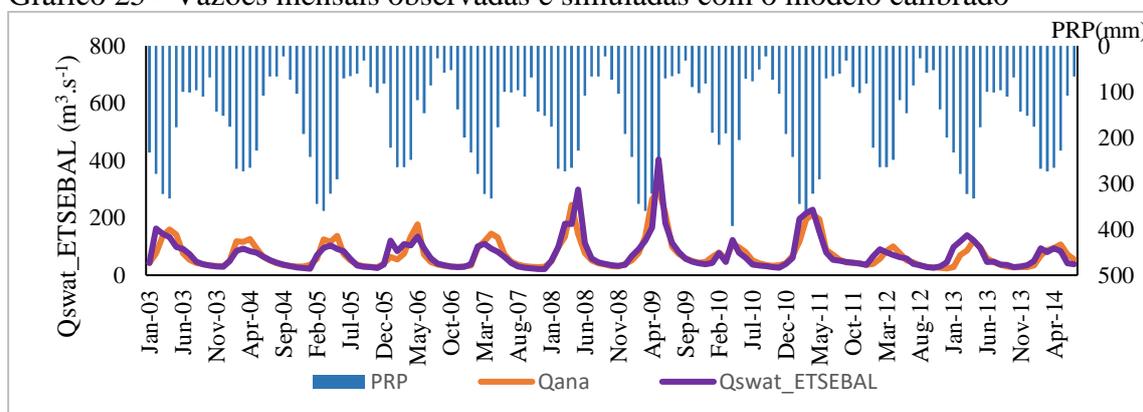
Tabela 35 - Parâmetros, métodos, intervalos e valores resultantes da calibração

Parâmetro	SWAT-CUP			
	Valor máximo	Valor mínimo	Valor Filtrado	Valor calibrado
(v) ESCO.hru	0,48	0,34	0,44	0,44
(v) CANMX.hru	74,07	38,40	40,24	40,24
(v) ALPHA_BF.gw	0,31	-0,15	0,08	0,08
(v) CH_K2.rte	12,20	8,28	11,10	11,10
(v) CH_N2.rte	0,21	0,18	0,21	0,21
(v) GW_REVAP.gw	0,31	0,22	0,36	0,36
(v) SURLAG.bsn	17,58	10,61	15,29	15,29
(v) RCHRG_DP.gw	0,64	0,33	0,36	0,36
(r) CN2.mgt	0,004	-0,10	-0,03	0,97
(r) SOL_AWC.sol	0,04	0,01	0,01	1,01
(r) SOL_K.sol	0,01	-0,04	0,01	1,01
(a) GW_DELAY.gw	145,	87,44	135,92	135,92
(a) GWQMN.gw	50	732,59	1601,07	1601,07
(a) REVAPMN.gw	1105,78	248,56	304,28	304,28

Fonte: do autor. Nota: r é a mudanças relativa ao valor de *default* (multiplicado por 1 + r).

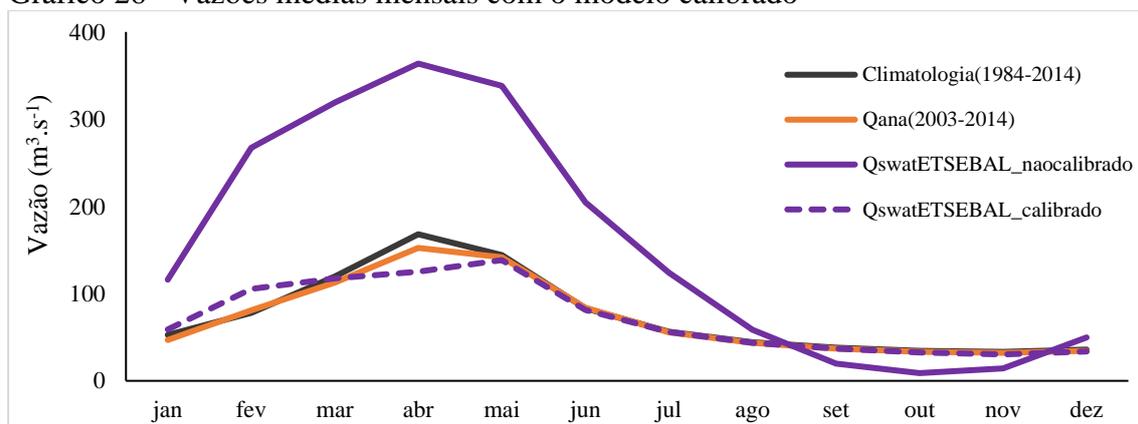
Os resultados das simulações mensais de vazão com os parâmetros ajustados mostraram que essas alterações deram ao SWAT maior precisão nas simulações da sazonalidade da vazão na sub-bacia, com boas respostas qualitativa e quantitativas. O modelo calibrado respondeu satisfatoriamente ao comportamento da precipitação e as vazões de pico no período chuvoso passaram a ter maior acurácia, com ERM e EAM de 30% e $26,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Na estação menos chuvosa, ERM e EAM de 12% e $6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Para a vazão média anual, ERM e EAM de 12% e $7,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Apesar de subestimativas e superestimativas em alguns eventos, o modelo não gerou atraso nem adiantamento significativos na subida e descida da curva de vazão (gráficos 25 e 26).

Gráfico 25 - Vazões mensais observadas e simuladas com o modelo calibrado



Fonte: do autor. PRP é a precipitação média dos oito pontos (INMET + 7 pontos do GWDS); Qana é a vazão média observada; Qswat_ETSEBAL é a vazão simulada usando a evapotranspiração do SEBAL.

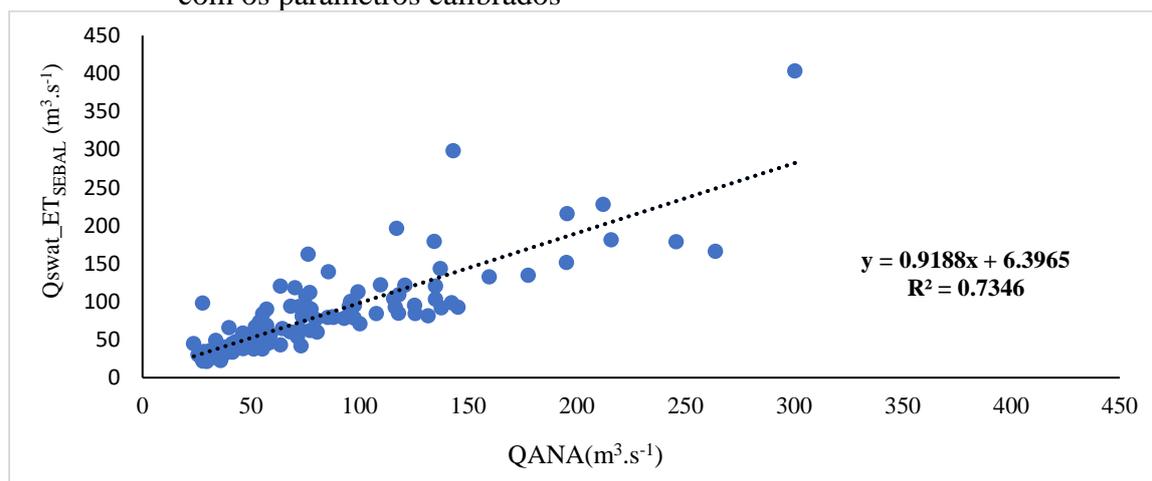
Gráfico 26 - Vazões médias mensais com o modelo calibrado



Fonte: do autor. Climatologia é a vazão média observada de 1984 a 2014; Qana (2003-2014) é a vazão média observada de 2003 a 2014; Qswat_ETSEBAL_nãocalibrado é a vazão simulada usando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL no modelo em condições iniciais; Qswat_ETSEBAL_calibrado é a vazão simulada usando a evapotranspiração estimada pelo SEBAL no modelo com parâmetros modificados.

Baseado nos resultados estatísticos de NSE, PBIAS, RSR e R^2 , conforme a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007), o desempenho do modelo pode ser considerado “muito bom” para o período total, “bom” para o tempo da calibração e “muito bom” no período da validação (tabela 36), ratificando a melhora das simulações de vazão quando aplicados os parâmetros calibrados.

Gráfico 27 - Diagrama de dispersão das vazões médias mensais observadas e simuladas com os parâmetros calibrados



Fonte: do autor.

Tabela 36 - Eficiência das vazões simuladas com o modelo calibrado

	Total (2003-2014)			Calibração (2003-2009)			Validação (2010-2014)		
	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS
ET _{SEBAL}	0,7	0,6	-0,7	0,6	0,7	0,5	0,7	0,5	-2,9

Fonte: do autor.

Parajuli *et al.* (2018) aplicaram dados de ET derivados do SEBAL para avaliar a calibração do SWAT. O modelo foi calibrado e validado usando dados de vazão mensal com os cenários de modelagem “*default*”, “apenas vazão”, “apenas ET” e “vazão-ET”. A modelagem dos cenários “apenas vazão” e “apenas ET” mostraram desempenhos igualmente bons, com o coeficiente de determinação (R^2) e NSE de 0,71 e 0,86 respectivamente; o cenário “apenas ET” apresentou R^2 e NSE de 0,66 e 0,83 respectivamente. Por outro lado, o cenário “*default*” teve R^2 de 0,39 e NSE de 0,78.

Ainda sobre a pesquisa de Parajuli *et al.* (2018), a modelagem dos cenários baseados na assimilação da ET pelo SEBAL demonstrou bom desempenho para a simulação de vazão. Os resultados deste estudo demonstraram o uso de dados de sensoriamento remoto baseados em imagens MODIS para avaliar a vazão do SWAT pode ser aplicado em bacias hidrográficas com a falta de dados meteorológicos.

Immerzeel; Droogers (2008) calibraram o SWAT para uma bacia na Índia de 45,678 km² de área usando ET de sensoriamento remoto somente. Estimativas mensais de evapotranspiração foram derivadas aplicando o SEBAL com imagens MODIS, sendo os resultados do modelo comparados aos dados de vazão observados. Githui *et al* (2012) também usaram ET de SR juntamente com medidas de vazão para calibrar o SWAT e estimar a recarga do aquífero para uma bacia irrigada na Austrália (irrigação de 325 mm.ano⁻¹).

Rajib *et al.* (2015) calibraram o SWAT usando a vazão e a umidade do solo simultaneamente e compararam com a calibração convencional, apenas para a vazão. Foram usadas umidade do solo medidas em campo e obtidas por sensoriamento remoto. Os autores normalizaram os intervalos de parâmetros calibrados finais e relataram a redução da incerteza do parâmetro quando o modelo foi calibrado com a umidade do solo e com o fluxo de vazão.

Resumindo, dada a complexidade de um sistema hidrológico e sua limitada disponibilidade de dados, o modelo SWAT apresentou um desempenho bom na simulação das descargas mensais sob diferentes cenários de uso e cobertura da terra e suas simulações de vazão mostraram-se mais precisas quando assimilada a ET estimada pelo SEBAL.

4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Na maioria dos sistemas hidrológicos, a evapotranspiração (ET) e a precipitação são os maiores componentes do balanço hídrico, entretanto, são difíceis de estimar pela complexidade dos terrenos. Assim, os algoritmos de estimativas de ET e precipitação baseados em dados de sensoriamento remoto podem fornecer melhorias nas simulações de respostas hidrológicas em modelos hidrológicos distribuídos. Neste capítulo, foi possível aplicar as estimativas de evapotranspiração pelo SEBAL na modelagem da vazão mensal do SWAT para a bacia hidrográfica do Rio Uraim. No geral, os dados estimados de ET pelo SEBAL integrados ao SWAT melhoraram significativamente as simulações numéricas de vazão mensal do modelo, demonstrando a ampla aplicabilidade dos dados de sensoriamento remoto. A performance das simulações foi melhor para os meses da estação menos chuvosa e pode estar relacionada ao fato da acurácia e precisão dos resultados de ET terem sido maiores neste período. Este estudo foi importante para a caracterização espaço-temporal da BHRU, pois além do levantamento histórico de dados climáticos para a área, foi possível observar o comportamento médio da vazão sob diferentes aspectos de uso e ocupação da terra identificados na bacia. Ressalta-se que os resultados deste estudo são válidos exclusivamente para o modelo da BHRU, pois foi desenvolvido usando os métodos e materiais descritos, portanto, outras bacias hidrográficas com características diferentes e com maior disponibilidade de dados, podem obter resultados diferentes. Recomenda-se mais aplicações como esta para investigar o comportamento médio da vazão, principalmente, sob cenários de mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra na região, considerando uma série de dados observados com mais períodos úmidos e secos.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. Duebendorf: Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2013. 100 p.

ALLEN, R. G *et al.* Sattelite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE. 380-394 p. 2007a.

ALLEN, R. G *et al.* Sattelite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE. 395-406 p. 2007b.

ARNOLD, J. G *et al.* Estimating hydrologic budgets for three illinois watersheds. **Journal of Hydrology**, v. 176, n. 1, p. 57-77, 1996.

ARNOLD, J.G *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 34, p. 73–89, 1998.

ARNOLD, J. G *et al.* Continental scale simulation of the hydrologic balance1. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 35, n. 5, 1999.

ARNOLD, J.G *et al.* SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**. v.55, n.4, p. 1491-1508, 2012.

_____.; HANEY E.B.; KINIRY J.R.; NEITSCH, S.L.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool: Input/Output file documentation**, version 2012. Agricultural Research Service and Texas AgriLife Research. Texas, 2012.

BARBAROTTO, L. **Análise da disponibilidade hídrica da bacia do rio Jundiáí por meio de simulações hidrológicas de cenários prováveis**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais. Campinas, SP. 2014.

BASTIAANSEN, W.G.M. *et al.* **Regionalization of surface flux density and moisture indicators in composite terrains**. These PhD Wageningen Agricultural University, Netherland, 273.p. 1995.

BASTIAANSEN, W.G.M. *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation, **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212. 1998a.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100. 2000.

BEVEN, K. J. Rainfall-runoff modelling: The primer. **Chichester: John Wiley & Sons Ltda.** 1ªed. 360p. 2001.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p. 305-317. 2008

BOEGH, E *et al.* Incorporating remote sensing data in physically based distributed agro-hydrological modeling. **Journal of Hydrology** 287, 279–299. 2004.

BRESSIANI, D. A *et al.* A review of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) applications in Brazil: challenges and prospects. In: International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IJABE), In Press, 2015.

GARBOSSA, L. H. P. *et al.* The use and results of the soil and water assessment tool in Brazil: a review from 1999 until 2010. In: INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE & WORKSHOPS review from 1999 until 2010. [Extended abstract]. Disponível em: link. Acesso em: 25/01/2016

GRENN, W. H.; AMPT, G. A. The Flow of Air and Water Through Soils. Journal of Agricultural Sciences. United States, 1911. **Studies on Soil Physics**, v. 4, p. 11-24. 1911.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**. [S. I.]: [s. n.], 1st ed., 1985, p. 96-99. 1985

IMMERZEL, W. W.; DROOGERS, P. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. **Journal of Hydrology**. 349, 411-424. 2007.

KANNAN, N *et al.* Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. **Journal of Hydrology**, v. 332, n. 3, p. 456-466, 2007.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal** v. 31, n.1, p13-24, 1986.

LUBITZ, E. **Avaliação da Aplicação do Modelo Hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC.** 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil, 2009.

MACHADO, R. E. **Simulação de Escoamento e de Produção de Sedimentos em uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento.** 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, Brasil, 2002.

McCARTHY, G. T. **The Unit Hydrograph and Flood Routing**. 1st ed. Providence: U. S. CORPS OF ENGINEERS, 1939.

MONTEITH, J. L. Evaporation and the Environment: The State and Movement of Water in Living Organisms. In: SYMPOSIA OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19, 1965, London, UK. **Anais**. London: [s. n.], p. 205-234, 1965.

MORIASI, D.N *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**. v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MUTHUWATTA, L. A. L. P *et al.* Calibration of a semi-distributed hydrological model using discharge and remote sensing data. **New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions**. Wallingford: IAHS Press, 2009. p. 52-58.

NASH, J. E. and J. V. SUTCLIFFE. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A discussion of Principles. **Journal of Hydrology**. United States. Hidrology, v.10, n. 3-4, p. 282-290. 1970.

NEITSCH, S. L *et al.* Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version 2005. Temple: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2005.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2005 (a)**. 2nd ed. Texas: Agricultural Research Service / Texas Agricultural Experiment Station, 2005 (a), 460p.

NEITSCH, S. L. *et. al.* **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2005 (b)**. Texas: Agricultural Research Service / Texas Agricultural Experiment Station, 2005 (b), 400p.

NEVES, F. F *et al.* Comparação entre três métodos de evapotranspiração potencial aplicados a duas sub-bacias hidrográficas de Descalvado–SP. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16., **Anais**. 2005

NUNES, H. G. G. C. **Modelagem hidrológica na bacia do rio capim**. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2013.

OLIVEIRA, M. A. T. DE. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA *et al.* **Erosão e conservação do solo: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

PARAJULI P. B *et al.* 2018. Evaluation of Using Remote Sensing Evapotranspiration Data in SWAT. **Water Resources Management: An International Journal, Published**

for the European Water Resources Association (EWRA), Springer; European Water Resources Association (EWRA), vol. 32(3), pages 985-996, February.

PRIESTLEY, C. H. B; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large - Scale Parameters. **Weather Magazine**, [S. I.], n. 100, p. 81-92, 1972.

PROVAM - PROGRAMA DE ESTUDOS E PESQUISAS NOS VALES AMAZÔNICOS. SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA. Belém: SUDAM/OEA, 1990. 189 p.

RAJIB, A. *et al.* Improving soil moisture accounting and streamflow prediction in SWAT by incorporating a modified time-dependent Curve Number method. *Hydrological Processes* 30:603-624. 2015

RODRIGUES, T. E *et al.* **Caracterização e Classificação dos Solos do Município de Paragominas, Estado do Pará.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental - Documentos 162. p. 1 - 49. 2003.

SARTORI, A *et al.* Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18. 2005a.

SARTORI, A *et al.* Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19-29. 2005b

SILVA, A. K. L. **Impacto da expansão da palma de óleo sobre o escoamento superficial e produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas não monitoradas dos Rios Bujaru e Mariquita no Nordeste do estado do Pará, Amazônia oriental.** Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia e São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo. 2016.

SLOAN, P. G.; MORRE, G. B. C.; EIGEL, J. D. Modeling Surface and Subsurface Storm Flow on Steeply - Sloping Forested Watersheds. **Water Resources Research**, Columbia, NY, United States of America, v. 20, n. 12, p. 1815-1822, dec. 1983.

SOUZA, A. M. L *et al.* Evapotranspiration from Remote Sensing to Improve the Swat Model in Eastern Amazonia. **Floresta e Ambiente**. 22(4): 456-464. 2015.

TEIXEIRA *et al.* Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology** 149 (2009) 462-476. 2009.

CAPÍTULO 5 RESPOSTA HIDROLÓGICA DA VAZÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE USO E COBERTURA DA TERRA ATRAVÉS DE PROJEÇÕES DE CENÁRIOS PARA O FUTURO PRÓXIMO

Resumo

A avaliação das mudanças climáticas globais e do uso e cobertura da terra no regime hidrológico das bacias hidrográficas é uma das grandes preocupações atuais. A fácil vinculação a ferramentas de análise de sensibilidade e calibração tornaram a aplicabilidade do SWAT mais simples e com grande potencial na simulação dos cenários passado, presente e futuro. Assim, este estudo objetivou prognosticar a vazão para o futuro próximo (2015-2034) integrando o SWAT a cenários hipotéticos gerados pelo CLUE-S. Os resultados demonstraram a boa capacidade do CLUE-S em projetar cenários futuros para a BHRU, integralizando as variáveis independentes com as demandas e elasticidades. O modelo revelou que quase todas as variáveis utilizadas foram forçantes de mudança de uso e cobertura da terra, principalmente os parâmetros biofísicos. Isto reforça o fato de que estes parâmetros são forçantes para a expansão agrícola na bacia. As projeções indicam que a agricultura anual estará mais concentrada na porção sudoeste da bacia e com maior expansão para o setor noroeste. Em termos de ganho/perda de áreas, até 2034 a agricultura aumentará aproximadamente 93,2 km², correspondendo a 13,4% do total da bacia; floresta e pastagem perderão 49,2 km² e 41,7 km² de área, respectivamente, e representarão 53,9% e 32,0%. A previsão da vazão baseada neste cenário indicou uma redução de 34,4% na vazão da estação menos chuvosa e aumento de 38,6% para a vazão da estação chuvosa. Os resultados dessa projeção sugerem ainda que a mudança climática pode ter desempenhado um papel mais pronunciado no regime hidrológico do que a própria mudança no uso da terra projetada pelo CLUE-S. Os resultados também mostraram a boa capacidade do uso integrado dos modelos SWAT e CLUE-S na geração de dados que contribuem para a análise do impacto ambiental da expansão agrícola no Nordeste do Pará e Leste da Amazônia.

Palavras-chave: Modelagem. Previsão. Vazão. Regime hidrológico.

CHAPTER 5 STREAMFLOW RESPONSE TO CLIMATE CHANGE AND LAND USE AND LAND COVER CHANGE THROUGH SCENARIO PROJECTIONS FOR THE NEAR FUTURE

Abstract

Assessing global climate change and land use and land cover change in the hydrological regime of watershed is a major concern today. The easy linking of sensitivity and calibration analysis tools made SWAT applicability simpler and more potent in simulating past, present, and future scenarios. Thus, this study aimed to predict the streamflow for the near future (2015-2034) by integrating the SWAT with hypothetical scenarios generated by CLUE-S. The results demonstrated the good capacity of CLUE-S in designing future scenarios for the BHRU, integrating the independent variables with the demands and elasticities. The model revealed that almost all the variables used were forcing land use and land cover change, mainly biophysical parameters. This reinforces the fact that these parameters are forces for agricultural expansion in the basin. Projections indicate that annual agriculture will be more concentrated in the southwestern portion of the basin and further expanding to the northwest. In terms of gain/loss of areas, by 2034 agriculture will increase approximately 93.2 km², corresponding to 13.4% of the total basin; forest and pasture will lose 49.2 km² and 41.7 km² of area, respectively, and will represent 53.9% and 32.0%. The forecast of the flow based on this scenario indicated a reduction of 34.4% in the flow of the dry season and 38.6% increase in the flow of the rainy season. The results of this projection also suggest that climate change may have played a more pronounced role in the hydrological regime than the lulcc projected by CLUE-S. The results also showed the good capacity of the integrated use of the SWAT and CLUE-S models in the generation of data that contribute to the analysis of the environmental impact of the agricultural expansion in the Northeast of Pará and East of the Amazon.

Keywords: Modeling. Prediction. Flow rate. Hydrological regime

1 INTRODUÇÃO

A forma como se dá a ocupação de uma área e as mudanças do uso e cobertura da terra causam impactos no ambiente local. Seus processos não ocorrem ao acaso e essas mudanças são determinadas por fatores sociais, econômicos, políticos e ambientais que interagem entre si nas diversas escalas de tempo e espaço. A compreensão dos efeitos dessas mudanças espaço-temporal pode ser feita pela modelagem dinâmica. A modelagem dinâmica consiste em métodos matemáticos e estatísticos que modelam a complexidade temporal de processos espaciais.

Um dos modelos de mudança do uso e cobertura da terra que mais tem se destacado nos últimos anos é o *Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent* (CLUE-S) (VERBURG *et al.*, 2002). Sua modelagem tem sido aplicada em várias partes do mundo e utiliza a regressão logística binária para quantificar localmente a influência de cada impulsionador de mudança sobre cada tipo de uso e cobertura da terra. Ele é composto de dois módulos (um espacial e um não espacial), sendo que no primeiro são especificados os planos celulares dos impulsionadores de demandas locais; e no segundo, os impulsionadores de demanda globais ou regionais definidos para quantificar a demanda agregada do uso da terra (VERBURG *et al.*, 2002; VERBURG *et al.*, 2004).

O CLUE-S pode realizar uma análise quantitativa sobre as mudanças no uso da terra em múltiplas escalas, em particular, simulando possíveis mudanças sob cenários futuros de uso da terra levando em conta os fatores da vizinhança, as forças motrizes e a adequação da terra aos cenários (VERBURG *et al.*, 2004).

O modelo hidrológico distribuído SWAT é amplamente utilizado na avaliação da resposta de vazão às mudanças no uso da terra e a combinação do CLUE-S como a modelagem do SWAT pode fornecer um bom desempenho na precisão do modelo em simular a vazão sob diferentes cenários de uso da terra. Isto pode permitir uma avaliação mais efetiva das componentes do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica sob diferentes cenários.

Dentro desse contexto, aplicou-se a modelagem do CLUE-S na presença de dependência espacial em função de um conjunto de parâmetros para simular mudanças de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Uraim. Objetivou-se, portanto, apontar possíveis áreas de maior pressão agrícola e pastagem para o futuro próximo (2015-2034) e, assim, aplicar cenários possíveis na modelagem hidrológica de vazão do SWAT.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Uraim permanece definida como a área de estudo. Sua forma, processo de escoamento superficial, clima, solos, etc. foram discutidos anteriormente, não sendo necessária sua reapresentação neste capítulo.

2.2 Modelagem dinâmica utilizando o arcabouço CLUE-S

Originado a partir do *Conversion of Land Use and its Effects* (CLUE), o *Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent* (CLUE-S) foi desenvolvido pelo *Land Dynamics Group* da Universidade de Wageningen, Holanda.

De acordo com Verburg *et al.* (2002), o CLUE-S pode ser definido como uma ferramenta de modelagem de dinâmica de mudança de uso e cobertura da terra que integra a influência de diferentes processos dessas mudanças a partir de simulações espacialmente explícitas para um nível de análise regional e local, ou seja, com maior resolução espacial. Portanto, pode ser apontado como um aprimoramento da aplicabilidade do CLUE porque trata-se de uma modelagem voltado para simulação de alta resolução, com capacidade entre 20 e 1000 metros de resolução (PEREIRA, 2013; SOLER, 2010; VERBURG *et al.*, 2002; VERBURG; VELDKAMP, 2004; VERBURG; OVERMARS, 2007)

Nesta modelagem, as simulações explícitas espacialmente são essenciais na análise empírica de probabilidades inerentes à alocação (ou não) de determinados usos ou coberturas de forma dinâmica (SOLER, 2010). Assim, a adequabilidade de alocação de um determinado uso da terra é feita pelas interações e competições que caracterizam as dinâmicas espaciais e temporais dos sistemas de uso da terra (VERBURG *et al.*, 2002; VERBURG; VELDKAMP, 2004).

O CLUE-S possui várias vantagens em relação às demais modelagens dinâmicas porque (i) permite uma fácil reprodução metodológica; (ii) é aplicável por usuários com conhecimentos básicos de programação, estatística e SIG; (iii) faz análise global do sistema, simulando diferentes usos e coberturas ao mesmo tempo; (iv) possibilita simular diferentes cenários (VERBURG *et al.*, 2002; PEREIRA, 2013).

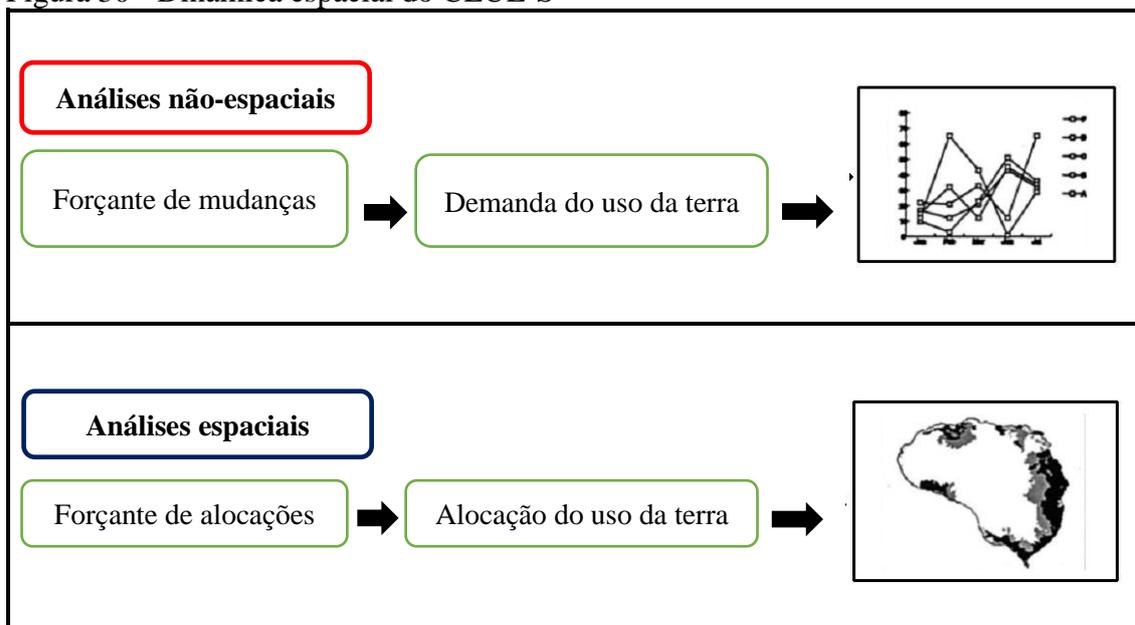
A sua modelagem tem sido aplicada em várias regiões com diferentes aspectos socioeconômicos, políticos e biofísicos, contemplando análises que vão desde a

intensificação da expansão agrícola até a compreensão dos processos de avanço da urbanização. Para áreas ao redor do mundo, cita-se estudos de Verburg; Veldkamp (2004), Verburg *et al.* (2006a), Verburg *et al.* (2006b); para o Brasil, ressalta-se os trabalhos Coelho (2009), Galharte (2011), Pereira (2013), Soler (2010) e Silva (2016).

2.2.1 Componentes do modelo CLUE-S

A descrição do arcabouço CLUE-S é apresentada a seguir baseada nos trabalhos de Verburg *et al.* (2002), Verburg & Veldkamp (2004), Soler (2010), Galharte (2013) e Silva (2016). A modelagem do CLUE-S é subdividida em dois módulos distintos: (1) módulo de demanda não espacial e (2) módulo de alocação espacialmente explícita (figura 30).

Figura 30 - Dinâmica espacial do CLUE-S



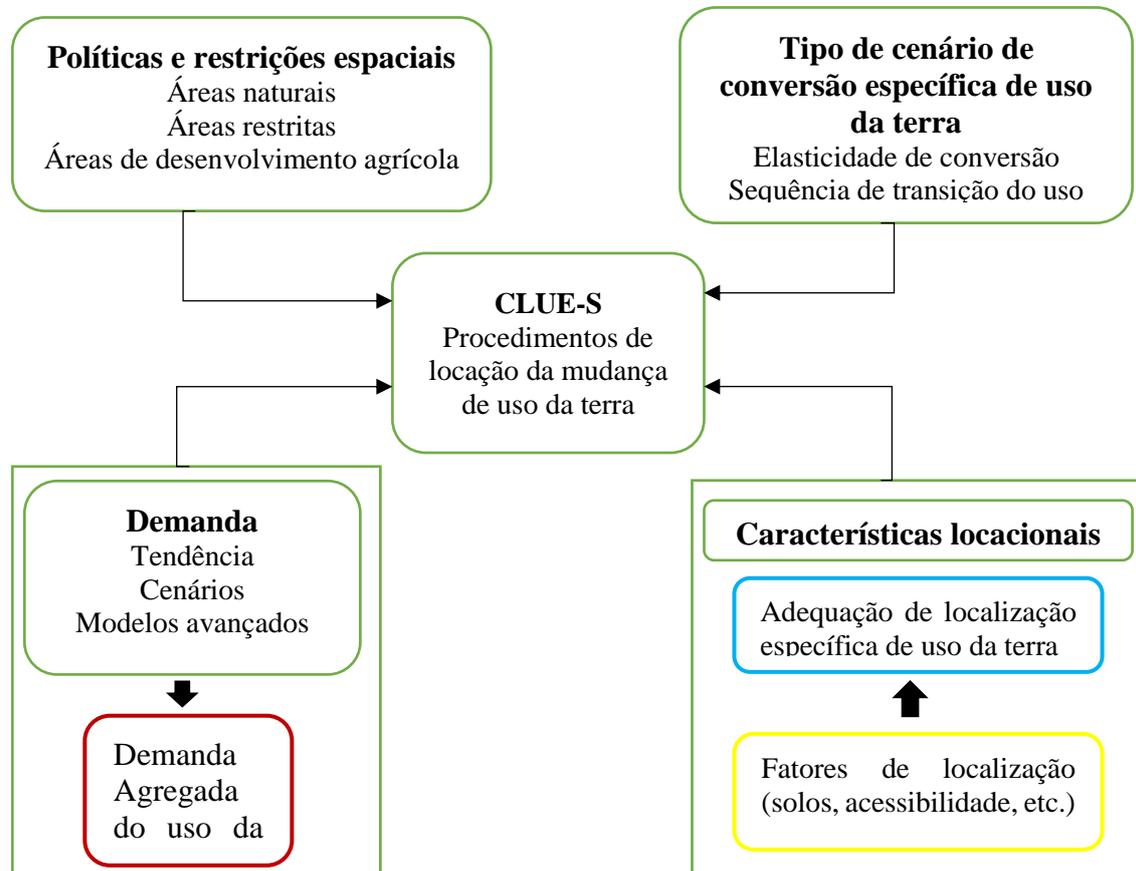
Fonte: adaptado de Verburg *et al.* (2010).

O módulo 1 calcula a variação de área para todos os tipos de uso da terra no nível agregado, assim, um aumento numa área específica reduzirá a área de outro uso. Já no módulo 2, essas demandas determinam as mudanças de uso e cobertura da terra em diferentes locais dentro da região de estudo pela utilização de um sistema de formatação de dados em modelo matricial (*raster*).

As simulações são fundamentadas nos componentes não espaciais e espaciais, possuindo quatro subcomponentes para o seu funcionamento, citando-se: (a) políticas e

restrições de uso do espaço, (b) parâmetros específicos de conversão, (c) demanda de uso da terra e (d) características da área de estudo (figura 31).

Figura 31- Fluxo de informações dentro do modelo CLUE-S



Fonte: adaptado de Verburg *et al* (2010).

a) Políticas e restrições de uso do espaço

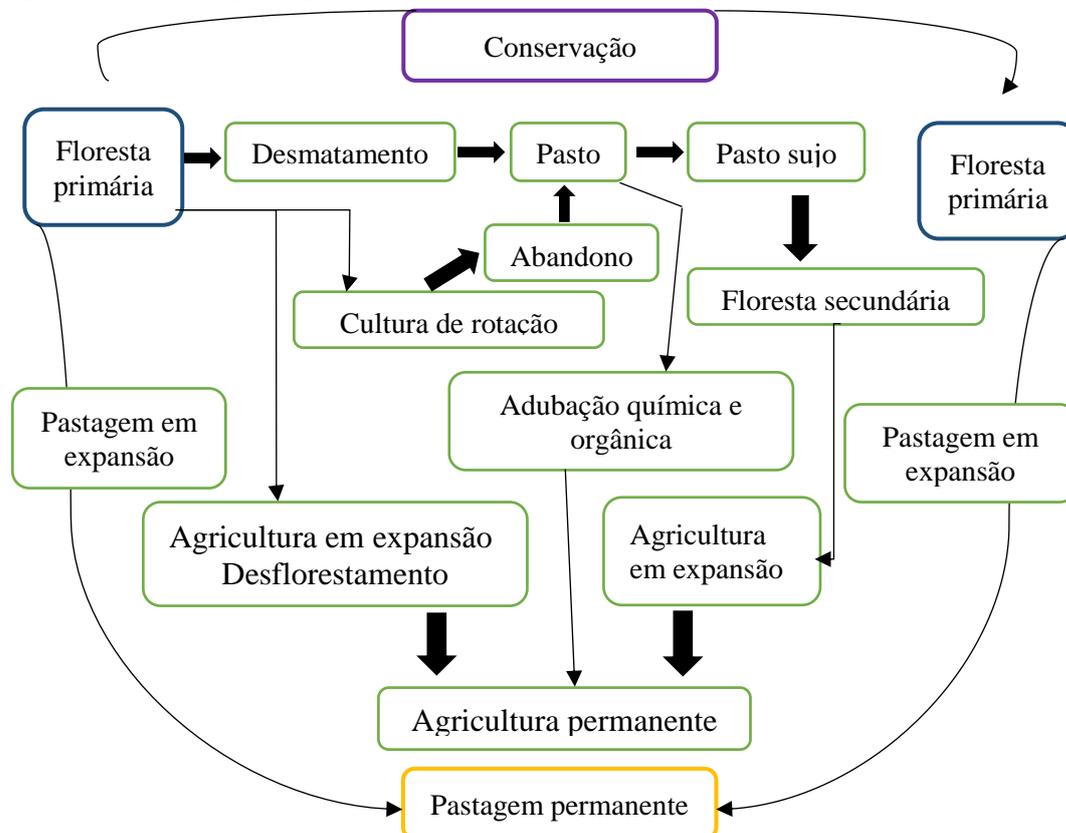
Os parâmetros exercem interferência nos mecanismos e padrões de alteração da paisagem, assim, é possível definir áreas onde as mudanças de usos e cobertura da terra possuem restrições parciais ou totais. Logo, é importante a construção de mapas que identifiquem as áreas de restrições. A matriz de conversão de uso da terra indica as áreas de conversão restrita.

b) Parâmetros específicos de conversão

Os parâmetros específicos de conversão são a elasticidade de conversão ($ELAS_u$) e sequências de transição de uso e cobertura da terra. Tais parâmetros influenciam na dinâmica espacial e temporal de mudança entre as classes de uso e cobertura.

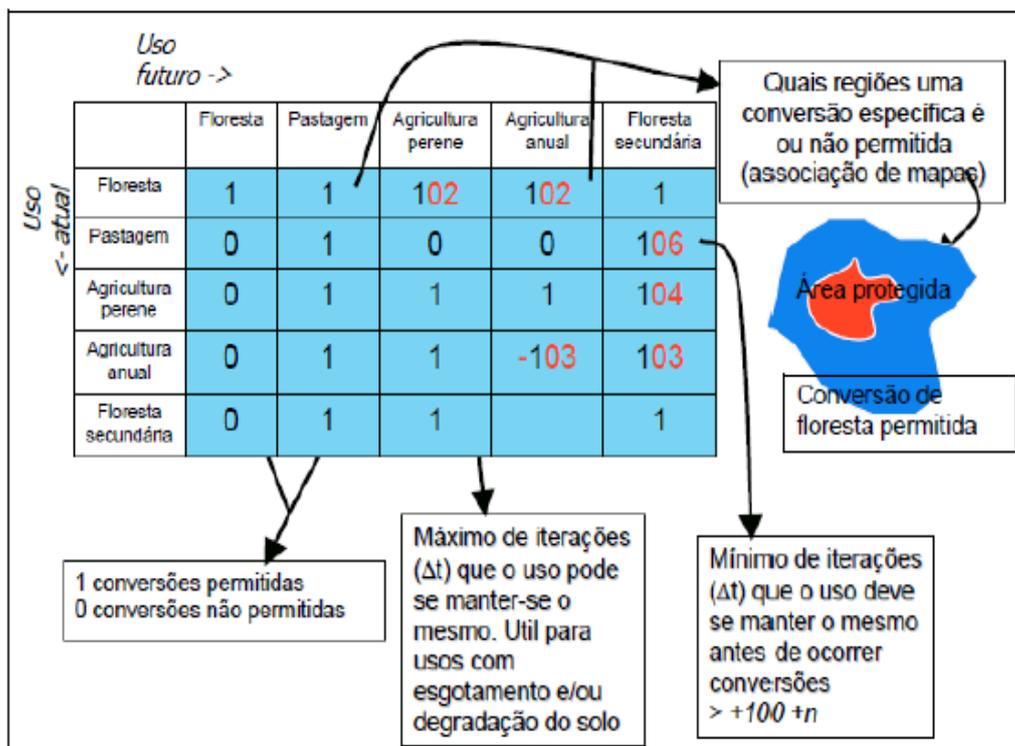
A $ELAS_u$ refere-se à facilidade ou não de um certo uso da terra (u) ser convertido em outro. O valor da $ELAS_u$ varia de 0 (fácil conversão) a 1 (irreversível). A matriz de conversão representa a sequência de transição, onde 1 (0) indica a possibilidade (impossibilidade) de conversão entre as classes (figura 33).

Figura 32 - Transição hipotética de mudança de uso e cobertura da terra



Fonte: adaptado de Soler (2010).

Figura 33 - Exemplo de matriz de conversão utilizada no CLUE-S



Fonte: Soler (2010) apud in Silva (2016).

c) Demanda de uso da terra

A quantidade de área a ser alocada para cada classe de uso e cobertura da terra a cada ano é determinada por este módulo. Sua elaboração pode ser realizada por diferentes maneiras e, para isso, é necessário estabelecer o objetivo do estudo. A técnica mais utilizada é a extrapolação de tendências de mudanças baseada no histórico de uso. Entretanto, também pode-se construir uma demanda a partir de modelos baseados nas mudanças macroeconômicas de interesses político-comerciais, mapeamento por sensoriamento remoto e outros.

d) Características da área de estudo

Uma probabilidade relativa de alocação dos diferentes tipos de uso é possível de ser calculada baseada nas condições biofísicas, geopolíticas e socioeconômicas de um local. Tal probabilidade em um modelo de regressão logística é definida conforme a equação 65.

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

Equação 65

onde: P_i é a probabilidade de uma célula ser convertida em um tipo de uso do solo; X_n são os fatores; i é a localização. Os coeficientes β são estimados por meio de regressão logística utilizando o uso atual como variável dependente (VERBURG *et al*, 2002). Soler (2010) enfatiza que é um método aplicável em situações que se tem uma variável dependente dicotômica.

Depois de informar todos os dados de entrada no CLUE-S, calculam-se as mudanças mais prováveis de uso e cobertura da terra em intervalos discretos de tempo.

Esse processo de alocação é determinado nas seguintes etapas:

- ✓ Determinação: determina-se as células passíveis de sofrer modificações, independente de possuírem restrição de conversão;
- ✓ Cálculo: é calculada a probabilidade total ($TPROP_{i,u}$) para cada uso da terra (equação 66);

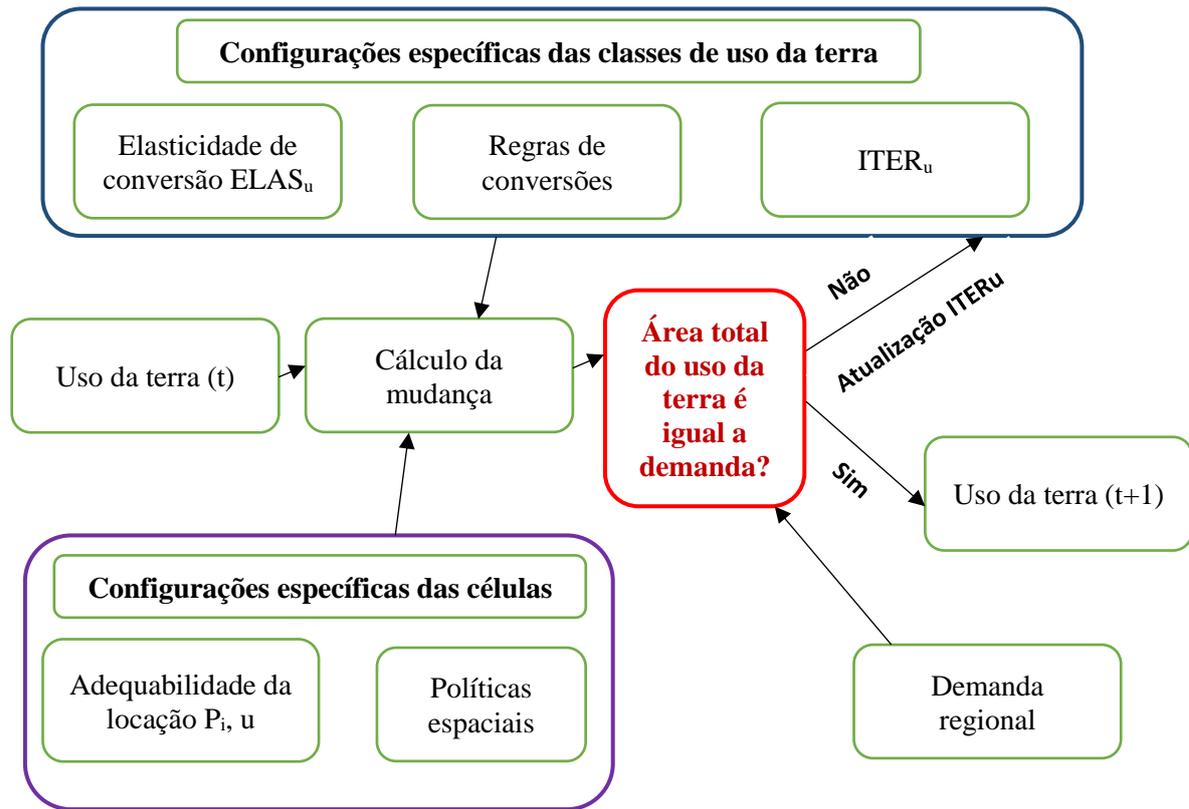
$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u$$

Equação 66

onde: $P_{i,u}$ a probabilidade da célula i assumir o uso u ; $ELAS_u$ é a elasticidade de mudanças específicas para cada uso; $ITER_u$ é a variável de interação, específica a cada uso e indica a competitividade relativa do uso.

- ✓ Alocação: faz-se uma alocação preliminar de $ITER_u$ com valor igual para todas as classes de uso da terra. A classe com maior probabilidade total para a célula considerada é alocada;
- ✓ Comparação. é feita uma comparação entre área total alocada para cada uso e demanda agregada quantificada a priori. O valor de $ITER_u$ é aumentado (diminuído) para classes cuja área de alocação é menor (maior) que a demanda;
- ✓ Iteração. As etapas “cálculo” e “comparação” são repetidas até que a demanda seja alocada corretamente. Ao se igualarem a área de alocação de cada uso e a demanda, o mapa final é salvo e inicia-se o cálculo do ano seguinte. A figura 34 ilustra os procedimentos usados pelo modelo CLUE-S.

Figura 34 - Módulo de alocação do modelo CLUE-S



Fonte: adaptado de Verburg (2010).

2.2.2 Banco de dados de entrada do CLUE-S

A realização das simulações da dinâmica de mudanças de uso e cobertura da terra pelo CLUE-S depende de um banco de dados georreferenciados. Soler (2010) ressalta que este banco deve possuir parâmetros que influenciam direta ou indiretamente nas mudanças de uso e cobertura da terra, como aqueles que fornecem informações dos aspectos do meio biofísico, de cultivos específicos, de dados socioeconômicos, demográficos, geográficos, de infraestrutura, etc. O banco de dados utilizado neste trabalho foi construído através de diversas fontes distintas.

2.2.3 Execução da modelagem dinâmica com o CLUE-S

a) Identificação do uso e cobertura da terra da área de estudo

Os dados de uso e cobertura da terra utilizados no CLUE-S foram os mesmos mapas empregados na modelagem do SWAT (tabela 37).

Tabela 37 - Reagrupamento das classes de uso e cobertura da terra

Mapa Terraclass (2004 e 2014)	Mapa CLUE-S
Agricultura anual	Agricultura anual
Floresta + Vegetação secundária	Floresta
Pasto com solo exposto + Pasto limpo + Pasto sujo + Mosaico de ocupações	Pastagem
Área Urbana + Outros	Outros

Fonte: do autor.

Tabela 38 - Área total por classe de uso e cobertura da terra

Classe no CLUE-S	Área 2004 (ha)	(%)	Área 2014 (ha)	(%)
Agricultura anual	13719	2,7	59180	11,6
Floresta	310823	60,8	280790	54,9
Pastagem	183400	35,8	168329	32,9
Outros	3652	0,7	3295	0,6
Total	511594	100,0	511594	100,0

Fonte: do autor. Mapas redimensionados onde 1 célula de 100 x 100 equivale a 1 ha.

b) Identificação dos fatores exploratórios de mudança de uso e de cobertura da terra

Os fatores exploratórios foram organizados conforme a orientação de Verburg (2010), que recomenda o preenchimento de um quadro com os parâmetros utilizados (quadro 7). Foram definidos a partir de aspectos biofísicos, políticos e socioeconômicos (quadro 8). Para Soler (2010), esses fatores podem influenciar ou não na permanência ou mudança de classe em uma determinada região, podendo ser estáticos (constantes ao longo do tempo) ou dinâmicos (se modificam ao longo do mesmo).

Quadro 7 - Orientações para a seleção dos fatores exploratórios no CLUE-S

Parâmetro	Aplicação do parâmetro
Uso e cobertura da terra em geral	As simulações de uso e de cobertura da terra.
Cultivos específicos	Dados de áreas semeadas para simulação da distribuição de cultura; dados de produção por área para simulação de cultivos por área
Dados de pecuária	Para simulações de distribuição de pecuária.
Demografia	Essencial para todas as simulações.
Dados socioeconômicos	Opcional quando considerados alternativas importantes para compreensão de cultivos por área.
Manejo da terra	Essenciais para simulação de cultivos por área
Dados geográficos	Importante para todas as simulações
Dados biofísicos	Essencial para todas as simulações, porém as variáveis escolhidas dependem da área de estudo.

Fonte: Verburg (2010) apud in Pereira (2013).

Quadro 8 - Parâmetros utilizados nas simulações do CLUE-S para a BHRU

Parâmetro	Descrição	Fonte	Tipo/Ano
Uso2004	Mapa de uso e cobertura da terra	Terra Class/INPE	Vetorial/2004
Uso2014	Mapa de uso e cobertura da terra	Terra Class/INPE	Vetorial/2014
DEhidrografia	Distância euclidiana da hidrografia	Do autor	Vetorial/2014
DEhidrovia	Distância euclidiana das hidrovias	ANTAQ	Vetorial/2009
DERodovia	Distância euclidiana das rodovias Estaduais e Federais na bacia	IBGE	Vetorial/2009
densSetor	Densidade populacional	Censo demográfico de 2010 do IBGE	Vetorial/2010
rendSetor	Valor do rendimento nominal médio mensal das pessoas responsáveis por domicílios particulares permanentes (com e sem rendimento)	Censo demográfico de 2010 do IBGE	Vetorial/2010
Hipsometria	Mapa hipsométrico	SRTM/EMBRAPA	Raster/2014
Declividade	Mapa de declividade	Do autor	Raster/2014
SoloFFC	Mapa de solo	ZEE-PA	Vetorial/2009
SoloFTD	Mapa de solo	ZEE-PA	Vetorial/2009
SoloGXBD	Mapa de solo	ZEE-PA	Vetorial/2009
SoloLAD	Mapa de solo	ZEE-PA	Vetorial/2009
PRPanual	Chuva média anual	Do autor	Raster/1984-2014
PRPtrichv	Chuva média do trimestre mais chuvoso	CMORPH	Raster/1998-2014
PRPtriseco	Chuva média do trimestre mais seco	CMORPH	Raster/1998-2014

Fonte: do autor.

c) Identificação das áreas demandadas para cada uso

Foram definidos dois cenários de demanda: (1) cenário de demanda para a calibração do modelo; (2) cenário de demanda para projeções. O cenário de calibração é compreendido de 2004 a 2014, e o cenário projetado até 2034. Ressalta-se que a escala de trabalho adotada neste capítulo foi de 1000 m de resolução, ou seja, cada pixel tem 100 ha de resolução, as quais as áreas foram calculadas para serem múltiplo de 100 ha.

- Cenário 1 - demanda para a calibração (2004 a 2014)

A diferença de área das classes existentes nos mapas entre 2004 e 2014 foram base para determinar as demandas deste cenário. Contabilizou-se a variação linear através do acréscimo ou decréscimo de incremento anual, calculada pela divisão igual para cada ano da área total que cresceu ou diminuiu no período analisado (2004-2014).

- Cenário 2 - demanda para o cenário projetado de 2034

Modelar a expansão da agricultura anual e da pastagem foi o objetivo principal deste cenário e os parâmetros calibrados no cenário 1 foram aqui aplicados. Nesta simulação, as demandas para a agricultura anual e pastagem foram elaboradas usando os relatórios de projeção do agronegócio Brasileiro para 2023 (MAPA, 2013) e da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2013), os quais indicam um crescimento de aproximadamente 18% das áreas de agricultura e diminuição de 3% das áreas de pastagens.

d) Análise dos fatores exploratórios

Foram baseadas em avaliações Estatísticas da relação entre fatores explanatórios e as classes de uso e cobertura da terra. Para tanto, utilizou-se o pacote estatístico *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS), versão 23, da IBM.

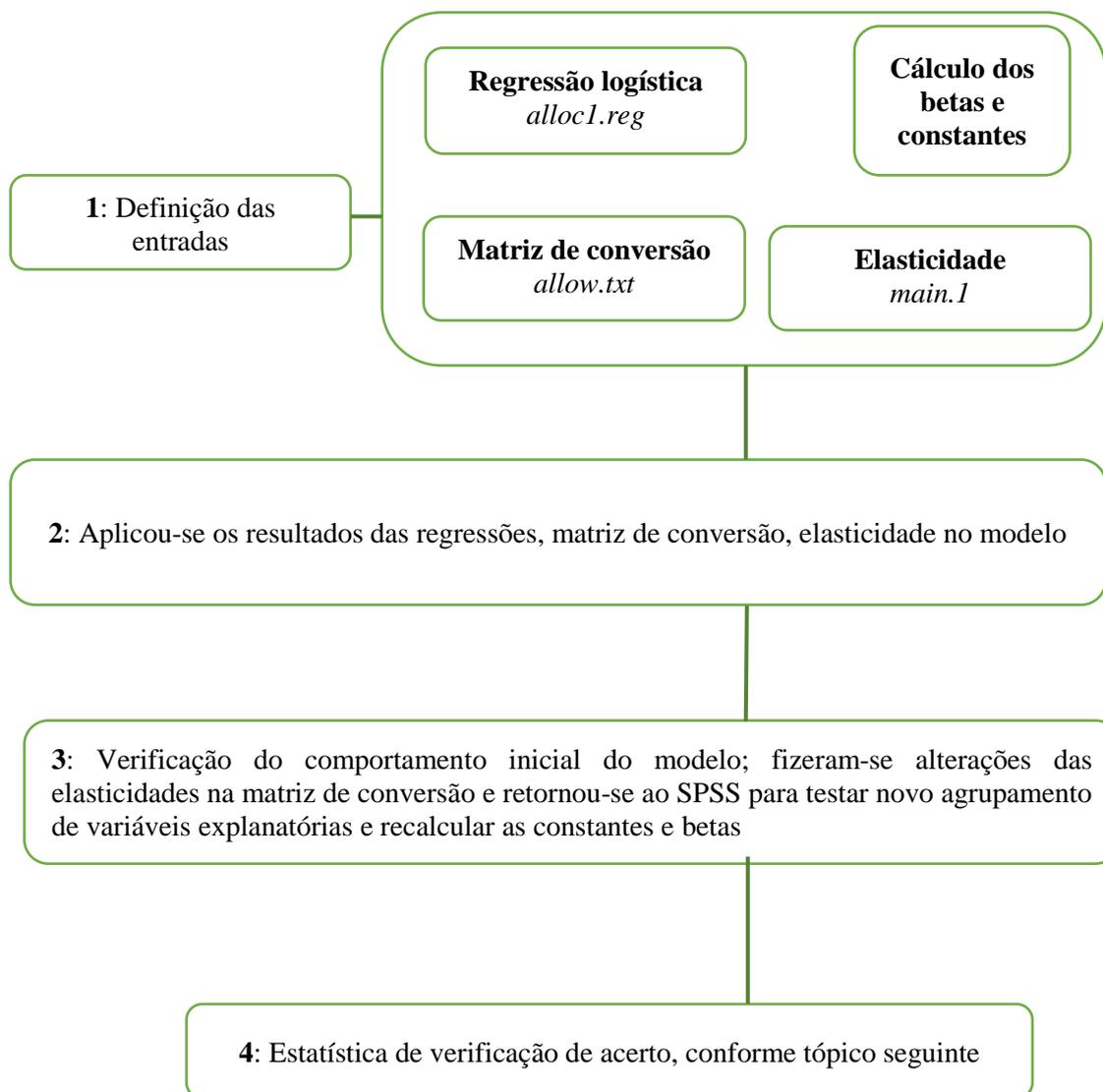
O trabalho com o SPSS consistiu-se em 3 análises: correlação bivariável, regressão logística binária e o cálculo da área sob a curva ROC (recomendável valor acima de 0.8, porém, aqui valores acima de 0,7 foram aceitáveis). Na regressão logística, aplicou-se o método *Enter* com todas as variáveis disponíveis primeiramente e, em seguida, o método *forward stepwise (conditional)* com todas variáveis. Os valores de beta (β) para cada fator exploratório e a constante para cada uso da terra foram obtidos a partir da regressão logística.

A rotina de trabalho consistiu em: (1) calcular as constantes e betas; (2) aplicação no modelo; (3) verificação – caso necessário, retornar para o passo 1 e refazer a rotina repetitivamente até encontrar resultados satisfatórios.

e) Calibração e ajustes do modelo

O trabalho atende as recomendações de Soler (2010), que sugere um conjunto de dados separados entre si pelo menos em 10 anos. O processo de calibração e ajustes no modelo é ilustrado na figura 35.

Figura 35 - Processo de calibração e ajustes no CLUE-S



Fonte: do autor.

f) Verificação do acerto dos resultados da calibração do modelo

O acerto do modelo foi testado a partir da análise de concordância com o mapa do Terra Class para 2014, expressos como concordâncias total e individual. A análise de concordância consistiu-se na construção e comparação da matriz de confusão (tabela 39) e nos cálculos estatísticos derivadas dessa matriz. Para avaliação total do mapa, calculou-se a Acurácia Global (Exatidão Global) e o Coeficiente de concordância *Kappa* (Índice *Kappa*); e a avaliação individual das classes deu-se a partir dos Erros de Omissão, Erros de Inclusão, Acurácia do Usuário e Acurácia do Produtor (tabela 40).

Tabela 39 - Esquema da matriz de confusão adotada para análise das simulações

Simulada (CLUE-S)	Referência (Terra Class)				Total
	Agra	Outr	Frst	Past	
AGRA	*P ₁₁	-	-	-	P ₁₊
OUTR	-	*P ₂₂	-	-	P ₂₊
FRST	-	-	*P ₃₃	-	P ₃₊
PAST	-	-	-	*P ₄₄	P ₄₊
Total	P ₊₁	P ₊₂	P ₊₃	P ₊₄	

Fonte: do autor. *P₁₁, *P₂₂, *P₃₃, *P₄₄ são os pontos da diagonal principal classificados corretamente; AGRA é agricultura anual; OUTR é outros; FRST é floresta; PAST é pastagem.

Tabela 40 - Métodos de acurácia adotados para a análise das simulações do CLUE-S

Método	Fórmula	Referência
Acurácia Global	$AG = \sum_{i=1}^m P_{ii}$	Story; Congalton (1986)
Índice <i>Kappa</i>	$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$	Cohen (1960)
Acurácia do usuário	$AU_i = \frac{P_{ii}}{P_{i+}}$	Story; Congalton (1986)
Acurácia do produtor	$AP_{ii} = \frac{P_{ii}}{P_{+i}}$	Story; Congalton (1986)
Erro de omissão	-	Congalton; Green (1999)
Erro de inclusão	-	Congalton; Green (1999)

Fonte: do autor.

Quadro 9 - Descrição dos métodos adotados na análise de acurácia das simulações

Método	Descrição
Acurácia Global	É uma das medidas mais simples, sendo calculada pela soma do total dos pixels corretamente classificados dividida pelo número total de pixels da matriz de confusão.
Índice <i>Kappa</i>	Mede o grau de concordância em escalas nominais assumindo que as unidades são independentes; as classes ou categorias da escala nominal são independentes e mutuamente exclusivas; o classificador e os pontos de referência operam de forma independente. Considera todos os elementos da matriz de erros ao invés de apenas aqueles que se situam na diagonal principal da mesma.
Acurácia do usuário	Acurácia de categoria individual que calcula a probabilidade de um pixel classificado no mapa representar a categoria na terra.
Acurácia do produtor	É também acurácia de caráter individual e indica a probabilidade de um pixel de referência ter sido corretamente classificado.
Erro de omissão	Situa-se na linha da matriz de erros. Mede a acurácia da classificação digital (mapa).
Erro de inclusão	Situa-se na coluna da matriz de erros. Mede a confiabilidade de uma classe corresponder a verdade de campo.

Fonte: do autor.

g) Aplicação do modelo para cenários futuros

A escolha do melhor resultado foi definida com base nas análises descritas no item anterior. Sendo assim, o melhor resultado foi projetado até o ano de 2034. Uma descrição completa das etapas de execução do CLUE-S desde a construção do banco de dados, passando pelo preparo de arquivos de entrada, carga no modelo e projeções de cenários futuros está em *Manual for the CLUE – Kenya application* (VERBURG *et al.*, 2005).

2.3 Simulações de vazão para o cenário futuro

O comportamento da vazão para o futuro próximo (2015-2034) na BHRU foi realizada pela assimilação dos resultados da modelagem do CLUE-S e do RegCM4 no SWAT. Foram aplicados os parâmetros do modelo calibrado no SWAT durante o experimento II para o cenário referente ao mapa de 2014.

Os dados meteorológicos necessários para alimentar o SWAT como parâmetros de entrada (item 2.2.3 do capítulo IV) foram fornecidos pelas simulações do modelo regional RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2, com cenário RCP45 do IPCC-AR4. Uma descrição completa desta modelagem bem como os resultados desta pesquisa, a qual investigou os aspectos regionais da precipitação sazonal durante o clima atual (últimos 25 anos, 1989-2013) e clima futuro (próximos 25 anos, 2015-2039), podem ser obtidos em Souza *et al* (2016).

De posse de todos os dados necessários para efetuarem-se as simulações futuras, seguiu-se a metodologia do SWAT descrita no capítulo IV.

2.4 Sistemas computacionais utilizados neste capítulo

- ✓ ArcGis v. 10.2, desenvolvido pela Environmental Systems Research Institute, USA, e licenciado para a Texas A&M University;
- ✓ SWAT v. 2012, desenvolvido pelo Agricultural Research Service (ARS), Texas A&M University System, Temple, Texas, USA, de acesso livre e gratuito;
- ✓ SWAT-CUP v. 2012, desenvolvido pelo Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Suíça, de acesso livre e gratuito;
- ✓ CLUE-S, desenvolvido pelo grupo de pesquisa Land Dynamics Group na Universidade de Wageningen, Holanda, de acesso livre e gratuito;
- ✓ SPSS v. 23, desenvolvido nas Universidades de Stanford e de Chicago, USA.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são abordados em duas maneiras: a primeira pela modelagem do arcabouço CLUE-S, considerando a dinâmica do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica bem como as projeções deste padrão para o futuro; e a segunda será discutida a assimilação dos resultados do CLUE-S na modelagem hidrológica do SWAT para previsão da resposta hidrológica vazão.

3.1 Dinâmica do uso e cobertura da terra na bacia

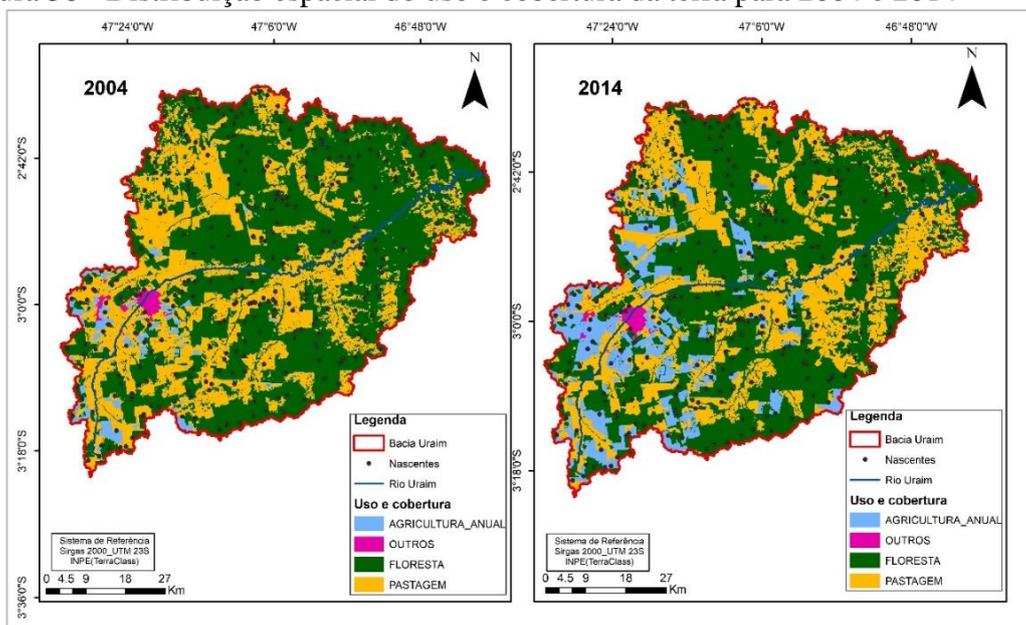
Os mapas utilizados foram obtidos do Projeto Terra Class, do INPE, e são referentes aos anos de 2004 e 2014. Para reduzir o número de classes e atender o objetivo das análises, foi feito um reagrupamento, conforme mostrado no item 3.3 do capítulo I. A dinâmica espacial do uso e cobertura da terra entre 2004 e 2014 identificada na bacia está ilustrada na tabela 41 e pela figura 36 e gráfico 28.

Tabela 41 - Mudanças do uso e cobertura da terra na BHRU de 2004 a 2014

Classe	Área 2004 (ha)	Área 2009 (ha)	Área 2014 (ha)
Agricultura anual	13719 (2,7%)	36450 (7,1%)	59180 (11,6%)
Floresta	310823 (68,8%)	295807 (57,8%)	280790 (59,4%)
Pastagem	183400 (35,8%)	175865 (34,4%)	168329 (32,9%)
Outros	3652 (0,7%)	3474 (0,7%)	3295 (0,6%)
Total	511594 (100%)	511594 (100%)	511594 (100%)

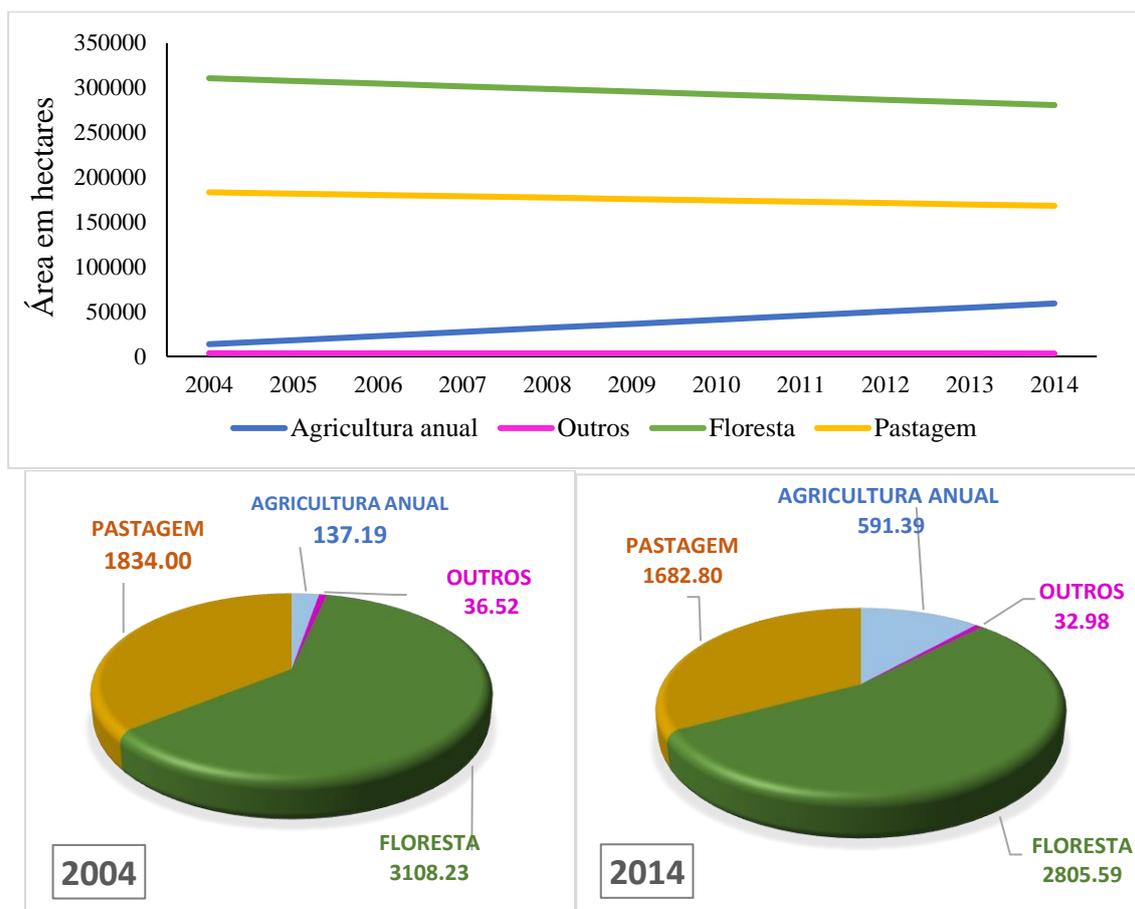
Fonte: do autor. Mapas redimensionados onde 1 célula de 100 x 100 equivale a 1 hectare.

Figura 36 - Distribuição espacial do uso e cobertura da terra para 2004 e 2014



Fonte: do autor.

Gráfico 28 - Mudança de uso e cobertura da terra de 2004 a 2014 na BHRU



Fonte: do autor.

Como discutido anteriormente, houve perda significativa das áreas de floresta, principalmente pelo avanço da pastagem e da agricultura. Entretanto, é importante pontuar que a diminuição da pastagem observada na bacia também está ligada ao aumento da agricultura anual sobre estas áreas. A agricultura anual representava 2,7% do total da bacia em 2004, e já em 2014 esta classe totalizava 11,6%. Este padrão observado é semelhante ao que reportou o SIPAM para o Leste da Amazônia. O instituto afirmara que novas áreas desflorestadas na região estariam sendo incorporada pelo avanço da fronteira agropecuária e o avanço estaria ocorrendo sobre vegetação primária da floresta e dos campos naturais (SIPAM, 2005). Segundo o próprio projeto Terra Class (INPE, 2014), a taxa média de crescimento da área ocupada com agricultura anual foi de 8% ao ano entre 2004 e 2014 para toda a Amazônia Legal.

Kato *et al.* (2005) relata ainda que essa diminuição das áreas de vegetação está relacionada à cultura de corte-e-queima da vegetação secundária para implantação de novas áreas de pastagem e agricultura geral, bem como ao abandono das pastagens degradadas e com solos exauridos por anos sequenciais de agricultura para entrarem em

pousio. Ademais, Domingues; Bermann (2012) e Lima; Bay (2005) levantaram a hipótese de uma relação indireta entre a expansão da fronteira agrícola e a elevação das taxas de desflorestamento, pois a soja vem sendo cultivada nessa região com um ritmo de expansão, aumentando desde 2000 paralelamente à intensificação das taxas de desflorestamento. Sousa *et al.* (2017) avaliaram as mudanças de uso e cobertura da terra em Paragominas e mostraram que grande parte das áreas de floresta foi convertida para pasto (3%); e do total de incremento da área de agricultura, 66% foi originário da classe de pasto, demonstrando que as dinâmicas estão baseadas na consolidação da agricultura e pecuária como variáveis na matriz econômica do município.

Mesmo perdendo área, as pastagens continuaram sendo o principal tipo de uso dentro da BHRU. Ressalta-se que Paragominas vem desenvolvendo sua economia a partir da abertura de pastos sobre florestas para pecuária bovina e produção de culturas graneleiras e, em 2008, possuía 43% de sua área total desflorestada, sendo incluído na lista dos 36 maiores desmatadores do bioma Amazônia pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Apesar do incremento de desmatamento ter diminuído nos últimos 6 anos com introdução desta política, o município apresentou ainda um total de 8,7 mil km² de área desmatada ainda em 2014, o que correspondeu a 44,7% do total desmatado. De acordo com o Terra Class (2014), a participação proporcional de pastagens foi estável em aproximadamente 65% nos vários mapeamentos durante esta década. Neste cenário, para Feanrside (2005), os impactos são negativos, pois quando a conversão de floresta para um outro tipo de uso acontece, há perda de biodiversidade, degradação das florestas e das áreas de bacias hidrográficas.

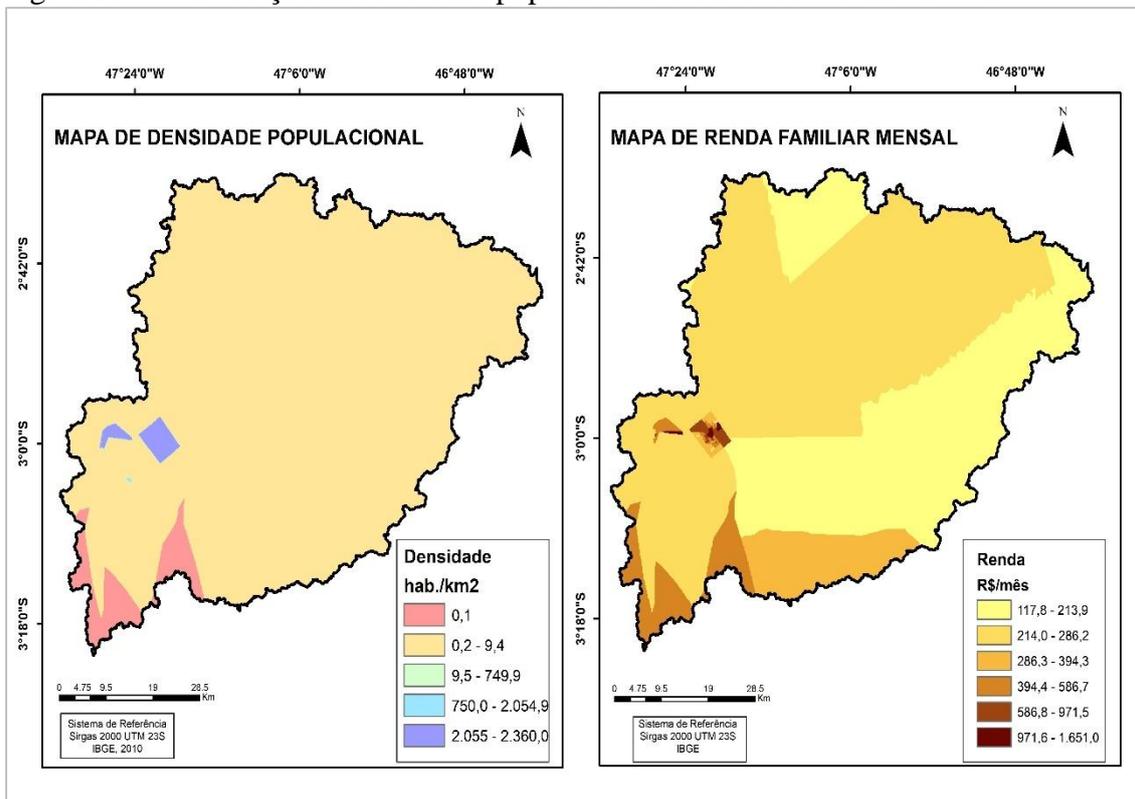
3.2 Identificação das variáveis independentes

As variáveis independentes (forçantes de mudança) utilizadas foram: Distância euclidiana da hidrografia, Distância euclidiana das hidrovias, Distância euclidiana das rodovias Estaduais e Federais na bacia, Densidade populacional, Valor do rendimento nominal médio mensal, Mapa hipsométrico, Mapa de declividade, Mapa de solo, mapa da chuva média anual, mapa da chuva média do trimestre mais chuvoso e mapa da chuva média do trimestre mais seco. Algumas das são mostradas a seguir.

3.2.1 Dados socioeconômicos

As informações de densidade populacional (habitantes/km²) e a renda mensal familiar (R\$/mês) foram fornecidas a partir da distribuição dos setores censitários (figura 37).

Figura 37 - Distribuição da densidade populacional e da renda mensal familiar



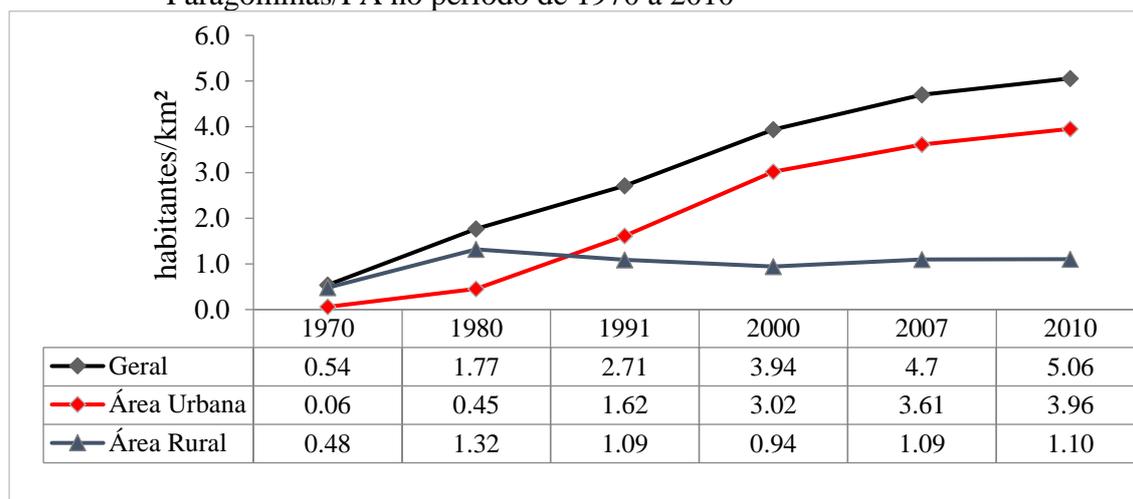
Fonte: do autor.

Nas décadas de 1960 e 1970, a abertura de rodovias, os projetos de colonização, os incentivos fiscais e outros esforços governamentais para integrar a região amazônica ao restante do país atraíram grandes contingentes populacionais à Amazônia brasileira. Essa migração acelerou o crescimento populacional de muitos municípios da região Norte, especialmente daqueles situados às margens das rodovias recém-criadas, como foi o caso de Paragominas, situado às margens da rodovia Belém-Brasília.

A densidade demográfica passou de 0,54 hab/km² em 1970 para 5,4 hab/km² na contagem populacional do IBGE/2013 (gráfico 29). O período de 1970 a 1980 foi marcado por um expressivo aumento da sua densidade populacional, passando de 0,5 hab/km² para 1,8 hab/km², o que correspondeu a uma taxa de crescimento anual de 12,6%, - a maior da história do município. No início da década de 1990, essa densidade atingiu o patamar de 2,7 hab/km², resultante da taxa de crescimento anual de 4,0% no período de

1980-1991. No ano 2000, Paragominas possuía 3,9 hab/km², após crescer a uma taxa anual de 4,2% ao longo da década de 1990. Em 2013, o município atingiu sua maior densidade populacional, 5,4 hab/km². Entretanto, a taxa de crescimento anual da população no período de 2000 a 2007 foi a menor: 2,5% ao ano. Recentemente, Paragominas abriga uma população de 103.8 mil habitantes.

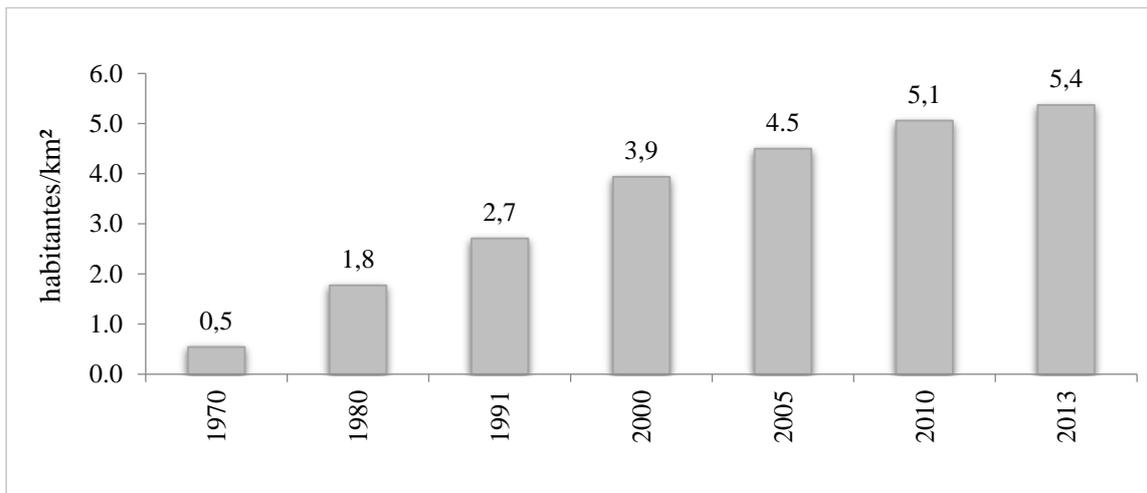
Gráfico 29 - Evolução da densidade demográfica das populações urbana e rural de Paragominas/PA no período de 1970 a 2010



Fonte: adaptado do IBGE – Censos Demográficos (2010).

Durante a década de 1980, a densidade da população urbana de Paragominas superou a da população rural e continuou crescendo até 2010. Desde o ano 2000, ela já equivalia a mais do triplo da densidade da população rural (3,02 hab/km² contra 0,94 hab/km²). A maior diferença entre elas ocorreu em 2010: 3,96 hab/km² contra 1,01 hab/km². A população rural, por sua vez, após atingir o seu ápice no início da década de 1980, com 1,32 hab/km², experimentou duas décadas consecutivas de queda, chegando ao patamar de 0,94 hab/km² em 2000. No ano de 2010, ela voltou a atingir número próximo ao do início da década de 1991, com pouco mais de 1 habitante por quilômetro quadrado (gráfico 30).

Gráfico 30 - Evolução da densidade demográfica de Paragominas/PA de 1970 a 2013

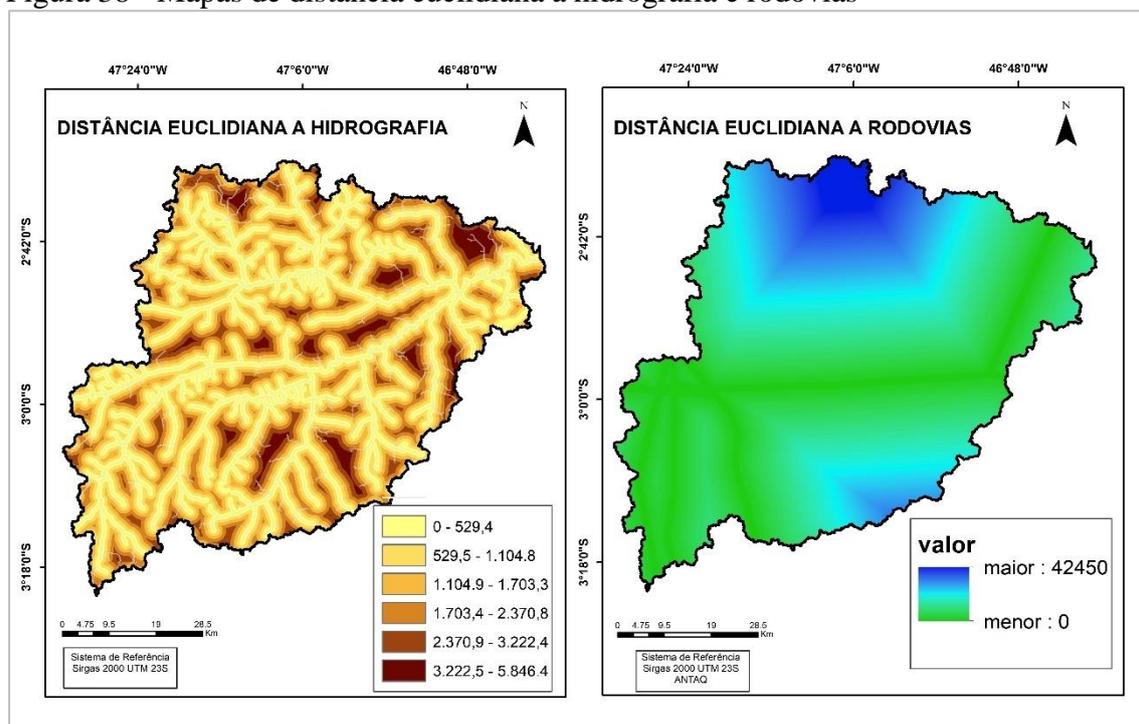


Fonte: IBGE Censos Demográficos 1970, 1980, 1991, 2000, 2010 e contagem da população 2013.

3.2.2 Dados geográficos/logísticos/climáticos.

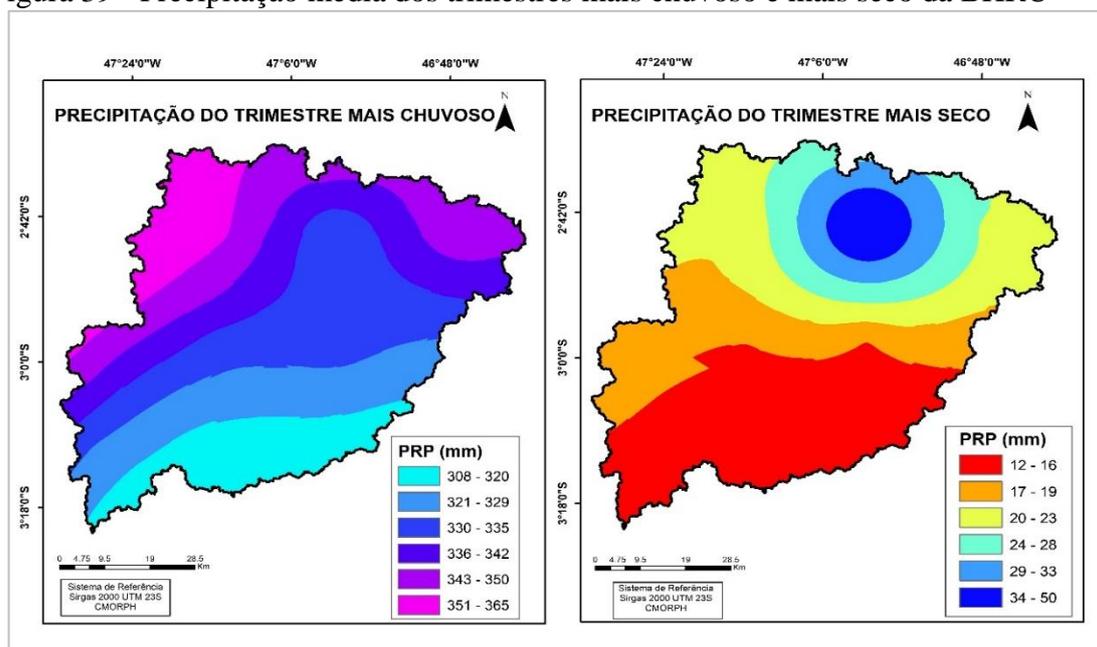
São as distâncias euclidianas a hidrografia e distância euclidiana a rodovias (figura 38). O cálculo foi realizado através da ferramenta *Euclidean Distance* do *software* ArcGis 10.2. A média das chuvas no trimestre mais chuvoso e menos chuvoso da bacia também foram utilizados na análise (figura 39).

Figura 38 - Mapas de distância euclidiana a hidrografia e rodovias



Fonte: do autor.

Figura 39 - Precipitação média dos trimestres mais chuvoso e mais seco da BHRU



Fonte: do autor.

3.3 Demandas, matriz de conversão, elasticidade e estatísticas

3.3.1 Cenário de demanda para a calibração (2004-2014) e projeção (2014-2043)

As demandas para o período de calibração foram fundamentadas somente na mudança de uso entre este período (2004-2014) (tabela 42). Para o período de projeção, a demanda foi elaborada usando os relatórios de projeção do agronegócio Brasileiro para 2023 (MAPA, 2013) e da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2013) (tabela 43).

Tabela 42 - Demanda por uso entre os anos de 2004 e 2014

Ano	Agricultura anual	Floresta	Pastagem	Outros
2004	13719	310823	183400	3652
2005	18265	307820	181893	3616
2006	22811	304816	180386	3581
2007	27357	301813	178879	3545
2008	31903	298810	177372	3509
2009	36450	295807	175865	3474
2010	40996	292803	174357	3438
2011	45542	289800	172850	3402
2012	50088	286797	171343	3366
2013	54634	283793	169836	3331
2014	59180	280790	168329	3295

Fonte: do autor. As 4 classes com área em hectares e valores múltiplos de 1 ha (pixel de 100 m).

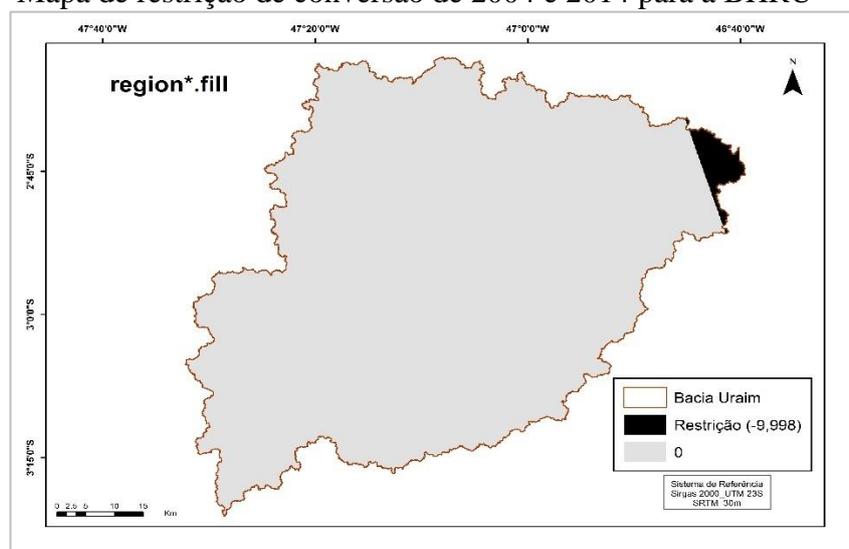
Tabela 43 - Demanda por área para projeção de 2014 e 2034

Ano	Agricultura anual	Floresta	Pastagem	Outros
2014	59180	280790	168329	3295
2015	59683	280539	168077	3295
2016	60186	280289	167824	3295
2017	60689	280038	167572	3295
2018	61192	279788	167319	3295
2019	61695	279537	167067	3295
2020	62198	279287	166814	3295
2021	62701	279036	166562	3295
2022	63204	278786	166309	3295
2023	63707	278535	166057	3295
2024	64210	278285	165804	3295
2025	64713	278034	165552	3295
2026	65216	277784	165299	3295
2027	65719	277533	165047	3295
2028	66222	277282	164794	3295
2029	66725	277032	164542	3295
2030	67228	276781	164289	3295
2031	67732	276531	164037	3295
2032	68235	276280	163784	3295
2033	68738	276030	163532	3295
2034	69241	275779	163279	3295

Fonte: do autor. As 4 classes com área em hectares e valores múltiplos de 1 ha (pixel de 100 m).

A restrição de uso (o arquivo '*region*.fill*') foi composto pelos limites de uma reserva indígena presente no exutório da bacia. Este mapa de restrição foi adicionado tanto para 2004 quanto para 2014 (figura 40).

Figura 40 - Mapa de restrição de conversão de 2004 e 2014 para a BHRU



Fonte: do autor.

3.3.2 Matriz de conversão e Estatísticas dos parâmetros

Nos processos de calibração e projeção, a matriz de conversão foi elaborada conforme apresenta a tabela 44. Nela, mesmo a vegetação secundária do mapa original está agregada à classe “Floresta”, não foi permitida às outras classes converterem-se a ela. Isto pode implicar numa limitação desta modelagem, visto que há possibilidade de agricultura e pastagem converterem-se em vegetação secundária, ainda que haja tempos mínimos de permanência antes de serem convertidos, como já reportou Kato *et al.* (2005) e aplicou Silva (2016).

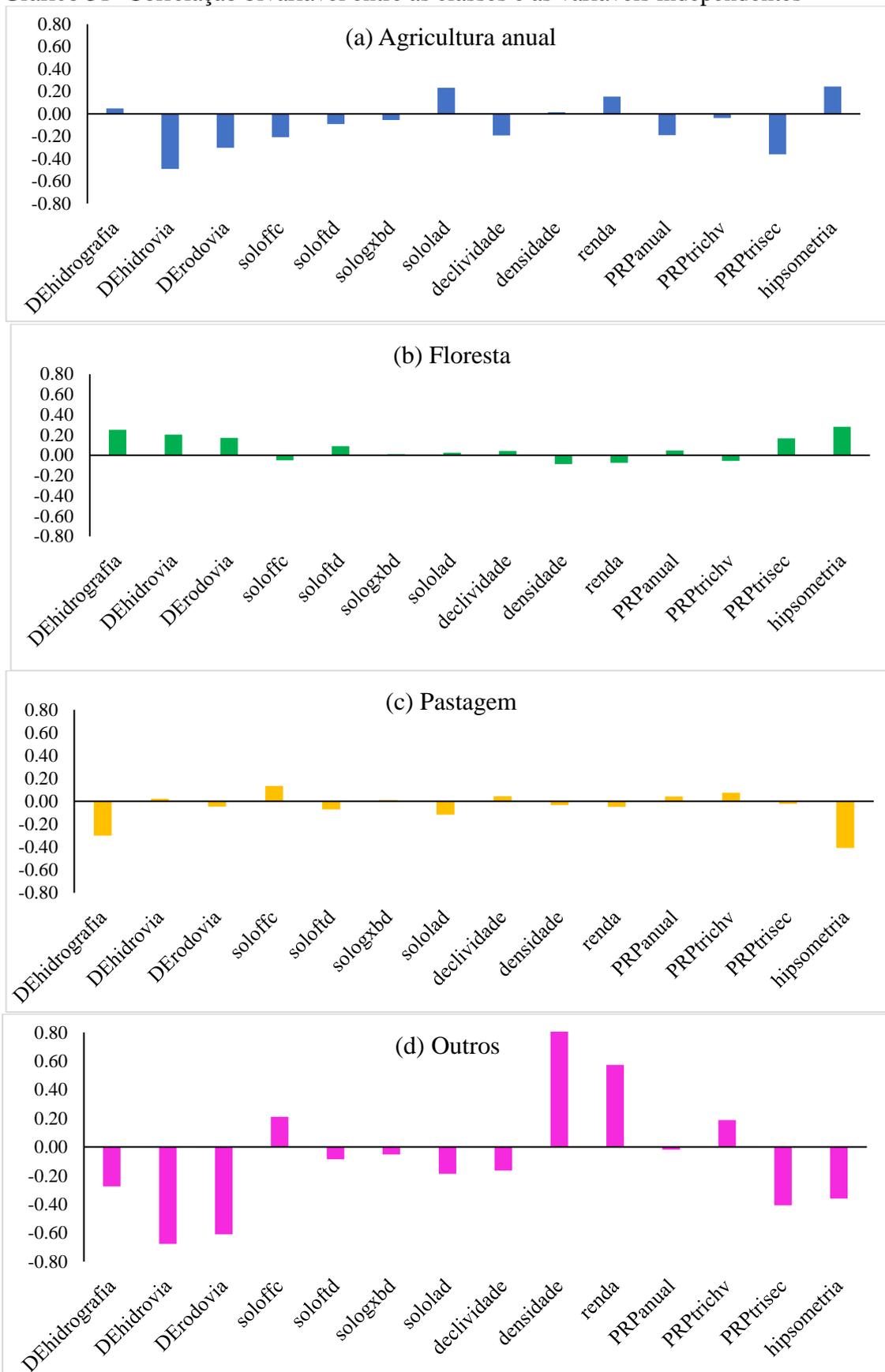
Tabela 44 - Matriz de conversão adotada para a calibração e projeção do modelo

Classes	Agricultura anual	Floresta	Pastagem	Outros
Agricultura anual	1	0	1	0
Floresta	1	1	1	0
Pastagem	1	0	1	0
Outros	0	0	0	1

Fonte: do autor.

Os resultados da correlação bivariável ajudaram na etapa de calibração das equações de regressão logística e, fundamentado na identificação de parâmetros não significativos nos métodos de regressão (Enter e Forward Stepwise), buscou-se a melhora da curva *Receiver Operating Characteristic* (ROC). Os gráficos 31 a, b, c e d ilustram os resultados da correlação bivariável entre as 4 classes e as variáveis explanatórias aplicadas no modelo para 2014.

Gráfico 31- Correlação bivariável entre as classes e as variáveis independentes



Fonte: do autor.

Nota-se que as variáveis “hipsometria” e “distância euclidiana a hidrografia” apresentaram-se expressivamente em todas as análises. Vale ressaltar que, para a agricultura anual, quase todas as variáveis explanatórias mostraram forte correlação com este uso. Isto reforça o fato de que, conceitualmente, estes parâmetros são forçantes para a expansão agrícola na bacia, seja pelos aspectos geográficos, ambientais ou logísticos. Este padrão explica o motivo pelo qual das 14 variáveis utilizadas na modelagem, 11 foram selecionadas na regressão final para modelar a agricultura anual.

A tabela 45 apresenta os resultados da regressão logística para os coeficientes de regressão β , Significância, exponencial do coeficiente β e da área sobre a Curve ROC. Eles referem-se às constantes da equação de regressão de cada uso e cobertura e aos betas de cada variável explanatória. Esses resultados representam os melhores testes e foram importantes nas simulações porque ajudaram na obtenção dos melhores resultados visuais e estatísticos no processo de calibração.

Tabela 45 - Regressão logística do melhor modelo de calibração (2004-2014)

Variáveis Explanatórias	Agricultura anual			Floresta			Pastagem			Outros		
	B	Sig.	Exp(β)	β	Sig.	Exp(β)	B	Sig.	Exp(β)	β	Sig.	Exp(β)
DEhidrografia	-0,0001	0,00	0,9999	0,0003	0,00	1,0003	-0,0003	0,00	0,9997	0,0017	0,00	1,0017
DEhidrovia	-0,0001	0,00	0,9999	0,0000	0,00	1,0000				-0,0003	0,00	0,9997
DErodovia	0,0000	0,00	1,0000				0,0000	0,00	1,0000	-0,0005	0,00	0,9995
SoloFFC	1,6698	0,00	5,3111							0,6382	0,01	1,8931
SoloFTD				2,3203		10,1792	-2,7019	0,00	0,0671			
SoloGXBD				1,4269		4,1656	-1,3616	0,00	0,2562			
SoloLAD	2,1428	0,00	8,5231				-0,1749	0,00	0,8396			
Declividade	-0,0561	0,00	0,9454	0,0064	0,01	1,0064	0,0314	0,00	1,0319			
DensSetor	-0,0004	0,00	0,9996	-0,0003	0,00	0,9997	-0,0008	0,00	0,9992	0,0025	0,00	1,0025
RendSetor				-0,0016	0,00	0,9984	0,00017	0,00	1,0017	-0,0027	0,00	0,9973
PRPanual	0,0097	0,00	1,0098				-0,0017	0,01	0,9983	0,3079	0,00	1,3605
PRPtrichv	-0,0448	0,00	0,9561	0,0027	0,03	1,0027	0,0127	0,00	1,0128	-2,1794	0,00	0,1131
PRPtriseco	-0,1596	0,00	0,8525	0,0605	0,00	1,0624	-0,0483	0,00	0,9528	-2,1884	0,00	0,1121
Hipsometria	0,0207	0,00	1,0209	0,0199	0,00	1,0201	-0,0259	0,00	0,9744	-0,0379	0,00	0,9628
Constante	0,1948	0,82	1,2551	-5,9848	0,00	0,0025	2,5340	0,00	12,6041	246,27	0,00	8,9642
Curva ROC	0,829			0,755			0,775			0,994		

Fonte: do autor.

As variáveis “hidrografia”, “hipsometria”, “precipitação do trimestre mais chuvoso” e “precipitação do trimestre mais seco” estiveram presentes para todas as classes do modelo. Isso demonstrando que a bacia possui características biofísicas significativas para a expansão da agricultura anual, principalmente. Além disso, praticamente todos os parâmetros compuseram a regressão logística e isso mostra que a estruturação do sistema produtivo da agropecuária na bacia reflete as mudanças do uso e cobertura da terra.

A variável “densidade demográfica” apresentou-se fortemente na modelagem e isso está ligado a mão de obra próxima necessária para desenvolver as atividades econômicas, principalmente de agricultura mecanizada e familiar (SILVA, 2016). Os resultados da Curva ROC foi excelente para “Outros” ($>0,8$) e satisfatórios para os demais usos e coberturas ($>0,7$). Importante observar que a resposta de melhor qualidade da Curva ROC para “Outros” reflete no melhor acerto dessa classe na calibração, como revelou os índices de acurácia de classificação de mapas vistos adiante.

3.3.3 Elasticidade

Testaram-se vários ajustes na elasticidade, sendo definidos como melhores os seguintes valores: 0,2 para a “agricultura anual” e “pastagem” (maior facilidade de mudança); 0,5 para “floresta” (grau médio de dificuldade de mudança); e 1 para “outros” (não se alteram). Finalmente, todas as informações foram agregadas ao modelo e, então, deu-se o processo de calibração. A tabela 46 ilustra os parâmetros principais utilizados na etapa calibração e projeção da modelagem.

Tabela 46 - Parâmetros principais dos modelos na calibração e projeção

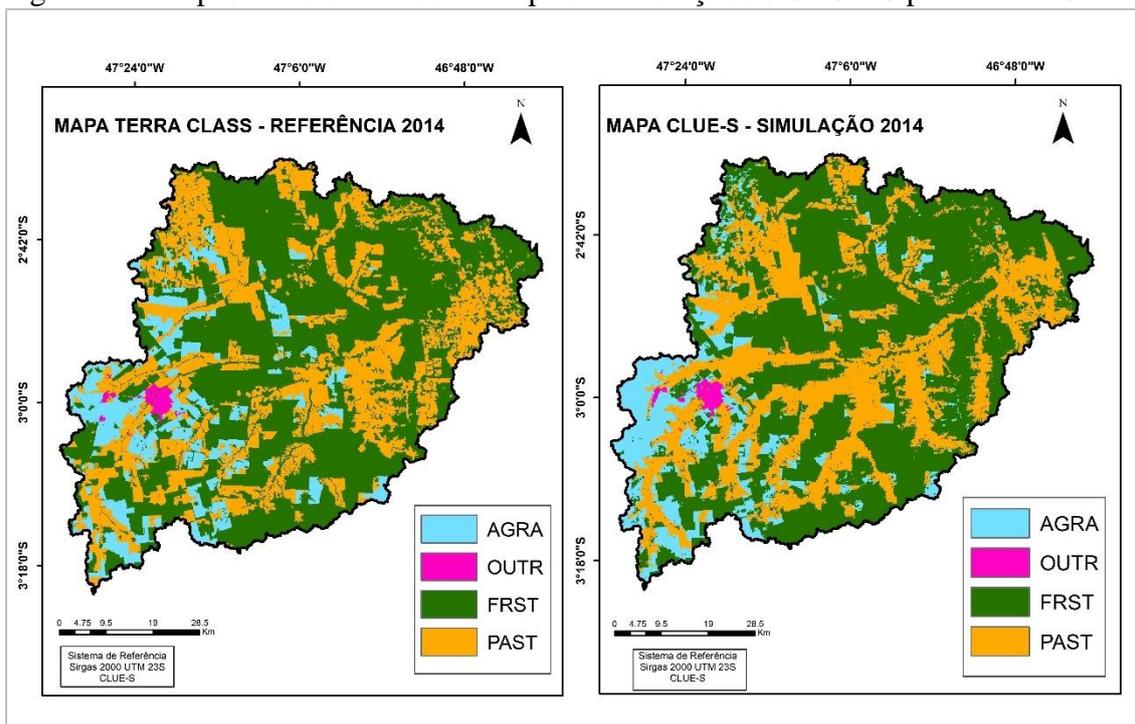
Descrição da linha	Calibração (2004-2014)	Projeção (2014-2034)
Número de usos e coberturas	4	4
Número de regiões	1	1
Nº máximo de variáveis independentes na equação de regressão	12	12
Número total de fatores explanatórios	14	14
Número de linhas	887	887
Número de colunas	977	977
Área da célula de grades (hectare)	1	1
Coordenada x	217963.8888	217963.8888
Coordenada y	9629090.444	9629090.444
Códigos dos usos da terra	0 1 2 3	0 1 2 3
Códigos das elasticidades dos usos	0.2 1 0.5 0.2	0.2 1 0.5 0.2
Variáveis de iteração	0 0.35 3	0 0.35 3
Início e fim da simulação	2004 2014	2014 2034
Fatores explanatórios com variação anual	0	0
Formato dos arquivos de saída	1	1
Regiões com diferentes regressões	0	0
Inicialização do histórico de uso da terra	1 5	1 5
Escolha do cálculo de vizinhança	0	0
Adição específica na preferência da área	0	0

Fonte: do autor.

3.4 Simulações da etapa de calibração

A partir dos melhores resultados das regressões logísticas, da matriz de conversão e das elasticidades definidas, iniciou-se a geração dos testes de simulação para calibração do modelo. O resultado da calibração está mostrado na figura 41. A avaliação do ajuste da calibração foi feita através da matriz de confusão entre o mapa real e simulado, pelos índices de concordâncias total e individual por classes (tabela 47).

Figura 41 - Mapas real e simulado na etapa de calibração do CLUE-S para a BHRU



Fonte: do autor. AGRA, OUTR, FRST e PAST referem-se a agricultura anual, outros, floresta e pastagem, respectivamente.

Tabela 47 - Esquema da matriz de confusão adotada para acurácia das simulações

Mapa CLUE-S	Mapa referência					$\sum x_{+i}$	E. I	A. U
	AGRA	OUTR	FRST	PAST				
AGRA	32652	252	10278	16009	59191	44,8%	55,2%	
OUTR	273	2937	29	48	3287	10,6%	89,4%	
FRST	8812	30	233599	37777	280218	16,6%	83,4%	
PAST	17443	76	36884	114495	168898	32,2%	67,8%	
$\sum x_{i+}$	59180	3295	280790	168329	511594			
E. O	44,8%	10,9%	16,8%	32,0%		Acurácia Global	<i>Kappa</i> total	
A. P	55,2%	89,1%	83,2%	68,0%		AG = 0,75	K = 0,6	

Fonte: do autor. E.I. significa erros de inclusão; E.O. significa erros de omissão; A.U. significa acurácia do usuário e A.P. significa acurácia do produtor.

A observação visual do mapa total demonstra uma simulação do modelo concordante com o mapa de referência terrestre (Terra Class 2014). Individualmente, o CLUE-S simulou bem as classes “floresta” e “outros”. Apesar disso, para a “agricultura anual” houve classificação concentrada, sobretudo, na porção sudoeste da bacia, no entrono das áreas de maior densidade demográfica, onde se localiza o núcleo urbano de Paragominas e existe um considerável número de fazendas no município.

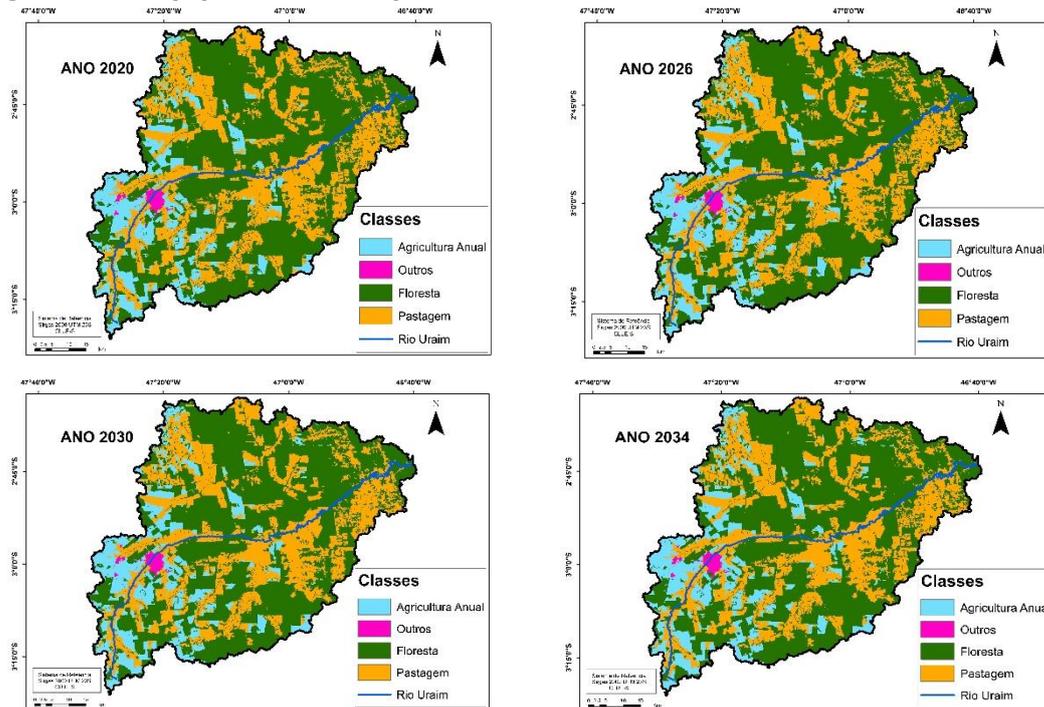
A consistência entre os mapas foi também estatisticamente analisada através da matriz de confusão, sendo a exatidão das simulações verificada pelos acertos do mapa total e por classe. Notou-se que a precisão do mapa simulado, dada pela Acurácia Global, resultou em um valor de 0,75 (75%), enquanto o índice *Kappa* apresentou valor de 0,6. De acordo com a classificação de Landis e Koch (1977) para o *Kappa*, a simulação pode ser considerada como “boa”.

As acurácias do produtor para as classes “outros”, “floresta” e “pastagem” foram 89,1%, 83,25 e 68,0%, respectivamente, revelando a alta probabilidade de elas terem sido corretamente classificadas no mapa simulado pelo CLUE-S. Isso é ratificado pelos valores baixos dos erros de omissão, sendo 10,9% para OUTR, 16,8 para FRST e 32,0% para PAST. Ainda, os resultados da simulação para “agricultura anual” revelaram uma probabilidade de 55,2% desta classe no mapa simulado representar a categoria na terra, dada pelo valor da acurácia do usuário e confirmado por 44,8% de confiabilidade do erro de inclusão.

Em suma, observa-se que a dinâmica das mudanças no CLUE-S depende principalmente das probabilidades obtidas pela regressão logística. Em outras palavras, as áreas de pastagem mostraram sofrer maior pressão com o avanço da agricultura. Estes resultados apontam para uma boa avaliação da modelagem do CLUE-S para a BHRU. Entretanto, vale ressaltar que a inserção de outras variáveis, como sugere Silva (2016), Soler & Verburg (2010) e Luo *et al* (2010), pode melhorar o entendimento das interações entre a dinâmica da expansão agrícola com as forçantes de mudanças nesta bacia hidrográfica.

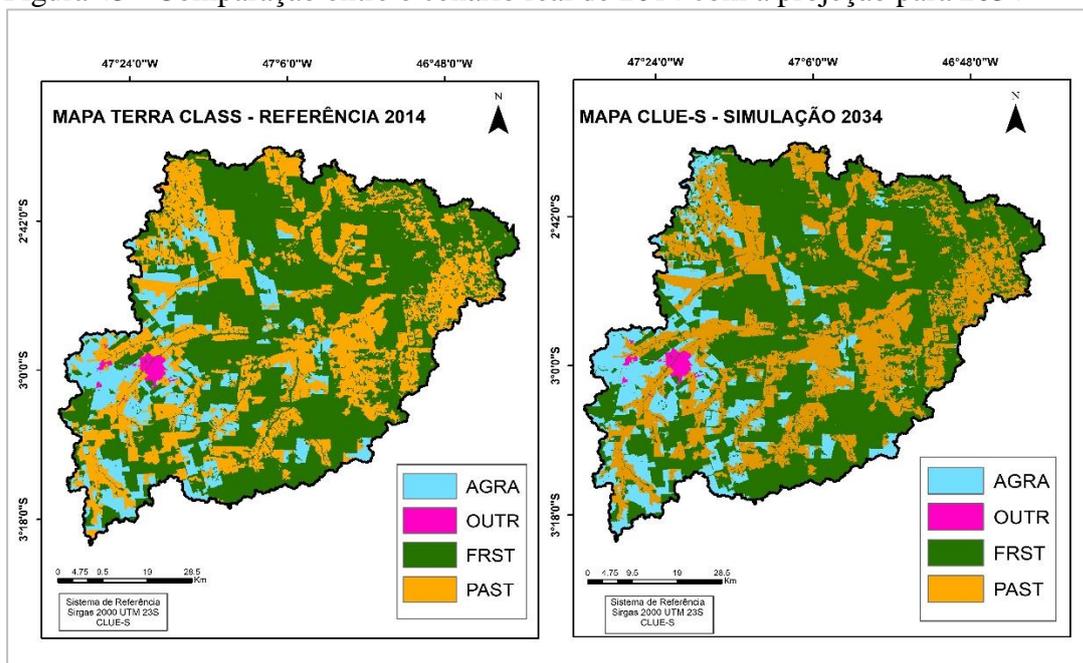
A partir dos resultados na etapa de calibração, as projeções foram realizadas. Estes resultados estão apresentados na figura 42 e 43. Esses mapas foram, assim, aplicados ao modelo SWAT calibrado no experimento II do capítulo IV com o intuito de prognosticar impactos futuros do avanço agrícola e das pastagens na vazão da BHRU.

Figura 42 - Projeções de mudanças de uso e cobertura da terra (2015-2034)



Fonte: do autor.

Figura 43 - Comparação entre o cenário real de 2014 com a projeção para 2034



Fonte: do autor. AGRA, OUTR, FRST e PAST referem-se a agricultura anual, outros, floresta e pastagem, respectivamente.

As projeções revelam que a agricultura anual estará mais concentrada na porção sudoeste da bacia, com maior expansão para o setor noroeste. Em termos de ganho e perda de áreas até 2034, a agricultura aumenta aproximadamente 93,2 km² e corresponderá a

13,4% do total da bacia. Floresta e a pastagem perderão 49,2 km² e 41,7 km² de área, respectivamente, e representarão 53,9% e 32,0% do total da bacia (tabela 48).

Tabela 48 - Dinâmica das mudanças do uso e cobertura da terra para 2034

Classe	Área 2014 (ha)	Área 2034 (ha)
Agricultura anual	59180 (11,6%)	68570 (13,4%)
Floresta	280790 (59,4%)	275871 (53,9%)
Pastagem	168329 (32,9%)	163858 (32,0%)
Outros	3295 (0,6%)	3295 (0,6%)
Total	511594 (100%)	511594 (100%)

Fonte: do autor. Mapas redimensionados onde 1 célula de 100 x 100 equivale a 1 hectare.

Os resultados encontrados a partir das projeções do CLUE-S são semelhantes aos de Carvalho; Domingues (2016), que projetaram um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal Brasileira usando um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) dinâmico inter-regional, com uma especificação para a ocupação do solo nas regiões. Os resultados desses autores para o período estudado (2006-2030) apontaram que as áreas com maior crescimento e desmatamento seriam aquelas situadas no arco do desmatamento, principalmente regiões produtoras de soja e bovinos.

Domingues; Bermann (2012) apontam cenários futuros com um aumento da expansão da soja em função da disponibilidade de terra e presença de infraestrutura. Estes autores indicam a existência de elementos que fazem a soja deslocar a pecuária para novas áreas, com provável efeito de desmatamento adicional. Nessa pesquisa, eles diagnosticaram o avanço da pecuária sobre as áreas anteriormente caracterizadas por mata nativa e, no período de 10 anos, houve um acréscimo de 18,22% de área desmatada, e as pastagens passaram a ocupar quase 112 mil hectares, passando a representar 39,64% da área total de São José do Xingu.

A crescente modernização da produção tem feito muitos trabalhadores serem excluídos, deslocando-os para áreas marginais onde contribuem para a abertura de novas fronteiras móveis ou expandem o alcance daquelas existentes, com acesso a capital e tecnologia (DOMINGUES; BERMAN, 2012). De acordo com o estudo do ISA (2005), a soja é o grão que emprega menos trabalhadores por área.

O avanço agropecuário na Amazônia provoca controvérsia em função do imenso valor ecológico do meio ambiente local. De fato, a expansão agrícola tem causando desflorestamento. No entanto, vale salientar que essa atividade exerce fundamental importância na economia local, regional e no âmbito nacional. Assim, é necessário que

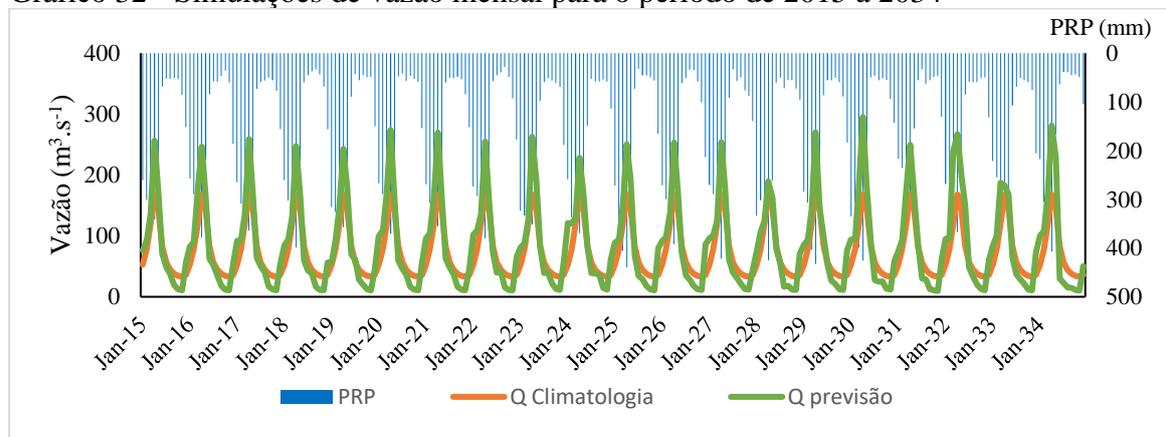
se criem modelos de agricultura ambientalmente sustentáveis, com novas formas de produzir, propiciando o aumento da produtividade dos sistemas agrícolas, a produção de alimentos de boa qualidade e o maior retorno financeiro dos empreendimentos.

3.5 Experimento 3: projeções de vazão integrando SWAT e CLUE-S

Tendo em vista que a resposta hidrológica é um indicador integrado da condição das bacias hidrográficas e que mudanças significativas na cobertura da terra podem afetar sua funcionalidade, integrou-se os resultados da modelagem do CLUE-S ao SWAT para fazer previsão da vazão mensal da vazão e, assim, melhorar a compreensão e a sensibilidade dos principais processos. Vários estudos têm analisado a dinâmica espacial combinando modelagens distintas para prever possíveis impactos nos serviços ecossistêmicos. As análises aqui tem como referência os estudos de Alansi *et al.* (2009), Galharte (2014), Obasi *et al.* (2017), Silva (2016), Zhang *et al.* (2016), que utilizaram modelagens de mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra integradas ao SWAT.

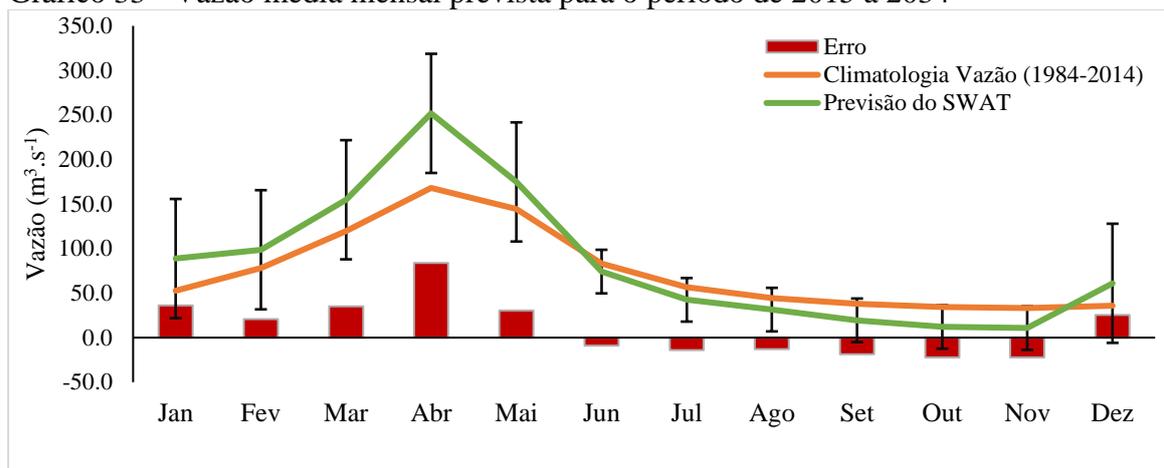
Os resultados dos efeitos combinados da mudança do uso da terra e da variabilidade climática estão representados nos gráficos 32 e 33. As previsões resultaram em uma vazão média anual de $85,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e mensal de $138,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $31,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para as estações chuvosa e menos chuvosa, respectivamente. Tomando como referência o padrão climatológico (1984-2014) da vazão na bacia, as projeções mostram mudanças expressivas, apontando para uma redução de 34,4% no período menos chuvoso e aumento de 38,6% na estação chuvosa. Observou-se também que o modelo não gerou atraso nem adiantamento significativos na subida e descida da curva de vazão com relação ao padrão médio.

Gráfico 32 - Simulações de vazão mensal para o período de 2015 a 2034



Fonte: do autor. PRP é a precipitação média do modelo climático RegCM4 para 8 pontos de coordenadas geográficas da bacia. Qclimatologia é a vazão climatológica; Qprevisão é a projeção de vazão pelo SWAT.

Gráfico 33 - Vazão média mensal prevista para o período de 2015 a 2034



Fonte: do autor. Climatologia Vazão é a vazão climatológica; Previsão SWAT é a projeção de vazão pelo SWAT. Erro é a diferença entre os valores simulados pelo SWAT e médio mensurado de 1984-2014. As barras correspondem ao desvio padrão da série de vazão simulada.

Baseadas no comportamento climatológico observado, as previsões para a estação chuvosa revelaram que essas simulações podem ser consideradas “muito boa” e “quase perfeita”, e para estação menos chuvosa elas são “boa” e “quase perfeita”, conforme a classificação de Camargo; Sentelhas (1997) e de Hopkins (2000) para os coeficientes de desempenho ou confiança (c) e correlação de Pearson (r), respectivamente. A tabela 49 ilustra os resultados estatísticos.

Tabela 49 - Desempenho das previsões mensais (2015-2034) de vazão pelo SWAT

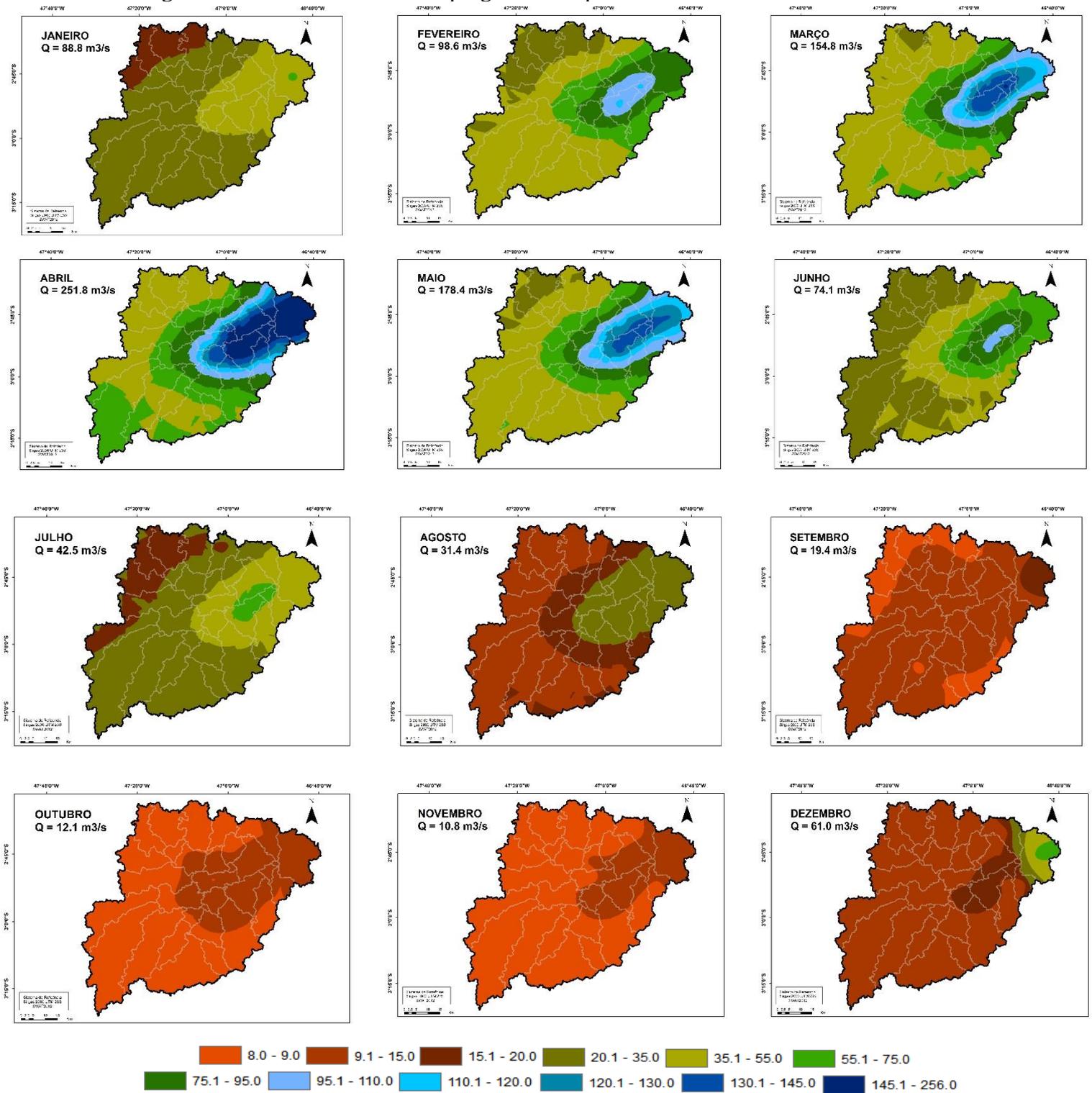
Estação	$Q_{média}$	A	B	R	R^2	d	c	Classificação
Chuvosa	$138,3 \pm 66,9$	9,6*	1,3*	0,93	0,86	0,84	0,78	Muito bom
Menos CHV	$31,7 \pm 24,5$	-28,7*	1,3*	0,90	0,80	0,79	0,71	Bom

Fonte: do autor. $Q_{média}$ é a vazão média mensal prevista \pm desvio padrão ($m^3.s^{-1}$), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), coeficiente de concordância (d), coeficiente de confiança e desempenho (c); classificação do desempenho do algoritmo baseado no coeficiente c. * Significativo a nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

A variabilidade da vazão mensal e anual prognosticadas pelo SWAT (figuras 44 e 45) pode ser atribuída aos resultados das previsões de chuva pelo RegCM4 para o setor Leste da Amazônia. O RegCM4 simulou chuvas acima (abaixo) da média para os meses da estação chuvosa (menos chuvosa). De acordo com Souza *et al* (2016), o modelo é capaz de simular as principais características da variabilidade espacial da precipitação nos quatro trimestres ao longo do ano; e as projeções para o clima futuro apontam mudanças mais significativas no setor leste da Amazônia, com uma redução de até 30%

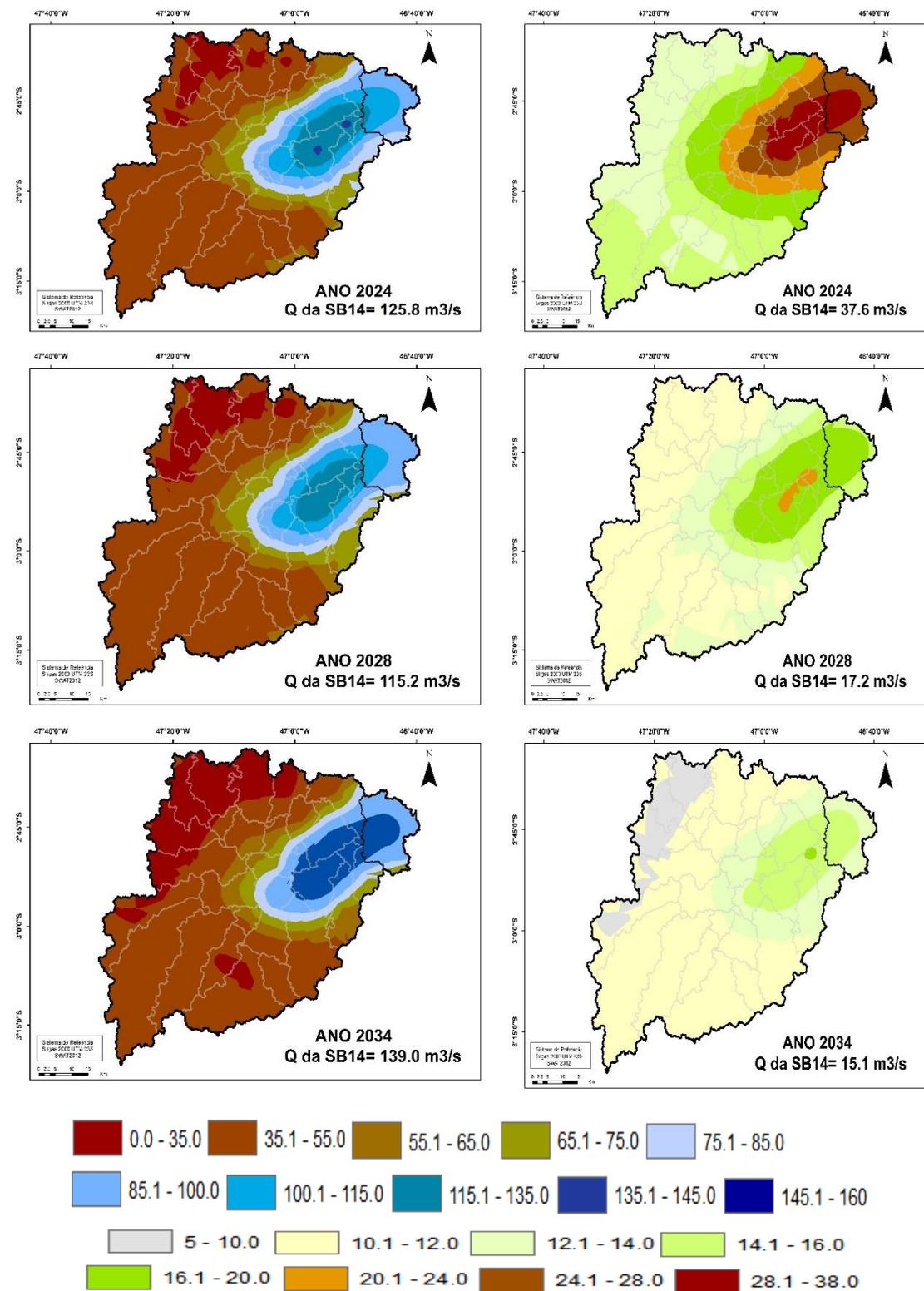
no volume de chuva no trimestre junho-julho-agosto. Isso sugere que a mudança climática pode ter desempenhado um papel mais pronunciado no regime hidrológico do que a mudança no uso da terra.

Figura 44 - Vazão média mensal prognosticada pelo SWAT de 2015-2034



Fonte: do autor.

Figura 45 - Vazão mensal das estações chuvosas e menos chuvosa até 2034



Fonte: do autor. Mapas à esquerda (direita) para a estação chuvosa (menos chuvosa).

O decréscimo da vazão da estação menos chuvosa pode ser atribuído ao fato de que, de acordo com as projeções do RegCM4 e do CLUE-S, o período menos chuvoso

será mais seco e haverá mais terras agrícolas na região das nascentes. Isso pode ser agravado pelas configurações morfométricas da bacia, que mostraram ter um considerável espaçamento entre os seus canais e possuir baixa densidade e capacidade de drenagem. Isto é, com a diminuição das chuvas na estação menos chuvosa, pode afetar seu sistema pouco desenvolvido apesar da grande quantidade de ramificações da sua rede de drenagem. Entretanto, o fato de que as chuvas apontam para um excedente na estação chuvosa e de que a bacia pode ser composta de material subsuperficial permeável com boa cobertura vegetal e baixo relevo (conforme os valores de densidade de drenagem e mapa de declividade), isso resultaria em mais capacidade de infiltração para recarga de água subterrânea, compensando o déficit hídrico na estação menos chuvosa subsequente.

A influência das mudanças no uso da terra sobre a vazão em um futuro próximo parece ser leve, semelhante à do passado recente. Pode-se argumentar, portanto, que os impactos hidrológicos da bacia devem ser, na verdade, calculados sobre toda a bacia, pois os efeitos positivos e negativos das mudanças ocorrerão em diferentes sub-bacias, o que pode compensar um ao outro. É necessário salientar que as áreas totais que sofreram conversão são relativamente pequenas em comparação com o tamanho de toda a bacia estudada, resultando em pequenos impactos hidrológicos agregados. Os impactos globais se tornariam mais pronunciados se as mudanças no uso da terra fossem mais extensas.

Mango *et al.* (2011) analisaram a sensibilidade dos resultados do SWAT à mudança do uso da terra para uma sub-bacia no Quênia, usando três cenários hipotéticos. As simulações em todos os cenários de mudança de uso da terra indicaram que vários padrões de uso da terra têm vários impactos nas interações entre a chuva e a vazão. A conversão de florestas em terras agrícolas indicou um aumento do escoamento superficial, diminuição do subterrâneo e aumento da evapotranspiração.

Pikounis *et al.* (2003) investigaram os efeitos da mudança do uso da terra para uma bacia hidrográfica na Grécia, aplicando o SWAT em uma etapa de tempo mensal. Os autores usaram três cenários: expansão da terra agrícola, desmatamento completo e expansão da área urbana. Todos os três cenários resultaram em um aumento na vazão durante a estação úmida e diminuíram durante a estação seca. Já o estudo de Alansi *et al.* (2009) avaliou o SWAT para simulação e previsão de vazões. Os resultados dos cenários demonstram que as mudanças no uso da terra são responsáveis por um aumento na vazão anual de 8% a 39%, e de 16% a 59% durante os meses de pico da vazão; e diminuem entre 3% a 32% durante os meses de baixa vazão. A previsão para o ano de 2020 usando 30 ciclos de previsão foi considerada a ideal para a área de estudo.

4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Diversos estudos demonstram o quanto a região Amazônica é importante no equilíbrio climático e hidrológico da América do Sul e, dependendo da escala analisada, também para o planeta. Atualmente, as mudanças de uso e cobertura da terra tem sido um dos grandes problemas relacionados à funcionalidade das bacias hidrográficas e os impactos dessas alterações precisam ser mais bem avaliados na escala local e regional. A este trabalho, o uso da modelagem do CLUE-S integrada ao SWAT permitiu melhorar a compreensão de como a vazão na bacia se comporta sob diferentes cenários. Durante o período de 2004 a 2014, as mudanças no uso da terra foram dominadas pelo aumento da agricultura e diminuição das áreas de floresta. Como resultado dos efeitos conjuntos da mudança do uso da terra e da variabilidade climática, a vazão responde de maneira diferente nas duas estações pluviométricas características da bacia. Para o futuro a médio prazo, as projeções climáticas do modelo RegCM4 apontam uma estação menos chuvosa (chuvosa) mais seca (mais úmida) e isso revelou que as simulações de vazão pelo SWAT foram mais sensíveis a variabilidade climática do que à mudanças do uso e cobertura da terra na bacia estudada, no entanto, essas mudanças não devem ser menosprezadas, pois exercem influência relativa nos regimes hidrológicos, como já foi mostrado em outras pesquisas de caráter similar. Sugere-se, portanto, que os próximos estudos para a BHRU quantifiquem os efeitos separados e combinados de cada mudança a fim de aprimorar a compreensão das variações hidrológicas. Por fim, os resultados da modelagem foram baseados em cenários e isto mostra uma gama de futuras possibilidades, que podem ser valiosas e inspiradoras para autoridades locais e partes interessadas em adaptar e otimizar a gestão de recursos terrestres e hídricos na bacia do Rio Uraim ou bacias adjacentes que tenham problemas semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ALANSI, A. W. Validation of SWAT model for streamflow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, 6, 7581–7609, 2009.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, T. S; DOMINGUES, E. P. Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal Brasileira entre 2006 e 2030. **Nova Economia**. v.26 n.2 p.585-621 2016.
- COELHO, A. **Modelagem de dinâmica do uso da terra e cobertura vegetal na região de Santarém, Oeste do Pará**. 2009. 128f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências Programa de pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará, 2009.
- DOMINGUES, M. S; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo, v. 15, n. 2, p. 1-22. 2012.
- FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates and consequences. **Conservation Biology**, v.19, n. 3, p. 680-688. 2005.
- FIESP. **Projeções para o agronegócio**. São Paulo: FIESP/ICONE. 116 p. 2013.
- GALHARTE, C. A. **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). 2011. 244f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient: a new view of statistics**. 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 03/05/2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto Prodes: monitoramento da floresta Amazônica Brasileira por satélite**. 2014. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>>. Acesso em 15/05/2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto Terra Class**. 2014. Disponível em <http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2010.php>. Acesso em 05/09/2015.
- INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. **Relação entre cultivo da soja e desmatamento: compreendendo a dinâmica**. 2005. Disponível em <<http://www.socioambiental.org/inst/docs/download/soja.pdf>> acesso em 05 de setembro de 2015.
- KATO, O. *et al.* Manejo de vegetação secundária na Amazônia visando ao aumento da sustentabilidade do uso agrícola do solo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO: SOLOS, SUSTENTABILIDADE E QUALIDADE AMBIENTAL*, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife, 2005.

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

LIMA, B. S; MAY, P. H. A expansão da fronteira agrícola no sul do Amazonas e sua relação com o incremento do desmatamento nas áreas de cerrados e campos naturais. *In: VI ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA - ECOECO*, v. 1. 2005.

LUO, G.; YIN, C.; CHEN, X.; XU, W.; LU, L. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: a case study of sangong watershed in Xinjiang, China. **Ecological Complexity**, v. 7, n. 2, p. 198-207, 2010.

MANGO, L. M. A. Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. **Hydrology and Earth System Sciences**. 15: 2245. 2011.

MAS, J. F. *et al.* Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura/uso del suelo. *In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR. Anais...* p. 5081; Curitiba, INPE: 2011

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Plano Agrícola e Pecuário 2013/2014**. Secretaria de Política Agrícola. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/plano-agricola-pecuario/plano-agricola-e-pecuario-2013-2014.pdf/view>> Acesso em 21/02/2017.

OBASI, A. A *et al.* Prediction of the impacts of climate changes on the streamflow of Ajali river watershed using swat model. **Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH)**, v. 36, n. 4, p. 1286 – 1295. 2017.

PAN, Y *et al.* 2010. The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling, **Comput. Environ. Urban Syst.** v. 34, p. 400–408. 2010.

PEREIRA, S. E. M. **Análise estratégica do zoneamento agroecológico como instrumento de ordenamento territorial setorial rural e sua aplicação em modelos de mudança de uso e cobertura da terra**. 2013. 166 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2013.

PIKOUNIS, M. V. E. Application of the SWAT model in the Pinios River Basin under different Land use Scenarios. **Global Nest: the international journal**, v. 5, p. 71-79. 2003.

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. São Carlos SP: EMBRAPA CNPDIA**. 49 p. 2010.

SOLER, L. DE S; ESCADA, M. I. S.; VERBURG, P. H. Quantifying deforestation and secondary forest determinants for different spatial extents in an Amazonian colonization frontier (Rondonia). **Applied Geography**, v. 29, p. 182-193, 2009.

SOLER, L. DE S.; VERBURG, P. H. Combining remote sensing and household level data for regional scale analysis of land cover change in the Brazilian Amazon. **Regional Environmental Change**, v. 10, n. 4, p. 371-386, 2010.

SOUZA, E. B *et al.* Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia Legal Brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo RegCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 18. 2016.

SOUSA, L. M. *et al.* Avaliação do uso e cobertura da terra em Paragominas e Ulianópolis-PA, utilizando dados do projeto TerraClass. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n.3, p. 421-431. 2017.

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

VERBURG, P. H.; VELDKAMP, A. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. **Landscape Ecology**, v. 19, n. 1, p. 77-98, 2004.

VERBURG, P. H. **The CLUE Modeling Framework: The conversion of land use and its effects**. University Amsterdam: Institute for Environmental Studies, 49 f. 2010.

VERBURG, P. H *et al.* Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. **Applied Geography**, v. 26, n. 2, p. 153-173, 2006

VERBURG, P. H.; SCHULP, C. J. E.; WITTE, N.; VELDKAMP, A. Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, n. 1, p. 39-56, 2006b.

VERBURG, P. H; OVERMARS, K. P. Dynamic simulation of land-use change trajectories with the CLUE-s model. In: KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H. J. **Modelling land-use change: Progress and applications**. Netherlands: Springer, cap. 18. p. 321-338. 2007.

SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA (SIPAM). **Reflexos e Tendências do Desmatamento no Sul do Amazonas, Manaus**, 2005.

VERBURG, P. H *et al.* Land use change modelling: current practice and research priorities. **GeoJournal**, v. 61, n. 4, p. 309-324, 2004.

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

VERBURG, P *et al.* A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. **Ecological Modelling**, v.116, p.45-61, 1999

VERBURG, P. *et al.* **Manual for the CLUE-Kenya application**. The CLUE Group Wageningen University Department of Environmental Sciences., 54 p. 2005.

VERBURG, P. H *et al.* 1999. Land use change under conditions of high population pressure: the case of Java. **Global Environ. Change**, n. 9, p. 303-312. 1999.

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

VERBURG, P. H *et al.* 2005. **Manual for the CLUE - Kenya application**. Wageningen University. Disponível em < <http://www.cluemodel.nl/>> Acesso e download em 10/10/2016.

ZHANG, L. *et al.* Hydrological Impacts of Land Use Change and Climate Variability in the Headwater Region of the Heihe River Basin, Northwest China. **PLOS ONE**. DOI: 10.1371/journal.pone.0158394. 2016.

ZHANG, X. *et al.* Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River Basin using the SWAT model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 50(3): 901-907. 2007.

5 CONCLUSÃO GERAL

Nos últimos anos, muitos estudos foram realizados para examinar os impactos hidrológicos advindos da mudança do uso da terra e/ou da variabilidade climática. Alguns achados desses estudos são úteis para entender as causas das variações hidrológicas e para desenvolver medidas de adaptação. No entanto, os efeitos combinados da mudança do uso da terra e da variabilidade climática e suas contribuições individuais ainda não são totalmente compreendidos e fornecem motivação para um estudo mais aprofundado. Além disso, os efeitos podem variar de lugar para lugar devido às suas variedades na geográfica, necessitando de uma investigação mais aprofundada a nível regional. Pesquisas de modelagem dos impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos da Amazônia já foram realizadas, no entanto, este estudo propôs-se a usar um modelo semi-distribuído que não necessitava de grandes quantidades de parâmetros de entrada, bem como, fez uso de dados de sensores remotos e integrou resultados de diferentes modelagens. Desde os cálculos morfoclimáticos, passando pelas estimativas de evapotranspiração do SEBAL e das simulações do SWAT até a integração do CLU-S ao SWAT, os resultados desta tese mostraram que a metodologia empregada é capaz de simular e prever resposta hidrológica da vazão em condições tropicais úmidas com sucesso, podendo estes métodos serem usados para estudar os efeitos das mudanças do uso da terra nos recursos hídricos em outras bacias hidrográficas, considerando suas particularidades é claro. É importante salientar que a abordagem desta tese possui algumas limitações, citadas a seguir, e que podem ser melhoradas para trabalhos futuros: (i) considerou-se apenas quatro classes de uso e cobertura da terra para mudanças, o que pode não ser realístico quando se espera uma configuração na superfície terrestre bem mais complexa; (ii) O CLU-S é desenhado para trabalhar exclusivamente com dados binários (presença ou ausência de uma classe de uso do solo) e pode ter sua aplicação limitada em casos onde os planos celulares são de dimensões consideráveis; (iii) a dificuldade em quantificar até que ponto esses impactos na vazão são devidos às mudanças no uso da terra, à variabilidade climática ou ambos, uma vez que os processos atmosféricos não foram investigados com profundidade e os mesmos acontecem em diferentes escalas tempo-espaço e por teleconexões; (iv) somente foi considerado um cenário de mudanças climáticas no SWAT, com base nas projeções do modelo RegCM4. Ainda assim, espera-se que esta pesquisa possa oferecer subsídios para o monitoramento ambiental, informando a respeito de intervenções necessárias, balizando as tomadas de decisão no que tange o uso sustentável dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALBARI, M. *et al.* Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. **Agric. Water Manage.** v. 88, p. 99–109. 2007.
- ALLEN, R.G *et al.* Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Advanced training and User’s Manual. **Idaho Implementation**, n.1, 98p. 2002.
- ALLEN, R. G *et al.* Crop evaporation (irrigation and drainage - paper 56). **Roma: FAO**, v. 1998. p. 301. 1998.
- ALMEIDA, O; UHL, C. Planejamento do uso do solo do município de Paragominas utilizando dados econômicos e ecológicos. *In:* ALMEIDA, O. (org.). **Evolução da fronteira amazônica: oportunidades para um desenvolvimento sustentável**. Belém: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon). p. 101-136. 1996.
- ALMEIDA, R. H. C. Identificação dos atores sociais e conflitos sociais na fronteira agrícola da soja: comunidade Corta-Corda/Santarém-Pará. *In:* CONGRESSO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 2004, Cuiabá, MT. **Anais...** CESR. 2012.
- ARABI, M *et al.* Representation of agricultural conservation with SWAT. **Hydrological processes**. v. 22, p. 3042-3055. 2008.
- ARVOR, D. *et al.* Análise dos perfis temporais de EVI/MODIS para o monitoramento da cultura da soja no estado de Mato Grosso - Brasil. *In:* XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Florianópolis, SC, p. 51-58. 2007.
- AYENEW, T. Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands, **Journal of Hydrology**, v. 279, p. 83-93. 2003.
- BARLOW, J *et al.* The critical importance of considering fire in REDD+ programs. **Biological Conservation**, v. 154, p. 1-8, 2012.
- BARROSO, D. F. R. **Fluxos hidrogeoquímicos em águas fluviais de microbacias do Nordeste paraense e a sua relação com o uso da terra**. 2011. 121f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém. 2011.
- BASTIAANSSEN, W.G.M. *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation, **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212. 1998a.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation, **Journal of Hydrology**, v.212–213, p.213-229. 1998b.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; SAKTHIVADIVEL, R.; VAN DELLEN VAN, A. Spatially delineating actual and relative evapotranspiration from remote sensing for modeling nonpoint pollutants. *In:* (org.) CORWIN, D. *et al.* **Assessment of non-source pollution**

in the vadose zone. Geophysical Monograph 108, American Geophysical Union, special issue after joint AGU Chapman/SSSA Outreach Conference Riverside, p. 179–196. 1999.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100. 2000.

BASTIAANSEN, W.G.M *et al.* Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka. **Irrig. Sci.** v. 21, p. 1–15. 2001.

BASTIAANSEN, W.G.M. *et al.* Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrig. Drain. Syst.**, v.15, p. 53–79. 2001.

BASTIAANSEN, W.G.M *et al.* Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. **Water Resour. Res.** 38, 1273–1282. 2002.

BASTIAANSEN, W.G.M *et al.* Managing scarce water resources in Asia: the nature of the problem and can remote sensing help? **Irrig. Drain. Syst.** v. 19, p. 269–284. 2005.

BEZERRA, B. G; SILVA, B. B; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p. 305-317. 2008.

COSTA, S. G. Expansão da soja na Amazônia: os conflitos sociais após a chegada da soja na região do Baixo Amazonas no Pará. *In: 34º ENCONTRO ANUAL DA ANPOCS: IDEOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO, SUJEITOS SOCIAIS E CONFLITOS SOCIOAMBIENTAIS.* Belém, Pará. 2010.

DOMINGUES, M. S; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & Sociedade.** São Paulo, v. 15, n. 2, p. 1-22. 2012.

FIGUEIREDO R. O *et al.* Effects of land use change on stream water chemistry in three meso-scale catchments in Eastern Amazonia. *In: LBA-ECO SCIENCE TEAM MEETING*, 10., 2006, Brasília, DF. **Resumos...** p.10-11. 2006.

FIGUEIREDO, R. O. Efeitos do uso da terra sobre processos hidrológicos e hidrogequímicos em pequenas bacias na Amazônia. *In: VIII CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL*, 8, 2007. Caxambu, MG. **Anais...** 2007.

FIGUEIREDO, R. O. Estudos em pequenos riachos amazônicos (igarapés) e suas bacias alteradas por desmatamento e atividades agrícolas. *In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ECOLOGIA E CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOLOGIA DO BRASIL*, 2009, São Lourenço, MG. **Anais...** p. 2-9, 2009.

FIGUEIREDO, R. O. Processos hidrológicos e biogeoquímicos em bacias hidrográficas sob uso agrícola e florestal na Amazônia Brasileira. *In: PORRO, R. (org.). Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação.* Brasília, DF. EMBRAPA, informação tecnológica, p. 478-500. 2009.

FEARNSIDE, P. M. O cultivo da soja: como ameaça pra o meio ambiente na Amazônia Brasileira. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL AMAZÔNIA 500 ANOS. Anais...* Museu Paraense Emílio Goeldi/UFPA/FCMB, Belém, Pará, 55p. 2002.

FERREIRA, L. V *et al.* Desmatamento e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, v. 19, p.157-166. 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Projeto desflorestamento (Prodes)**. 2015. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>. Acesso em 25/10/2016.

KATO, O. R *et al.* Plantio direto na capoeira. **Ciência e Ambiente**, v. 29, p. 99-111, 2004.

KIMURA, R. L. B *et al.* Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. **Journal of Arid Environments**, n. 68, p. 53-65. 2007.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation. **Hydrological Sciences**, vol. 31, 13-24 p. 1986.

LIMA, B. S; MAY, P. H. A expansão da fronteira agrícola no sul do Amazonas e sua relação com o incremento do desmatamento nas áreas de cerrados e campos naturais. *In: VI ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA - ECOECO*, v. 1. 2005.

LIMA, L. M; LOPES, E. S; FIGUEIREDO, R. O. Retenção do dimetoato e sua relação com pH e teores de argila e matéria orgânica nos sedimentos da zona não saturada de uma microbacia no nordeste paraense. **Acta amazônica**. v. 37, n. 2, p.187-194, 2007.

LUIZÃO, F. J. Ciclos de nutrientes na Amazônia: respostas às mudanças ambientais e climáticas. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, São Paulo. 2007

MAS, J. F. *et al.* Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura/uso del suelo. *In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR. Anais...* Curitiba, INPE, p. 5081. 2011.

MINOTI, R. T. **Abordagens qualitativa e quantitativa de microbacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do médio Mogi-Superior/SP**. 2006. 247 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2006.

MUELLER, C *et al.* **Análise da expansão da soja no Brasil**. Banco Mundial on line. Disponível em <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf. 2002>. Acesso em 15/01/2016.

PINTO, A. *et al.* 2009. Diagnóstico socioeconômico e florestal do município de Paragominas. Relatório Técnico. **Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia**. Disponível em: <<https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/outros/iagnostico-socioeconomico-e-florestal-do.pdf>>. Acesso em 24/01/2017.

SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA (SIPAM). **Reflexos e tendências do desmatamento no Sul do Amazonas, Manaus, 2005.**

SIQUEIRA, T. V. **O ciclo da soja: desempenho da cultura da soja entre 1961 e 2003. Biblioteca Digital do BNDES**, Rio de Janeiro, nº 20, p. 127-222, 2004.

TEIXEIRA *et al.* Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part A: calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462-476, 2009.

TONIOLO, A; UHL, C. Perspectivas econômicas e ecológicas da agricultura na Amazônia Oriental. *In*: ALMEIDA, O. (org.). **Evolução da fronteira amazônica: oportunidades para um desenvolvimento sustentável.** Belém: Imazon, 1996. p. 67-99.

VELDKAMP, A.; LAMBLIN, E. F. Agriculture, ecosystems and environment. predicting land use change. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 85, p.1-6, 2001.

VENTURIERI, A *et al.* Utilização de imagens Landsat e CBERS na avaliação da mudança do uso e cobertura da terra e seus reflexos na qualidade da água em microbacia hidrográfica do município de Paragominas, Pará. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2005, São José dos Campos, **Anais...** São José dos Campos-SP: INPE, p.1127- 1134, 2005.

VERBURG, P. H. *et al.* Land use change modelling: current practice and research priorities. **Geo Journal**, v. 61, p. 309–324, 2004.

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

VIEIRA, I. C. G *et al.* The role of the shrub cordia multispicata cham. as a 'succession facilitator' in an abandoned pasture, Paragominas, Amazônia. **Kluwer Academic Publishers.** Printed in Belgium Vegetation, v. 115, p. 91-99, 1994.

VIEIRA, I. C. G *et al.* Legacy of fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. **Frontiers in Ecology and the Environment (Print)**, v.3, n.7, p. 365-369, 2005.

VIEIRA, I. C. G; TOLEDO, P. M; ALMEIDA, A. Análise das modificações da paisagem da Região Bragantina, no Pará, Integrando diferentes escalas de tempo. **Revista Ciência e Cultura**, v. 59, p.27-30, 2007.

UHL, C; ALMEIDA, O. O desafio da exploração sustentada na Amazônia, *In*: ALMEIDA, O. (org.). **Evolução da fronteira amazônica: oportunidades para um desenvolvimento sustentável.** Belém: Imazon, 1996. p. 1-6.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural.**

2009. 130f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

WATRIN, O. S; MACIEL, M. N. M; THALÊS, M. C. Análise espaço-temporal do uso da terra em microbacias hidrográficas no município de Paragominas, Estado do Pará. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 13., 2007, Florianópolis, SC, **Anais...** São José dos Campos, SP. INPE, p.7019-7026, 2007.

ZARIN, D. J *et al.* Legacy of fire slows carbon sequestration in Amazonian forest regrowth. *In: CONFERÊNCIA CIENTÍFICA DO LBA: experimento de grande escala na Biosfera-Atmosfera na Amazônia*, 3., 2004, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF, 2004.