



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA  
DOUTORADO EM GEOGRAFIA**

**TESE DE DOUTORADO**

**CLÁUDIA ADRIANA BUENO DA FONSECA**

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO  
DO SOLO E SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS  
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NO BIOMA CERRADO:  
O CASO DA BACIA DO RIO DAS ALMAS, GOIÁS**

JOÃO PESSOA - PB

Dezembro de 2020

**CLÁUDIA ADRIANA BUENO DA FONSECA**

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DO  
SOLO E SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS  
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NO BIOMA CERRADO: O CASO  
DA BACIA DO RIO DAS ALMAS, GOIÁS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro e Ciências Exatas e da Natureza da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do grau de Doutor em Geografia.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Richarde Marques da Silva

JOÃO PESSOA - PB

Dezembro de 2020

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

F676a Fonseca, Cláudia Adriana Bueno da.

Análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo e simulação dos processos hidrossedimentológicos no bioma cerrado : o caso da bacia do Rio das Almas, Goiás / Cláudia Adriana Bueno da Fonseca. - João Pessoa, 2020. 223 f. : il.

Orientação: Dr. Richarde Marques da Silva.  
Tese (Doutorado) - UFPE/CCEN.

1. Bacia hidrográfica - Rio das Almas. 2. Processos hidrossedimentológicos. 3. Solo - uso. 4. SWAT. 5. SWAT-CUP. I. Silva, Richarde Marques da. II. Título.

UFPE/BC

CDU 556.51(043)

**"ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E  
SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS NO  
BIOMA CERRADO: O CASO DA BACIA DO RIO DAS ALMAS, GOIÁS"**

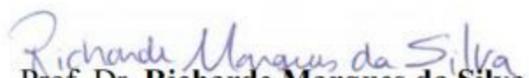
por

**Cláudia Adriana Bueno da Fonseca**

Dissertação de Tese de Doutorado apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do CCEN/UFPB, como requisito total para obtenção do título de Doutora em Geografia.

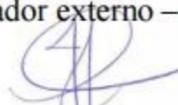
Área de Concentração: Território, Trabalho e Ambiente

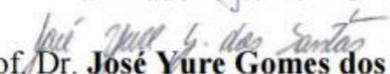
Aprovada por:

  
Prof. Dr. **Richarde Marques da Silva**  
Orientador – UFPB

  
Prof. Dr. **Eduardo Rodrigues Viana de Lima**  
Examinador interno – UFPB

  
Prof. Dr. **Victor Hugo Rabelo Coelho**  
Examinador externo – UFPB

  
Prof. Dr. **Ivanilton José de Oliveira**  
Examinador externo – UFG

  
Prof. Dr. **José Yure Gomes dos Santos**  
Examinador externo – UFRN

**Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Ciências Exatas e da Natureza  
Programa de Pós-Graduação em Geografia  
Curso de Mestrado e Doutorado em Geografia**

**Dezembro/2020**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Jesus, Nossa Senhora que propagais o amparo, a proteção, a saúde, a bondade, a esperança e a Fé em toda a Terra, dando-nos sabedoria e discernimento para vencer os obstáculos da vida.

Aos meus pais, Lincoln Fonseca e Orizolina Bueno (*in memoriam*), pela oportunidade e o dom da vida.

Ao meu esposo, Alexandre Nascimento pelo amor, paciência e companheirismo nos caminhos e lutas traçadas pela vida e que estejamos sempre unidos e nos apoiando um ao outro.

Aos meus padrinhos, Onofre de Abreu e Dirce pelo carinho, amparo e força transmitida durante toda a minha vida.

Âmbito familiar: aos meus irmãos (Warde, Regina, Leandro e Lincoln Jr.), sobrinhos (as), cunhado (as) pelo apoio, carinho e paciência. Aos familiares do meu esposo o apoio, carinho e paciência. Com muito carinho, a minha sogra, Dona Maria Barbosa aos 92 anos, que me apoia e esteve orando por todos nós.

À Universidade Estadual de Goiás – Campus Cora Coralina/UEG, ao colegiado de Geografia, pela concessão de afastamento integral para a dedicação à pesquisa e às atividades do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba (PPGG/CCEN/UFPB).

Ao meu orientador e pesquisador, o professor Dr. Richarde Marques da Silva, pelas orientações, paciência, dedicação e colaboração com essa pesquisa.

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB), ao Centro de Ciência Exatas e da Natureza (CCEN), aos servidores da secretaria acadêmica do PPGG, ao coordenador do programa e a todos os professores que ministraram as disciplinas na pós-graduação, que contribuíram com a realização do curso de doutorado.

Ao INMET, pelo fornecimento dos dados meteorológicos das estações, para realização de estudo de modelagem hidrossedimentológica do SWAT.

À Agência Nacional de Águas (ANA), que permitiu o acesso ao banco de dados de níveis de precipitação e vazão pelo Portal *HIDROWEB*, que foram essenciais para a realização do estudo de modelagem.

Ao Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG)/ UFG, pela disponibilidade do banco de dados vetoriais e *raster*, produzidos para Estado de Goiás.

Aos pesquisadores e colegas do Laboratório de Ensino, Pesquisa e Projetos em Análise Espaciais (LEPPAN), pela colaboração e ajuda à modelagem hidrossedimentológica do SWAT.

Aos colegas Glaucilene, Alexandro e Vanine, pela ajuda e contribuição na pesquisa de modelagem hidrossedimentológica do SWAT.

Aos colegas da turma do doutorado (2017), pelo companheirismo, convívio mútuo, reuniões e distração.

Aos amigos de João Pessoa/PB: Janaína Oliveira, Luciano, Luiz Otávio, Carmem, Glaucilene, Marcos, Andréia, Andressa, Janaína Araújo e Carlos pelos momentos de ajuda, distração e convívio mútuo. Estiveram comigo nos anseios dessa pesquisa, amparando e disponibilizando atenção e carinho nos momentos de angústias e nas situações difíceis.

Aos amigos goianos: Gislaine, Josy, Neemias, Leandro, César, Luciano, Vinícius e Gleice, Murilo e Dagmar, Auristela, Odete, Débora e tantos outros que incentivaram, apoiaram e torceram para realização do doutorado em Geografia.

Aos casais do ECC/PB da Paróquia Santo Antônio de Lisboa, João Pessoa/PB, pelos momentos de companheirismo, reuniões, orações e ajuda mútua.

E a todos, tudo agradeço a Deus!

*“Cada segundo é tempo para mudar tudo para sempre”*

*- Charles Chaplin.*

## RESUMO

A mudança no uso e ocupação do solo tem provocado alterações na dinâmica fluvial e no regime hidrossedimentológico na bacia hidrográfica do Rio das Almas, localizada no bioma Cerrado no Estado de Goiás. Essas manifestações vêm ocorrendo de forma acelerada desde a década de 1990 em virtude da pressão do agronegócio pela demanda de grãos alimentícios, cana-de-açúcar e na pecuária bovina. A gravidade do problema é confirmada quando se analisa os dados sobre o desmatamento e o avanço de novos cultivos temporários na bacia, que podem afetar os fatores naturais, como: produção de água, qualidade dos solos, aumento do escoamento superficial, perdas de solo e produção de sedimentos. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é analisar as mudanças espaço-temporais do uso e ocupação do solo e sua influência nos processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio das Almas, no período entre 1991 e 2017. Essa bacia hidrográfica tem uma relevância na produção hídrica e na geração de energia elétrica. Para a realização deste estudo, imagens do satélite Landsat 5 e Landsat 8 das datas 13/06/1991 e 13/06/2017 foram utilizadas. O modelo SWAT foi aplicado de 01/01/1974 a 31/12/1980 (já inclusos os três anos de aquecimento do modelo) e a validação ocorreu de 01/01/1981 a 31/12/1994, com os seguintes produtos: (a) uso do solo de 1991, (b) mapa de tipos de solo, (c) modelo digital de elevação (MDE) e (d) dados meteorológico e hidrológico (1974–1994). Para o estudo foram definidos dois cenários hipotéticos distintos de uso do solo simulado no modelo no período de 1974–1994: (a) Cenário 1: considerado otimista, um cenário que recomenda o uso sustentável e a preservação da vegetação natural, enfatizando a restauração dos processos ecológicos essenciais conectados a corredores ciliares, nascentes e topo de morro e serra que estavam ocupados pelas atividades antrópicas (agricultura, pecuária e área urbana), mapeada no uso do solo de 2017; e (b) Cenário 2: considerado pessimista, que apresenta um cenário de aumento no desmatamento e na expansão das atividades agropecuárias. Os resultados obtidos na calibração e validação do modelo para as estações fluviométricas (Jaraguá e Colônia dos Americanos) indicaram um desempenho muito bom com valores de  $R^2 = 0,80$  e  $NS = 0,61$ ; e  $R^2 = 0,85$  e  $NS = 0,82$ , respectivamente. A vazão média mensal observada para estação Jaraguá foi de  $35,44 \text{ m}^3/\text{s}$  e a simulada de  $41,48 \text{ m}^3/\text{s}$  (diferença de 17%). Para a estação Colônia dos Americanos a vazão média observada foi de  $337,80 \text{ m}^3/\text{s}$  e a ajustada igual a  $360,60 \text{ m}^3/\text{s}$  (diferença de 6,75%). A estimativa média de produção de sedimentos foi  $48,17 \text{ ton/ha.ano}$  no período analisado (1974–1994). A diferença entre a vazão média ajustada do uso do solo de 1991 e a simulada do Cenário 1 foi de  $95,27 \text{ m}^3/\text{s}$ , isso equivale a variação de 26,42% e para o Cenário 2 a diferença foi de  $139,84 \text{ m}^3/\text{s}$  (equivale a variação de 38,78%). Nos cenários hipotéticos de uso do solo, a estimativa do volume de sedimentos produzidos no cenário otimista teve uma redução significativa de 10,96% em relação ao uso do solo de 1991 (calibrado no modelo) e de 35,19% em comparação ao cenário pessimista. Em contrapartida, o cenário pessimista apresentou elevada produção de sedimentos de 54,29% quando se compara com cenário otimista, em relação ao uso do solo de 1991 teve um aumento de 37,37%. Quanto a projeção ao cenário hipotético pessimista, os resultados demonstraram que a bacia tem maior predisposição de perdas de solo e produção de sedimentos nas sub-bacias com alteração da cobertura vegetal, solos propensos a erosão hídrica, uso do solo para agricultura e com maior intensidade de chuvas.

**Palavras-chave:** Processos hidrossedimentológicos; Uso do Solo; SWAT; SWAT-CUP.

## ABSTRACT

The change in land use and occupation has caused changes in the fluvial dynamics and hydrosedimentological regime in the Rio das Almas watershed, located in the Cerrado biome in the state of Goiás. These manifestations have been occurring at an accelerated rate since the 1990s due to the pressure of agribusiness by the demand for food grains, sugar cane and cattle breeding. The seriousness of the problem is confirmed when one analyzes the data on deforestation and the advance of new temporary crops in the basin, which can affect natural factors such as: water production, soil quality, increased runoff, soil loss, and sediment production. In this sense, the objective of this work is to analyze the spatial-temporal changes of land use and occupation and their influence on hydrosedimentological processes in the Almas river basin, in the period between 1991 and 2017. This watershed has a relevance in water production and electricity generation. To conduct this study, Landsat 5 and Landsat 8 satellite images from the dates 06/13/1991 and 06/13/2017 were used. The SWAT model was applied from 01/01/1974 to 12/31/1980 (already including the three years of model warming) and validation occurred from 01/01/1981 to 12/31/1994, with the following products: (a) 1991 land use, (b) soil type map, (c) digital elevation model (DEM) and (d) meteorological and hydrological data (1974-1994). For the study, two distinct hypothetical land use scenarios simulated in the model over the period 1974-1994 were defined: (a) Scenario 1: considered optimistic, a scenario that recommends the sustainable use and preservation of natural vegetation, emphasizing the restoration of essential ecological processes connected to riparian corridors, springs and hilltops and hillsides that were occupied by anthropic activities (agriculture, livestock and urban area), mapped in the 2017 land use; and (b) Scenario 2: considered pessimistic, which presents a scenario of increased deforestation and expansion of farming activities. The results obtained in the calibration and validation of the model for the fluviometric stations (Jaraguá and Colônia dos Americanos) indicated a very good performance with values of  $R^2 = 0,80$  and  $NS = 0,61$ ; and  $R^2 = 0,85$  and  $NS = 0,82$ , respectively. The observed average monthly flow rate for Jaraguá station was  $35,44 \text{ m}^3/\text{s}$  and the simulated  $41,48 \text{ m}^3/\text{s}$  (17% difference). For the Colônia dos Americanos station the average observed flow was  $337,80 \text{ m}^3/\text{s}$  and the adjusted one was  $360,60 \text{ m}^3/\text{s}$  (difference of 6,75%). The average estimate of sediment yield was  $48,17 \text{ ton/ha}\cdot\text{year}$  in the analyzed period (1974-1994). The difference between the 1991 average adjusted land use flow rate and the simulated one for Scenario 1 was  $95,27 \text{ m}^3/\text{s}$ , this is equivalent to variation of 26,42% and for Scenario 2 the difference was  $139,84 \text{ m}^3/\text{s}$  (equivalent to variation of 38,78%). With respect to the hypothetical land use scenarios, the estimate of sediment volume produced in the optimistic scenario had a significant reduction of 10,96% in relation to the 1991 land use (calibrated in the model) and of 35,19% compared to the pessimistic scenario. On the other hand, the pessimistic scenario presented a high sediment production of 54,29% when compared to the optimistic scenario, and in relation to the 1991 soil use it had an increase of 37,37%. As for the projection of the hypothetical pessimistic scenario, the results demonstrated that the basin has a greater predisposition for soil loss and sediment production in the sub-basins with alterations in vegetation cover, soils prone to water erosion, agricultural land use and with greater rainfall intensity.

**Keywords:** Runoff-erosion processes; Land use; SWAT; SWAT-CUP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico.....	29
Figura 2 - Estrutura do modelo SWAT.....	45
Figura 3 - Dados de entrada no SWAT e resumo de processos.....	48
Figura 4 - Representação da simulação hidrossedimentológica no modelo SWAT.....	49
Figura 5 - Relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação.....	53
Figura 6 - Localização geográfica da BHRA no Brasil e no estado de Goiás – Brasil....	60
Figura 7 - As médias mensais pluviométricas, temperaturas máximas e mínimas na BHRA (1971 e 1994).....	68
Figura 8 - Sistemas aquíferos e as ocorrências de falhas geológica da BHRA. Fonte: Hidrogeologia do Estado de Goiás (2018).....	71
Figura 9 - Unidade geomorfológica da BHRA.....	73
Figura 10 - Esquema ilustrativo do funcionamento da modelagem hidrossedimentológica do SWAT por sub-bacia.....	89
Figura 11 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas da ANA e INMET e a altimetria da BHRA. ....	95
Figura 12 - Modelo digital de elevação utilizado no <i>ArcSWAT</i> para delimitação automática da BHRA.....	96
Figura 13 - Tipos de solos da BHRA.....	100
Figura 14 - Eventos da média anual da precipitação e vazão na BHRA (1974 a 1994)....	113
Figura 15 - Comportamento da média mensal de chuva-vazão para período chuvoso e seco na BHRA (1974 a 1994).....	114
Figura 16 - Distribuição espacial da precipitação média anual da BHRA (1971 e 1994).....	115
Figura 17 - Declividade da bacia hidrográfica do rio das Almas/GO.....	116
Figura 18 - Mapeamento de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas/GO (1991).....	119
Figura 19 - Mapeamento de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas/GO (2006).....	121
Figura 20 - Mapeamento de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas/GO (2017).....	123
Figura 21 - Gráfico comparativo do mapeamento do uso do solo na BHRA (1991, 2006 e 2017).....	124

Figura 22 - Gráfico comparativo em área plantada de lavouras temporárias e pecuária bovina nos municípios que compõem totalmente e parcialmente na BHRA (1991 a 2017) .....	125
Figura 23 - Localização dos estabelecimentos de frigoríficos na BHRA .....	128
Figura 24 - Evolução da pecuária bovina nos municípios da BHRA (1991 a 2017).....	129
Figura 25 - Variação temporal dos maiores efetivos bovinos por municípios na BHRA (1991 a 2017).....	131
Figura 26 - Evolução do cultivo do Arroz por área cultivada, nos municípios da BHRA (1991 a 2017).. .....	133
Figura 27 - Variação temporal do cultivo do Arroz por área cultivada, na BHRA (1991 a 2017) .....	134
Figura 28 - Evolução do cultivo da Cana-de-açúcar nos municípios da BHRA (1991 a 2017).. .....	136
Figura 29 - Variação temporal do cultivo da Cana-de-açúcar por área cultivada na BHRA (1991 a 2017).. .....	137
Figura 30 - Localização das Usinas sucroalcooleiras nos municípios da BHRA. ....	140
Figura 31 - Evolução do cultivo do Feijão nos municípios da BHRA (1991 a 2017). ..	142
Figura 32 - Variação temporal do cultivo do Feijão por área cultivada na BHRA (1991 a 2017). .....	143
Figura 33 - Evolução do cultivo do Milho nos municípios da BHRA (1991 a 2017)....	145
Figura 34 - Variação temporal do cultivo do Milho por área cultivada na BHRA (1991 e 2017). .....	146
Figura 35 - Evolução do cultivo da Soja nos municípios da BHRA (1991 a 2017) .....	148
Figura 36 - Variação temporal do cultivo da Soja por área cultivada na BHRA (1991 e 2017). .....	149
Figura 37 - Evolução do cultivo do Sorgo nos municípios da BHRA (1991 a 2017)....	152
Figura 38 - Variação temporal do cultivo da Sorgo por área cultivada na BHRA (1991 a 2017). .....	153
Figura 39 - Modelo digital de elevação (MDE) utilizado no modelo SWAT para delimitação de sub-bacias na BHRA. ....	155
Figura 40 - Hidrograma das vazões das médias mensais observada e simulada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação média mensal observada para estação fluviométrica Jaraguá (1974 a 1994) .....	156

Figura 41 - Hidrograma das vazões médias mensais observada e simulada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação média mensal observada para estação fluviométrica Colônia dos Americanos, (1974 a 1994). .....	157
Figura 42 - Análise de sensibilidade realizada pelo Global Sensitivity do SWAT-CUP para BHRA.....	161
Figura 43 - Gráficos de dispersão dos valores dos parâmetros em relação a função objetivo .....	164
Figura 44 - Hidrograma das vazões médias mensais observada e ajustada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação da média mensal observada para estação fluviométrica Jaraguá (1974 a 1994) .....	166
Figura 45 - Hidrograma das vazões médias mensais observada e ajustada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação média mensal observada para estação fluviométrica Colônia dos Americanos (1974 a 1994). .....	167
Figura 46 - Comportamento da média anual da produção de sedimentos estimada na estação Colônia dos Americanos em relação à média de precipitação, utilizando o uso do solo de 1991 na BHRA (1974-1994). .....	169
Figura 47 - Diagrama de dispersão da média anual da produção de sedimentos em relação a vazão ajustada no modelo, para uso do solo de 1991 (calibrado) na BHRA (1974-1994) .....	170
Figura 48 - Espacialização da produção de sedimentos das sub-bacias para uso do solo de 1991 na BHRA (1974 a 1994). .....	172
Figura 49 - Comportamento espacial da média anual do escoamento superficial por sub-bacias para o uso do solo de 1991 (1974-1994). .....	173
Figura 50 - Comportamento espacial da média de precipitação da bacia, para o uso do solo de 1991 (1974-1994). .....	174
Figura 51 - Distribuição espacial da média anual de perdas de solo estimada por sub-bacia, para o uso do solo de 1991 (calibrado) na BHRA (1974-1994). .....	175
Figura 52 - Fração de sedimentos transportada por cada segmento de rio na BHRA (1974-1994). .....	177
Figura 53 - Cenário Otimista (CEN1) de uso do solo na BHRA. ....	180
Figura 54 - Cenário pessimista (CEN2) de uso do solo na BHRA .....	181
Figura 55 - Hidrograma das vazões observada e simuladas da média mensal para o uso do solo dos cenários hipotéticos, otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) e o hietograma da precipitação média observada (1974 a 1994).. .....	182

Figura 56 - Hidrograma das vazões observada e estimadas da média mensal para uso do solo dos cenários hipotéticos, otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) e o hietograma de precipitação média observada (1974 a 1994).....	183
Figura 57 - Comportamento da média mensal do escoamento superficial para o uso do solo os cenários hipotéticos otimista (CEN1) e pessimista (CEN2), em relação à média de precipitação na BHRA (1974 e 1994)..	185
Figura 58 - A estimativa da média anual da produção de sedimentos para o uso do solo dos cenários hipotéticos otimista e pessimista em relação à média de precipitação na BHRA (1974 a 1994)..	187
Figura 59 - Comparação temporal da produção de sedimentos entre o uso do solo de 1991 (calibrado) e os cenários hipotéticos de uso do solo (CEN1:otimista; CEN2: pessimista) na BHRA (1974-1994)..	190
Figura 60 - Comportamento anual dos sedimentos acumulados entre o uso do solo de 1991 (calibrado) e os cenários hipotéticos de uso do solo (CEN1: otimista e CEN2: pessimista) na BHRA (1974 e 1994).....	190
Figura 61 - Espacialização da produção de sedimento das sub-bacias para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974 e 1994). .....	192
Figura 62 - Espacialização do escoamento superficial das sub-bacias para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974 e 1994 .....	192
Figura 63 - Espacialização da média de precipitação para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974 e 1994) .....	193
Figura 64 – Classificação de perdas de solos das sub-bacias, para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974-1994).....	196

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de sistema aquíferos e os tipos de solos na BHRA .....	71
Tabela 2 - Classes de uso do solo para cenário otimista na BHRA, associado as classes correspondentes ao banco de dados do modelo SWAT. ....	83
Tabela 3 - Classes de uso do solo para cenário pessimista na BHRA associado as classes correspondentes ao banco de dados do modelo SWAT. ....	84
Tabela 4 – Classificação de perdas de solo em bacia hidrográfica .....	91
Tabela 5 - Classes de uso do solo na BHRA associado as classes correspondentes ao banco de dados do modelo SWAT. ....	92
Tabela 6 - Estações meteorológicas da BHRA.....	93
Tabela 7 - Estações pluviométricas e fluviométricas da BHRA.....	94
Tabela 8 - Coeficientes estatísticos para diferentes combinações no modelo. ....	97
Tabela 9 - Apresenta os tipos de solos na BHRA, área (absoluta e relativa) e o número de controle reconhecido pelo banco de dados do modelo SWAT .....	99
Tabela 10 – Os tipos de solo e seus respectivos Grupos hidrológicos, na BHRA. ....	106
Tabela 11 - Os parâmetros mais utilizados para área do Cerrado. ....	107
Tabela 12 - Conjuntos de parâmetros com os intervalos de variação utilizados na calibração do modelo. ....	109
Tabela 13 - Classificação da eficiência da modelagem hidrológica.....	112
Tabela 14 - Apresenta as classes de uso do solo no contexto da BHRA para os anos de 1991, 2006 e 2017.....	117
Tabela 15 - Relação dos estabelecimentos de Frigoríficos instalados na BHRA. ....	127
Tabela 16 - Usinas sucroalcooleiras operando nos municípios da BHRA. ....	139
Tabela 17 - Valores atribuídos para sensibilidade global dos parâmetros da BHRA.....	160
Tabela 18 - Conjuntos de parâmetros calibrados do uso do solo de 1991, para HRU e as respectivas sub-bacias das estações fluviométricas (Colônia dos Americanos e Jaraguá). ....	165
Tabela 20 - Dados das classes de uso do solo para os dois cenários hipotéticos de uso do solo da BHRA, simulados no modelo SWAT.....	179
Tabela 21 - Comparação estatística da vazão observada com uso do solo de 1991 (calibrado) e os cenários simulados pelo modelo SWAT: otimista (CEN1) e pessimista (CEN2), na BHRA, no período de 1974-1994.....	184

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ANA** - Agência Nacional de Águas  
**ARNO** - *Arno River Model*  
**ARS** - *Agricultural Research Service*  
**ANSWERS** - *Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation*  
**APP** - Área de Preservação Permanente  
**Aw** - Tropical quente sub-úmido  
**BDMEP** - Banco de dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa  
**BHRA** - Bacia Hidrográfica do Rio das Almas  
**CEAP** - Projeto de Avaliação de Efeitos de Conservação  
**CREAMS** - *Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*  
**EPIC** - *Environmental Impacts Policy Climate*  
**EPIC** - *Erosion Productivity Impact Calculator*  
**EUA** - Estados Unidos da América  
**EUROSEM** - *European Soil Erosion Model*  
**FAO/ONU** - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura  
**fator-P** - Porcentagem de dados  
**FURNAS** - Central Elétrica de *Furnas*  
**HEC-1** - *Hydrologic Engineering Center 1*  
**HRU** - *Hydrologic Response Units*  
**HUMUS** - Modelo de Unidades Hidrológicas dos Estados Unidos  
**IBGE** - *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*  
**ILLUDAS** – *Urban Drainage Area Simulator*  
**INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia  
**IPH** - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
**Kc** - coeficiente de compacidade  
**Kf** - fator de forma  
**km<sup>2</sup>** - Quilômetro quadrado  
**KYERMO** - *Kentucky Erosion Model*  
**LANDSAT** - *Land Remote Sensing Satellite*  
**LAPIG** - Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento  
**m** – Metros  
**m<sup>3</sup>/s** – metros cúbicos por segundo  
**mm** – milímetros  
**MMA** – Ministério do Meio Ambiente  
**mPa** - massa Polar Atlântica

**MDE** - Modelo Digital de Elevação  
**MUSLE** - Universal de Perdas de Solo Modificada  
**NS** – Coeficiente de *Nash e Sutcliffe*  
**OLI** - *Operational Terra Image*  
**PBIAS** – percentual de tendência  
**PPGG** - Programa de Pós-Graduação em Geografia  
**PPM** - Pesquisa da Pecuária Municipal  
**95PPU** – *Percent Prediction Uncertainty*  
**R<sup>2</sup>** - Coeficiente de determinação de *Pearson*  
**ROTO** - *Routing Outputs to Outlet*  
**SCS** - *Soil Conservation Service*  
**SEGPLAN-IMB** - Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento do Instituto Mauro Borges de estatísticas e estudos socioeconômicos  
**SEMARH** - Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Goiás  
**SHE** - *Systeme Hydrologique Europeen*  
**SIDRA** - Sistema de Recuperação Automática  
**SIG** - Sistema de Informações Geográficas  
**SIRGAS** - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas  
**SRTM** - *Shuttle Radar Topographic Mission*  
**SSARR** - *Stremflow Synthesis and Reservoir Regulation Model*  
**SUF12** - Sequential Uncertainty Fitting Version 2  
**SWAT** - *Soil and Water Assessment Tool*  
**SWAT-CUP** - *Calibration Uncertainty Procedures*  
**SWRRB** - *Simulator for Water Resources in Rural Basins*  
**ton/ha.ano** – Toneladas/ hectares.ano  
**TOPKAPI** - *Topographic Kinematic Approximation and Integration*  
**TOPMODEL** - *Topographic Based Hydrological Model*  
**UHE** – Usina Hidrelétrica  
**UFG** – Universidade Federal de Goiás  
**UFPB** - Universidade Federal da Paraíba  
**USDA** - *Agricultural Research Service*  
**USGS** - *Science for a changing world*  
**USLE** - *Universal Soil Loss Equation*  
**TM** - *Thematic Mapper*  
**UTM** - *Universal Transversa de Mercator*  
**WEPP** - *Water Erosion Prediction Project*  
**WGS** - *World Geodetic System.*

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
1.1 HIPÓTESE .....	23
1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	23
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>26</b>
2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO.....	26
2.2 DINÂMICA DOS PROCESSOS EROSIVOS.....	31
2.3 MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DE BACIA HIDROGRÁFICA.....	39
<b>2.3.1 Estrutura e aplicação do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)</b> .....	<b>43</b>
<b>2.3.2 Calibração do modelo SWAT e o programa SWAT-CUP</b> .....	<b>50</b>
<b>2.3.3 Modelagem hidrossedimentológica no Brasil e no Cerrado brasileiro</b> ....	<b>54</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>60</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	60
<b>3.1.1 Vegetação Natural do Cerrado</b> .....	<b>62</b>
<b>3.1.2 Clima</b> .....	<b>67</b>
<b>3.1.3 Hidrogeologia</b> .....	<b>69</b>
<b>3.1.4 Geomorfologia</b> .....	<b>72</b>
3.2 DECLIVIDADE .....	74
3.3 MAPEAMENTO DA EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS (1991, 2006 E 2017).....	75
3.4 EVOLUÇÃO DA AGROPECUÁRIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/GO .....	79
3.5 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO E MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA PARA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/GO .....	80
<b>3.5.1 Cenários hipotéticos de uso do solo</b> .....	<b>80</b>
<b>3.5.2 Modelagem Hidrossedimentológica</b> .....	<b>84</b>
3.6 MODELO SWAT ( <i>SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL</i> ) .....	85
<b>3.6.1 Determinação do Balanço Hídrico</b> .....	<b>85</b>
<b>3.6.2 Escoamento superficial</b> .....	<b>86</b>
<b>3.6.3 Evapotranspiração</b> .....	<b>87</b>
<b>3.6.4 Estimativa da produção de sedimentos na BHRA</b> .....	<b>88</b>
<b>3.6.5 Estimativa da produção de sedimentos das sub-bacias</b> .....	<b>90</b>

3.7 BANCO DE DADOS PARA ENTRADA NO MODELO SWAT .....	91
3.7.1 Associação de classes de uso do solo .....	92
3.7.2 Dados hidrometeorológicos .....	93
3.7.3 Dados Geoespaciais .....	96
3.7.3.1 Modelo Digital de Elevação .....	96
3.7.3.2 Tipos de solo .....	98
3.7.3.3 Grupos Hidrológicos .....	103
3.8 ETAPA DE EXECUÇÃO NO MODELO SWAT .....	106
3.8.1 Etapa de verificação e execução: Análise de sensibilidade.....	106
3.8.2 Etapa de execução: calibração e validação do modelo SWAT.....	110
3.8.3 Índices de desempenho da modelagem.....	111
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>113</b>
4.1 COMPORTAMENTO DE CHUVA E VAZÃO NA BACIA EM ESTUDO .....	113
4.2 EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/GO NOS ANOS DE 1991, 2006 E 2017 .....	117
4.3 O AVANÇO DA AGROPECUÁRIA E SUAS PERSPECTIVAS MUDANÇAS NO USO DO SOLO ANALISADOS NOS ANOS DE 1991, 2000, 2006, 2011, 2016 E 2017 NA BHRA.....	125
<b>4.3.1 Evolução da área plantada com Arroz, Cana-de-açúcar, Feijão, Milho, Soja e Sorgo (1991, 2000, 2006, 2011 e 2017).....</b>	<b>132</b>
4.3.1.1 Cultivo do Arroz.....	132
4.3.1.2 Cultivo da Cana-de-açúcar .....	135
4.3.1.3 Cultivo do Feijão .....	141
4.3.1.4 Cultivo do Milho.....	144
4.3.1.5 Cultivo da Soja .....	147
4.3.1.6 Cultivo do Sorgo.....	151
4.4 MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BHRA .....	154
4.4.1 Simulação do modelo .....	154
4.4.2 Modelagem inicial do uso do solo de 1991 .....	156
4.4.3 Análise de sensibilidade .....	158
4.4.4 Calibração e Validação do uso do solo de 1991 .....	165
4.5 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS .....	168
4.5.1 Estimativa da produção de sedimentos das sub-bacias para o uso do solo de 1991.....	171
4.4.6 Classificação de perdas de solo para o uso do solo de 1991 na BHRA...	175

<b>5 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO E A SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS PARA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/ GO.....</b>	<b>179</b>
5.1 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BHRA PARA OS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO OTIMISTA E PESSIMISTA....	182
5.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO OTIMISTA E PESSIMISTA PARA A BHRA.....	186
5.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NAS SUB-BACIAS PARA OS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS OTIMISTA E PESSIMISTA DE USO DO SOLO.....	191
5.4 CLASSIFICAÇÃO DE PERDAS DE SOLO PARA O USO DO SOLO DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS OTIMISTA E PESSIMISTA .....	196
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>200</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>203</b>
<b>APÊNDICE A - Metodologia do cenário hipotético otimista de uso do solo.....</b>	<b>222</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Bioma Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro e está inserido predominantemente no Planalto Central do Brasil de estrutura complexa, estendendo-se entre as latitudes de 5° e 20° Sul e longitude de 45° e 60° Oeste, ocupando 2.036.448 km<sup>2</sup>, o que representa 24% do território nacional. Em função de sua extensão territorial, faz limite com outros quatro biomas brasileiros: ao norte encontra-se com a Amazônia, a nordeste com a Caatinga, a sudeste com a Mata Atlântica e a sudoeste, com o Pantanal (MMA, 2014).

O conjunto ecossistêmico do Cerrado é compreendido pela elevada variabilidade espacial de fitofisionomia, clima, tipos de solo, topografia (altitudes que variam de 300 a 1.700 m) (EITEN, 1994) que desempenham um papel fundamental no processo de produção e distribuição hídrica que fluem para as principais bacias hidrográficas brasileiras, como a Tocantins-Araguaia, Amazônica, Paraná, Paraguai e São Francisco (RESCK et al., 2008; ALMEIDA et al., 2006).

Do ponto de vista hidrológico, é evidente a relevância do Cerrado para quantidade e qualidade dos recursos hídricos na região, sendo necessária atenção especial para o desmatamento e a expansão das atividades agropecuárias que ocorre nessa área, em virtude dos impactos ambientais negativos causados pela expansão das atividades econômicas.

A expansão da pecuária bovina tem papel importante no processo histórico de ocupação do bioma, transformou a criação de gado bovino em uma das atividades econômicas de maior relevância no final do século XIX (MMA, 2014). As décadas de 1960 e 1970 do século XX, marcaram o início de investimentos na agropecuária com modernas técnicas, suplemento de solo e mecanização tornando a área do Cerrado em um celeiro de grãos e de extensas pastagens (PAULA, 2011).

O modo como as terras desse bioma vem sendo efetivamente ocupada pela tecnologia agrícola, é resultante de um modelo de agricultura moderna voltado para agronegócio, com pouca ou quase sem nenhuma preocupação conservacionista a longo prazo, que sofre com as mudanças nos aspectos físicos, biológicos, sociais e culturais (EITEN, 1994).

Extensas áreas contínuas estão sendo desmatadas, principalmente as veredas (buritis) e matas ciliares vêm sendo objeto de severas agressões, advento da mudança do uso do solo com a modernização da agricultura que marcou o início do rápido e

sistemático processo de conversão da vegetação natural para áreas de produção agropecuária (FERREIRA, 2009).

Segundo MMA (2014) o desmatamento interfere no ciclo hidrológico, uma vez que sem cobertura vegetal provoca a redução da infiltração da água no solo e aumento do escoamento superficial, o que afeta a dinâmica fluvial. Além disso, ocorre a redução da recarga hídrica, perdas de solo, produção de sedimentos e o aumento da probabilidade de ocorrência de eventos extremos, como as inundações.

O ritmo intenso do desmatamento do Cerrado tem ocasionado diversos impactos ambientais, tais como a redução e fragmentação dos ecossistemas e no comportamento hidrológico de importantes bacias hidrográficas brasileiras (MMA, 2014), na redução da qualidade dos solos e no aumento da erosão hídrica, assoreamento dos corpos hídricos e produção de sedimentos (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006). Esse é o caso dos impactos das mudanças no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio das Almas (BHRA), localizada na Mesorregião do Centro Goiano no estado de Goiás.

Essa bacia hidrográfica tem uma relevância na produção hídrica. A caracterização hidrogeológica na região da BHRA está intimamente relacionada as correlações estruturais e estratigráficas da geologia e subordinada aos aspectos fisiográficos (clima, relevo, hidrografia, solos e a vegetação natural). A predominância dos solos Latossolos vermelhos (53,72%) compõem os reservatórios deste sistema. Por serem profundos e muito porosos apresentam condições adequadas para um bom desenvolvimento radicular em profundidade, importante armazenador de água em virtude da posição topográfica, características como textura argilosa e estrutura uniformes em profundidade (SANTOS et al., 2018), retendo a umidade no solo por mais tempo, ocasionado um lento processo de infiltração e, conseqüentemente o abastecimento dos aquíferos rasos e profundos que contribuem para a vazão dos rios perenes e também no surgimento de nascentes (LEPSCH, 2002).

Há pouco mais de trinta anos a paisagem da BHRA apresentava uma cobertura vegetal preservada (MAPBIOMAS, 1985-2019). Nos últimos vinte e seis anos, essa bacia vem passando pelo processo de alteração em decorrência da pressão do agronegócio, pela demanda por alimentos, que tornou inevitável a continuidade da expansão da agropecuária. A rápida mudança no uso e cobertura do solo em virtude da modernização e das técnicas produtivas no campo, aliada a combinação de fatores naturais (solo, hidrologia, relevo e clima) e aos investimentos financeiros subsidiados, principalmente por programas e políticas de governo (CARRIJO, 2008) em infraestruturas, como

rodovias e ferrovias proporcionaram um desenvolvimento econômico regional. Por outro lado, vem aumentando a ocupação de áreas naturais, seja sobre a vegetação nativa e de recursos hídricos que comprometem importantes ecossistemas na bacia em estudo.

Outro aspecto relevante na área de estudo é que essa bacia também é estratégica no que tange geração de energia elétrica, pois toda disponibilidade hídrica é direcionada para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa que está instalada a jusante. Essa usina foi inaugurada em março de 1997, tendo uma área inundada de aproximadamente 1.784 km<sup>2</sup>, com capacidade do volume útil do reservatório de 99,80% e com afluência de 1.563,40 m<sup>3</sup>/s (SAR, 2017), numa altitude de 460 m e o volume de água equivalente 54,4 bilhões m<sup>3</sup>. Esse aproveitamento hidrelétrico tem grande importância no panorama energético brasileiro, participa do sistema interligado para produção e geração de energia para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste, tendo o elo da interligação Norte-Sul onde suas três unidades geradora totalizam 1.275 MW de potência (FURNAS, 2019<sup>1</sup>).

Esse reservatório é fruto do processo de ocupação recente da fronteira energética do Tocantins-Araguaia (SILVA, 2014; FERNANDES, 2010; FERREIRA; TOKARSKI, 2007). Assim, entender o comportamento hidrossedimentológico sob o viés do uso e ocupação do solo e no regime de descarga líquida e sólida da bacia hidrográfica do Rio das Almas, é condição básica para um planejamento bem-sucedido, gestão dos recursos hídricos e conservação do solo.

Devido a relevância dos recursos hídricos e a mudança na cobertura e no uso do solo foi adotado na pesquisa da bacia hidrográfica do Rio das Almas uma das principais ferramentas para o planejamento e gestão ambiental, o Modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Tendo como finalidade representar a dinâmica do balanço hídrico e de processos que ocorrem na superfície e subsuperfície envolvendo o escoamento, susceptibilidade do solo à erosão hídrica, perdas de solo, produção de sedimentos e possível assoreamento de reservatórios.

Justifica-se na pesquisa a aplicação do Modelo SWAT em função de adaptações e ajustes na metodologia para se adequar a realidade especificamente da bacia em estudo. Inclusive, buscou-se selecionar uma sequência de parâmetros e procedimentos que foram necessários para realização deste trabalho e que possibilitou simular, avaliar, estimar e prever impactos provocados pela mudança no uso do solo, disponibilidade hídrica e,

---

<sup>1</sup> <https://www.furnas.com.br/subsecao/129/usina-de-serra-da-mesa---1275-mw?culture=pt>

consequentemente na produção de sedimentos, através da simulação de cenários hipotéticos de uso do solo.

### 1.1 HIPÓTESE

A hipótese norteadora desta pesquisa é se as mudanças no uso e cobertura do solo na BHRA no período de 1991–2017 têm provocado a diminuição e a fragmentação da cobertura vegetal decorrente do desmatamento e da intensificação das atividades agropecuárias, então pode afetar diretamente a resposta hidrológica de uma bacia e interferir nas vazões naturais e na produção de sedimentos.

### 1.2 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Este estudo tem como objetivo geral realizar uma análise espaço-temporal das mudanças do uso e ocupação do solo e sua influência nos processos hidrossedimentológicos em uma bacia estratégica no bioma Cerrado.

Para tanto, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as mudanças de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio das Almas, no período 1991 e 2017.
- Simular os processos hidrossedimentológicos da bacia hidrográfica do BHRA.
- Estimar cenários hipotéticos de uso do solo otimista e pessimista para a BHRA.
- Analisar os processos hidrossedimentológicos para os cenários hipotéticos de uso do solo na BHRA.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de Tese de doutorado está organizado conforme o regulamento do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG)/ UFPB e na linha de pesquisa em Gestão do Território e Análise Geoambiental. E tem a seguinte estrutura:

O **Capítulo 1** trata-se da Introdução, onde se apresenta o tema do trabalho e sua relevância no contexto de bacia hidrográfica, sob as mudanças no uso do solo e os possíveis impactos nos processos hidrossedimentológicos da bacia. Além da hipótese e dos objetivos (Geral e Específicos).

No **Capítulo 2** trata-se da Revisão Bibliográfica, visando reunir nesse item conceitos e discussões relevantes à temática, para o desenvolvimento da pesquisa. Dentro de uma perspectiva ampla, no qual buscou-se contextualizar os diversos elementos geográficos, processos e interações que se interligam e (co)relacionam, interferem no comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica e seus processos, tais como: análise geográfica: bacia hidrográfica como unidade de planejamento; o ciclo hidrológico; dinâmica dos processos hidrológicos; modelagem hidrossedimentológica em bacias hidrográficas; Modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*); calibração do modelo SWAT e o programa SWAT-CUP; modelagem hidrossedimentológica no Brasil e no Cerrado brasileiro.

No **Capítulo 3** consiste em Materiais e Métodos, onde estão descritas as caracterizações essenciais da área de estudo, como: localização da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas, os tipos de vegetação natural do bima Cerrado, o clima, a hidrogeologia, geomorfologia, solos e declividade. Além de apresentar nesse capítulo, a metodologia de forma pormenorizada, que apoiam os capítulos 4 e 5, como a descrição completa dos procedimentos metodológicos que permitiram justificar, em função do problema de investigação e dos objetivos definidos na pesquisa, inclusive as ferramentas utilizadas, como o ArcGis 10.4, modelo SWAT, SWAT-CUP, bem como, os algoritmos que explicam o balanço hídrico simulado pelo modelo, banco de dados para entrada no modelo SWAT, estimativa de perdas de solo e produção de sedimentos, associação de classes de uso do solo correspondente ao modelo SWAT de dados: climáticos, hidrometeorológicos regionais e locais (temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar, velocidade dos ventos e umidade relativa; e as séries históricas dos dados diários das estações pluviométricas e fluviométricas,) e os dados geoespaciais (Modelo Digital de Elevação; tipos de solo e os respectivos grupos hidrológicos; e o mapeamento de uso do solo); etapas de verificação e execução no modelo SWAT: análise de sensibilidade e calibração e validação; apresenta o conjunto de parâmetros identificados na resposta hidrológica da bacia, a partir da função objetivo escolhido (eficiência de *Nash-Sutcliffe*) e da estatística do coeficiente de determinação de Pearson ( $R^2$ ).

No **Capítulo 4** trata-se dos Resultados e Discussão do trabalho de tese. Nesse capítulo são apresentados os dados extraídos e correspondentes à pesquisa realizada. Nesse capítulo permite discutir de forma objetiva: o comportamento de chuva e vazão na bacia em estudo; evolução do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Almas, nos anos de 1991, 2006 e 2017; evolução dos dados censitários da agropecuária

na Bacia Hidrográfica do Rio das Almas; evolução da área plantada com: Arroz, Cana-de-açúcar, Feijão, Milho, Soja e Sorgo (1991, 2000, 2006, 2011 e 2017); Modelagem Hidrossedimentológica para o uso do solo 1991; estimativa da produção de sedimentos e de perdas de solo na Bacia Hidrográfica do Rio das Almas.

No **Capítulo 5** consiste apresentar os resultados e discussões dos cenários hipotéticos de uso do solo distintos: (1) Otimista e (2) Pessimista simulados no modelo SWAT. Nesse capítulo são apresentados: a simulação dos processos hidrológicos e sedimentológicos para os dois cenários hipotéticos, como: a estimativa de vazão, escoamento superficial, perdas de solos e produção de sedimentos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica visa reunir os conceitos e discussões relevantes à temática para o desenvolvimento da pesquisa. Numa perspectiva ampla, busca-se contextualizar os diversos elementos geográficos, processos e interações que se interligam e se relacionam, interferindo no comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica.

### 2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO

Entende-se a bacia hidrográfica como uma área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial constituído por canais interligados. De todo o volume de água precipitado, parte é infiltrado no solo, parte é evaporado e outra parte é automaticamente escoado por meio de uma rede de drenagem das áreas mais altas para as mais baixas, seguindo uma hierarquia fluvial até concentrar-se em um único ponto formando um rio principal (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A bacia hidrográfica é delimitada topograficamente existindo uma hierarquização da rede de drenagem, composta por um conjunto de vertente que capta naturalmente a água de precipitação e faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída (exutório). E cada bacia hidrográfica interliga-se com outra bacia de ordem hierárquica superior, constituindo em relação a última, uma sub-bacia (TUCCI, 1998).

A Política Nacional de Recursos Hídricos instituída pela Lei Federal nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997<sup>2</sup>, define a bacia hidrográfica como a unidade de planejamento e gestão das águas, considerando a integração e a influência de diversos elementos que estão inseridos no recorte espacial dos recursos hídricos (CARVALHO, 2020).

De acordo com essa autora, as bacias hidrográficas são tidas no âmbito do planejamento territorial como a unidade básica de análise para o desenvolvimento de ações e medidas estruturais e não estruturais com a perspectiva de integração entre a gestão dos recursos hídricos e a gestão ambiental.

A delimitação dessa unidade de paisagem para o planejamento, permite analisar de forma sistêmica os elementos, fatores e relações ambientais, sociais e econômicas a partir de demandas e ofertas existentes na área. Nesse caso, o recorte espacial tem sido adotado na gestão hídrica para o reconhecimento, caracterização e avaliação, a fim de

---

<sup>2</sup> [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm)

facilitar a abordagem sobre os recursos hídricos e sedimentológicos (CARVALHO, 2020).

Assim, numa bacia hidrográfica os processos acontecem em conjunto, pois a intensidade dos processos podem variar no tempo e no espaço conforme as características da bacia, como: o relevo, topografia, cobertura vegetal, tipos de solo, hidrogeologia, presença de áreas urbanas, atividades agropecuárias ou industriais entre outros (PAZ, 2004).

Por ser espacialmente heterogênea, a bacia hidrográfica apresenta diferente escala de interesse para o estudo e análise geoambientais. Numa abordagem sistêmica, a bacia hidrográfica tem caráter integrador e dinâmico, por revelar excelentes áreas de estudo para o planejamento, permite conhecer e avaliar seus diversos componentes, processos e interações que nela ocorrem (BOTELHO; SILVA, 2004). Qualquer mudança significativa dentro da unidade ambiental pode resultar em desequilíbrios temporários ou permanentes, que em geral são irreversíveis (CHRISTOFOLETTI, 1999).

As características essenciais da uma bacia hidrográfica é capaz de ser identificada, por meio da modificação dos fatores naturais e antrópicos ao longo do tempo. As alterações provocadas pelas ações antrópicas são entendidas como fatores-chave para sua interpretação e sua relação com os processos que as interagem, por exemplo, a fragmentação da cobertura vegetal ocasionam desequilíbrio e alteram o funcionamento dos ecossistemas essenciais das regiões naturais, em virtude das atividades agropecuárias, urbanas e outras (FISCHER; LINDENMAYER, 2007).

Nesse sentido, a bacia hidrográfica é considerada um sistema físico aberto, cuja entrada é o volume de água precipitado, entretanto, nem toda a precipitação se torna escoamento no exutório (saída), em função da chuva poder ficar armazenada na própria bacia em forma de lagoas e represas, por exemplo. Há perdas intermediárias, relativas aos volumes evaporados, transpirados (pela vegetação) ou infiltrados profundamente. Tais volumes de água representam parcela da entrada no sistema que é perdida para a atmosfera e para camadas rasas e profundas do subsolo (RENNÓ; SOARES, 2000).

Paz (2004) reforça a discussão, mencionando que mesmo com o aspecto de sistema aberto, o estudo hidrológico se dá a nível de bacia hidrográfica, cujo papel hidrológico é entendido como sendo o de transformar uma entrada de volume de água concentrada no tempo (que é a precipitação) em uma saída de água de forma mais distribuída no tempo (escoamento pelo exutório). Nesse meio termo, ou seja, entre a ocorrência da precipitação e a vazão de saída da bacia, decorrem todos os processos

intermediários: evaporação, interceptação, evapotranspiração (vegetação), infiltração subsuperficial e profunda, escoamentos subsuperficial e subterrâneo, desagregação e transporte de sedimentos. Entretanto, como os processos acontecem em conjunto, a intensidade dos processos pode variar no tempo e no espaço conforme as características da bacia, que são: o relevo, topografia, cobertura vegetal, tipo de solo, geologia, presença de áreas urbanas, atividades agropecuárias ou industriais etc.

Para estudo de bacia hidrográfica, a análise do ciclo hidrológico é um elemento fundamental (SILVEIRA, 1998), principalmente na fase terrestre que é mais relevante, englobando todos os componentes do processo, citados anteriormente por Paz (2004). Além os processos que regem a erosão hídrica do solo, o transporte e a produção de sedimentos, que em conjunto constituem os processos hidrossedimentológicos (TUCCI, 1998).

Dentre os componentes dos processos naturais, a precipitação é um dos fatores climáticos mais importantes do ciclo hidrológico, que responde pela entrada (*input*) e, conseqüentemente, pelo balanço hídrico, distribuição e os modos de ocorrência em uma bacia hidrográfica. As quantidades relativas de chuvas (volume), seus regimes sazonais ou diários (distribuição temporal) e a intensidade de chuvas individuais (volume/duração) são algumas características que afetam a natureza e a magnitude de uma bacia. Parte da precipitação não atinge o solo (em relação ao volume que atinge a superfície), devido a evaporação durante a queda, porque fica retida na vegetação (interceptação) ou por outra forma de obstrução, que resulta na redução do escoamento superficial. Do volume que atinge o solo, parte infiltra, parte escoia sobre a superfície e parte evapora, quer diretamente ou através das plantas, no fenômeno conhecido como transpiração. Portanto, a determinação da intensidade de precipitação é importante para entender o controle de inundação e da erosão do solo (BERTONI; TUCCI, 2007; GUERRA, 1998) (Figura 1).

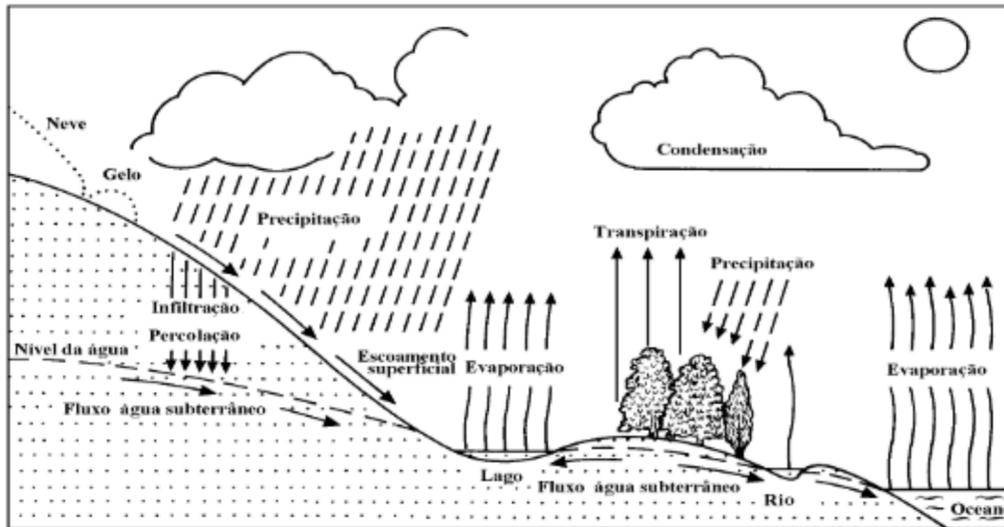


Figura 1 - Ciclo hidrológico. Fonte: Tucci (1998).

A água segue diversos caminhos e conforme as características físicas do solo, definem o fluxo que excedem para escoar na superfície do terreno e a quantidade de chuva que infiltra através do solo (GUERRA, 1998). No solo, a água pode movimentar-se entre as partículas e os espaços vazios proporcionando um comportamento tanto ascendente como descendente e armazenando por um período muito variável. Formam-se assim os aquíferos e/ ou lençóis subterrâneos que contribuem para o escoamento de base dos rios, que por sua vez, alimentam os canais abertos durante longos períodos de estiagem. Parte da umidade do solo realimentada pela infiltração é aproveitada pela vegetação através das raízes e a outra parte é devolvida novamente a atmosfera por transpiração (SILVEIRA, 1998).

Suprida essa etapa de infiltração, parte da água passa a escoar superficialmente. Esse processo é impulsionado pela gravidade para as cotas baixas, que exerce maior ou menor influência na infiltração da água da chuva e na velocidade do escoamento, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo (SILVEIRA, 1998). Inicialmente são preenchidas as depressões do terreno e em seguida dá-se início ao escoamento propriamente dito, associado ao declive do terreno em direção aos canais naturais que vão se concentrando nos fundos de vales, formando os cursos principais dos rios, somado a água que chega ao curso depois do processo da infiltração para finalmente dirigirem-se aos reservatórios, lagos e oceanos (SUGUIU; BIGARELLA, 1990; SILVEIRA, 1998; TUCCI, 1998).

Segundo Guerra (2005) e Netto (1998) as rotas preferenciais dos fluxos superficiais ou subterrâneos definem os mecanismos erosivos-depositivos preponderantes que resultam da interação dos diversos fatores, como abiótico (clima, rocha, solo vegetação e topografia), biótico (fauna e flora) e antrópico (uso do solo), compõem a paisagem. Qualquer alteração na composição dos fatores naturais pode induzir a modificações significativas na dinâmica espaço-temporal dos processos hidrológicos atuantes nas encostas e, conseqüentemente, na modelagem do relevo, perdas de solo e na produção de sedimentos.

Ao identificar as relações entre o processo e as formas, conseqüentemente, pode-se estabelecer um equilíbrio entre ambos, de modo que, qualquer alteração no sistema (processo) em seqüência será refletida por alteração na estrutura morfológica (forma). Por outro lado, as mudanças ocorridas nas formas podem alterar a maneira pela qual o processo se realiza (CHRISTOFOLETTI, 1980). Por exemplo, uma bacia hidrográfica é “um sistema que acionado por uma entrada, a precipitação através dos diversos processos do ciclo hidrológico transforma essa chuva em vazão. Ou seja, a estrutura do sistema hidrológico depende de características, como: vegetação, solo, topografia e outros” (TUCCI, 2005, p.19).

Em termos práticos, a cobertura vegetal responde pela manutenção dos recursos naturais renováveis, pois exerce um papel essencial no ciclo da água, aumenta a porosidade e permeabilidade do solo através das raízes, mantém a superfície úmida com presença de matéria orgânica e protege o solo contra o impacto da chuva e de outros fatores (LIMA, 2000). Em contrapartida, os solos expostos aos agentes intempéries estão sujeitos ao efeito erosivo chamado *splash*, que tem como resultado a ruptura dos agregados quando são golpeados pelo contato com as gotas de chuva sobre a superfície, ocasionando a desagregação, o transporte e o escoamento superficial das partículas do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993; GUERRA, 2005), caracterizando assim, o início do ciclo hidrossedimentológico.

Outro fator marcante que pode interferir nos componentes do ciclo hidrológico é o comportamento da ação humana sobre determinados tipos de solos e as formas de uso, que refletem no potencial de degradação dos recursos naturais renováveis, podendo torná-los mais sensíveis aos processos erosivos (NETTO, 1998).

Entende-se que tanto na zona rural como na zona urbana a atividade humana interfere no processo natural do ciclo da água, uma vez que, acarreta diversos problemas, como por exemplo, o desmatamento, a impermeabilização do solo, a emissão de

poluentes na atmosfera, queima de combustíveis fósseis e outros que geram mudanças na emissão de gases na atmosfera. Dependendo da intensidade e da interferência sobre determinados ambientes, pode ocasionar a diminuição no regime de chuvas e provocar a estiagem. Já em outros ambientes pode promover o aquecimento da superfície, elevar a temperatura média e contribuir com as mudanças do clima, como por exemplo, provocar o surgimento de ilhas de calor, chuvas excessivas e inundações (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

## 2.2 DINÂMICA DOS PROCESSOS EROSIVOS

A erosão é um processo contínuo pelo qual o solo e os minerais são desagregados e transportados, podendo ser definidos por dois estágios distintos: a separação e o transporte. A primeira refere-se ao desalojamento das partículas sólidas do solo pela ação de agentes erosivos (água, vento e gelo). Enquanto o transporte resulta da ação gravitacional e do movimento dos sedimentos de seus locais de origem, que são depositados em superfícies rebaixadas, denominando-se de sedimentação das partículas erodidas. Porém, os sedimentos podem ficar depositados temporariamente na depressão do terreno e, ou se deslocarem pela atuação da água das chuvas e serem transportados pelos cursos d'água (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006).

Os processos erosivos tem causas relacionadas à própria natureza, tais como: quantidade e distribuição das chuvas, declividade, comprimento e forma das encostas, propriedades químicas e físicas dos solos, tipo de cobertura vegetal e condicionantes externos através da ação humana, que emprega diversos tipos de uso e manejo da terra, tendendo a acelerar tais processos (GUERRA; MENDONÇA, 2004). Portanto, alguns solos são mais suscetíveis do que outros ao deslocamento e ao transporte de partículas pelos agentes erosivos (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993; LESPSCH, 2002 e 2010).

Camapum de Carvalho et al. (2006) apontam dois fatores físicos importantes que afetam a magnitude da erosão do solo, que são: a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo. A primeira decorre da ação dos agentes erosivos, como a água da chuva ou efeito *splash* que causam o desprendimento e o transporte do solo. Enquanto a erodibilidade é definida como a falta de capacidade do solo resistir aos processos erosivos e depende não só das características intrínsecas, mas também de fatores subsidiários como ciclos de

umedecimento e secagem, estrutura e textura do solo, além da composição química da água presente.

O solo é um material inconsolidado originado das rochas por desagregação e decomposição, em função da atuação do intemperismo (físico, químico e biológico) e da pedogênese (materiais intemperizados reorganizados associado à matéria orgânica). Os solos são dependentes dos fatores de formação como clima, organismos, relevo e o tempo, que se encontram de maneira distinta nas diferentes regiões do globo e ocasionam a formação de perfis de alteração, compostos de camadas com diferentes espessura e composição. Enquanto os sedimentos são provenientes dos materiais inconsolidados (aluvião ou coluvial) erodidos e transportados para as partes baixas da superfície (TOLEDO et al., 2009).

Os materiais do solo (ou estruturas) são constituídos por milhões de partículas de diferentes composições mineralógicas e diversos tamanhos entre cascalho, areia, silte e argila, parte dos quais pode estar como grãos simples ou agregados por matéria orgânica ou argila. No entanto, o arranjo dessas partículas pode influenciar no direcionamento e no tempo de armazenamento de água no solo, em função da estrutura que se apresenta: granular, laminar, em bloco (angulares e subangulares), prismática e colunar (NETTO, 1998; LESPSCH, 2002 e 2010). Cada uma tem um comportamento diferencial na distribuição dos fluxos de água no perfil do solo, seja pela aderência das partículas unitárias (areia, silte e argila) que é provocada por substâncias que têm a capacidade de ligá-las, seja por outros processos que podem agir e provocar o aparecimento de fendas que separam as unidades estruturais, tais como a penetração de raízes e as galerias cavadas por pequenos animais (LESPSCH, 2002 e 2010).

Segundo esse mesmo autor, as características dos solos como textura e estrutura permitem agrupar os tipos de solo quanto ao potencial de geração de escoamento superficial, definindo quatro classes: solos profundos ou baixo potencial, solos rasos ou alto potencial, área semi-impermeáveis e água. Os solos com baixo e médio potencial de geração de escoamento e alto potencial de armazenamento de água são compostos pelas classes de solos: Latossolos, Chernossolos e Argissolos. Já os solos com maior capacidade de geração de escoamento e menor capacidade de armazenamento de água são solos ditos rasos ou pouco profundos, classificados como: Cambissolos e Neossolos litólicos (agrupa as áreas de afloramento rochoso).

Carvalho (2008) aponta dois agentes erosivos no solo – o ativo e o passivo. O primeiro agente é denominado de elementos naturais do meio físico que causam ou

afetam diretamente a erosão, que são: a chuva, temperatura, insolação, vento, gelo, a ação dos microrganismos e a atividade antrópica. Dentre esses agentes, a precipitação é o elemento principal que pode originar vários efeitos ou provocar grandes estragos erosivos no solo em bacia hidrográfica, dependendo da intensidade, quantidade, duração e da frequência das chuvas, conforme apontado anteriormente. Processada a erosão pluvial, a água passa a ter efeito de infiltração e escoamento superficial sobre o terreno em forma de enxurrada, cuja força de arrasto e de transporte é variável, pois depende de diferentes fatores físicos do solo (textura, estrutura e permeabilidade). Enquanto a temperatura e insolação são responsáveis pelos efeitos climáticos, o vento e os microrganismos são agentes de importância secundária e o gelo torna-se insignificante num país tropical. Por último, a ação humana que interfere diretamente nos fatores naturais e dinâmicos da estrutura dos solos, favorecendo os processos erosivos.

Já os agentes passivos são definidos pela topografia, gravidade, tipos de solo (textura e estrutura), cobertura vegetal e formações superficiais. A topografia (declividade, rugosidade e comprimento de rampa) associada à gravidade favorece a atuação da erosão e permite que ocorra maior ou menor intensidade no deslocamento de partícula, principalmente se o solo estiver desprovido de vegetação. As formações superficiais derivam de materiais passíveis de erosão que afloram na superfície (CARVALHO, 2008).

Camapum de Carvalho et al. (2006) classificam as erosões quanto à forma e a origem, podendo ser dividida em dois grupos: erosão natural ou geológica e a erosão acelerada ou antrópica. A erosão geológica está associada ao arraste de partículas ou materiais (solos, formações superficiais e fragmentos de rochas) e ao transporte, sem a intervenção humana. Enquanto erosão acelerada está relacionada à ação humana (práticas de manejo do solo, desmatamento, ocupação desordenada e outros).

A erosão superficial pode ser classificada em: pluvial, laminar, por escoamento difuso e por escoamento concentrado. A erosão pluvial é decorrente da ação da chuva, chamada de erosão hídrica, atua diretamente na superfície e na sedimentação incluindo o processo físico de desprendimento, transporte e deposição de partículas sólidas (sedimentos), agentes que ocasionam o impacto das gotas de chuva sobre o solo (*splash*) e o escoamento superficial (CARVALHO, 2008; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006; GUERRA, 2005; GUERRA; MENDONÇA, 2004; GUERRA, 1998; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993).

Esses autores esclarecem que, a erosão laminar se processa durante as fortes chuvas com declividade leve a moderada e quando o solo já se encontra saturado em toda sua extensão, desenvolvendo um desgaste suave e uniforme provocado pelo escoamento superficial, que pode evoluir para outras formas de erosão. Enquanto a erosão por escoamentos difuso e concentrado ocorre em outro estágio, quando a água escoar sobre o terreno descoberto e forma depressões que pouco a pouco vão evoluindo para sulcos, ravinas e voçorocas. Ao final desses processos, o material é transportado para as superfícies rebaixadas e para os cursos d'água, lagos e reservatórios.

A erosão na forma de escoamento difuso e concentrado, Camapum de Carvalho et al. (2006) explicam que ocorre quando o fluxo de água canalizado nas ravinas continua aprofundando o terreno e, posteriormente alarga essas feições erosivas em pontos de rupturas dando origem às voçorocas, que são características erosivas relativamente permanentes nas encostas, principalmente na região Centro-Oeste, marcada por elevadas temperatura e pluviosidade na estação do verão. Grande parte desses processos erosivos ocorre de modo direto e previsível como consequência, da intervenção antrópica no ambiente, decorrente do plantio e manejo do solo de modo inadequado, sem o uso de práticas de combate à erosão (por exemplo, terraceamento) e devido ao desmatamento de matas ciliares (GUERRA; MENDOÇA, 2004).

O processo erosivo não acontece de forma constante em todos os solos, pois os atributos físicos, químicos e biológicos interferem no processo e variam em diferentes tipos de solo. A erosão é ocasionada inicialmente por forças ativas, como destacado por Carvalho (2008) e a intensidade dessas forças envolvem vários fatores (naturais e antrópicos) provocados pelas formas e magnitudes variáveis, conforme o local de ocorrência (CARVALHO et al., 2009).

Como os processos erosivos se desenrolam nas encostas e no âmbito das bacias hidrográficas, o comportamento dos sedimentos é muito variável e dinâmico desde as partes elevadas até as planícies. Isso se dá em função da rocha, relevo, solos, da cobertura vegetal, declividade, do regime de chuvas, do uso do solo e de diversos outros fatores (GUERRA; MENDONÇA, 2004; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993). Nas áreas elevadas da bacia com intensa precipitação há maior erosão e transporte de sedimentos em função da ação da gravidade. À medida que as declividades decrescem e suavizam as encostas, a água corre em finos filetes, que progressivamente aumentam de volume, dependendo da intensidade da precipitação. Quando essas forças se reduzem até a condição de não poderem continuar a deslocar a partícula, ocorre o processo de

deposição. Esse depósito pode ser transitório ou permanente, como por exemplo o assoreamento. Parte desse sedimento produzido pode ser conduzido para dentro dos cursos d'água, para represas e também para outras bacias de drenagem contribuintes (CARVALHO, 2008; CHRISTOFOLETTI, 1980).

O processo erosivo natural sempre ocorre em função de ações que são controladas pelos agentes: climático, geológico, geomorfológico, pedológico e topográfico sobre a superfície e dentro da rede de drenagem. Nesse caso, a intensidade do processo depende da escala de tempo e da forma de ocupação do solo, que controla a velocidade da erosão sobre a superfície e, posteriormente, ocasiona a produção de sedimentos. Um dos principais mecanismos que desencadeiam e aceleram esses processos são as atividades antrópicas, por meio do desmatamento, pelas práticas agropecuárias intensivas, pela urbanização entre outros.

Os processos responsáveis pela produção de sedimentos são muito complexos (naturais e ação humana), abrangendo vários dos fatores citados anteriormente. Quando o material sólido (partícula erosiva) é transportado pelos cursos d'água, Suguio e Bigarella (1990) explicam que os fluxos de água necessitam de forças para exercer a ação do deslocamento dos sedimentos, que estão condicionados à velocidade, ao gradiente hidráulico (declividade do rio) e a profundidade (sazonais). E ressaltam que a capacidade de um rio de transportar sedimentos varia de acordo com a dinâmica do canal de escoamento, do tamanho da partícula e da forma, pode acontecer de duas maneiras: quando a flutuação no rio é tranquila, este tem capacidade de levantar e carregar somente as partículas mais leves, como a argila. Entretanto quando os fluxos estão turbulentos e dependendo de sua velocidade e volume, podem mover partículas que variam desde o tamanho argila até um fragmento de rocha.

Tais fatores explicam a dinâmica fluvial e a complexidade sedimentológica numa bacia hidrográfica. Portanto, é preciso envolver inúmeros fatores de ordem física, meteorológica e principalmente antrópica que atua na modificação do manto intemperizado de forma acelerada, através do sistema produtivo (SOUZA e SOBREIRA, 2017). Além disso é importante considerar o volume de sedimentos produzidos, que tende a ser deslocado e atingir outras bacias de drenagem e reservatórios de maior porte (SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

Atualmente, a mudança nas formas de se produzir na bacia do Rio das Almas/GO está incorporada à modernização agropecuária e é considerada como parte integrante de um sistema de produção agropecuário amplo e coligado com outros setores (urbano-

industrial) de alta tecnologia (biológica, química e mecânica) e produtividade que sofrem fortes influências externas relacionados aos aspectos: econômicos, mercado consumidor, políticas públicas específicas, tecnológicas, à competitividade e outros (BACCARIN, 2011; SOUZA; SOBREIRA, 2017).

A tendência de expansão do sistema formado pela agricultura modernizada, em muitas vezes, resulta no crescimento do desmatamento para conversão em diferentes cultivos (BACCARIN, 2011), podendo gerar várias consequências, como: erosão hídrica, perdas de solo, produção de sedimentos, principalmente durante a preparação do terreno, no período de germinação e crescimento vegetativo até colheita (DEDECEK, 1986). Isso vai depender do manejo utilizado no período de preparo, pois o solo fica totalmente desprotegido e susceptível aos agentes climáticos, como detalhado por Carvalho (2008). Quando o solo tem manejo inadequado, a exposição a esses agentes é maior, favorecendo o empobrecimento do solo, principalmente em encostas íngremes, com pastos para o rebanho bovino (DIAS-FILHO, 2012). Além disso, a implantação de monoculturas, ano após ano, é outro aspecto que leva ao desgaste dos solos (LESPOCH, 2002 e 2010).

Como citado anteriormente, dependendo do preparo do solo a superfície pode ficar temporariamente desprotegida e sob as condições climáticas, resultando em processos erosivos e na produção de sedimentos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993). Por exemplo, a produção de sedimentos em área de pastagem gira em torno de 5 ton/ha.ano em plantio direto, enquanto em manejo convencional com aração e gradagens os efeitos negativos sobre o solo podem ser ainda maiores. Se o solo estiver sem cobertura e sofrer o impacto direto da água de chuva a produção de sedimentos pode chegar a 53 ton/ha.ano (FERREIRA; TOKARSKI, 2007).

Segundo a Agenda 21 (2000), o levantamento produzido em 1994 pelo WWF/Brasil que é uma organização não governamental, que atendeu uma demanda do governo do estado de Goiás, mostrou que as perdas média de solo em cultura de grãos na área de Cerrado está em torno de dez quilos por quilo de grão produzido em função da erosão hídrica. Isso gera uma perda de fertilidade do solo, seja pelo assoreamento ou pela poluição de bacia hidrográfica (CAMPOS et al, 1995).

Klink e Machado (2005) explicam que a degradação do solo pode surgir a partir de um manejo deficiente do solo e, conseqüentemente, a erosão pode ser alta, como por exemplo, nos plantios convencionais de soja, onde a perda da camada superficial do solo é em média de 25 ton/ha.ano. As práticas de conservação como o plantio direto podem

reduzir a erosão em 3 ton/ha.ano. Isso mostra que, aproximadamente 45.000 km<sup>2</sup> da área do Cerrado pode estar comprometida e sujeita aos agentes intempéries.

Áreas com cultivo da cana-de-açúcar também está sujeita as perdas de solo e a produção de sedimentos, dependendo do tipo de solo, do manejo, da época de plantio e do preparo do solo. Entretanto, no primeiro ano do plantio e devido à movimentação do solo para o plantio da cultura, a produção de sedimentos pode chegar a 49 ton/ha.ano. Nos anos seguintes a média de sedimento fica em torno de 16,4 ton/ha.ano (ROSSETTO, 2004).

Comparativamente com outras culturas como a soja e o milho, De Maria e Dechen (1998) reportam uma estimativa da produção de sedimentos em área de plantio sob dois tipos de solos: os Latossolos e os Argissolos. Os autores constataram que a soja tem uma perda de solo equivalente a 22,6 ton/ha.ano e 63,0 ton/ha.ano respectivamente, se plantada no mês de outubro. Enquanto o plantio de milho no mesmo mês pode chegar a 11,5 ton/ha.ano e 32,0 ton/ha.ano, respectivamente. Já para esse mesmo cultivo realizado em dezembro, com elevada precipitação, os índices de sedimentos podem ser maiores com 15,1 ton/ha.ano e 42,1 ton/ha.ano, respectivamente. E as estimativas para áreas com plantio direto, como milho, podem reduzir esses índices para 2,6 ton/ha.ano e 7,4 ton/ha.ano, respectivamente. O solo descoberto tem uma produção de sedimentos expressiva de 122,3 ton/ha.ano sobre os Latossolos e nos Argissolos de 340,8 ton/ha.ano.

O resultado presente na pesquisa de Dedecek (1986) mostra que o índice de produção de sedimentos em condições ambientais do Cerrado foi caracterizado em diferente situação de manejo de cultivos e regime de chuva (média 1.243 mm). O cultivo do milho no plantio convencional teve uma produção de sedimentos superior aos demais cultivos, com cerca de 29,41 ton/ha.ano. Enquanto o arroz e a soja com mesmo manejo convencional tiveram uma produção de sedimento equivalente a 7,11 ton/ha.ano e 8,08 ton/ha.ano, respectivamente. A soja no experimento com diferentes manejos teve índices menores de produção de sedimento no plantio direto (5,05 ton/ha.ano) do que no manejo sem palha (6,0 ton/ha.ano). No entanto, o solo descoberto indicou elevada produção de sedimentos (52,66 ton/ha.ano) em relação aos cultivos. E a pastagem perene teve menor capacidade erosiva (0,15 ton/ha.ano). Portanto, permite entender que a cobertura do solo e a prática de manejo do solo são fatores determinantes no controle de erosão. É importante salientar que as observações de produção de sedimentos realizado por Dedecek foram obtidas em terraço, numa parcela de 22 m<sup>2</sup> e declive de 5,5%.

No entanto, é bom considerar que na sucessão do sistema de cultivos, os solos tratados com o manejo de plantio direto apresentaram mais favoráveis à condutividade hidráulica, sendo um fator determinante em relação aos outros manejos (SANTOS et al., 2015). Trata-se de estratégia que pode ser empregada na adoção de prática agrícola para reposição de matéria orgânica, aumentar a retenção e infiltração da água no solo.

Para as áreas de Cerrado, o preparo do solo é geralmente efetuado na época seca, com diferentes práticas de manejo. No preparo convencional envolve uso de uma ou duas gradagens, que favorece a formação de torrões e pode acarretar em dois problemas: a necessidade de várias gradagens niveladoras para destorroar o solo e, conseqüentemente, a formação de uma camada subsuperficial compactada, tornando o solo altamente suscetível a erosão hídrica, no retorno das chuvas (DEDECEK, 1986; EMBRAPA, 1999).

Cabe destacar que a causa principal da erosão hídrica nos terrenos cultivados resulta da ação da chuva diretamente no solo exposto. Assim, a quantidade final de sedimento em um dado local irá depender da combinação do poder da chuva de causar erosão no solo (erosividade) e da capacidade do solo de resistir à ação da chuva (erodibilidade), como citado anteriormente por Camapum de Carvalho et al. (2006).

A erodibilidade é uma propriedade do solo que representa o efeito integrado dos processos, que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e ao transporte de partículas, ou seja, a susceptibilidade ou predisposição do solo à erosão hídrica. Porém, as propriedades do solo (distribuição e tamanho das partículas, estabilidade estrutural, teor de matéria orgânica, natureza dos minerais de argila e constituintes químicos) influenciam nesses processos (CASTRO et al., 2011).

De acordo com esses autores, os solos do Cerrado passaram por mudanças tecnológicas nas últimas décadas e atualmente apresentam-se mais atrativos, diante do contexto do cenário nacional em relação a produção agrícola. Essa mudança se deu pela utilização de corretivos químicos, irrigação artificial e a mecanização da agricultura. Esta evolução tecnológica propiciou um uso mais intenso e se torna necessário um estudo mais profundo das características dos solos para um manejo adequado, buscando reduzir impactos negativos. Porém, nem todas as classes de solos aceitam as mesmas técnicas de manejo, pois as propriedades físicas de cada tipo de solo precisam ser analisadas e levadas em consideração no planejamento de utilização.

A literatura representada por Silveira (1998), Tucci (1998), Guerra e Mendonça (2004), Bertoni e Lombardi Neto (1993), Camapum de Carvalho et al. (2006), Guerra (1998), Guerra (2005), Carvalho (2008), Suguio e Bigarella (1990), Dedeczek (1986),

Lespsch (2002 e 2010), Côrreia et al. (2016), documentos da EMBRAPA Cerrado e outros, abrangem conceitos, processos e formas de manejo e esclarece a dinâmica dos fatores naturais e antrópicos. Portanto, compreender todos esses processos e fatores em conjunto pode auxiliar no planejamento e na gestão territorial dos recursos naturais do bioma Cerrado.

### 2.3 MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DE BACIA HIDROGRÁFICA

Com advento dos computadores na década de 1960 e a inovação tecnológica na década 1970, originou em uma nova dinâmica que se consolidou no tempo-espaço extrapolando as fronteiras do espaço geográfico (DAMBRÓS, 2020). O campo da hidrologia prosseguiu na experimentação de técnicas numérica e estatística para o desenvolvimento de modelos hidrológicos semiconceituais, que agregaram o conhecimento de diferentes processos na bacia hidrográfica para que em uma determinada escala simulasse matematicamente os principais processos do ciclo hidrológico (TUCCI, 1997 e 1998).

Nesse caso, os primeiros modelos que tornaram conhecidos foram: o *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model* - SSARR e o *Stanford Watershed Model* - SWM, HEC-1, criado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, para modelagem de eventos de tempestade única incluindo estimar os fluxos dos cursos d'água como resultado das chuvas, perdas e hidrograma (TEIXEIRA, 2010). Em 1974, surgiu o modelo ILLUDAS que é um simulador de área de drenagem urbana (TERSTRIEP; STALL, 1974); o *Systeme Hydrologique Europeen* - SHE (ABBOTT et al., 1986).

Com base no aprimoramento de técnica matemática e no aumento da capacidade de computadores (TUCCI, 1997), surgiram inovações que integraram imagem de satélite para gerenciamento ambiental, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) que é uma ferramenta fundamental para manipulação de informações contidas no sensoriamento remoto (GARRIDO, 2003) e o desenvolvimento de modelos hidrológicos de simulação, gerando avanço nas pesquisas relacionadas aos recursos hídricos, análise qualitativa e quantitativa dos processos hidrológicos (MELO et al., 2008).

Os sistemas de informação geográfica são sistemas destinados à aquisição, armazenamento, manipulação, análise, simulação, modelagem e apresentação de dados referenciados espacialmente. Portanto, são ferramentas que melhoram a eficiência e efetividade do tratamento de informação de aspectos e eventos geográficos para interesse

de um planejamento ambiental integrado (FLORENZANO, 2011). Tendo outras tarefas úteis, como o armazenamento de grande quantidade de informação geográfica, facilita a visualização e o acesso às informações, além de possibilitar a reunião de diversas fontes de dados (gráficos, planilhas, textos, mapas e imagens) num único ambiente (LONGLEY et al., 2013).

O sensoriamento remoto orbital é a prática de obter informações sobre a superfície terrestre por meio de imagens adquiridas do espaço, utilizando radiação eletromagnética refletida ou emitida, em uma ou mais regiões do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2011). O caráter sintético e multitemporal das imagens torna o sensoriamento remoto capaz de fornecer informações fundamentais sobre os alvos, incluindo seu posicionamento, monitoramento e atualização dos dados (LIU, 2006). Portanto, aplicação de técnica do sensoriamento remoto é fundamental para análise, por exemplo, no estudo e monitoramento de queimadas, desmatamento, erosão e escorregamento de encostas, inundação, florestas tropicais, recursos minerais, ambientes aquáticos, urbanos e rurais entre outros, com a finalidade de planejar, identificar, classificar e interpretar mapeamentos de áreas, onde ocorreram modificação de uso e ocupação do solo (FLORENZANO, 2011).

O modelo matemático de simulação semi-distribuído com interface com o SIG, melhorou a representatividade espacial de uma bacia hidrográfica e de suas sub-bacias (TUCCI, 1998), devido a sua capacidade e facilidade em manipular uma grande quantidade de dados. As variáveis que são utilizadas como dados de entrada nesses modelos, são: tipo e uso do solo, cobertura vegetal, relevo e distribuição de feições hidrológicas e outros (SANTOS, 2015).

Essa junção de métodos possibilitou ao geógrafo e aos demais profissionais da ciência incorporar as técnicas de experimentação numéricas e estatísticas nas pesquisas hidrológicas iniciarem suas próprias pesquisas, em conjunto com as agências governamentais de países desenvolvidos e subdesenvolvidos (GASSMAN et al., 2007). Desse modo, alguns modelos hidrológicos são integrados as informações de características física e atributos antrópicos, discretização em sub-bacia com a função de melhorar o desempenho e a representatividade espacial e temporal do comportamento de bacias hidrográficas (TUCCI, 2005; RENNO; SOARES, 2000).

De acordo com Garrido (2003) os modelos matemáticos de simulação utilizados na área de recursos hídricos podem ser identificados de acordo com algumas finalidades, como:

Os modelos de chuva-vazão: HEC-1 (*Hydrologic Engineering Center*), TR-20 (*Computer Program for Project Formulation Hydrology - Technical Release 20 - U.S. Soil Conservation Service*), ILLUDAS (*Illinois Urban Drainage Area Simulator - Illinois State Water Survey*), DR3M (*Distributed Routing Rainfall-Runoff Model - U. S. Geological Survey*).

Os modelos de simulação contínua de vazão: SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins - U.S. Department of Agriculture*); PRMS (*Precipitation-Runoff Modeling System - U.S. Geological Survey*); SHE (*Système Hydrologique Européen - Danish Hydraulic Institute, U.K. Institute of Hydrology e SOGREAH*) e IPH II, III, IV e IPHMEN (*Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*).

Os modelos de fluxo-hidráulico: HEC-2 (*Hydrologic Engineering Center*), WSPRO (*Water-Surface PROfile - U.S. Geological Survey*), FLDWAV-NWS (*NWS National Weather Flood Wave Model - U. S. National Weather Service*) e o DHM (*Diffusion Hydrodynamic Model - Computational Hydrology Institute*).

Os modelos de qualidade da água: SWMM (*Storm Water Management Model - U.S. Environmental Protection Agency*); HSPF (*Hydrologic Simulation Program - FORTRAN - U.S. Environmental Protection Agency*), QUAL2E (*Enhanced Stream Water Quality Model - Texas Water Development Board*); WASP4 (*Water-Quality Simulation Program - U.S. Environmental Protection Agency*) e MIKE11 (*Danish Hydraulic Institute*).

E por fim, os modelos que aplicaram a tecnologia na interface do SIG, foram: AGNPS (*Agricultural Nonpoint Source Pollution Modeling System*), ANSWERS (*Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation*) SWRRBWQ (*Simulator for Water Resources in Rural Basins - Water Quality*), MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

Tucci (2005) e Rennó e Soares (2000) explicam que os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos e formas, como: os tipos de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos, físico ou matemáticos), as relações entre as variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), as relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos). E descrevem resumidamente as diferentes classificações:

- Físicos: são modelos que incluem tecnologias análogas e princípios de semelhança aplicados a modelos em escalas reduzidas.
- Matemáticos: procuram representar o comportamento do sistema por meio de equações matemáticas.
- Conceituais: baseiam-se nas concepções teóricas do ciclo hidrológico para caracterizar e interpretar os fenômenos, em vez de descrever a ocorrência empírica do processo físico.
- Empíricos: ajustam os valores calculados aos dados observados através de funções sem considerar processos físicos envolvidos.
- Concentrados: quando não levam em consideração a variabilidade espacial dos parâmetros no interior do sistema, considerando os dados de entrada e os parâmetros representativos como valores médios e geralmente utilizam só o tempo como variável independente.
- Distribuídos: quando as variáveis e parâmetros variam espacialmente no interior do sistema.
- Contínuos: capazes de modelar os fenômenos e processos ao longo de um período e de forma contínua.
- Eventos: modelos que simulam um evento individual de curta duração, dadas as condições iniciais.

Rennó e Soares (2000) alertam sobre a escolha do modelo, pois deve ser feita com base na aplicação e objetivo que deseja atingir e da disponibilidade de dados, uma vez que, um mesmo processo a ser modelado pode ser representado de diferentes maneiras e alguns são mais apropriados para determinados casos. Dessa forma, não existe um modelo único que seja o melhor e sim aquele que pode descrever melhor um fenômeno.

Essa complexidade dos modelos matemáticos permitem compreender o funcionamento do balanço hídrico (RENNÓ; SOARES, 2000), por meio de algoritmos e descrever os principais processos baseados em princípios físicos, que pressupõe os diversos fenômenos (precipitação, evaporação e infiltração), variáveis (vazão, sedimentos) e os parâmetros (área da bacia hidrográfica). As informações são armazenadas no banco de dados do modelo, para que posteriormente, possam ser interpretadas e explicadas de forma aceitável os processos após a simulação, como: escoamento superficial, condutividade hidráulica (taxa de infiltração), escoamento em

rios, canais e reservatórios, evaporação e evapotranspiração, interceptação vegetal, retorno ao fluxo de aquíferos rasos e aquífero profundo entre outros (GASSMAN et al., 2007; TUCCI, 2005).

Em sentido mais amplo, o modelo hidrossedimentológico pode ser definido como um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou comportamento de um sistema físico, pelo qual se procura explicar ou prever dentro de uma teoria científica as propriedades de um sistema, como por exemplo, preservar as principais características físicas de uma bacia hidrográfica mesmo havendo algumas limitações existentes no modelo (TUCCI, 2005).

De acordo com esse mesmo autor, além de entender o comportamento do sistema o modelo também pressupõe avaliar o comportamento futuro de uma bacia hidrográfica, através de previsão. Esse cenário trata da simulação do sistema pelo modelo a partir de parâmetros ajustados, que resulta na quantificação de respostas a diferentes entradas, podendo destacar, por exemplo, modificações do uso do solo, quantidade e qualidade da água e de operações de reservatórios, cargas de sedimentos resultantes de diferentes intensidades de precipitação entre outros eventos capazes de ser estatisticamente possíveis de mensurar.

Silva e Rosa (2017) ressaltam que os modelos hidrossedimentológicos têm importante papel na simulação de situações hipotéticas para o conhecimento do comportamento dos processos hidrológicos de cenários futuros e ou hipotéticos. A simulação de diversos cenários hipotéticos pode ser utilizada de modo rápido e com menor custo de execução em relação à pesquisa experimental e de forma aceitável. E os resultados da simulação permite entender as possíveis consequências de uma ou várias situações ocorridas em uma determinada bacia hidrográfica.

Enfim, o modelo hidrossedimentológico tornou-se uma ferramenta importante para atender as demandas e as necessidades das diversas áreas do conhecimento e dos mais variados tipos de projetos ambientais, como: urbano, energia, transporte, produção agrícola, planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos etc. (GASSMAN et al., 2007; TUCCI, 2005).

### **2.3.1 Estrutura e aplicação do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)**

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - *Agricultural Research Service*) e pelo Texas - *A&M University* (ARNOLD et al., 1998). Esse modelo permite simular e

prognosticar o impacto das práticas de manejo de uso do solo (cenários) sobre os recursos hídricos, prever a vazão e a produção de sedimentos, de produtos agroquímicos (fertilizantes, inseticidas e herbicidas) que atinge o solo e a qualidade da água, escoamento e outros complexos que afetam as bacias hidrográficas, através de múltiplas análises em um longo período de tempo. Além dessas funções exibidas, o modelo possui ainda um módulo de produção de nutrientes e pesticidas e outro de produção de neve (NEITSCH et al., 2011).

O desenvolvimento do modelo SWAT é uma continuação da experiência da modelagem do Serviço de Pesquisa Agrícola USDA-ARS (*Agricultural Research Service*) que envolveu um período de pesquisa de aproximadamente 30 anos. O atual modelo decorre diretamente do Simulador de Recursos Hídricos em Bacias Rurais (SWRRB), submetido a modificações e ajustes para melhoria e desempenho do sistema incluindo componentes-chave que contribuiu com modelo USDA-ARS (ARNOLD et al., 2012).

Dentre as melhorias no surgimento do SWAT estava incluído: o escoamento superficial, a discretização da bacia hidrográfica, previsão hidrológica, o método de taxa de escoamento de pico melhorado. Além do cálculo de perdas de transmissão e a adição de vários novos componentes, como: fluxo de retorno de água subterrânea, reservatório de armazenamento, o submodelo de crescimento de culturas, um gerador de tempo e transporte de sedimentos, a incorporação do destino dos pesticidas, componente de tecnologia opcional do Serviço de Conservação do Solo (SCS) para as estimativas das taxas máximas de escoamento e as recentes equações de produção de sedimento (GASSMAN et al., 2007; NEITSCH et al., 2011).

As dificuldades encontradas no SWRRB eram em relação a divisão da bacia hidrográfica que se limitava a dez sub-bacias e o modelo traçava a rota de transporte da água e de sedimento da sub-bacia diretamente para a descarga da bacia. Com essas limitações, desenvolveram um outro modelo chamado de ROTO (*Routing Outputs to Outlet*), que assumiu os resultados de diversas análises do modelo SWRRB, superando assim suas limitações como traçar os itinerários dos fluxos e reservatórios. No entanto, a entrada e a saída de vários arquivos do SWRRB exigiam uma maior capacidade de armazenamento de dados no computador. Para superar os desafios do sistema, os modelos SWRRB e ROTO foram fundidos num único modelo dando origem ao modelo SWAT na década 1990 (NEITSCH et al., 2011; ARNOLD et al., 2012).

Fruto dessa junção, o modelo SWAT incorporou grande parte dos avanços contidos nos modelos anteriores, como: ARS, incluindo o modelo CREAMS de Componentes químicos, Escoamento e Erosão do Sistema de Gestão Agrícola, o modelo GLEAMS de Efeitos de Cargas no Subsolo no Sistema de Gestão Agrícola e o modelo EPIC (*Environmental Impacts Policy Climate*) de Impactos Ambientais do Clima, que estava originalmente denominado de Cálculo de Impacto da Produção de Erosão e o modelo de Clima Integrado de Política Ambiental (Figura 2). A partir desses ajustes, o modelo SWAT tornou-se uma importante ferramenta de simulação de processos hidrossedimentológicos, permitindo ampliar a capacidade de lidar com uma variedade de análise referente aos problemas de gestão de bacias hidrográficas (GASSMAN et al., 2009; NEITSCH et al., 2011; FERRIGO, 2014).

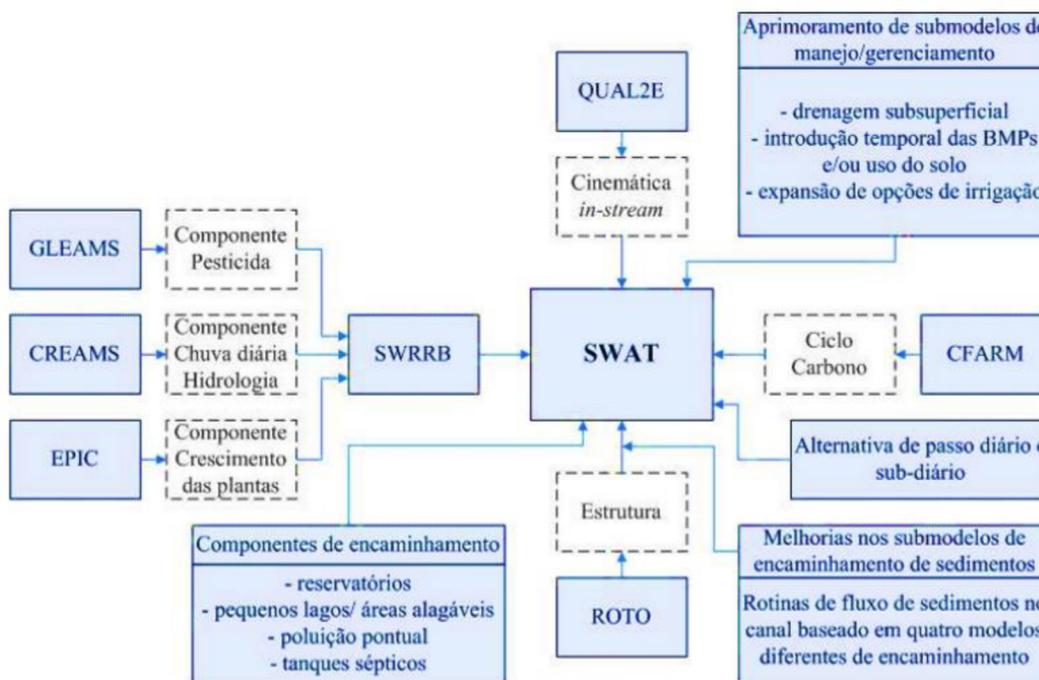


Figura 2 - Estrutura do modelo SWAT. Adaptado de Ferrigo (2014)

O lançamento do modelo SWAT teve início nos anos 90, com a primeira versão lançada do SWAT94.2, incorporando as Unidades de Respostas Hidrológicas Múltiplas (HRUs) e operando com interface do SIG (OLIVERA et al., 2006). O modelo foi submetido a revisões, inspeções contínuas e a expansão de sua capacidade, desempenho e ajustes do sistema, posteriormente surgiram outras versões subsequentes, como: SWAT96.2, SWAT98.1, SWAT99.2, SWAT2000, SWAT2009 (NEITSCH et al., 2011; WINCHELL et al, 2010), SWAT2012 e a última atualização do modelo é o SWAT+

(Editor 2012.10.23 de 08 de junho de 2020) está disponível para *download* no site oficial do modelo (<http://swat.tamu.edu/>), além do manual do usuário e documentação teórica detalhada.

O SWAT é um modelo abrangente e é capaz de simular longos períodos de forma contínua em intervalos de tempo diário, mensal e anual. É semi-distribuído, onde a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias de modo a refletir sobre os distintos uso e cobertura do solo, tipos de solo e topografia. A modelagem é baseada em processos físicos que prevê os efeitos das ações do ciclo hidrológico, de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos ou nutrientes, produtos químicos agrícolas (pesticidas), tanto em pequenas quanto em grandes bacias hidrográficas (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; GASSMAN et al., 2007).

O modelo pode ser usado para avaliar os efeitos de decisões de gestão alternativas sobre os recursos hídricos e a poluição de fontes não pontuais em grandes bacias. Os principais componentes hidrológicos incluem o clima, hidrologia, tipos de solo, temperatura, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e manejo da terra em nível de sub-bacia. Porém, não é um modelo concebido para simular detalhadamente eventos únicos, como cálculo de propagação de cheias (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2005; SRINIVASAN; ARNOLD, 1994; GASSMAN et al., 2007).

Observa-se que a aplicação do modelo SWAT vem cada vez mais expandindo na comunidade científica em diversas áreas (KHALIDA et al., 2016; ABBASPOUR et al., 2015; FARAMARZI et al., 2013; ABBASPOUR et al., 2007; FARAMARZI et al., 2007; JHA et al., 2006; BEKIARIS et al., 2005; GASSMAN et al., 2003). Muitas das aplicações foram impulsionadas pelas necessidades de várias agências governamentais, principalmente nos Estados Unidos e na União Europeia que exigem avaliações amplas e precisas sobre as mudanças antropogênicas, climáticas e outras influências que interferem sobre os recursos hídricos, apresentando resultados eficientes para o planejamento ambiental (GASSMAN et al., 2007).

Uma das primeiras e grandes aplicações realizadas pelo SWAT foi ajustar ao Modelo de Unidade Hidrológica dos Estados Unidos (HUMUS) a implementação de análises do USDA para avaliar a Lei de Conservação de Recursos dos Estados Unidos em 1997. Este sistema foi usado para simular os impactos da perda hidrológica e/ou de poluentes, no uso da água agrícola, na convergência do sistema de cultivo e outros (GASSMAN et al., 2007).

A modelagem do SWAT trabalha em três níveis de escala espacial no processo de simulação: bacia hidrográfica, sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Units* - HRU). A primeira é representada pelo delineamento espacial da bacia hidrográfica. A segunda representação é por sub-bacias que estão hidrologicamente conectadas e definidas por delineamento automático (dados meteorológicos, coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica e de rede de drenagem). Já a terceira consiste na discretização de uma bacia hidrográfica, dividindo-a em múltiplas sub-bacias, posteriormente em HRU, o que o caracteriza como um modelo semi-distribuído (GASSMAN et al., 2007; RENNÓ; SOARES, 2000).

A divisão em múltiplas sub-bacias ocorre dentro da unidade de paisagem devido à heterogeneidade, ou seja, reúne combinações únicas do tipo de solo, uso do solo, cobertura vegetal e declividade, possibilitando ao modelo refletir sob os diferentes comportamentos localizados no viés da vazão, escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subsuperficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração, dentre outras condições hidrológicas para os diferentes uso e tipos de solo (BERTINI, 2014; SANTOS, 2015) e predizer a quantidade de carga de água, sedimentos, nutrientes, pesticidas e outros que escoam para o canal principal em cada sub-bacia, posteriormente os fluxos escoam das sub-bacias para o exutório da bacia principal.

A HRU pode ser representada pela predominância, portanto, a escolha pode ser definida pelo usuário. Essa escolha considera a sub-bacia hidrologicamente homogênea pelo uso dominante do uso do solo, tipo de solo e topografia (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994; GASSMAN et al., 2007). Assim, obtêm-se nos resultados hipóteses sobre a conexão do fluxo de água e seus constituintes sobre uma superfície e/ ou subsuperfície, predizendo os possíveis impactos (TUCCI, 1998).

Nesse contexto, o balanço hidrológico global é simulado para cada HRU, incluindo: a interceptação da precipitação pelo dossel, particionamento da precipitação, escoamento superficial e infiltração, redistribuição da água no perfil do solo, evapotranspiração, retorno ao fluxo de aquíferos rasos e aquífero profundo (GASSMAN et al., 2007).

Srinivasan e Arnold (1994) explicam que as distribuições das HRUs em sub-bacias são complexas e não existe interação entre elas, pois as cargas (escoamento, sedimentos, nutrientes e outros.) de cada unidade de resposta são calculadas separadamente e depois somadas em conjunto para determinar as cargas totais da bacia. Portanto, o benefício dessas seria no sentido de aumentar a precisão para a predição de

cargas a partir da sub-bacia e é só em nível de sub-bacia que as relações espaciais podem ser especificadas. Além disso, as dimensões reais das áreas das sub-bacias ficam armazenadas no banco de dados do modelo (GASSMAN et al., 2007).

O modelo SWAT oferece uma interface amigável em ambiente SIG (OLIVERA et al., 2006), facilitando extrair dados de entrada para modelagem de uma bacia hidrográfica (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994). Essa facilidade é permitida em função de ser acoplada aos principais *softwares* GIS para extensões ArcSWAT (ArcGIS) e QSWAT (QGIS), este último de domínio público. Essas extensões possibilitam a integração de bancos de dados, elaboração e edição de cenários climatológicos e de uso do solo, análise e representação espacial das variáveis simuladas concedendo maior agilidade e facilidade na organização de dados.

A etapa da modelagem permite editar dados de entrada, como: hidrometeorológico, modelo digital de elevação, tipos de solo e uso do solo, posteriormente delimitação da bacia, balanço hídrico e os processos hidrossedimentológicos (NEITSCH et al., 2011), como mostra a Figura 3.

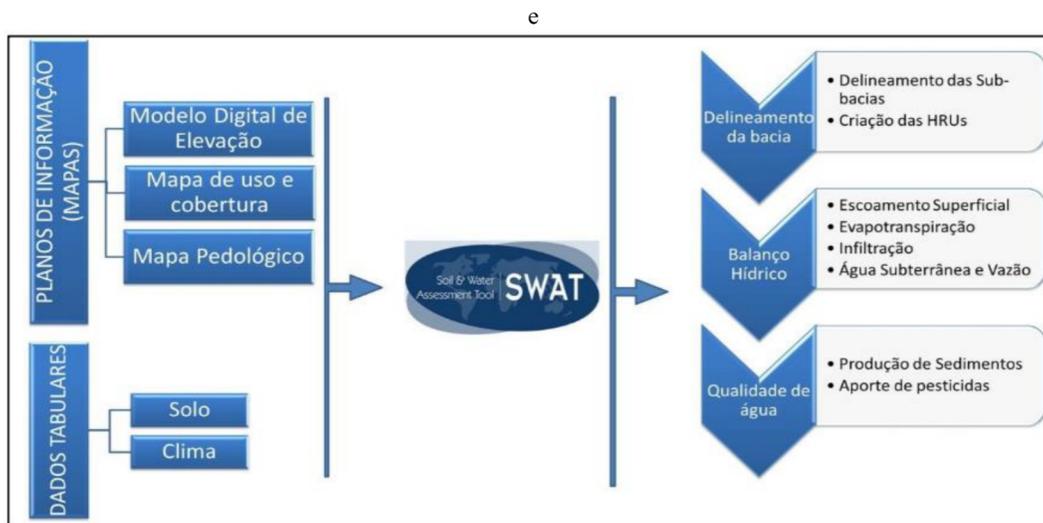


Figura 3 - Dados de entrada no SWAT e resumo de processos. Fonte: Adaptado de Carvalho (2014).

O SWAT constitui-se uma ferramenta eficiente para modelagem em grandes bacias hidrográficas (COLLISCHONN; TUCCI, 2001), o que possibilita simular os processos do ciclo hidrológico e estão separadas por duas principais divisões: a fase do terreno e a fase aquática. A primeira é dita como a fase da superfície que controla o balanço hídrico (ciclo hidrológico), citados anteriormente. Já a segunda fase refere-se aos processos da movimentação da água, sedimentos, nutrientes e carga de pesticidas que

serão carreadas para rede de drenagem, ou seja, do ponto de lançamento até o exutório da bacia. A estimativa da produção de sedimentos, o modelo calcula através da equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE) (ARNOLD et al. 1998). Como mostra a Figura 4.

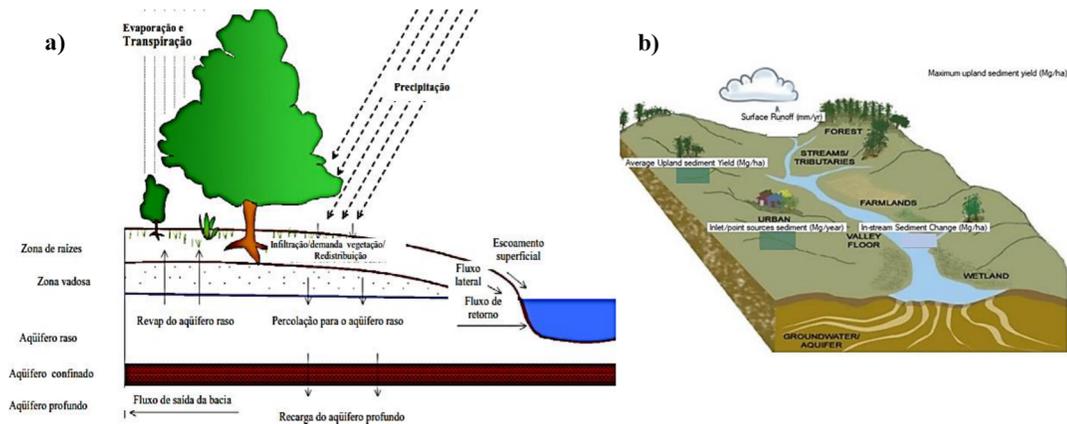


Figura 4 - Representação da simulação hidrossedimentológica no modelo SWAT: a) ciclo hidrológico; e b) os processos hidrossedimentológicos. Fonte: Adaptado do Modelo SWAT 2012.

Nesse contexto da modelagem, o escoamento e a erosão do solo estão diretamente relacionados a todos os processos do ciclo hidrológico. Por essa razão, modelar matematicamente esses processos implica na consideração de parâmetros físicos do sistema da bacia, tais como: a condutividade hidráulica, capacidade de infiltração, tensão do solo, as relações funcionais entre estas e a umidade do solo. Permitindo assim, ao usuário definir práticas de gerenciamento que ocorrem em cada HRU (SANTOS, 2015).

O modelo SWAT pode estar vinculado a diversas finalidades, isso vai depender do objetivo de cada trabalho. Uns visam avaliar o comportamento hidrológico, outros estimar a produção de sedimentos baseando-se em diferente uso do solo, outros ainda, podem estar interessados em simular o efeito das mudanças climáticas ou desflorestamento. O modelo pode também ser aplicado para a simulação de cenários hipotéticos de uso do solo na bacia hidrográfica, para simular e avaliar o comportamento hidrossedimentológico através de previsão (CARVALHO, 2014).

Abbaspour et al. (2007) demonstram a eficiência do modelo a partir dos aspectos especificados que atingem o solo, como a mudança no uso do solo, qualidade da água, escoamento, sedimentos, fertilizantes, inseticidas e herbicidas e outros. Existe um número crescente de aplicações do modelo em vários estudos específicos em diferentes escalas. Por exemplo, o Modelo de Unidade Hidrológica dos Estados Unidos (HUMUS) usou o

modelo SWAT para simular todo o território dos EUA, com medição de vazão de 6.000 estações fluviométricas. Esse estudo foi então estendido no Projeto de Avaliação de Efeitos de Conservação do USDA (CEAP).

Abbaspour et al. (2015) aplicaram o modelo SWAT para doze grandes bacias fluviais na Índia, objetivando quantificar o impacto das mudanças climáticas na hidrologia. Simularam também a hidrologia do continente africano nessa ferramenta em um único projeto e calcularam os recursos hídricos, numa resolução espacial em nível de sub-bacia e intervalos de tempo mensais. Faramarzi et al. (2007) utilizaram o modelo do SWAT para simular as descargas hidrológicas dos cursos d'água no país no Irã, levaram em consideração as barragens e as práticas de irrigação. Os resultados foram bastante satisfatórios para a maioria dos rios nesse país. Em um trabalho subsequente, Faramarzi et al. (2013) utilizaram o mesmo modelo para analisar o impacto das mudanças climáticas e disponibilidade hídrica no continente africano ao nível da sub-bacia, para o período de 2020–2040.

O site oficial fornece ao usuário apoio e acesso para todos os *softwares* de suporte, artigos de periódicos selecionados e outras publicações. Existe assim, um banco de dados do SWAT com informações das conferências anteriores e as que irão ocorrer futuramente como: workshops e um boletim informativo por e-mail chamado *SWATbytes*. A equipe central de desenvolvimento e suporte ao usuário do SWAT está localizada no Laboratório de Pesquisas de Solo e Águas do USDA-ARS e no *AgriLife Blackland Research Center* em Temple, no Texas. O desenvolvimento do modelo SWAT ocorre em outras regiões de pesquisa na América do Norte. Além disso houve a criação de vários grupos de usuários em todo o mundo, como no sudeste da Ásia, África, Irã e Brasil, incluindo nessa discussão o SWAT, ArcSWAT, VizSWAT, SWAT-CUP (ARNOLD et al., 2012).

### **2.3.2 Calibração do modelo SWAT e o programa SWAT-CUP**

A Calibração do modelo SWAT e o programa SWAT-CUP é uma importante etapa da modelagem. Bonumá (2011) explica que o modelo SWAT foi desenvolvido com base em um extenso banco de dados de solos, topografia, culturas, manejo e clima dos Estados Unidos da América. Portanto, quando aplicado em regiões com escassez de dados, cujas características de solos, plantas e clima contradizem com a realidade norte-americana, torna-se imprescindível a realização da calibração dos parâmetros do modelo.

A calibração do modelo tem por objetivo principal ajustar os valores simulados na bacia hidrográfica, com base em dados observados em determinados pontos da bacia, podendo ser calibrado pela vazão, sedimentos e qualidade da água (ABBASPOUR et al, 2007). Os parâmetros de entrada no modelo são baseados nos processos e devem ser mantidos dentro de um intervalo de incerteza realista para uma determinada bacia hidrográfica ou sub-bacia. Requer do usuário um amplo conhecimento da área de estudo, em virtude das características climáticas, tipos de solo, uso do solo, capacidade de infiltração, condutividade hidráulica, umidade do solo entre outros (BLAINSKI et al., 2017).

Conforme Arnold et al. (2012), o primeiro passo para a calibração é separar o recorte temporal da série de dados observados em período de calibração e outro para validação. Sendo que no primeiro, os dados são ajustados até que se tenha uma resposta satisfatória de saída, ou seja, podem variar na bacia de estudo para que os dados simulados se aproximem dos dados observados. Uma vez determinados os parâmetros mais sensíveis que permite esta aproximação, o modelo é aplicado no segundo período para validar os resultados.

Fernandes (2015) relata que no início da simulação ocorrem grandes incertezas, devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente a umidade do solo. E deve ser considerado um período de aquecimento de três anos, conhecido como *warm up*, com isso, ao iniciar a simulação as variáveis estudadas devem estar livres da influência das condições iniciais.

O SWAT é constituído por um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo, que requer um grande número de parâmetros de entrada, o que complica a parametrização e calibração do modelo. Nesse caso, diversas técnicas de calibração foram desenvolvidas para o modelo, incluindo procedimentos de calibração manual e procedimentos automatizados usando o método de evolução complexa e outros métodos comuns. Esse processo demanda amplo conhecimento em virtude do grande número de parâmetros não mensuráveis que precisam ser estimados (BLAINSKI et al., 2017).

Os modelos distribuídos em grande escala são particularmente difíceis de calibrar e de interpretar a calibração devido à grande incerteza do modelo. Dentre as ferramentas para calibrar existe o programa SWAT-CUP (*Calibration Uncertainty Procedures*), que foi desenvolvido recentemente e fornece uma estrutura de tomada de decisão que incorpora uma abordagem semiautomática, usando calibração manual e automatizada e incorporando análise de sensibilidade e incerteza (ARNOLD et al., 2012).

O SWAT-CUP é um programa desenvolvido por Abbaspour (2009). Este programa é vinculado ao simulador SWAT que processa de forma rápida a calibração, análise de sensibilidade e a incerteza. Possui rápido processamento e possibilita a escolha de cinco métodos, que são: SUFI2, GLUE, ParaSol, McMc e PSO. De acordo com o autor, qualquer um dos procedimentos pode ser usado para executar a análise de calibração e incerteza do modelo SWAT e possui módulos gráficos para observar resultados de simulação, intervalo de incerteza, gráficos de sensibilidade e relatórios estatísticos. E estão descritos de forma detalhada no manual publicado por Abbaspour (2011).

Dentre os cinco métodos, o algoritmo SUFI2 analisa a sensibilidade dos parâmetros e tem sido o mais aplicado nos estudos dos biomas Caatinga (SANTOS, 2015) e do Cerrado (FERRIGO, 2014; CASTRO, 2013; CARVALHO (2014), CHAVES (2016), SALLES (2012), SARMENTO (2010), SILVA (2016) e VEIGA (2014)). Emprega-se esse algoritmo para a calibração automática, após várias iterações pode-se identificar os melhores parâmetros a partir da função objetivo escolhida (eficiência de Nash e Sutcliffe) e pela estatística do coeficiente de determinação de Pearson ( $R^2$ ) (ARNOLD et al., 2012).

Esse algoritmo envolve o grau em que todas as incertezas são contabilizadas e quantificadas por uma medida referida pelo fator-P, que é a porcentagem de dados medidos de um parâmetro que conduz a 95% de incerteza de previsão (95PPU<sup>3</sup>). Outra medida que quantifica a força de uma análise de calibração e incerteza é o fator-R, que é a espessura média da banda de 95PPU dividida pelo desvio padrão dos dados medidos. Portanto, o SUFI2 procura agrupar a maioria dos dados medidos com a menor faixa de incerteza possível (Figura 5). Teoricamente, o valor do fator-P varia entre 0 e 100%, enquanto o fator-R varia entre 0 e infinito. Um fator-P de 1 e um fator-R de zero é uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos (KHALID et al., 2016). A descrição do algoritmo SUFI-2 pode ser consultada em Abbaspour et al (2007).

---

<sup>3</sup> *Percent Prediction Uncertainty*

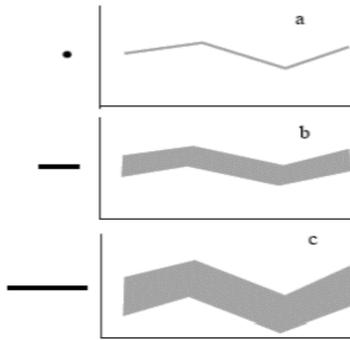


Figura 5 - Relação entre as incertezas dos parâmetros e a incerteza na simulação: (a) mostra um valor de parâmetro único, indicado por um ponto, que leva a uma resposta de um modelo único. (b) apresenta na região sombreada a propagação da incerteza em um parâmetro que conduz aos 95PPU. (c) à medida que aumenta a incerteza dos parâmetros, a incerteza de saída também aumenta (não necessariamente de forma linear) (SANTOS, 2015). Fonte: Abbaspour et al. (2007).

Santos (2015) explica que para a utilização do SUFI2 existem algumas definições básicas que o usuário deve seguir, como: a escolha dos parâmetros que serão otimizados em conformidade com a realidade da bacia; estabelecer as faixas mínimas e máximas fisicamente significativas para os parâmetros selecionados, assim como a relação matemática que deve ser adotada para a variação dos valores dos parâmetros; realizar as iterações; a variável ou as variáveis a serem verificadas (vazão observada), incluindo a série histórica a ser considerada; e utilizar a função objetivo como referência (Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe).

No SWAT-CUP, o usuário pode ajustar manualmente os parâmetros e os intervalos entre as execuções de calibração automática. Para a análise de sensibilidade de parâmetro, o programa ajuda a focar nas análises de calibração e nas incertezas que são usadas para fornecer estatísticas para o ajuste de qualidade. É importante considerar que, durante a iteração da calibração, diferentes faixas de variação de cada parâmetro são inseridos valores de referência para atender especialmente os processos hidrológicos da bacia, onde são identificados os parâmetros que estão influenciando mais ou menos nos resultados do modelo (ABBASPOUR et al., 2007).

Arnold et al. (2012) alertam para os resultados do modelo, que devem ser analisados variando cada parâmetro e logo, fixando todos os outros. É uma forma rápida de análise, que não é incontestável pelo processo computacional. O problema nesse tipo de procedimento é que alterando-se apenas um parâmetro de cada vez, nunca se sabe se os valores dos outros parâmetros que estão fixos estariam ou não corretos.

Abbaspour et al. (2007) esclarecem que para cada iteração deve ter no mínimo de 300 a 500 simulações, que em geral, é suficiente para calibrar o modelo. Durante essa

etapa o modelo SWAT testa para cada simulação, um valor diferente que será inserido para ajustar cada parâmetro utilizado. A primeira iteração é um ajuste matemático nos parâmetros, enquanto as demais iterações dos parâmetros ajustados são compreendidas fisicamente, levando em consideração os parâmetros físicos do sistema da bacia hidrográfica.

Carvalho (2014) explica que a análise de sensibilidade é uma avaliação das magnitudes nas respostas do modelo, em função de alterações nos parâmetros de entrada. Na prática, trata-se de um procedimento para identificar os parâmetros que contribuem mais fortemente para a geração dos resultados do modelo. A etapa posterior a calibração do modelo é conduzida mais facilmente, pois se percebe que muitos dos parâmetros que não têm peso significativo na geração dos resultados serão descartados posteriormente.

Por fim, a última etapa de verificação de um modelo hidrológico é a validação dos ajustes realizados nos parâmetros. A validação se resume em executar no modelo SWAT, os valores dos parâmetros obtidos na calibração, para um período de dados diferente ao que foi utilizado na calibração dos dados observados (ARNOLD et al., 2012). Uma vez atendidos os critérios mínimos de qualidade, o modelo pode ser considerado adequado para a simulação do fluxo hidrossedimentológico em bacias experimentais (BLAINSKI et al., 2017).

Enfim, os aspectos científicos da modelagem requerem que o modelo hidrológico seja descrito de maneira transparente, de modo que a aplicação dos parâmetros seja relevante na calibração de fluxo, sensibilidade e na análise de incerteza hidrológica. As etapas são realizadas rotineiramente como parte do trabalho, para o ajuste de qualidade da modelagem. A calibração é condicional (isto é, condicionada na estrutura do modelo, entrada do modelo, suposições do analista, algoritmo de calibração, dados de calibração etc.) e não exclusivamente determinada, enquanto a análise de incerteza é essencial para avaliar a confiança de um modelo calibrado (GASSMAN et al., 2007).

### **2.3.3 Modelagem hidrossedimentológica no Brasil e no Cerrado brasileiro**

O modelo SWAT tem ganhado cada vez mais espaço no desenvolvimento de pesquisas e, nos diversos segmentos de aplicações relacionados a análise e estudos ambientais de bacias hidrográficas. Porém, alguns trabalhos não descrevem os processos de calibração e, principalmente de validação do modelo. Outros alegam a dificuldade para realizar a modelagem em função da ausência de dados medidos nas bacias modeladas

(BLAINSKI et al., 2017). Os trabalhos a seguir mostram as publicações relacionadas ao modelo SWAT, no Brasil e no Cerrado brasileiro:

Blainski et al (2017) testaram o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Negrinho, localizada no nordeste do estado de Santa Catarina. Tiveram como objetivo testar um esquema de calibração hierárquica para o modelo. Nessa calibração foi utilizado o algoritmo SUFI2 e os dados observados foram divididos em períodos de calibração e validação em que o fluxo mensal previsto, correspondeu aos valores medidos, com  $NS \geq 0,5$  e  $PBIAS < \pm 25\%$ . Quando os períodos úmidos e secos foram considerados separadamente, os valores de NS dos anos úmidos (2008 a 2012) foram maiores do que os valores do ano seco (2003 a 2007). Na validação do SWAT para uma sub-bacia com uso do solo similar, o modelo não conseguiu captar bem os picos de fluxo ( $NS = 0,0$ ), porém, os dados do balanço hídrico foi compensado ( $PBIAS = 0,1\%$ ). O estudo de caso demonstra que o desempenho da SWAT varia muito, dependendo da escala espacial e do período de calibração. Os autores recomendam para os estudos posteriores, simular cenários de uso da terra e mudança climática, usando dados espacialmente bem distribuídos e séries temporais incluindo períodos seco e úmido no processo de calibração e validação.

Aragão et al. (2013) aplicaram o modelo SWAT em duas sub-bacias da bacia do rio Japarutuba Mirim, uma localizada a montante da Fazenda Pão de Açúcar (PA) e outra localizada a montante da Fazenda Cajueiro (CJ), no estado de Sergipe. Para testar a sensibilidade dos parâmetros calibrados, utilizou-se a aplicação cruzada de doze parâmetros mais sensíveis nas duas bacias hidrográficas, entre anos 1985 e 2000. Dentre os vinte e sete parâmetros identificados na análise de sensibilidade relacionados ao processo chuva-vazão, apenas doze apresentaram as maiores sensibilidades. Isso demonstra que houve influência sobre os resultados da simulação em ambas as bacias. Tais parâmetros destacaram o escoamento subterrâneo nos processos simulados pelo modelo, demandando, portanto, dados relativos aos solos com elevado grau de confiabilidade. Os valores apresentaram  $NS = 0,83$  e  $PBIAS = 8,50\%$ , o que leva a considerar a calibração como muito boa, fazendo-se uma ressalva aos períodos de estiagem. Em termos gerais, a calibração e a validação para vazão simulada para as estações Cajueiro e Pão de Açúcar foram satisfatórias.

Santos (2015) realizou uma análise espaço temporal dos processos hidrossedimentológicos de escoamento superficial, propagação e produção de sedimentos da bacia do rio Tapacurá, no estado de Pernambuco. A modelagem apresentou um bom

resultado para calibração, com valores  $R^2 = 0,72$  e  $NS = 0,71$ . Em relação a validação obteve-se valores superiores em relação a calibração com valores satisfatórios para  $R^2 = 0,86$  e  $NS = 0,85$ .

Bonumá (2011) aplicou o SWAT para avaliar os processos hidrológicos, produção de sedimentos e a transferência de fósforo em uma pequena bacia hidrográfica do rio Arroio Lino (área de 4,18 km<sup>2</sup>), na região Sul do país, com predominância da cultura de fumo e com sérios problemas correlacionados à poluição por fósforo. A bacia foi monitorada no exutório, permitiu realizar a análise de sensibilidade, calibração e validação dos parâmetros, vazão e a produção de sedimentos. As adaptações nos parâmetros do modelo foram necessárias durante a etapa de calibração e validação. O estudo apresentou bons resultados na simulação de vazões mensais com valores  $NS = 0,87$  na calibração e  $NS = 0,76$  na validação. Nesse estudo a autora fez uma adaptação no método de cálculo de erosão pelo SWAT, com o intuito de representar melhor os processos de deposição de sedimentos nas encostas. As simulações com o modelo modificado foram satisfatórias para o transporte de sedimentos, quando comparados aos observados e obteve-se um melhor desempenho durante a calibração com valor  $NS = 0,70$  em relação ao modelo SWAT simulado ( $NS = -0,14$ ). Os resultados sugerem que a integração da rotina de produção de sedimentos no SWAT, aumenta a precisão do modelo de previsão em áreas mais íngremes e, ao mesmo tempo, melhora significativamente a capacidade de prever a distribuição espacial das áreas de deposição de sedimentos, a fim de minimizar os impactos ambientais causados por um determinado uso do solo.

Fukunaga (2012) avaliou a aplicabilidade do SWAT para estimar vazões em duas bacias do Espírito Santo, a sub-bacia do Córrego Jaqueira (MBJ), no município de Alegre (ES) com área de aproximadamente 22,6 hectares e a sub-bacia do Itapemirim com aproximadamente 2.237 km<sup>2</sup>. Na simulação inicial as vazões de base eram subestimadas e as vazões de pico superestimadas. A calibração foi realizada de forma automática para o modelo, que resultou em coeficientes estatísticos satisfatórios para a sub-bacia do rio Itapemirim ( $NS = 0,57$  e  $R^2 = 0,75$ ), embora a vazão de pico tenha sido superestimada. Enquanto para sub-bacia do córrego Jaqueira, o autor ressalta que devido as inúmeras falhas no monitoramento da estação impossibilitaram a calibração no modelo.

Para o bioma Cerrado, Baldissera (2005) desenvolveu sua pesquisa para avaliar a aplicabilidade do SWAT na bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT para simular a vazão média mensal com uma área de aproximadamente 29.000 km<sup>2</sup>. Este foi o primeiro estudo no Brasil aplicando o SWAT numa bacia de grande extensão, obtendo resultados

satisfatórios de  $NS = 0,71$  e  $R^2 = 0,75$  para as condições hidrológicas e meteorológicas da região.

Bertini (2014) utilizou a ferramenta SWAT para analisar a produção de sedimentos e escoamento superficial sob a influência da expansão agrícola entre 1981–2010, na bacia hidrográfica do rio Papagaio, na região de Sapezal, no meio norte do Mato Grosso. Realizou-se duas simulações, uma no período de 1981 a 1990 e a outra entre 2001 e 2010. Na calibração obteve-se valores satisfatórios: com  $R^2 = 0,93$  e  $NS = 0,73$  para 1985, enquanto, para 2009 teve  $R^2 = 0,77$  e  $NS = 0,7$ . Enquanto na validação obteve-se valores satisfatórios: para 1986, com  $R^2 = 0,85$  e  $NS = 0,36$  e para ano de 2010,  $R^2 = 0,76$  e  $NS = 0,74$ . Os resultados mostraram alta correlação entre os valores de escoamento superficial e produção de sedimentos na área de estudo e os maiores valores foram registrados onde houve expansão agrícola.

Carvalho (2014) aplicou o modelo SWAT na bacia do Alto Rio Jardim (DF), para simular a descarga sólida em suspensão em uma bacia agrícola. No processo de calibração e validação foi definido o número de 1.000 simulações, obteve-se dois tipos de resultados: diários e mensais. Os resultados no período de calibração mostraram valores satisfatórios para as vazões diárias simulados com  $NS = 0,51$  e  $R^2 = 0,74$  e o mensal com  $NS = 0,71$  e  $R^2 = 0,85$ . A validação alcançou os seguintes índices de desempenho:  $NS = 0,49$  e  $R^2 = 0,83$  para modelagem diária e  $NS = 0,54$  e  $R^2 = 0,95$  para a mensal. Porém, a simulação da produção de sedimentos não foi satisfatória e não apresentou bom desempenho para ajustar os valores calculados no modelo, a partir dos dados observados.

Ferrigo (2014) aplicou o SWAT na sub-bacia do rio Descoberto (DF), para avaliar a representatividade de quatorze parâmetros na calibração, que foram utilizadas em outras cinco sub-bacias contribuintes da bacia em estudo. Na calibração automática do SWAT-CUP a modelagem foi considerada satisfatória com  $NS = 0,51$  e  $R^2 = 0,44$ . Na verificação os índices estatísticos apresentaram insatisfatórios  $NS = 0,48$  e  $R^2 = 0,46$ . Ao verificar a representatividade desses parâmetros para as quatro outras sub-bacias propostas, três apresentaram índices estatísticos satisfatórios e uma apresentou índices abaixo do esperado.

Ferreira (2016) aplicou o modelo SWAT para a análise predição da vazão da bacia hidrográfica do ribeirão do Gama (DF), tendo uma área de aproximadamente 146,52 km<sup>2</sup>, localizada a sudoeste do centro de Brasília no Distrito Federal está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do Gama e Cabeça do Veado, no bioma Cerrado. Após o período da calibração automática (2004 a 2012), os resultados apresentados da

modelagem foram considerados muito satisfatórios para a vazão mensal com valores de  $R^2 = 0,90$  e  $NS = 0,86$  e, enquanto os dados diários tiveram resultados satisfatório:  $NS = 0,53$  e  $R^2 = 0,63$ . Assim, na calibração dos dados mensal da vazão, o modelo conseguiu representar de forma mais satisfatória o período de estiagem, pois houve uma melhora no ajuste do fluxo de base.

Silva (2016) aplicou o modelo SWAT na simulação de vazão em bacia hidrográfica do rio Preto, localizado entre Distrito Federal e os Estados de Goiás e Minas Gerais, dentro da região do Cerrado, ocupando uma área de aproximadamente 10.310 km<sup>2</sup>, utilizando valores de parâmetros regionalizados. Para análise foram definidos e gerados dois grupos para combinações: calibração (1; 3; 5; 6 e 8) e a verificação (2, 4, 7 e 9), aplicando 150 e 300 iterações. As combinações 1, 3, 5, 6 e 8 tiveram os resultados que variaram para  $NS = 0,63$  a  $0,64$  e os valores  $R^2$  de  $0,60$  e  $0,61$  no período de calibração e, para o período de verificação o  $NS$  foi de  $0,40$  a  $0,43$  e os valores  $R^2$  de  $0,76$  a  $0,78$ . Já nas combinações 2, 4, 7 e 9, os valores variam  $NS$  de  $0,50$  a  $0,52$  e valores  $R^2$  de  $0,69$  a  $0,71$  para a calibração, no entanto, para verificação  $NS$  ficou entre  $0,19$  a  $0,20$  e valores  $R^2$  variando entre  $0,88$  a  $0,90$ . Nos resultados, ambos os grupos de simulações com diferentes iterações, o período de calibração apresentou os melhores resultados em relação ao período de verificação. Sendo assim, os resultados foram satisfatórios na calibração e insatisfatórios na verificação.

Salles (2012) utilizou o SWAT para simular a vazão da bacia hidrográfica do Ribeirão Pípiripau com uma área de aproximadamente 235 km<sup>2</sup>, localizada na região nordeste do Distrito Federal, divisa com o Estado de Goiás. Para análise da sensibilidade utilizou o algoritmo LH-OAT para definir os melhores parâmetros para o SWAT e ajustado no processo de calibração. O modelo foi calibrado manualmente e simulou de forma satisfatória os valores para  $NS = 0,67$ ,  $PBIAS = -6,70\%$ ,  $COEA = 0,52$  e  $RSR = 0,58$  para as vazões médias mensais, indicando a possível aplicabilidade do modelo na predição de vazões na bacia. Para validação os resultados foram satisfatórios com valores para  $NS = 0,79$ ,  $COE = 0,65$ ,  $PBIAS = -21,49\%$  e  $RSR = 0,49$ . Todavia, tanto no período de calibração quanto de validação o modelo estimou adequadamente as vazões de pico, mas tendeu a superestimar as vazões de base.

Chaves (2016) aplicou o SWAT numa bacia experimental do córrego Sarandi (DF) com área de aproximadamente 30 km<sup>2</sup>, para estimar as perdas de solo, de nutrientes e corretivos (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio) em área agrícola, com série temporal de 2012 a 2014. Nos resultados da calibração e verificação da vazão por dados

diários, apresentaram resultados satisfatórios com valores  $R^2 = 0,50$  e  $NS = 0,44$  e para verificação  $R^2 = 0,73$  e  $NS = 0,67$ . Já os resultados da calibração dos sedimentos por dados mensais foram insatisfatórios com valores  $R^2 = 0,51$  e  $NS = 0,14$ . Por outro lado, os resultados da verificação apresentaram dados satisfatórios com valores  $R^2 = 0,81$  e  $NS = 0,66$ . O autor destaca a importância para os índices estatísticos que poderiam apresentar melhores resultados com uma série de dados maior, com um número significativo de picos, pois os índices utilizados no SWAT apresentam melhores respostas quando há uma maior presença de picos na série analisada.

Castro (2013) aplicou o modelo SWAT para avaliar a área agrícola da bacia hidrográfica do Alto Rio Jardim, com uma extensão de 105 km<sup>2</sup>, situada na porção sudeste do Distrito Federal, no bioma Cerrado. Para análise de sensibilidade utilizou dez parâmetros para as séries diárias. Os resultados apresentaram valores satisfatórios para os dados de um ano, para a calibração e validação. A calibração obteve uma boa representatividade da vazão com valores  $NS = 0,60$  e  $R^2 = 0,66$ . Enquanto para a validação os valores foram  $NS = 0,80$  e  $R^2 = 0,66$ . O modelo SWAT demonstrou ser uma ferramenta passível de utilização para a simulação de vazões diárias para a bacia em estudo.

Veiga (2014) utilizou o SWAT para analisar a vazão e os sedimentos em suspensão e para estimar a produção de sedimento na bacia hidrográfica do Córrego Samambaia, município de Goiânia/ GO, com área de aproximadamente 31,74 km<sup>2</sup>. Realizou-se as medições de vazão e sedimentos em suspensão durante o período de fevereiro a dezembro de 2013 e os dados climáticos foram extraídos da estação meteorológica, localizada na Escola de Agronomia/UFG. Obteve-se os resultados para análise estatística  $NS = 0,80$  para calibração,  $NS = 0,88$  para o escoamento superficial e sedimentos em suspensão, respectivamente, sendo considerados bons ajustes entre os valores medidos e simulados.

Sarmiento (2010) aplicou o modelo SWAT com o objetivo de investigar e avaliar o desempenho do modelo na bacia hidrográfica do rio Descoberto (DF), incluindo o reservatório com área de 825 km<sup>2</sup>, localizado na divisa sudoeste do Distrito Federal e o estado de Goiás. Após a calibração automática utilizando a função SSQ, com objetivo minimizar os resíduos, a aderência da curva de valores simulados à curva de valores medidos, para o período de 1983 a 1992, encontrou o valor de  $NS = 0,62$ , considerado satisfatório no ajuste do modelo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio das Almas/GO (BHRA) está localizada no bioma Cerrado, com uma área de 18.636,83 km<sup>2</sup> (1.863.683,37 hectares). Essa bacia está inserida na Mesorregião do Centro Goiano no Estado de Goiás, mais precisamente entre as coordenadas 14°37'00"S e 16°15'00"S e 50°08'00"W e 48°49'00"W. A BHRA abrange trinta e seis municípios goianos. Desse total, vinte e nove municípios possuem extensões territoriais integralmente e sete parcialmente (Figura 6).

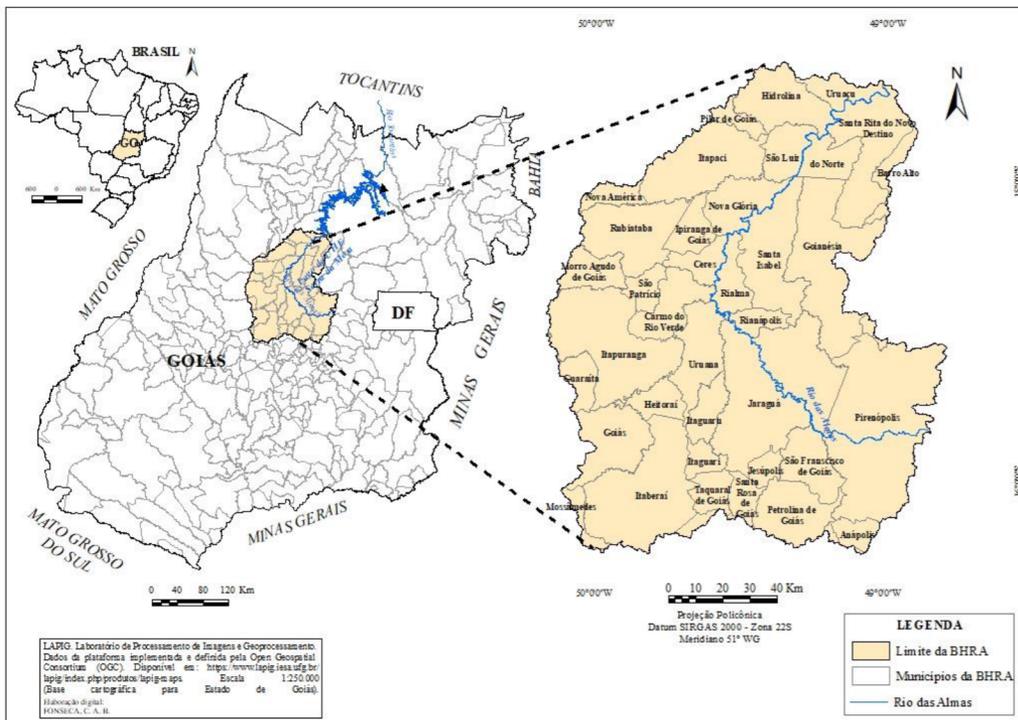


Figura 6 - Localização geográfica da BHRA no Brasil e no estado de Goiás – Brasil. Org.: FONSECA, C. A. B. (2017).

Os municípios que possuem extensão integralmente na bacia, são: Carmo do Rio Verde, Ceres, Guaraíta, Heitoraí, Hidrolina, Ipiranga de Goiás, Itaberaí, Itaguari, Itaguaru, Itapaci, Itapuranga, Jaraguá, Jesúpolis, Morro Agudo de Goiás, Nova América, Nova Glória, Petrolina de Goiás, Pirenópolis, Rialma, Rianópolis, Rubiataba, Santa Isabel, Santa Rita do Novo Destino, Santa Rosa de Goiás, São Francisco de Goiás, São Luiz do Norte, São Patrício, Taquaral de Goiás, Uruana. Enquanto, as outras unidades

administrativas englobam parcialmente o território da bacia, que são: Anápolis, Barro Alto, Goianésia, Goiás, Mossâmedes, Pilar de Goiás, Uruaçu (SEGPLAN-IMB, 2016).

A BHRA tem uma extensa área e por ter forma alongada é susceptível ao acúmulo de escoamento. O seu formato é evidenciado nos valores obtidos pelo coeficiente de compacidade (Kc) igual a 1,8, fator de forma (Kf) de 0,038 e o índice de circularidade de 0,96, o que caracteriza a bacia como forma alongada (FONSECA, 2017). De acordo com os critérios de Vilella e Mattos (1975), esses dados da área de estudo não apresentam tendência acentuada para enchentes, evitando assim um maior risco a inundação em condições normais de precipitação e que pode ser evidenciado por um relevo aplainado o que facilita o escoamento superficial (CHRISTOFOLLETTI, 1980).

A distribuição dos cursos d'água ao longo da bacia em estudo são compreendidos pelos rios perenes e intermitentes. O índice de densidade de drenagem é de 0,99 km/km<sup>2</sup>, demonstrando ser um sistema de drenagem mediano, apesar de ter apresentado um número de ramificações significativo, revelando em geral um padrão de drenagem predominantemente dendrítico, segundo a classificação de Christofolleti (1980).

A hierarquia fluvial da bacia estudada é de sexta ordem, os canais fluviais juntos somam 16.753 fluxos distribuídos ao longo da bacia, a extensão do rio das Almas tem 693,33 km, da nascente até o exutório, tendo os principais afluentes os rios: dos Bois, Vermelho, Sucuruí, Uru, Peixe, Verde, São Patrício e Padre Souza. (FONSECA, 2017). O rio das Almas nasce dentro do Parque Estadual da Serra dos Pirineus, numa altitude aproximada de 1.200 m e deságua em uma altitude de aproximadamente 445 metros, ponto de afluência para onde converge toda a descarga hídrica e sedimentológica para o reservatório da UHE Serra da Mesa, no município de Uruaçu/GO (SEGPLAN-IMB, 2016).

A BHRA tem as suas fragilidades semelhantes às outras bacias de drenagem em área do bioma Cerrado. Portanto a suas particularidades geológica e a heterogeneidade fisiográfica (relevo, clima, solo, hidrografia e cobertura vegetal) contribuem para produtividade hídrica na região. Essas particularidades favoreceram o desenvolvimento de monocultura impulsionada pelo agronegócio e a implantação de um dos maiores reservatórios com aproveitamento hidroelétrico de grande importância, no panorama energético brasileiro, a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.

Porém, nas últimas décadas a paisagem natural da BHRA vem sendo modificada, em função do desmatamento e da intensificação da agropecuária (SIDRA-IBGE, 2017). Tendo em vista as peculiaridades naturais da bacia, percebe-se que essa é favorecida por

uma extensa superfície plana e suave ondulada e composta por diferentes tipos de solos. Nota-se a diversificação dessa peculiaridade e a definição do potencial de uso e ocupação do solo. Na superfície com declive entre 0 e 10% (Figura 17), situa-se nas porções mediana e inferior da bacia e as planícies do rio das Almas e seus afluentes, compostos pelos solos profundos (Latosolos vermelhos), seguido dos Argissolos vermelhos e Chernossolos (Figura 13) ocupados pela agropecuária.

A superfície aplainada da bacia tornou-se mais atuante nos últimos vinte e seis anos (1991 a 2017), o terreno passou a ser mais intensamente trabalhado e com maior capacidade para rotatividade de culturas, sucessão de pastagem bovina e uso de maquinário. Enquanto as superfícies moderadamente elevadas a fortemente onduladas com declividade acima de 15%, encontram-se as espécies vegetacionais fragmentadas do bioma (florestada, estrato herbáceo-arbustivo e herbáceo-gramíneo), desenvolvidas sobre os diferentes tipos de solo na bacia. Portanto, a interferência antrópica pode estar alterando o fluxo de energia e matéria (CHRISTOFOLETTI 1980), com a mudança do uso e cobertura do solo para a conversão de pastagem e agricultura (PERH/GO, 2015; CORREA, 2013). Tal interferência em bacia hidrográfica ocasiona a redução da cobertura vegetal, maior potencial de escoamento superficial, degradação do solo e processos erosivos derivados: do solo descoberto, da aração do solo, da mecanização, do pisoteio do gado entre outros (CARVALHO, 2008; CARVALHO et al., 2009; CAMAPUM DE CARVALHO et al. 2006).

### 3.1.1 Vegetação Natural do Cerrado

O bioma Cerrado é caracterizado por espécies de vegetação heterogênea com existência de estratos arbóreo e florestal, herbáceo-arbustivo e herbáceo-gramíneo, com árvores espaçadas e retorcidas, que em geral, são dotadas de cascas grossas e de raízes profundas (MMA, 2014; VALENTE, 2006).

Segundo Ribeiro e Walter (1998) é representada por um conjunto de formas, aspectos e fisionomias que distinguem sua composição e são diversificadas pelas três formações: **Formações Savânicas** (Cerrado Típico, Cerrado Denso, Cerrado Ralo, Cerrado Rupestre, Parque de Cerrado, Palmeiral e Veredas), as **Formações Campestres** (Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre) e as **Formações Florestais** (Mata ciliar, Mata de galeria, Mata seca e Cerradão).

Esses autores utilizaram critérios para diferenciação dos tipos fitofisionômico do bioma, que baseou na fisionomia (forma), na estrutura (densidade), na forma de crescimento dominante, nas mudanças estacionais, nos aspectos do ambiente (fatores edáficos) e na composição florística. E classificaram assim:

- As **Formações Savânicas** englobam o Cerrado Sentido Restrito (p. 120-130):

O **Cerrado Denso** é um subtipo de vegetação predominantemente arbóreo, com cobertura de 50% a 70% e altura média de cinco a oito metros. Representada pela forma mais densa e alta de Cerrado sentido restrito. Os estratos arbustivo e herbáceo são mais ralos, provavelmente devido ao sombreamento resultante da maior densidade de árvores. Ocorrem principalmente nos tipos de solos, como: Latossolos Roxo, Vermelho, Latossolos Vermelho Amarelo e nos Cambissolos, dentre outros.

**Cerrado Típico** é um subtipo de vegetação predominantemente arbóreo-arbustivo, com cobertura arbórea de 20% a 50% e altura média de três a seis metros. Trata-se de uma forma comum e intermediária entre o Cerrado Denso e o Cerrado Ralo. Na classe de Cerrado Típico ocorrem nos tipos de solos, como: Latossolos vermelhos, Latossolos vermelho amarelo, Cambissolos, Areias Quartzosas, Litólicos ou solos Concrecionários.

**Cerrado Ralo** é um subtipo de vegetação arbóreo-arbustiva, com cobertura arbórea de 5% a 20% e altura média de dois a três metros. Representa a forma mais baixa e menos densa de Cerrado sentido restrito. O estrato arbustivo-herbáceo apresenta diferenças estruturais em relação aos subtipos anteriores. Ocorrem principalmente nos tipos de solos, como: Latossolos vermelho amarelo, Cambissolos, Areias Quartzosas, solos Concrecionários, Hidromórficos e Litólicos.

**Cerrado Rupestre** é um subtipo de vegetação arbóreo-arbustiva que ocorre em ambientes rupestres (litólicos ou rochosos). Possui cobertura arbórea variável de 5% a 20%, altura média de 2 a 4 metros e estrato arbustivo-herbáceo. Embora possua estrutura semelhante ao Cerrado Ralo, o substrato é um critério de fácil diferenciação, pois comporta pouco solo entre afloramentos de rocha. Portanto, os indivíduos arbóreos concentram-se nas fendas entre as rochas, a densidade é variável e dependente do volume

de solo. Os solos que evidenciam nessa classe são os Neossolos Litólicos, originados da decomposição de arenitos e quartzitos, pobres em nutrientes, ácidos e apresentam baixos teores de matéria orgânica.

**Parque de Cerrado** é uma formação Savânica caracterizada pela presença de árvores agrupadas em pequenas elevações do terreno, algumas vezes imperceptíveis, conhecidas como murundus. As árvores possuem altura média de três a seis metros e formam uma cobertura arbórea de 5% a 20%. Os solos são Hidromórficos, drenados em áreas planas adjacentes. Porém com espécies que provavelmente apresentam maior tolerância à saturação hídrica do perfil do solo. A flora herbácea predomina nas áreas planas adjacentes aos murundus e é similar à que ocorre nos campos úmidos.

**Palmeiral** é uma formação Savânica caracterizada pela presença marcante de uma única espécie de palmeira arbórea é denominada de Palmeiral. Em geral os Palmeirais do Cerrado encontram-se em terrenos bem drenados, embora também ocorram em terrenos mal drenados, onde pode haver a formação de galerias acompanhando as linhas de drenagem. Palmeirais em solos bem drenados geralmente são encontrados nos interflúvios e em solos mal drenados (brejosos), presentes ao longo dos fundos de vales do Brasil Central.

**Vereda** é a fitofisionomia com a palmeira arbórea, em meio a agrupamentos mais ou menos densos de espécies arbustivo-herbáceas. Estas são circundadas por Campo Limpo, geralmente úmido. Encontradas em solos Hidromórficos, saturados durante a maior parte do ano. Geralmente ocupam os vales ou áreas planas acompanhando linhas de drenagem mal definidas, em geral sem murundus. Também são comuns numa posição intermediária do terreno, próximas às nascentes (olhos d'água), ou na borda de Matas ciliares. A ocorrência da Vereda condiciona-se ao afloramento do lençol freático, decorrente de camadas de permeabilidade diferentes em áreas sedimentares do Cretáceo e Triássico. Elas exercem papel fundamental na manutenção da fauna do Cerrado, funcionando como local de pouso para a aves, atuando como refúgio, abrigo, fonte de alimento e local de reprodução também para a fauna terrestre e aquática.

- As **Formações Campestres** do Cerrado que englobam (p.130-136):

**Campo Sujo** é um tipo fisionômico exclusivamente herbáceo-arbustivo, com arbustos e subarbustos esparsos cujas plantas, muitas vezes, são constituídas por indivíduos menos desenvolvidos das espécies arbóreas do Cerrado sentido restrito. A fisionomia é encontrada em solos rasos como os Litólicos, Cambissolos ou Plintossolos Pétricos, eventualmente com pequenos afloramentos rochosos de pouca extensão (sem caracterizar um "Campo Rupestre"), ou ainda em solos profundos e de baixa fertilidade (állico ou distrófico) como os Latossolos de textura média e em Areias Quartzosas. Em função de particularidades ambientais, o Campo Sujo pode diferir se o solo for bem drenado (Campo Sujo Seco) ou mal drenado (Campo Sujo Úmido ou com Murundus).

**Campo Rupestre** é um tipo fitofisionômico predominantemente herbáceo-arbustivo, com a presença eventual de arvoretas pouco desenvolvidas de até dois metros de altura. Abrange um complexo de vegetação que agrupa paisagens em relevos ocupados por trechos de afloramentos rochosos. Geralmente ocorre em altitudes superiores a 900 metros, em áreas onde há ventos constantes, dias quentes e noites frias. Esta fitofisionomia ocorre geralmente em solos litólicos ou nas frestas dos afloramentos. São solos ácidos, pobres em nutrientes, originados muitas vezes da decomposição de quartzitos, arenitos ou itacolomitos que permanecem nas frestas dos afloramentos, ou podem ser carregados para locais mais baixos ou então podem formar depósitos de areia quando o relevo permite. A disponibilidade de água é restrita, pois as águas pluviais escoam rapidamente para os rios, devido à pouca profundidade e reduzida capacidade de retenção pelo solo.

**Campo Limpo** é uma fitofisionomia predominantemente herbácea, com raros arbustos e ausência completa de árvores. Pode ser encontrado em diversas posições topográficas, com diferentes variações no grau de umidade, profundidade e fertilidade do solo. Entretanto, é encontrado com mais frequência nas encostas, nas chapadas, nos olhos d'água, circundando as Veredas e na borda das Matas de Galeria, geralmente em solos Litólicos, Litossolos, Cambissolos ou Plintos solos Pétricos. Quando ocorre em áreas planas, relativamente extensas, contíguas aos rios e inundadas periodicamente, também é chamado de "Campo de Várzea", "Várzea" ou "Brejo", sendo os solos do tipo Hidromófico, Aluvial, Plintos solos ou Solos Orgânicos. Existem particularidades ambientais para o Campo Limpo, como o Campo Sujo, que apresenta variações determinadas pela umidade do solo e topografia. Na presença de um lençol freático

superficial é denominado de Campo Limpo Úmido, enquanto o Campo Limpo Seco não apresenta umidade aparente.

- As **Formações Florestais** do Cerrado que englobam (p. 104-115):

**Mata Ciliar** entende-se essa fisionomia pela vegetação florestal que acompanha os rios de médio e grande porte da região do Cerrado, em que a vegetação arbórea não forma galerias. Em geral essa Mata é relativamente estreita em ambas as margens, dificilmente ultrapassando 100 metros de largura em cada. É comum a largura em cada margem ser proporcional à do leito do rio, embora em áreas planas a largura possa ser maior. Porém, a Mata ciliar ocorre geralmente sobre terrenos acidentados, podendo haver uma transição nem sempre evidente para outras fisionomias florestais como a Mata Seca e o Cerradão. Os solos podem ser rasos como os Cambissolos, Plintossolos ou Litólicos e profundos como os Latossolos e Argissolos, ou ainda ser solos Aluviais.

**Matas de Galeria** apresentam uma vegetação florestal com altura média do estrato arbóreo que varia entre 20 e 30 metros e uma superposição das copas que fornecem cobertura arbórea que acompanha os rios de pequeno porte e córregos dos Planaltos do Brasil Central, formando corredores fechados (galerias) sobre o curso de água. Geralmente localiza-se nos fundos dos vales ou em cabeceiras de drenagem, onde a água ainda não conseguiu escavar um canal definitivo. Quase sempre é circundada por faixas de vegetação não florestal em ambas as margens, em geral, ocorre uma transição brusca com as formações Savânica e Campestre. A transição é quase imperceptível onde ocorrem as Matas ciliares e o Cerradão. Os solos que se apresentam, são geralmente os Cambissolos, Plintossolos, Argissolos, Hidromórficos ou Aluviais, podendo mesmo ocorrer em Latossolos semelhantes aos das áreas de Cerrado (sentido amplo) adjacentes. A particularidade ambiental dessa mata é que no seu interior a umidade relativa é alta, mesmo na estação seca do ano.

**Mata Seca** são designadas em função da queda de folhas durante a estação seca, com altura média do estrato arbóreo varia entre 15 e 25 metros, dependentes das condições químicas, físicas e principalmente da profundidade do solo. Essa vegetação não possui associação com cursos de água, ocorrendo nos interflúvios em solos geralmente mais ricos em nutrientes. Pode ser encontrada em solos desenvolvidos em

rochas básicas de alta fertilidade (Terra Roxa Estruturada, Brunizém ou Cambissolos), em Latossolos Roxo e Vermelho-Escuro, de média fertilidade e sobre solos de origem calcária.

**Cerradão** é uma formação florestal, possui grande capacidade de armazenar água, apresenta altura média do estrato arbóreo varia de 8 a 15 metros, proporcionando condições de luminosidade que favorecem à formação de estratos arbustivo e herbáceo diferenciados, apresentando raízes longas para alcançarem o lençol freático. Em sua maioria, os solos de Cerradão são profundos, bem drenados, de média e baixa fertilidade, ligeiramente ácidos, pertencentes às classes: Latossolos vermelhos, Latossolos vermelho amarelo ou Latossolos roxo. Também existe ocorrência em proporção menor, nos solos Cambissolos distrófico.

### **3.1.2 Clima**

O clima predominante no domínio do Cerrado é caracterizado de acordo com a classificação de Köppen do tipo Aw (tropical quente sub-úmido), marcado por duas estações bem definidas, uma chuvosa que se inicia em outubro e finaliza em abril, outra seca que começa em maio e se estende até setembro (RIBEIRO; WALTER, 1998 e 2008). O período chuvoso (verão) analisado no período (1971-1994) teve uma precipitação média mensal superior a 250 mm/mês e no período seco (inverno) que é marcado pela estiagem nas áreas de Cerrado (junho a agosto) ficou em torno de 10 mm/mês (Figura 7).

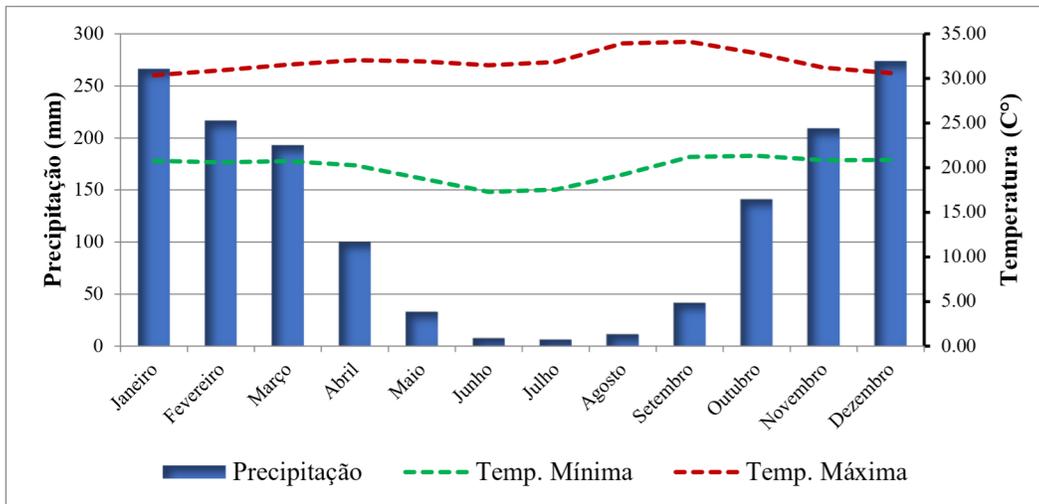


Figura 7 - As médias mensais pluviométricas, temperaturas máximas e mínimas na BHRA (1971 e 1994). Fonte: HIDROWEB (2017).

As temperaturas apresentam variações expressivas ao longo do ano, decorrentes dos fatores físico-geográficos e dinâmicos, com médias mínimas oscilando em torno de 17°C nos meses de junho e julho e as máximas chegam a 34°C nos meses de agosto e setembro. Segundo Campos et al. (2002), a falta de chuva e a baixa umidade favorecem as queimadas que são frequentes na estação seca, sejam elas naturais, sejam provocadas pelo homem através das atividades agropecuárias.

O principal fenômeno meteorológico responsável pela precipitação no estado de Goiás durante a estação chuvosa se dá em função da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esse fenômeno forma-se a partir da chegada de frentes subtropicais a região central do Brasil e associa-se à umidade proveniente da região Amazônica, favorecendo a ocorrência de chuvas por um período superior a três dias consecutivos, com volumes expressivos de precipitação (PEREIRA et al., 2010; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A estação seca inicia-se em maio e vai até setembro e o volume total de precipitação média não ultrapassa 25 mm/mês. Nesse período há recuo dessas massas úmidas e atuação da Massa Polar Atlântica (mPa), provocando a queda da temperatura, ausência de precipitações e baixa umidade relativa do ar, que pode chegar a 15% (AYOADE, 1986; MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007; CAMPOS et al., 2002). Outra característica meteorológica dessa estação, relatada por Pereira et al. (2010) e Mendonça e Danni-Oliveira (2007) é a presença de massas de ar quente e seco sobre a porção central do Brasil, que inibe a formação de nuvens e desvia as frentes frias que vem

do sul do continente para o Oceano Atlântico. Durante este período, as chuvas são escassas, algumas massas de ar frio chegam a atingir essa região ocasionando as menores temperaturas do ano.

### **3.1.3 Hidrogeologia**

Entende-se que as províncias hidrogeológica definem os fatores que contribuem para produtividade hídrica de uma região, como o geológico e o fisiográfico. O fator geológico tem papel fundamental no processo, tendo como base, principalmente as características litológicas das rochas. Já o fator fisiográfico é compreendido pelo clima, relevo, hidrografia, solo e vegetação natural, os quais podem operar mudanças profundas nas condições das águas do subsolo, favorecendo a disponibilidade hídrica (FEITOSA et al., 2008).

A geologia é a base para determinar a capacidade hidrogeológica, condiciona a infiltração, a circulação, o armazenamento e exploração da água nos horizontes superficiais (BARROS, 1994). A área da BHRA é constituída por um conjunto de rochas intemperizadas do embasamento datada do período Pré-Cambriano e por faixa de dobramento, que compreende as rochas do Grupo Araxá (quartzitos), Grupo São Bento associado a Formação Serra Geral (Basalto, Basalto-andesito) e Grupo Serra Dourada da Unidade B (Clorita xisto, Xisto granatífero, Xisto, Muscovita quartzito) e secundariamente por rochas da Suíte Granito Tipo Lavrinha (granitos, gnaisses), Complexo Hidrolina (Granito gnaiss, Granodiorito gnaiss), Complexo granulítico Anápolis-Itauçu com associação de Ortogranulitos (Ígnea, Metamórfica), Complexos Granito-gnáissicos (Granodiorito, Granito), Complexo granítico sintectônico (Diorito, Granodiorito, Granito, Monzonito), Grupo Goiás Velho (Metabasalto, Xisto), Grupo Pilar de Goiás (Mármore, Xisto, Metachert), Complexo máfico-ultramáfico Barro Alto (Metagabronorito, Metatroctolito, Metanorito) e Conglomerados ajustados em estruturas com diversos Grupos (LACERDA FILHO et al., 2000; MAMEDE et al., 1981).

Esse conjunto é marcado por estruturas (fratura, falha e dobras) e tectônica que controlam as condições de ocorrência, movimento e qualidade das águas subterrâneas (FEITOSA et al., 2008), por diversos ambientes responsáveis pela deposição de coberturas sedimentares vinculadas aos cursos fluviais e à evolução geomorfológica regional (ALMEIDA et al., 2006). Tendo em vista que a natureza das rochas intemperizadas do embasamento e suas coberturas na bacia em estudo foram distinguidas

pelas províncias estruturais e pelas sucessivas etapas da evolução tectônica estrutural no Brasil (FEITOSA et al., 2008).

No âmbito da BHRA, as Províncias são marcadas pelas porções do Escudo Central e Escudo Oriental que determinaram o potencial de armazenamento e circulação de água subterrânea, caracterizado por um domínio fraturado, onde ocorrem os sistemas aquíferos do Araxá (Xistos, calcixisto, metacalcario, quartzitos, anfibolitos e rochas ultramáficas), Complexos Acamadados (Metaultramáficas, Ultramáficas, granada gnaisse, leptinito, granada granulito e granada quartzo), Cristalino Noroeste (Granitos, Gnaisses, xistos, conglomerado e os complexos gnáissicos associados aos Greenstone Belts), Greenstone Belts (Metavulcânicas e Metassedimentares) e Serra da Mesa (Xistos, cascalho, calcixito, formação ferrífera, quartzo e a sequência Vulcano sedimentares) (ALMEIDA et al., 2006).

O comportamento e a dinâmica das condições climáticas do bioma Cerrado que é caracterizado pelo tropical quente sub-úmido, com a média anual pluviométrica de 1.300 mm e com temperatura média anual relativamente elevada entre 20°C e 34° C (RIBEIRO; WALTER, 1998 e 2008), favorecem circunstâncias e ambiente propício para ocorrer os processos químicos, alterações do manto rochoso que são determinados pelas características de porosidade e permeabilidade da rocha. Essa características dominantes alteram e aumentam gradativamente evoluindo para um tipo fissural em ambiente de intensa profundidade facilitando assim, a circulação de água e a recarga subterrânea que ajudam alimentar o escoamento de base dos rios durante o período de estiagem (FEITOSA et al., 2008).

Em face aos grupos vegetacionais do Cerrado, nota-se que a cobertura vegetal é variada, com predominância de formações florestais e de formações complexas, como Savânica e Campestre, sob essas fitofisionomias existem um número considerado de unidade de solos. Os solos mais frequentes na bacia hidrográfica do Rio das Almas são os Latossolos vermelho (53,72%), seguidos dos Cambissolos (18,10%), dos Argissolos vermelho (15,01%), Chernossolos (8,44%) e pelos afloramentos rochosos como os Neossolos Litólicos distrófico (4,73%).

A Tabela 1 apresenta os sistemas aquíferos e os tipos de solos da BHRA. A Figura 8 apresenta as respectivas distribuições dos sistemas e as ocorrências de falhas geológica, os quais caracterizam a bacia em estudo.

Tabela 1 - Tipos de sistema aquíferos e os tipos de solos na BHRA

Sistema Aquífero	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Tipos de solo	Altitude
Araxá	3.628,43	19,47%	Latossolos vermelho, Cambissolos e Neossolos Litólicos	1200 a 700m
Complexos Acamadados	1.886,39	10,12%	Chernossolos e Argissolos	900 e 700m
Cristalino Noroeste	7.397,42	39,45%	Latossolos vermelho	900 e 500m
Greenstone Belts	231,98	1,25%	Cambissolos e os Neossolos Litólicos	900 a 700m
Serra da Mesa	5.537,11	29,71%	Latossolos vermelho	700 a 500m

Fonte: ALMEIDA et al., 2006. Org.: FONSECA, C. A. B (2019).

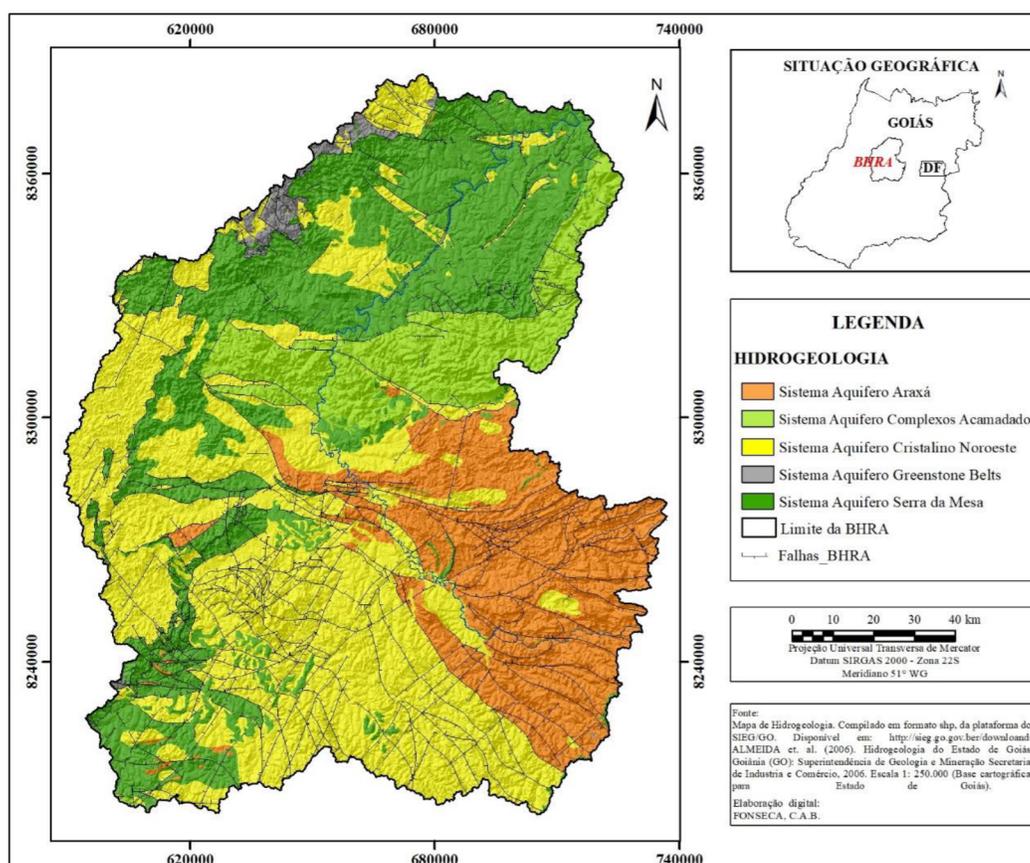


Figura 8 - Sistemas aquíferos e as ocorrências de falhas geológica da BHRA. Fonte: Hidrogeologia do Estado de Goiás (2018). Org.: FONSECA, C. A. B.

Nota-se na Tabela 1, que os sistemas aquíferos predominante na BHRA, são: Cristalino Noroeste, Serra da Mesa e o Araxá em conjunto somam 88,63% da área da bacia. E com isso, permite entender que são os contribuintes do sistema, em termos de produtividade hídrica e de potencial de recarga subterrâneas, que podem estar entre as zonas fraturadas. A análise do contexto indica que os efeitos hidrológicos sobre sistema aquífero ao longo da bacia são decorrentes da contribuição de diversos componentes que

atuam em nível local, são: geologia, topografia, pedologia, hidrologia, cobertura vegetal e as variações climáticas. E por se tratar de uma região com elevada taxa de precipitação pluvial (apesar de irregular) (Figura 14) e por conter amplas áreas recobertas pelos Latossolos vermelhos (Figura 13), apresentar condições de recargas mais eficientes e com maior grau de desenvolvimento em relação às demais classes de solo (CORREIA et al., 2004; CASTRO et al., 2011), contribuindo assim para armazenamento de água no perfil do solo e recarga das águas subterrâneas.

De acordo com Palhares (2013) é crescente a demanda por água no Brasil em todos os segmentos (irrigação, abastecimentos urbano e animal e a indústria de transformação). Nas últimas duas décadas houve um aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado, a previsão é que ocorra um aumento de 24% na demanda até 2030. Na região Centro-Oeste, 29,6% do total das retiradas de água, são usados para abastecimento animal. E alerta que o registro e controle de outorga de uso da água são fundamentais para gestão dos recursos hídricos.

#### **3.1.4 Geomorfologia**

A compartimentação geomorfológica formou-se de acordo com a natureza das rochas e a tectônica atuante, numa escala regional, caracteriza-se por extensas áreas com planaltos, alinhamentos serranos e depressões interplanálticas (IBGE, 2009). No aspecto físico da bacia, o relevo apresenta diferentes formas elaboradas sobre uma complexa estrutura geológica associada ao comportamento hidrológico superficial e subsuperficial (MAMEDE et al., 1981).

Parte dessas unidades geomorfológicas da BHRA estão inseridas no Planalto Central Goiano associado às áreas de dobramentos e rejuvenescimentos brasileiros, representados pelo grande complexo estrutural Pré-Cambriano. Este conjunto é marcado por salientes blocos de maciço antigo do território brasileiro, caracterizado por uma complexa e variável formas de relevo, por uma diversidade de rochas metamorfizadas, de estrutura marcada por falhamentos, intrusões, metamorfismo, encontrando em estágio de dissecação (NASCIMENTO, 1991), tendo uma variação altimétricas entre 435 m a 1.484 m.

O mapeamento geomorfológico da região da BHRA, organizado por Latrubesse e Carvalho (2006) são compostas por vários elementos atuantes, constituindo áreas complexas com agrupamentos de geofomas de diferentes origens que desenvolveu-se sobre rochas Pré-Cambrianas, faz contato com as unidades: Superfície Regional de

Aplainamento IIA, Zona de Erosão Recuante, Estruturais, Morros e Colinas, Superfície Regional de Aplainamento IIIA e Agradação. Essas unidades geomorfológicas estão espacializadas na Figura 9.

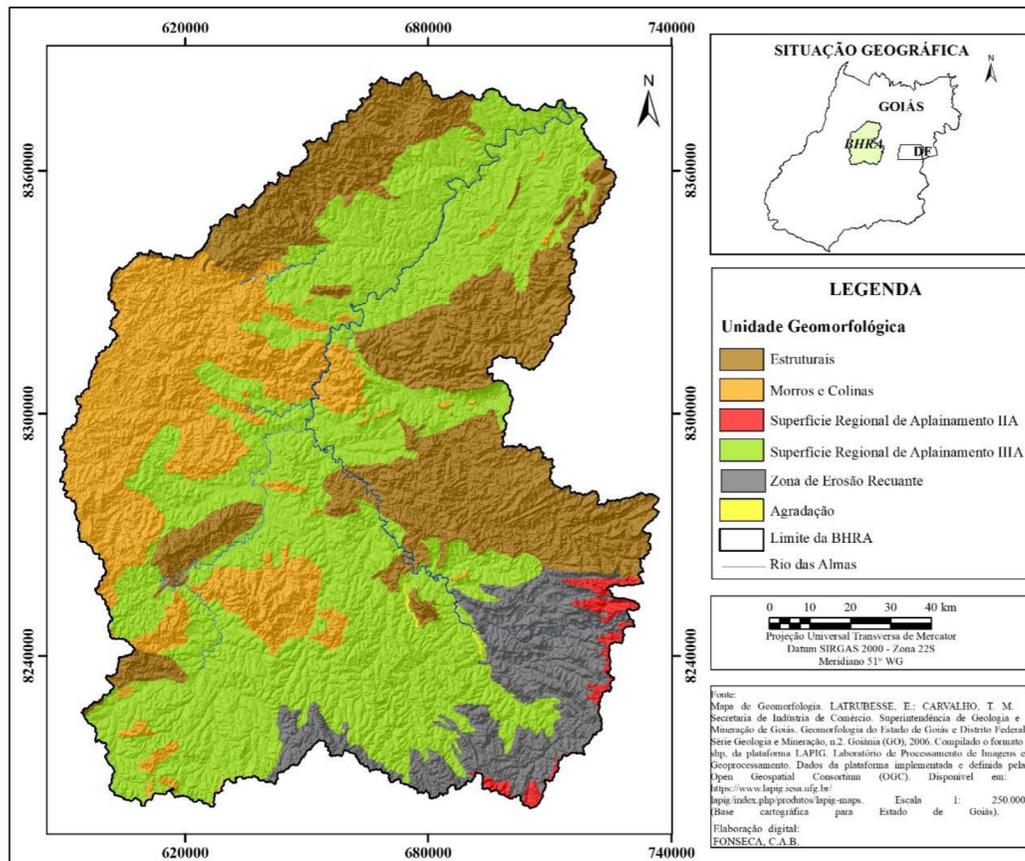


Figura 9 - Unidade geomorfológica da BHRA. Fonte: Latrubesse e Carvalho (2006). Org.: FONSECA, C. A. B.

Percebe-se na Figura 9 que a unidade da Superfície Regional de Aplainamento IIA ocorre na borda da BHRA situada na porção sudeste, em uma faixa menor (1,03%) representada pelas cotas entre 900 e 1300 m, com forte dissecação e a presença dos solos Neossolos Litólicos distróficos. No lado oeste dessa unidade isolada é formado pela Zona de Erosão Recuante muito dissecada com 8,92% da área da bacia, formada por vales com vertentes acentuadas e recuo expressivos que se estende na borda ao sul da bacia, sobre os solos Cambissolos e Argissolos vermelhos.

Na porção oeste da unidade da Zona de Erosão Recuante encontra-se em contato direto com a unidade geomorfológica da Superfície Regional de Aplainamento IIIA, representada pela maior área da bacia com 45,74%, situada numa cota inferior que variam entre 800 a 300 m, com pouca dissecação e estendendo-se para o centro-norte da bacia,

sobre a predominância dos solos Latossolos vermelhos. Conforme Latrubesse e Carvalho (2006) explicam que relevo com menor dissecação, perfis do solo profundos apresentam boas condições de infiltração e recarga dos aquíferos regionais.

Entretanto, na parte oeste da BHRA formaram relevos acidentados de Morros e Colinas (19,09%) com dissecação muito forte. Em contato com essa unidade a noroeste e situada na borda da bacia encontra-se a faixa da unidade Estruturais (6,18%), associado ao relevo de morro e colinas com forte controle estrutural e dobramento com a presença de solos Argissolos vermelhos, Cambissolos e Neossolos Litólicos distrófico, condicionam a existência de fluxos locais e intermediários originando recarga ineficiente (LATRUBESSE; CARVALHO, 2006).

Ao longo da faixa leste da bacia, nota-se ocorrência de unidades Estruturais, onde formaram relevos de morro e colinas muito dissecados representando 18,66% da área da bacia, situados sobre os diferentes tipos de solos, como os Latossolos vermelhos, Cambissolos, Chernossolos, Argissolos vermelhos e Neossolos Litólicos. Enquanto a unidade Agradação representa a menor área (0,4%), na escala de 1:250.000, constituída pelas planícies fluviais e de solos Cambissolos.

Os relevos residuais elevados presentes na bacia são constituídos por uma sequência de metamorfismos regionais dos grupos citados anteriormente. A depressão intermontana participa da composição litológica das coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (aglomerado, laterita, argila, areia) e dos depósitos aluvionares (areia e cascalho) que ocorrem de modo descontínuo em áreas com altitude em torno 500 m, porém ao sul, sudeste e sudoeste da bacia elevam-se gradativamente, chegando a 900 m. E ao centro da bacia entre o relevo elevado dos Grupos Goiás Velho, Pilar de Goiás e o Complexo máfico-ultramáfico Barro Alto formaram uma ligeira convexização (NASCIMENTO, 1991; MAMEDE et al., 1981). Nesse conjunto de unidades geomorfológicas definem os aspectos hidrográfico, produção de água e processos erosivos na bacia.

### 3.2 DECLIVIDADE

A declividade da bacia é derivada do modelo digital de elevação (MDE). Esta representa um parâmetro topográfico, ou seja, a inclinação do relevo, sendo essa fundamental para a modelagem do escoamento, uma vez que, a velocidade de fluxo depende dessa variável (TUCCI, 2005). As classes de declividade da BHRA foi gerada

na escala 1:250.000, a partir da transformação dessa imagem para o formato de grade triangular até a geração de curva de nível com intervalo de 100 m. Na sequência originam-se os modelos de sombreado e tridimensionais representando a superfície, vistos em três dimensões, que permitiu uma melhor análise morfológica da área. Esse modelo armazena dados de altimetria que originou o mapa de declividade. Mais detalhes sobre esse mapa veremos no item 4.1 e Figura 17. Esse produto cartográfico auxilia na análise geoambiental dos compartimentos geomorfológicos, da rede de drenagem, de solo e outros.

### 3.3 MAPEAMENTO DA EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS (1991, 2006 E 2017)

O mapeamento do uso e ocupação do solo consistiu na utilização de imagens de satélite e técnicas de processamento digital de imagens, como: segmentação e classificação supervisionada (MOREIRA (2011) no *software* do Arcgis 10.4 que engloba uma série de algoritmos e é vinculado ao SIG. A partir dessa classificação é necessário a interpretação visual das feições naturais e antrópicas para identificar as seguintes classes, como: solo exposto, área urbana, áreas de agricultura e pastagem, corpos hídricos e as fitofisionomias do bioma Cerrado (cerradão/ floresta, cerrado típico e mata ciliar).

- Para avaliar as mudanças no uso e ocupação do solo na área de estudo foram escolhidos os anos de 1991, 2006 e 2017. Esses anos foram selecionados devido a significativa mudança no uso do solo, para as culturas da soja, cana-de-açúcar, milho, sorgo e a pecuária bovina na região da bacia observada e analisada pelos dados censitários do IBGE (item 3.4).

Para o mapeamento do uso do solo (1991, 2006 e 2017) utilizou-se composições coloridas “falsa cor” (RGB) para orientação visual na classificação e interpretação das cenas, das quais se extraem informações, como: forma, textura, tonalidade/cor, tamanho, sombra, padrão e localização, conforme Florenzano (2011) Moreira (2011), Florenzano (2008) e os critérios de mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado, de acordo com Sano et al. (2007 e 2008), Souza et al. (2015) e Ponzoni e Shimabukuro (2007). Neste estudo as composições coloridas foram 4R5G3B para os anos 1991 e 2006, para o ano 2017 a composição 5R6G4B. Deve-se ressaltar que as escolhas do período das imagens estão relacionadas a sazonalidade climática na região Centro-Oeste e ao período

de colheita das culturas de grãos e da cana-de-açúcar (SILVA; CASTRO, 2015). As imagens possuem resolução espacial de 30 m e são das órbitas/pontos: 222/070 e 222/071, obtidas na plataforma do USGS *Earth Explore*<sup>4</sup>.

A classificação do uso do solo foi processada em ambiente SIG, *software* Arcgis 10.4 utilizando as ferramentas: *Classification/ > Iso Cluster > Unsupervised Classification > Maximum Likelihood Classification*. Para cada classe temática de uso e cobertura do solo, o *software* (Arcgis 10.4), utilizou algoritmos estatísticos de reconhecimento de padrões e características espectrais semelhantes (SANO et al., 2007 e 2008). Nesse processo, a classificação subdivide-se em não-supervisionada e supervisionada em ambos os casos demandam duas fases: a do treinamento e a classificação supervisionada (MOREIRA (2011).

Com base nesses procedimentos, são apresentados a seguir os três mapeamentos usados para avaliar as mudanças no uso e ocupação do solo na BHRA:

- **Uso do solo 1 (1991):** Tem-se o mapeamento do uso e ocupação do solo de 1991, realizado a partir da classificação supervisionada e interpretação de imagens do sensor TM/ LANDSAT-5 da data 13/06/1991.
- **Uso do solo 2 (2006):** Tem-se o mapeamento do uso e ocupação do solo de 2006, elaborado a partir da classificação supervisionada e interpretação de imagens do sensor TM/ LANDSAT-5 da data 13/06/2006.
- **Uso do solo 3 (2017):** Tem-se o mapeamento do uso e ocupação do solo de 2017, obtidos a partir da classificação supervisionada e interpretação de imagens do sensor OLI/ LANDSAT-8 da data 13/06/2017.

Os usos e ocupação do solo identificados na área de estudo foram: (a) Cerradão/Floresta; (b) Cerrado Típico, (c) Mata ciliar; (d) corpos hídricos (e) Área de agricultura; (f) Área de pastagem; (g) Solo exposto; e (h) Área urbana. Como citado anteriormente, o bioma Cerrado é caracterizado por diversas formações e espécies heterogêneas (Florestais, Savânica e Campestre), as quais são representadas por um conjunto de formas, aspectos e fisionomias (RIBEIRO; WALTER, 2008; MMA, 2014;

---

<sup>4</sup> <https://earthexplorer.usgs.gov/>

VALENTE, 2006). Diante desse desafio e pela extensão territorial da BHRA, a alternativa foi separar a classe temática de vegetação por formações, via classificação visual, conforme os critérios de Ribeiro e Walter (2008) e Sano et al. (2007 e 2008):

- a) Classe **Cerradão/Floresta** englobam os tipos de vegetação com predominância de espécies arbóreas e densa. O adensamento dessa classe permitiu ser identificadas pela tonalidade avermelhada intensa (em função da alta reflectância das folhas verdes na faixa espectral do infravermelho próximo) e com textura mais rugosa e forma geométrica irregular.
- b) Classe **Cerrado Típico** engloba em conjunto nessa pesquisa, os tipos fitofisionômicos das formações Savânica e Campestre, devido as assinaturas espectrais serem muito semelhantes (SANO et al., 2007 e 2008). Tais formações estão subdividas em Savana gramíneo-lenhosa, Savana Parque e todos os tipos de Campo Cerrado, Campo sujo, Campo limpo e suas subclasses. O padrão de tonalidade apresentado nessa classe variou do suave azul ao esverdeado, uma vez que sua taxa fotossintética se apresenta inferior àquela fisionomia mencionada anteriormente (cerradão/floresta).
- c) Classe **mata ciliar**, também conhecida como mata úmida, tem a tonalidade, textura idênticas a classe cerradão/floresta, o que diferenciam e facilitam a sua identificação é a sua localização por estar acompanhando os cursos d'água.
- d) classe **corpos hídricos** apresenta tonalidade escura ou preta, de tonalidade azulada (presença de partículas em suspensão), de textura lisa, forma oval e irregular (açudes, lagoas naturais e artificiais) e lineamentos e meandros dos rios principais.

As outras classes que se diferenciam dos naturais, são as antropizadas (agricultura, pastagem, solo exposto e área urbana), marcadas pela geometria, textura e tonalidade/cor. Considerou-se as classes de acordo Sano et al. (2007 e 2008) e Ponzoni e Shimabukuro (2007):

- e) Classe **área de agricultura** compreende a cobertura do solo que apresentaram textura lisa, forma regular e circular, com presença de corredores que são comuns em talhões grandes para as culturas, como: cana-de-açúcar e reflorestamentos adultos. Tendo diversas tonalidades e padrões, como: vermelho-alaranjados na região do visível e do infravermelho médio para as culturas sadia e madura, tonalidade laranja para cultura em estágio inicial e amarronzados para estágio de colheitas. Nessa classe existem uma

rotatividade com os diferentes cultivos (soja, milho, cana-de açúcar, arroz e sorgo) e a sucessão com a pecuária bovina, sobre diferentes tipos de solos (Latossolos vermelhos, Argissolos vermelhos, Chernossolos e Cambissolos), que podem ter capacidades para geração de erosão hídrica: desagregação, transporte, escoamento superficial e produção de sedimentos.

- f) Classe **área de pastagem** é uma classe difícil de ser mapeada, em função da periodicidade marcante da vegetação natural e da confusão espectral entre as classes (SANO et al., 2008; FERREIRA et al., 2013) do uso de espécie campestre (natural) para pastagem natural (FERREIRA et al., 2013). Identificar e classificar essa classe tornou-se um grande desafio devido a extensão territorial da BHRA. Portanto, na classificação visual e supervisionada, apoiou nos critérios de Sano et al. (2008) para a identificação e definição dessa classe, através de informações, como: forma, textura, tonalidade/cor, tamanho, sombra, padrão e localização. Esses critérios permitiram interpretar a cobertura vegetal, por meio da textura que se apresentou intermediária a lisa, homogeneidade, proximidade com solo exposto, forma geométrica regular e composta pela tonalidade variada do azul mais claro ao verde azulado. Essa classe também sofre com capacidade elevada para rotatividade das culturas, pisoteio do gado e processos erosivos citados anteriormente.
- g) Classe **solo exposto** apresentou tonalidade esbranquiçada, de textura lisa e forma regular, localizada próxima às áreas de agricultura, pastagens e urbanas.
- h) Classe **Área urbana** apresentou tonalidade variando do azul claro ao azul escuro, textura ligeiramente rugosa e forma simétrica e de localização próxima às rodovias.

Os mapeamentos de uso e ocupação do solo (1991, 2006 e 2017), tiveram algumas finalidades, como: (a) a primeira permitiu avaliar as mudanças no uso e cobertura do solo ocorridas ao longo dos vinte e seis anos, na área de estudo; (b) o segundo propósito foi o mapeamento do uso do solo de 1991 utilizado para modelagem hidrossedimentológica.

Cabe ressaltar que, devido a periodicidade marcante da vegetação natural do bioma Cerrado e da confusão espectral entre as classes temáticas de uso do solo (SANO et al., 2007 e 2008; FERREIRA et al., 2013) dos períodos analisados (1991, 2006 e 2017), utilizou-se o processo de classificação supervisionada, como citado anteriormente. Para

se ter produtos confiáveis de classificação, utilizou imagens históricas do *Google Earth Pro*<sup>5</sup>, como apoio na análise do uso e ocupação do solo da BHRA.

Essas imagens históricas (*Google Earth Pro*) possibilitaram visualizar pontos de interesse, como as áreas: agrícola, pastagem, urbana, cobertura vegetação, estradas e rodovias, solo exposto, cursos d'água e outros. Para identificar as áreas de interesses das classes escolhidas na pesquisa, utilizou-se da sinalização de dados vetoriais pontuais, considerados como “amostras” e criados no *software* ArcGis 10.4. Esses vetores tiveram duas finalidades: (a) utilizados para identificar e classificar os diferentes usos do solo encontradas no supervisionamento de alvos nas imagens de sensores: TM/ LANDSAT-5 e OLI/ LANDSAT-8; e (b) utilizou-se os vetores (pontual) criado nesse *software*, para identificar, reconhecer e corrigir as classes que tiveram confusão espectral entre as classes geradas na classificação supervisionada, por causa da periodicidade marcante da vegetação natural do bioma, no período analisado (1991, 2006 e 2017). Essa proposta metodológica foi utilizada também por Lopes e Nogueira (2011), que empregaram essa técnica para atualizar produtos de classificação supervisionada processadas em ambiente SIG, para o mapeamento de uso e cobertura do solo de forma confiável.

### 3.4 EVOLUÇÃO DA AGROPECUÁRIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/GO

Os dados secundários de área plantada da agricultura temporária na BHRA, é uma proposta de estudo exploratório específico para diagnosticar o avanço da agropecuária (em área plantada) ao longo dos vinte e seis anos na bacia em estudo. As culturas investigadas foram: arroz, cana-de-açúcar, feijão, milho, soja e sorgo, para os anos de 1991, 2000, 2006, 2011 e 2017, extraídos do banco de dados censitários do IBGE. Estes anos foram escolhidos em função da acelerada mudança no uso do solo para os cultivos de grãos, cana-de-açúcar e na pecuária bovina.

Esse estudo tornou-se fundamental para compreender a configuração socioeconômica dos municípios que envolvem a bacia e relacionar aos possíveis fatores que estão intrinsecamente correlacionados ao uso e cobertura do solo na bacia, como o desmatamento e a expansão da agropecuária. E posteriormente estabelecer relações e semelhanças desses fatores de uso do solo com os resultados da modelagem hidrossedimentológica.

---

<sup>5</sup> <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>

Esses dados estão apresentados por meio de mapas, gráficos e tabelas, cujas informações incluem os dados de série histórica coletados na plataforma: IBGE – Sistema de Recuperação Automática (SIDRA), da Produção Agrícola Municipal<sup>6</sup> e discutidos em tópico a parte (item 4.3).

A atividade da pecuária bovina também é considerada nesta pesquisa, por ter um papel importante no processo histórico de ocupação do bioma Cerrado e de estar integrada à agricultura. Ambas as atividades são desenvolvidas paralelamente e ou consorciadas. Os anos escolhidos para análise da pecuária bovina, coincidem com os da produção agrícola, que são: 1991, 2000, 2006, 2011, 2016 e 2017. Esses foram extraídos da Pesquisa da Pecuária Municipal – PPM, tabela 3939<sup>7</sup> – Efetivos dos rebanhos, por tipo de rebanho, discutidos em tópico a parte (item 4.3).

### 3.5 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO E MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA PARA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/GO

#### 3.5.1 Cenários hipotéticos de uso do solo

Neste trabalho, dois cenários hipotéticos de uso do solo foram propostos para avaliar os processos hidrossedimentológicos na BHRA: (a) Cenário otimista (CEN1) e (b) Cenário pessimista (CEN2). Esses cenários foram simulados no modelo SWAT usando os valores dos parâmetros ajustados na etapa de calibração do modelo, como descrito no item 3.5.2. O cenário otimista de uso do solo foi estimado com base na recuperação hipotética de área de preservação permanente (APP) próximos a cursos d'água, topos de morro e serra, baseado no código florestal brasileiro (Lei Nº 12.651/2012). Esse cenário teve a finalidade de restabelecer áreas fragmentadas da cobertura vegetal, as quais envolvem processos ecológicos e funcionais que são essenciais para o bioma Cerrado e avaliar se esses ambientes estão atuando da forma como seria esperado, como: conter processos erosivos, transporte de partículas, perdas de solo e produção de sedimentos. Pois, as mudanças no uso do solo que ocorreram ao longo dos vinte e seis anos foram expressivas, devido ao desmatamento e da expansão da atividade agropecuária.

---

<sup>6</sup> <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612>

<sup>7</sup> <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>

O cenário pessimista de uso do solo foi compilado na base do mapeamento elaborado por Ferreira (2009) para Estado de Goiás. Nesse mapeamento consta as transformações de uso do solo que segue uma tendência histórica nas áreas de Cerrado, como o aumento do desmatamento e o crescimento das atividades agropecuárias. Mais detalhes sobre essas transformações veremos mais abaixo no texto. A importância de se utilizar esse produto na pesquisa, é avaliar sob a ótica da modelagem hidrossedimentológica ainda não experimentado para BHRA, em relação a essa tendência de uso do solo sobre a previsão de vazão e na estimativa de perdas de solo e produção de sedimentos.

Tais cenários caracterizaram o uso e manejo do solo que são fatores significativos para a produção de sedimentos. Dessa forma, os cenários hipotéticos simulados no modelo SWAT seguiram as sugestões e contribuições de trabalhos realizados por: Perazzoli et al. (2013), Bonumá et al. (2013), Lino (2009), Pinto (2011), Ferrigo et al. (2011), Ferreira (2009) e Machado (2002). A partir dessas sugestões foi possível criar os cenários hipotéticos de uso do solo, estão descritos a seguir:

**Cenário hipotético otimista de uso do solo (Cenário 1):** Com vista ao planejamento do uso do solo aplicou metodologia para criar o cenário otimista, tomando-se por base a condição atual do mapeamento de uso do solo de 2017 (item 3.3), o que refletia melhor as mudanças no uso do solo ocorridas ao longo dos vinte e seis anos. Para análise desse cenário hipotético consistiu em estimar a influência da vegetação sobre os processos hidrossedimentológicos. Maiores detalhamento sobre a criação desse mapa estão descritos no “APÊNDICE A – Metodologia do cenário hipotético otimista de uso do solo”.

O cenário 1 considerado ideal manteve-se as classes de vegetação nativa existente e previu um acréscimo de remanescentes de Cerrado (cerradão/floresta, cerrado típico e mata ciliar) sob as classes antropizadas (agricultura, pastagem, solo exposto e urbana), usando o ambiente SIG do *software* ArcGis 10.4 e os procedimentos metodológicos descritos por Arnesen et al. (2015) e Bacani et al. (2015).

Nesse *software* gerou-se a estrutura vetorial formada pela rede de drenagem, utilizando o modelo digital de elevação (MDE), com os respectivos níveis hierárquicos do sistema fluvial ( 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª ordem) e a proposta de Strahler (1952) para determinação da ordem dos canais fluviais (CHRISTOFOLETTI, 1980). Em seguida definiu as nascentes desses cursos d'água, usando a ferramenta presente no módulo *Features* da extensão *Data Management Tools/ Feature Vertices To Points*, com opção

*START*, determinou a zona de influência da APP (50 m) com a ferramenta *Buffer*, do mesmo *software*.

Em seguida estabeleceu a estimar da média da largura de cada hierarquia fluvial, procedidas da simulação no modelo SWAT. A partir das características topográficas do terreno, o modelo assume que os canais fluviais traçados possuem formato trapezoidal e estabelece dados de comprimento, largura e profundidade dos canais fluviais (NEITSCH et al., 2011; CARVALHO, 2014).

Essas informações são armazenadas na tabela de atributos do parâmetro de entrada (*shapefile Reach*) e definida pela coluna *Wid2 (Stream reach Width (m))*, que estima a largura dos canais ao nível da água (NEITSCH et al., 2011). A fim de se aplicar a metodologia descrita de acordo com determinação do código florestal brasileiro (Lei Nº 12.651/2012), separou-se cada sistema fluvial (1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª ordem) e poligonizou separadamente. Posteriormente tomou como base a largura de cada hierarquia fluvial para a criação das faixas de APP, utilizando a ferramenta *Buffer* do mesmo *software*.

A determinação do código florestal brasileiro (Lei Nº 12.651/2012) articulado com a Política Estadual dos Recursos Hídricos para Estado de Goiás estabeleceu os limites da APP de acordo com a largura dos rios, que são: cinquenta metros de diâmetro no entorno das nascentes e dos olhos d'água, para qualquer que seja sua situação topográfica; trinta metros de APP para os cursos d'água de menos de dez metros de largura; cinquenta metros (APP), para os cursos d'água que tenham de dez a cinquenta metros de largura; cem metros (APP), para os cursos d'água que tenham de cinquenta a duzentos metros de largura; duzentos metros (APP), para os cursos d'água que tenham de duzentos a seiscentos metros de largura; e quinhentos metros (APP), para os cursos d'água que tenham largura superior a seiscentos metros.

Para delimitar a APP de topo de morro e serra, prescrito pelo Código Florestal (2012), definiu a segregação dessas áreas com declividade superior a 20%, a qual seguiu a rotina de simulação do modelo SWAT e, posteriormente essa APP hipotética foi incluída a classe do “cerradão/floresta”.

Determinou-se nesse cenário que as faixas de declives entre 5% e 10% que já se encontravam suprimidas pelas atividades agropecuárias e solo exposto fossem transformadas hipoteticamente em “cerrado típico”.

Diante desses procedimentos metodológicos criados nessa pesquisa pode-se gerar uma reconstituição hipotética da vegetação natural do bioma Cerrado. Ao final, todo o conjunto de feições criados foram reunidos em um único arquivo *shapefile* contendo: a

vegetação natural existente, as APPs, a reconstituição parcial hipotética da vegetação natural e de áreas suprimidas pelas atividades antrópicas (agricultura, pastagem e urbana). Para cada categoria, relacionou-se um número de controle (conforme a Tabela 2) para associar as diversas informações contidas no banco de dado do simulador do modelo SWAT. E posteriormente, converteu-se a base cartográfica desse cenário, de formato vetorial para o formato *raster*, utilizando o mesmo *software*.

Tabela 2 - Classes de uso do solo para cenário otimista na BHRA, associado as classes correspondentes ao banco de dados do modelo SWAT.

<b>Classes de uso do solo</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Classes de uso correspondentes ao modelo SWAT</b>
Área de agricultura	<i>crop</i>	AGRL ( <i>Agricultural Land</i> )
Área de pastagem	<i>crop</i>	PAST ( <i>Pasture</i> )
Área urbana	<i>urban</i>	URLD ( <i>Residential-Low Density</i> )
Cerrado/Floresta	<i>crop</i>	FRSD ( <i>Forest-Deciduous</i> )
Cerrado Típico	<i>crop</i>	FRST ( <i>Forest-Mixed</i> )
Mata Ciliar	<i>crop</i>	FRSE ( <i>Forest-Evergreen</i> )

Fonte: Adaptada à rotina do modelo SWAT e conforme a classificação apropriada para o uso do solo do cenário otimista. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

**O Cenário hipotético de uso do solo pessimista (Cenário 2):** Baseou-se no mapeamento elaborado por Ferreira (2009), para o cenário de 2050 para Estado de Goiás, encontra-se disponível para *download* gratuito na plataforma do LAPIG/UFG<sup>8</sup>. Esse mapeamento é fruto da tese de doutorado do autor, que fundamenta no entendimento previsto e de investigações precedentes de uso e ocupação do solo na região do bioma Cerrado, isto é, que segue uma tendência histórica no uso e cobertura do solo, como o aumento do uso da terra para fins agrícolas em lavouras de grãos, cana-de-açúcar, reflorestamento, pastagens natural e cultivada, exploração florestal, áreas que ainda possam ser preservadas e o desmatamento.

Na modelagem desse cenário, Ferreira (2009) definiu duas classes no mapeamento de uso do solo: Remanescentes do bioma Cerrado<sup>9</sup> e a área convertida em agropecuária, excluiu as estimativas dos ambientes ripários (faixa média de 100 m para cada margem dos rios, na escala 1:250.000) e das unidades de conservação do estado.

<sup>8</sup> <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html> (bi\_ce\_desmatamento\_cenario\_futuro\_5000\_2050\_lapig).

<sup>9</sup> SANO et al (2006).

O mapeamento de uso e ocupação do solo, compilado de Ferreira (2009) foi adaptado nessa pesquisa, utilizando as técnicas do SIG para desmembrar a classe de uso e ocupação do solo para fins agropecuários e, posteriormente o mapa foi reclassificado conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de uso do solo para cenário pessimista na BHRA associado as classes correspondentes ao banco de dados do modelo SWAT.

<b>Classes de uso do solo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Classes de uso correspondentes ao modelo SWAT</b>
Área de agricultura	<i>crop</i>	AGRL ( <i>Agricultural Land</i> )
Área de pastagem	<i>crop</i>	PAST ( <i>Pasture</i> )
Área urbana	<i>urban</i>	URLD ( <i>Residential-Low Density</i> )
Cerrado Típico	<i>crop</i>	FRST ( <i>Forest-Mixed</i> )

Fonte: Adaptada à rotina do modelo SWAT e conforme a classificação apropriada para o uso do solo do cenário pessimista. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Vale ressaltar que, para o cenário pessimista de uso do solo utilizou-se na simulação do modelo SWAT a categoria da vegetação, FRST - *Forest-Mixed*, contido no banco de dados do modelo. Essa classe vai representar melhor as condições de uso do solo sob a tendência histórica da área de Cerrado, que conduz para o desmatamento e aumento das atividades agropecuárias.

### 3.5.2 Modelagem Hidrossedimentológica

A calibração do modelo SWAT foi realizada utilizando os dados observados de vazão das estações fluviométricas (Jaraguá e Colônia dos Americanos) localizado na bacia, para o período de 01 de janeiro de 1974 a 31 de dezembro de 1980 (já inclusos os três anos de aquecimento do modelo). O conjunto de parâmetros da modelagem são apresentados na Tabela 12. A validação ocorreu no período de 01 de janeiro de 1981 a 31 de dezembro de 1994. Para essa etapa da modelagem foi utilizado o uso do solo do ano de 1991, com finalidade de analisar os processos hidrossedimentológicos da bacia, no período de 1974 e 1994.

Os cenários alternativos de uso do solo (otimista e o pessimista) foram simulados no modelo SWAT para o período de 01 de janeiro de 1974 a 31 de dezembro de 1994, utilizando os mesmos dados da série histórica de precipitação e meteorológicos, alterando apenas o uso do solo, ou seja, uma simulação com o cenário otimista e outra uma

simulação com o cenário pessimista. Essas simulações tiveram a finalidade de analisar as mudanças do uso do solo e seus reflexos nos processos hidrossedimentológicos na bacia para esses dois cenários alternativos de uso do solo.

### 3.6 MODELO SWAT (*SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL*)

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARNOLD et al., 2012) é um modelo hidrossedimentológico fundamentado nas características físicas da bacia hidrográfica. Esse modelo matemático é vinculado a um SIG (OLIVERA et al., 2006). Os processos físicos são diretamente modelados com base nos dados geográficos e informações tabulares de entrada, sendo sua interface capaz de armazenar dados geoespaciais, numéricos e de texto. Os dados geoespaciais referem-se aos arquivos do modelo digital de elevação (MDE), uso e ocupação do solo e tipos de solos, enquanto os dados numéricos e de texto caracterizam os dados espaciais, climáticos e hidrológicos. Logo, este modelo é considerado semi-distribuído e contínuo no tempo em que os fenômenos têm a capacidade de simular longos períodos diários, mensais ou anuais e o impacto da mudança do uso do solo em bacia hidrográfica.

#### 3.6.1 Determinação do Balanço Hídrico

O balanço hídrico simulado pelo modelo SWAT é composto de quatro volumes de controle: (a) reservatório superficial; (b) reservatório subsuperficial; (c) reservatório subterrâneo – aquífero raso ou livre; e (d) reservatório subterrâneo – aquífero profundo (NEITSCH et al., 2002; ARNOLD et al., 2012). É representado pela Equação 1:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Onde,  $SW_t$  a quantidade final de água no solo (mm);  $SW_0$  a quantidade inicial de água contida no solo no dia  $i$  (mm);  $t$  o tempo (dias);  $R_{day}$  representa a precipitação no dia  $i$  (mm);  $Q_{surf}$  o escoamento superficial no dia  $i$  (mm);  $E_a$  é evapotranspiração no dia  $i$  (mm);  $W_{seep}$  significa a quantidade de água que entra na zona vadosa no dia  $i$  (mm);  $Q_{gw}$  a quantidade de fluxo de retorno no dia  $i$  (mm).

### 3.6.2 Escoamento superficial

Inicialmente, quando a precipitação é aplicada a um solo seco, a taxa de infiltração é geralmente muito alta. E na medida em que diminui a taxa de infiltração o solo torna-se encharcado. Conseqüentemente, as depressões superficiais começam a encher e uma vez preenchidas essas depressões e o escoamento superficial inicia-se. Ou seja, o escoamento superficial ocorre sempre quando a taxa (quantidade) de água sobre a superfície do solo exceder a taxa de infiltração (NEITSCH et al., 2011).

O modelo SWAT fornece dois métodos para estimar o escoamento superficial: a partir do procedimento de Curva Número SCS (*Soil Conservation Service*, 1972), ou *Curve Number* e o método de *Green e Ampt* (1911) (NEITSCH et al., 2011), que requer os dados subsidiários de precipitação da bacia (CARVALHO, 2014). O modelo foi desenvolvido para estimar a quantidade de escoamento em diferentes usos da terra e tipos de solo (NEITSCH et al., 2011). A equação da Curva Número (CN) foi utilizada nesta pesquisa e está representada pela Equação 2:

$$Q_{sup} = \frac{(P_{diária} - I_a)^2}{P_{diária} - I_a + S} \quad \text{para } P_{diária} > I_a \quad (2)$$

em que  $Q_{sup}$  é o escoamento acumulado ou o excedente da precipitação (mm),  $P_{diária}$  é a intensidade de precipitação para o dia (mm),  $I_a$  é a abstração inicial que inclui armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm) e  $S$  é o parâmetro de retenção (mm) (NEITSCH et al., 2011).

Segundo Carvalho (2014), as recomendações do próprio SCS, as abstrações iniciais ( $I_a$ ), podem ser aproximadas para  $0,2S$ . Dessa forma,  $P_{day} > 0,2S$  é condição para que haja escoamento superficial no dia analisado. O parâmetro de retenção é definido na Equação 3:

$$Q_{surf} = \frac{(P_{day} - 0.2S)^2}{(P_{day} - 0.8S)} \quad (3)$$

onde,  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial ou excesso de precipitação (mm);  $P_{day}$  é a intensidade da precipitação para o dia (mm); e  $S$  representa o parâmetro de retenção (mm).

O valor de  $S$  está representado pela Equação 4:

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

### 3.6.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o mecanismo principal pelo qual a água é removida de uma bacia e inclui todos os processos em que a água na superfície da terra é convertida em vapor d'água, como: lago e represa, rios, evaporação do dossel de planta, transpiração, sublimação da neve e evaporação do solo (NEITSCH et al., 2011). No modelo SWAT foram incorporados três métodos para sua possível determinação: o método de *Penman-Monteith* recomendada pela FAO/ONU, método de *Priestley\_Taylor* e o método de *Hargreaves* (ABBASPOUR et al., 2015). O método utilizado no modelo foi o de *Penman-Moneith*, para obter a evapotranspiração a partir dos parâmetros climatológicos de radiação solar, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento, requeridos e avaliados no processo (NEITSCH et al., 2011). Representado pela Equação 5:

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot \left( 0,622 \cdot \lambda \cdot \frac{P_{air}}{P} \right) \cdot \frac{(e_z^s - e_z)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left( 1 + \frac{r_c}{e_a} \right)} \quad (5)$$

onde,  $\lambda$  é a densidade de fluxo de calor latente (MJ/m<sup>-2</sup>/d<sup>-1</sup>);  $E$  representa a taxa de evaporação de profundidade (mm/d<sup>-1</sup>);  $\Delta$  é a declividade da curva da pressão-temperatura do valor de saturação;  $H_{net}$  é a rede de radiação (MJ/ m<sup>-2</sup>/d<sup>-1</sup>);  $G$  é a densidade do fluxo de calor para o solo (MJ/m<sup>2</sup>/d<sup>-1</sup>);  $\rho_{air}$  é a densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>);  $C_p$  é o calor específico em pressão constante (MJ/Kg°C<sup>-1</sup>);  $e_z$  é a pressão do valor de saturação de ar na altura  $z$  (kPa);  $e_z^0$  é a pressão do vapor de água de ar na altura  $z$  (kPa);  $\gamma$  é a constante psicrométrica (kPa/°C);  $r_c$  é a resistência do dossel de planta (s/m<sup>-1</sup>); e  $r_a$  é a resistência de difusão da camada de ar (s/m<sup>-1</sup>).

De acordo com Perazzoli et al. (2013), o modelo SWAT calcula a evaporação de solos e transpiração das plantas separadamente. A evaporação potencial da água do solo e a transpiração das plantas são funções da evapotranspiração potencial e do índice de área foliar. O método escolhido para o cálculo foi o de Priestley-Taylor (1972), por apresentar melhor adaptação aos dados meteorológicos disponíveis. Este requer dados de radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, sendo representada pela Equação 6:

$$ETP = K_C \left( \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r \right) \quad (6)$$

onde, ETP é a evapotranspiração potencial (mm dia<sup>-1</sup>),  $E_r$  é a evaporação calculada pelo método do balanço de energia (mm/dia),  $\Delta$  é a inclinação da curva de pressão de saturação de vapor em função da temperatura (Pa/°C),  $\gamma$  é a constante psicrométrica (Pa/°C) e  $\alpha$  é o parâmetro Priestley-Taylor. O valor utilizado é 1,26, sendo representativo da média das diversas coberturas.

### 3.6.4 Estimava da produção de sedimentos na BHRA

Para estimar a produção de sedimentos, o modelo SWAT utiliza-se da Equação Universal de Perda do Solo Modificada (MUSLE) (WILLIAMS, 1975). Essa equação utiliza a quantidade de escoamento superficial para simular a erosão e a produção de sedimentos (BLAINSKI et al., 2017). É representada pela Equação 7:

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hrh})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (7)$$

sendo que, *sed* é a produção de sedimento em um determinado dia (ton);  $Q_{surf}$  é o volume do escoamento superficial (mm/ha);  $q_{peak}$  é a taxa de escoamento de pico (m<sup>3</sup>/s);  $area_{hrh}$  é a área da unidade de resposta hidrológica, na qual é estimada a produção de sedimentos (ha);  $K_{usle}$  é o fator de erodibilidade do solo (0,013 ton m<sup>2</sup> hr/(m<sup>3</sup> - ton mm));  $C_{USLE}$  é o fator de uso e manejo do solo;  $P_{USLE}$  é o fator de práticas conservacionistas;  $LS_{USLE}$  é o fator topográfico;  $CFRG$  de fragmentação esparsa (adimensional).

Na figura 10 mostra o esquema ilustrativo do funcionamento da modelagem hidrossedimentológica do SWAT das sub-bacias, elaborado de Uzeika (2009). O modelo calcula o aporte de sedimentos (SED\_SYLD) através da Equação Universal Modificada de Perda de Solo (MUSLE) para cada HRU, que compõe as sub-bacias. A autora ressalta que, nem todo material desprendido do solo na sub-bacia é transferido para o canal da rede de drenagem. Após a etapa do processo de equacionamento em cada sub-bacia, é realizada a transferência desses sedimentos gerados para o canal. Porém, na saída de cada sub-bacia há pontos de controle intermediários que contabilizam a produção de sedimentos de cada sub-bacia (SED\_OUT). Ao final, pode-se concluir que a produção de sedimento (SED\_OUT) na bacia hidrográfica refere-se a descarga sólida que passa pelo

ponto de controle selecionado (exutório), a qual recebe a contribuição das fontes de sedimentos das sub-bacias e da erosão do canal, então inicia-se a propagação destes para fora da bacia hidrográfica (UZEIKA, 2009; SANTOS, 2015).

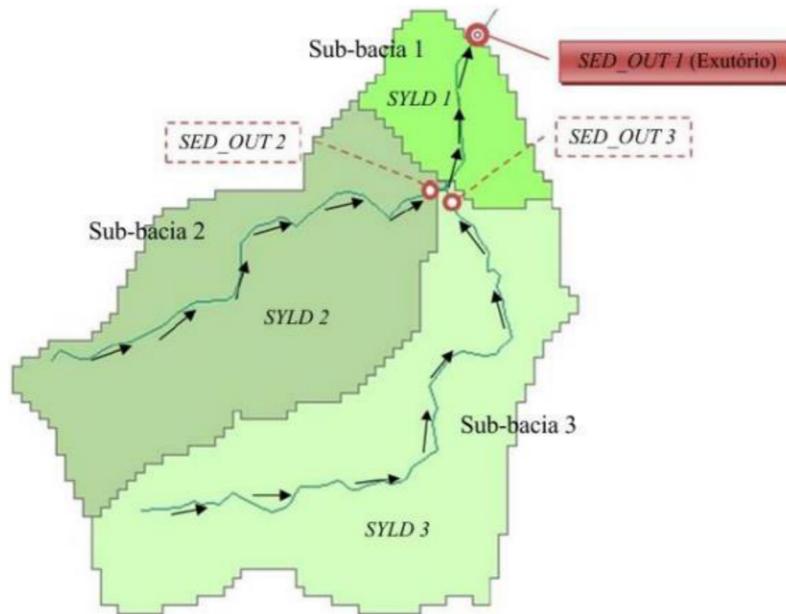


Figura 10 - Esquema ilustrativo do funcionamento da modelagem hidrossedimentológica do SWAT por sub-bacia. Adaptado de Santos (2015).

A documentação oficial do modelo SWAT, diferenciam os resultados dos processos erosivos modelados de duas maneiras: (a) SYLD (t/ha) é a quantidade de produção de sedimentos da sub-bacia que é transportada para o rio; (b) SED\_OUT (ton) é a quantidade de sedimento transportado pelo fluxo de água no canal que atinge a saída do canal da bacia hidrográfica (exutório) (ARNOLD et al., 2012)

Santos (2015) explica que a produção de sedimento (SED\_OUT) de uma bacia hidrográfica constitui a parte do solo erodido que atinge os cursos d'água e é transportada para fora da bacia. Portanto, a produção de sedimento é a fração do solo erodido que atinge o exutório da bacia hidrográfica.

De acordo esse autor, é possível analisar a quantidade de sedimentos que entra (SED\_IN) e o que sai (SED\_OUT) em cada canal e de cada sub-bacia, com base na modelagem hidrossedimentológica. E identifica se houve deposição ou erosão na calha da rede de drenagem. Segundo esse autor, essa análise é realizada através da Equação 8:

$$F_s = \frac{SED\_OUT}{SED\_IN} \quad (8)$$

onde, a fração de sedimentos ( $F_s$ ) indica cada trecho de rio que transporta para o trecho subsequente, com base na quantidade de sedimentos de entrada (SED\_IN).

### 3.6.5 Estimativa da produção de sedimentos das sub-bacias

A estimativa da produção de sedimentos por sub-bacias é calculada para cada HRU, através da Equação Universal de Perdas de solo Modificada, de Williams (1975) (ARNOLD et al. 2012; RENNÓ; SOARES, 2000). O modelo SWAT faz a previsão e quantificação desses sedimentos gerados por erosão, promovida principalmente pelo escoamento superficial que são destinados para o canal fluvial das referidas sub-bacias (JHA et al., 2006). Portanto, torna-se fundamental identificar na Bacia Hidrográfica do Rio das Almas as áreas, cujo solos sejam suscetíveis aos processos erosivos visando a obtenção e a necessidade de aplicação de medidas de conservação do solo (IRVEM et al., 2007).

A avaliação da produção de sedimentos por sub-bacia é muito importante para a melhoria das áreas que podem estar comprometidas pela falta de conservação do solo e de práticas inadequadas, derivadas das atividades agropecuárias. Ao serem identificadas, podem ser alertadas para os riscos ambientais e recomendadas para serem aplicadas o manejo sustentável (IRVEM et al., 2007).

Nessa pesquisa utilizou-se o ambiente de SIG para identificar e analisar a vulnerabilidade do solo à erosão hídrica, entre as sub-bacias da bacia hidrográfica do Rio das Almas. Para isso, utilizou interpretação de perdas de solo proposta por Irvem et al. (2007) que define seis classes para análise de risco à erosão e adaptou o limite de tolerância dessas perdas à literatura de Bertoni e Lombardi Neto (1995), que variam entre 4,5 e 15 ton/ha.ano. Esse limite adaptado é o que mais se aproxima da realidade dos solos em questão e de estudos na área do Cerrado. E estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação de perdas de solo em bacia hidrográfica

Perdas de solo (ton/ha.ano)	Classes de risco à erosão
< 4,5	muito baixa
4,5 - 10	baixa
10 - 15	moderada
15 - 50	forte
50 - 200	muito severo
> 200	extremamente severo

Fonte: adaptada de Irvem et al. (2007) e Bertoni e Lombardi Neto (1995).

### 3.7 BANCO DE DADOS PARA ENTRADA NO MODELO SWAT

O modelo SWAT necessita de uma diversidade de informações para ser executado, para tanto, utilizam-se dados de entrada específicos que são correlacionados com as características físicas da área de estudo. Neitsch et al. (2011) explicam que esses dados são os que descrevem a relação entre as variáveis de entrada e saída do modelo, para que possa caracterizar e equacionar: o ciclo hidrológico, o método curva número, a vazão de pico de escoamento superficial, o retardo de escoamento superficial, a percolação, o escoamento lateral, o fluxo de água subterrânea, a evapotranspiração, a produção de sedimentos, a propagação do fluxo de água, a análise de sensibilidade, a calibração e a verificação do modelo.

No entanto, o modelo já possui um banco de dados (*default*) indicativo para as bacias estudadas nos Estados Unidos da América (EUA), com os parâmetros de solo e de vegetação, que não se adequam a realidade brasileira. Para realizar a modelagem de forma consistente e de acordo com realidade da bacia em estudo, foi necessário criar um banco de dados específico como: **associação de classes de uso do solo** correspondente ao modelo SWAT, utilizando informações compiladas a partir de levantamento de dados **hidrometeorológicos** regionais e locais (temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade dos ventos e umidade relativa; e as séries históricas dos dados diários das estações pluviométricas e fluviométricas,) e os **geoespaciais** (Modelo Digital de Elevação; tipos de solo e os respectivos grupos hidrológicos; e o mapeamento de uso do solo de 1991). Os dados foram organizados em planilhas e mapas temáticos com propósito de serem processados em aplicativo acoplado ao *software* Argis10.4 – ArcSWAT, para a realização das simulações. Os dados estão descritos a seguir:

### 3.7.1 Associação de classes de uso do solo

Para adequar as classes de uso do solo de 1991 para a simulação do modelo SWAT, foi necessário relacionar para cada categoria um número de controle para associar as diversas informações contidas no banco de dado do simulador do modelo. Isso foi necessário para manter o maior nível de similaridade e de informações da área de estudo em relação a fitofisionomias vegetacionais, diversos cultivos e as estruturas das classes de uso do solo (*crop* e *urban*) ao banco de dados original do modelo (*default*).

A versão SWAT 2012 já possui no seu banco de dados (*default*) internamente o tipo de vegetação para crescimento de diferentes plantas anuais e perenes e as categorias de urbanização. Existem atualmente 127 categorias de uso da terra com diversos tipos cobertura vegetal, tipos de culturas e as feições naturais (corpo hídrico) e outras 9 categorias dos tipos de urbanização, considerando a densidade de edificações, como: residencial, comercial, industrial e outras. Tais informações atribuídas no *default* do modelo são originalmente compiladas a partir da literatura americana (BRESSIANI et al., 2015). As associações das classes estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Classes de uso do solo na BHRA associado as classes correspondentes ao banco de dados do modelo SWAT.

Classes de uso do solo	Estrutura	Classes de uso correspondentes ao modelo SWAT	Número de controle ( <i>default</i> )
Área de agricultura	<i>crop</i>	AGRL ( <i>Agricultural Land</i> )	1
Área de pastagem	<i>crop</i>	PAST ( <i>Pasture</i> )	2
Área urbana	<i>urban</i>	URLD ( <i>Residential-Low Density</i> )	3
Cerrado/Floresta	<i>crop</i>	FRSD ( <i>Forest-Deciduous</i> )	4
Cerrado Típico	<i>crop</i>	FRST ( <i>Forest-Mixed</i> )	5
Corpo Hídrico	<i>crop</i>	WATR ( <i>Water</i> )	6
Mata Ciliar	<i>crop</i>	FRSE ( <i>Forest-Evergreen</i> )	7
Solo exposto	<i>crop</i>	BARR ( <i>Barren</i> )	8

Fonte: Adaptada à rotina do modelo SWAT, conforme a classificação apropriada para o uso do solo de 1991. Org.: FONSECA, C. A. B (2019).

### 3.7.2 Dados hidrometeorológicos

Para simulação do modelo SWAT é necessário utilizar diversos parâmetros para alimentar o gerador climático do modelo, para a bacia hidrográfica em estudo. Esses parâmetros compõem as variáveis climáticas históricas do local como os valores diários, que foram obtidos dentro e/ ou em sua circunvizinhança. Dentre os dados diários estão: temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar, velocidade dos ventos e umidade relativa, compilados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)<sup>10</sup>. Segundo Neitsch et al. (2011) esses dados fornecem informações de umidade e energia que controlam o equilíbrio hídrico e conduzem todos os outros processos simulados dentro da bacia hidrográfica.

No modelo SWAT dispõe de gerador climático WXGEN, que foi originalmente desenvolvido para o modelo EPIC. E é por meio desse que são inseridos os dados regionais dos parâmetros climáticos da bacia em estudo, em formato texto a partir do gerador climático (*Weather Data Definition*) no banco de dados do SWAT 2012 (ABBASPOUR et al., 2007). Nessa pesquisa foram utilizados os valores diários de variáveis climáticas das séries históricas, tais como: precipitação (mm  $H_2O$ ), temperatura máxima e mínima do ar ( $^{\circ}C$ ), radiação solar incidente ( $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ ), velocidade do vento ( $m\ s^{-1}$ ) e umidade relativa do ar (%), de duas estações climatológicas: Pirenópolis e Goiás, para período de 1971 a 1994 (Tabela 6), no qual obteve-se dados satisfatórios.

Tabela 6 - Estações meteorológicas da BHRA.

Estação	Tipo	Código	Latitude	Longitude	Altitude
Pirenópolis	Climatológico	83376	-15,85°	-48,96°	740 m
Goiás	Climatológico	83374	-15,93°	-50,14°	512 m

Fonte: dados INMET, 2017. Org.: FONSECA, C. A. B. (2018).

As estações meteorológicas (Tabela 6) são monitoradas pelo INMET. Esses dados foram obtidos a partir da plataforma do Banco de dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP<sup>11</sup>), que apresentou dados diários em forma digital, de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial.

Para as séries históricas de precipitação, utilizou-se os dados diários de cinco estações pluviométricas, no período de 1971 a 1994: Jaraguá (01549003), Uruana

<sup>10</sup> <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>

<sup>11</sup> <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>

(01549009), UHE Serra da Mesa Fazenda Cajupira (01449005), Goianésia (01549001) e UHE Serra da Mesa Ceres (01549000). Quatro dessas estações encontram-se dentro da BHRA e uma próxima a área selecionada com a intenção de manter uma cobertura homogênea sobre a bacia e são monitoradas pela Agência Nacional de Águas – ANA. Tais dados foram obtidos na plataforma digital do *Hidroweb*<sup>12</sup>. Os dados de vazão foram adquiridos na mesma plataforma da Agência, para as duas estações fluviométricas, que são: Colônia dos Americanos (20490000) período 1974 a 1994 e Jaraguá (20100000) no período 1974 a 1994. Estão descritas na Tabela 7 e espacializadas na Figura 11.

Tabela 7 - Estações pluviométricas e fluviométricas da BHRA.

<b>Estações</b>	<b>Tipo</b>	<b>Código</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Elevação</b>
Goianésia	Pluviométrico	1549001	-15,33 S	-49,12 W	662 m
Jaraguá	Pluviométrico	1549003	-15,75 S	-49,33 W	607 m
UHE Serra da Mesa Ceres	Pluviométrico	1549000	-15,27 S	-49,55 W	608 m
UHE Serra da Mesa Fazenda Cajupira	Pluviométrico	1449005	-14,79 S	-49,17 W	471 m
Uruana	Pluviométrico	1549009	-15,49 S	-49,69 W	560 m
Colônia dos Americanos	Fluviométrico	20490000	-14,73 S	-49,06 W	455 m
Jaraguá	Fluviométrico	20100000	-15,71 S	-49,3 W	604 m

Fonte: ANA/HIDROWEB (2017). Org.: FONSECA, C. A. B. (2018).

<sup>12</sup> <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>

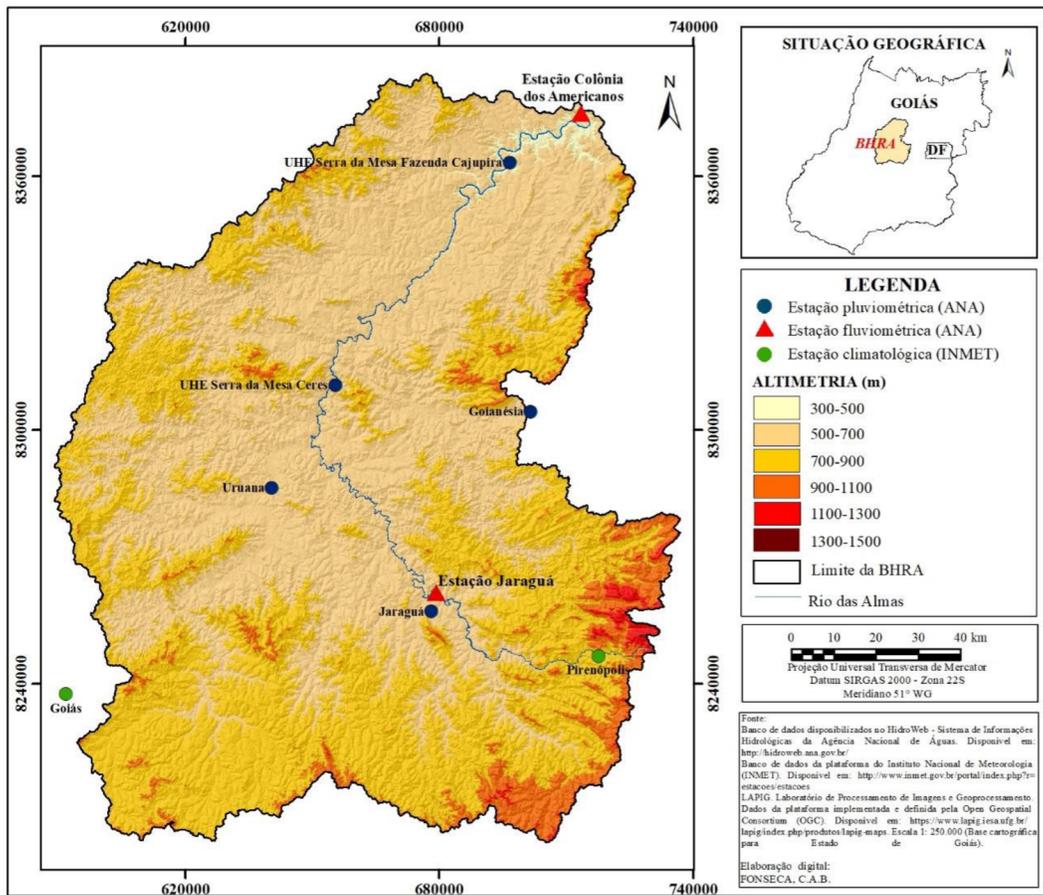


Figura 11 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas da ANA e INMET e a altimetria da BHRA. Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Todas as estações pluviométricas apresentaram falhas na série de dados, decorrentes de problemas operacionais, que podem ser tanto pelo observador ou pelo próprio aparelho utilizado para os registros. Assim, para facilitar a organização dos dados e para que o modelo tenha uma série pluviométrica contínua, as falhas das estações foram preenchidas por meio do método de ponderação regional (VILELLA; MATTOS, 1975). Este método simplificado permite preencher as falhas de um posto a partir de uma ponderação com base nos dados de três postos vizinhos, considerando que a precipitação nessa estação é proporcional as estações vizinhas. É dado pela Equação 9, descrita a seguir:

$$P_X = \frac{1}{3} \left( \frac{M_X}{M_A} P_A + \frac{M_X}{M_B} P_B + \frac{M_X}{M_C} P_C \right) \quad (9)$$

Onde,  $P_x$  a precipitação na estação a ser preenchida, representando as falhas;  $M_x$  a média aritmética das precipitações do posto com falha;  $M_A$ ,  $M_B$  e  $M_C$  a média aritmética das precipitações dos postos vizinhos;  $P_A$ ,  $P_B$  e  $P_C$  as precipitações nos postos vizinhos na a data a ser preenchida.

### 3.7.3 Dados Geoespaciais

#### 3.7.3.1 Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação (MDE), utilizado é derivado do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) 1 Arc-Second Global, com resolução de  $30 \times 30$  m obtidos a partir da fonte de dados do site USGS (*Science for a changing world*), de domínio público (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Para área da bacia, obteve-se as cenas: 14S51 e 14S495, 15S51 e 15S495, 16S51 e 16S495 (acesso em 14/04/2017), de referência WGS84. Convertidas para o Datum South American: SIRGAS 2000 UTM 22S no software ArcGis 10.4 (Figura 12).

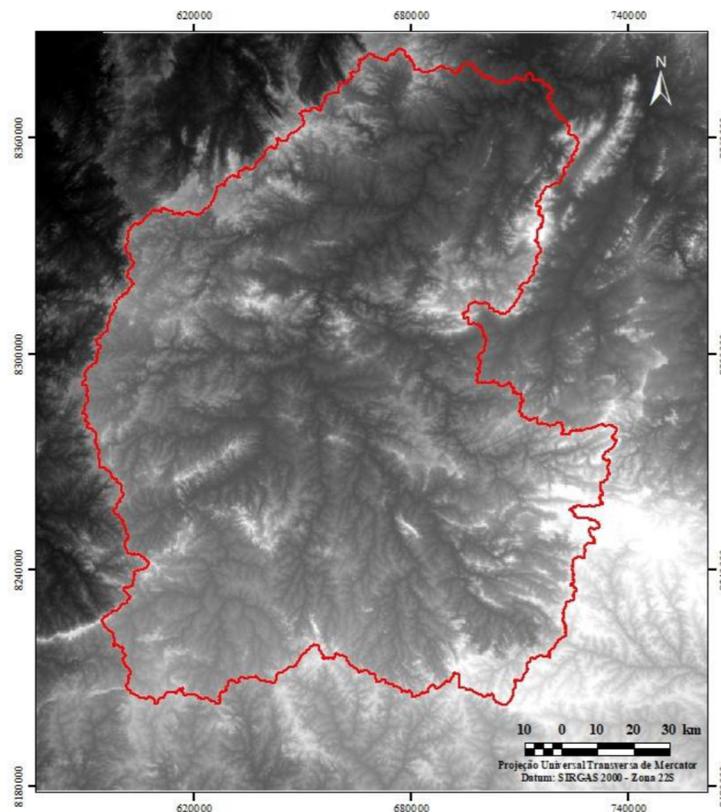


Figura 12 - Modelo digital de elevação utilizado no *ArcSWAT* para delimitação automática da BHRA. Fonte: USGS (2017).

Ao inserir o MDE no ArcSWAT, este permite delimitar automaticamente a bacia hidrográfica em estudo. Posteriormente o modelo efetuou a divisão da bacia em sub-bacias pela discretização, que geralmente é realizada com base na topografia, nos canais naturais e nos caminhos de escoamento da bacia (RENNÓ; SOARES, 2000). O modelo define a direção dos fluxos de drenagem e o acumulado, além de obter os respectivos cálculos de parâmetros, como: área da bacia hidrográfica, elevação (mínima, média e máxima) e a declividade média de cada sub-bacia.

De acordo com Castro (2013) a direção do fluxo de drenagem e do fluxo acumulado são gerados através de uma grade regular, tomando-se por base a linha de maior altitude do terreno. A nova grade numérica gerada determina a direção de maior altitude de um pixel em relação a seus oito pixels vizinhos. Assim, ocorre a descrição numérica da direção que a água irá percorrer após atingir cada pixel, que pode ser representada graficamente por meio da aplicação do código de direção.

Para definir a área mínima de acumulação de fluxo da BHRA, Farias (2018) realizou vários testes, considerando diferentes áreas mínimas que variaram entre 2.000 a 10.000 hectares e com diferentes combinações das características do solo, alterando as porcentagens de suas áreas limite e sua combinação predominante. Para cada projeto simulado foram avaliados coeficientes estatísticos e a eficiência dos dados gerados. Concluiu-se que as diferentes combinações desses fatores não alteram de forma significativa os resultados gerados nas simulações do modelo e, conseqüentemente, seus coeficientes (Tabela 8).

Tabela 8 - Coeficientes estatísticos para diferentes combinações no modelo.

Área mínima de acumulação do fluxo	Limites das áreas (%) (HRU)	Estação Jaraguá		Estação Colônia dos Americanos		Nº de Sub-bacias	HRUs geradas
		R <sup>2</sup>	Nash	R <sup>2</sup>	Nash		
10.000 ha	30 / 30 / 25	0,75	-2,27	0,86	-0,12	97	1641
10.000 ha	10 / 10 / 5	0,75	-2,34	0,85	-0,18	97	2943
5.000 ha	30 / 30 / 25	0,77	-1,93	0,87	-0,03	197	455
3.500 ha	30 / 30 / 25	0,75	-2,27	0,86	-0,13	305	1062
2.000 ha	0 / 30 / 25	0,75	-2,24	0,85	-0,16	503	736
<b>2.000 ha</b>	<b>Característica Predominante (HRU)</b>	<b>0,80</b>	<b>0,61</b>	<b>0,85</b>	<b>0,82</b>	<b>503</b>	<b>503</b>

Fonte: Simulações efetuadas por Farias (2018) e Fonseca, C. A. B (2019).

Ao final, depois de várias tentativas optou-se pela área mínima de acumulação de 2.000 hectares, devido a representatividade da bacia e por uma questão otimização do

modelo. Visto que, a divisão em várias sub-bacias significava atribuir as menores áreas a serem analisadas e ter uma maior capacidade, desempenho e otimização na execução do modelo. Os projetos simulados com grande quantidade de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) apresentaram coeficientes um pouco melhores, porém houve dificuldades para efetuar o processo de calibração automática no programa SWAT-CUP.

Em seguida, o modelo determinou o traçado da rede de drenagem a partir dos critérios estabelecidos pela área mínima de acumulação (2.000 ha). Depois dessa etapa, as estações fluviométricas (Colônia dos Americanos e Jaraguá) foram inseridas no modelo SWAT e o ponto de seção de saída da bacia (exutório), posteriormente o modelo realizou a discretização espacial em quinhentas e três sub-bacias, o que o caracteriza como um modelo semi-distribuído (ARNOLD et al. 2012; RENNÓ; SOARES, 2000), além de calcular os respectivos parâmetros para cada sub-bacia.

Na etapa seguinte, o modelo SWAT necessita dos produtos cartográficos para definir as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU), que são: o mapeamento de uso e ocupação do solo (1991), tipos de solos e a declividade definida no modelo que foram: 5%, 10%, 15% e 20%. Para proporcionar um melhor resultado na simulação hidrológica mensal e um bom desempenho do modelo, optou-se pelo maior número de sub-bacias e pela geração de uma única HRU por sub-bacia (HRU predominante e classe predominante), que foram demonstradas pelas estatísticas dos coeficientes: de *Nash-Sutcliffe* (NS) e de Determinação de Pearson ( $R^2$ ). Para cada sub-bacia, o modelo SWAT calculou os parâmetros topográficos referentes a área, declividade, tipo de solo e uso do solo, em seguida gerou um banco de dados estatístico com todas as elevações em metros.

Segundo Jha et al. (2006), o balanço hídrico de cada HRU é representado por três volumes de armazenamento: perfil do solo, aquífero raso e aquífero profundo. O fluxo de água e a produção de sedimentos são somados em todas as HRU de cada sub-bacia e as cargas resultantes são então escoadas através de canais fluviais para a saída da bacia hidrográfica. A erosão, perdas de solo e a produção de sedimentos são estimadas para cada HRU, através do calculado pela Equação Universal de Perda de solo Modificada (MUSLE) de Williams (1975). O modelo estima a capacidade de concentração, retenção de sedimentos e a quantidade desse fluxo de sedimentos que entra no canal fluvial e a erosão do canal.

### 3.7.3.2 Tipos de solo

O produto cartográfico dos tipos de solos da BHRA foi obtido na plataforma do Mapa de Solos do Brasil<sup>13</sup>, de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de solos (SiBCS, 2006). Efetuou-se o recorte da área da bacia na escala de 1:250.000, englobou-se a porção menor da classe dos solos Gleissolos (0,1% na bacia) que apresentava textura (média a argilosa), estrutura (moderada) e tipo de relevo compatível ao solo adjacente, Latossolos vermelho, para otimização do modelo SWAT. Posteriormente, reclassificou e atribuiu cada tipo de solo a um número de controle, converteu-se a base cartográfica do formato vetorial para formato *raster*, *Datum South American: SIRGAS 2000 UTM 22S*, utilizando o *software* ArcGis 10.4.

Na Tabela 9 apresenta os tipos de solos na BHRA, área absoluta e relativa e o número de controle atribuído para cada tipo de solo e reconhecidos no *default* do modelo SWAT.

Tabela 9 - Apresenta os tipos de solos na BHRA, área (absoluta e relativa) e o número de controle reconhecido pelo banco de dados do modelo SWAT

<b>Tipos de solo</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Número de controle (default)</b>
Argissolos Vermelho	2797,14	15,01	<b>1</b>
Cambissolos	3374,20	18,10	<b>2</b>
Chernossolos	1572,69	8,44	<b>3</b>
Latossolos Vermelho	10.010,51	53,72	<b>4</b>
Neossolos Litólico distrófico	882,30	4,73	<b>5</b>

Fonte: As áreas dos tipos de solos adaptadas à rotina do modelo SWAT. Org.: FONSECA, C. A. B. (2017).

Na área de estudo predominam os solos bem desenvolvidos, drenados e profundos como é caso dos Latossolos vermelhos (53,72%) de textura argilosa e encontram-se em superfícies planas a suave onduladas e com intensa atividade agropecuária. Os Cambissolos (18,10%) de textura média, relevo suave ondulado a moderadamente ondulado, caracterizados como rasos e pouco profundos. Os Argissolos vermelhos (15,01%) de textura média argilosa, ocupam as encostas dissecadas e estão dispostos em superfícies suave onduladas e onduladas. Os Chernossolos (8,44%) de textura argilosa ocupam a porção do relevo suave ondulado e ondulado. Os Neossolos Litólicos distrófico (4,73%) textura média e cascalhento com presença de afloramento rochoso e dispostos em relevos fortemente ondulado, estão concentrados nas bordas da bacia (Figura 13).

<sup>13</sup> [http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil\\_solos\\_5m\\_20201104](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104)

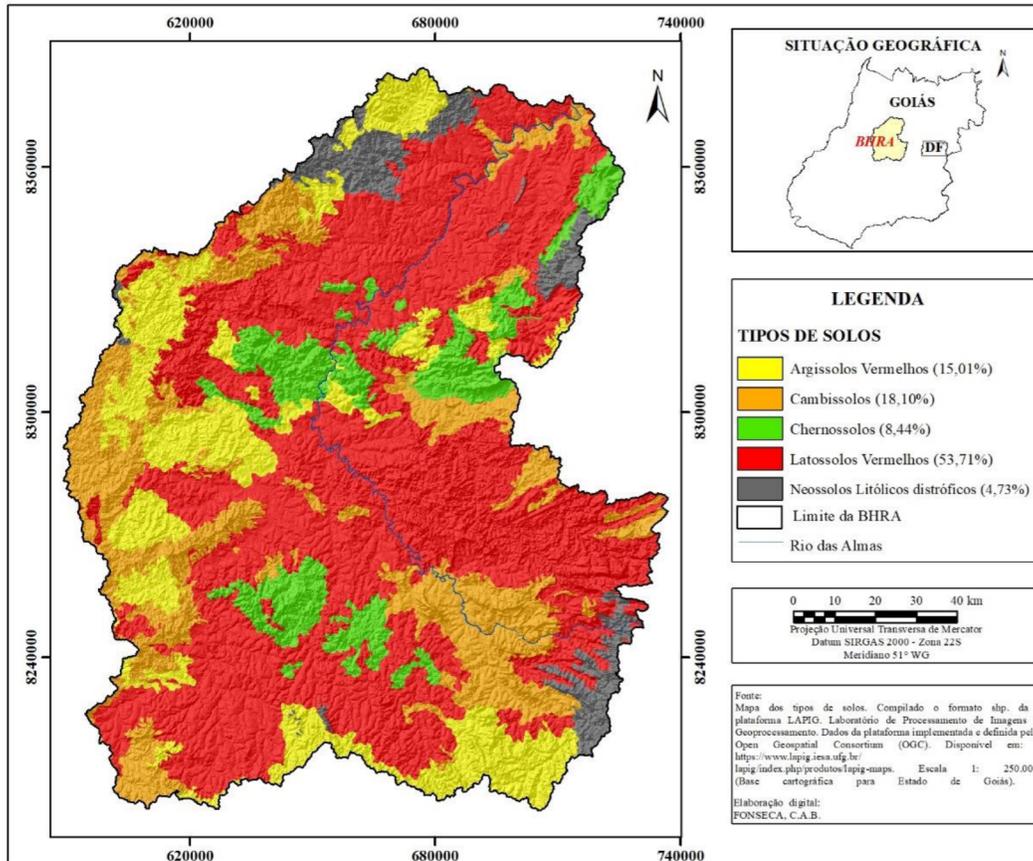


Figura 13 - Tipos de solos da BHRA. Org.: FONSECA, C. A. B. (2017).

De acordo com Sousa e Lobato (2004) e Sartori et al (2005), a morfologia dos solos na bacia hidrográfica do Rio das Almas estão relacionados as diferentes litologias, relevo, características pedológicas (textura e estrutura) e submetidos as variações climáticas do bioma Cerrado. E foram classificados na área de estudo, conforme a Embrapa (1999;2006) e Santos et al. (2018), como:

**Argissolos vermelhos** são do grupamento de solos com B textural (Bt) em vinculação com atributos que evidenciam argila de atividade baixa, de cores vermelhas acentuadas devido a teores mais altos e à natureza dos óxidos de ferro presentes no material originário, em ambientes bem drenados. Apresenta fertilidade natural muito variável devido à diversidade de materiais de origem. O teor de argila no horizonte subsuperficial (de cor vermelha) é bem maior do que no horizonte superficial. Ocorrem geralmente em áreas de relevo suave ondulado e ondulado, no entanto, podem ser

identificados em áreas menos declivosas, o que favorece a mecanização. As principais limitações são os declives dos terrenos mais acidentados e a deficiência de fertilidade.

Aptidão agrícola desse tipo de solo é considerada boa para agricultura, quando apresentam fertilidade natural e não dispõem da presença de fragmentos rochosos na superfície. Esse solo também tem aptidão agrícola para o uso mais intensivo, quando são intermediários para os Latossolos, mesmo contendo baixa fertilidade natural, uma vez que são profundos. Essa limitação pode ser corrigida, desde que ocorram em áreas de relevo suavizado. As culturas perenes também são uma alternativa para esse tipo de solos, principalmente, os mais profundos. Porém esse tipo de solo, geralmente, possui alta suscetibilidade à erosão.

**Cambissolos** são solos que apresentam heterogeneidade do material de origem, devido às formas de relevo e das condições climáticas. As características destes solos variam muito de um local para outro. Nos ambientes de ocorrência, normalmente estão associados a áreas de relevos moderadamente movimentados (ondulados a forte ondulado ou montanhoso), no entanto, pode ocorrer em superfície plana a suave ondulado e fora de alcance da influência do lençol freático. O horizonte B incipiente (Bi) tem textura franco-arenosa ou mais argilosa, geralmente, apresenta teor uniforme de argila e podendo ocorrer ligeiro decréscimo ou um pequeno incremento de argila do A para o Bi. Admite-se diferença marcante do A para o Bi em casos de solos desenvolvidos quando há descontinuidade litológica ou estratificação do material de origem. Estes solos podem apresentar espessura no mínimo mediana (50-100 cm de profundidade) e sem restrição de drenagem em relevo pouco movimentado, eutróficos ou distróficos apresentam bom potencial agrícola. Quando situados em planícies aluviais estão sujeitos a inundações, que se frequentes e de média a longa duração são fatores limitantes ao pleno uso agrícola desses solos.

Aptidão agrícola do Cambissolos apresenta potencial para uso agropecuário em áreas suavizadas, principalmente os de maior fertilidade natural e de maior profundidade. Porém em áreas de ocorrência com pouca profundidade e declivosas, apresentam fortes limitações para o uso agrícola, no entanto, são utilizados no uso da pecuária bovina. Em geral apresentam alta erodibilidade associada ao grande potencial de escoamento de superficial e são altamente suscetíveis aos processos erosivos.

**Chernossolos** são solos de desenvolvimento não muito avançado, originários de rochas ricas em cálcio e magnésio e presença de minerais esmectíticos que conferem alta atividade da argila. São classificados pela presença de horizonte diagnóstico superficial A chernozêmico de alta saturação por bases, teores elevados de carbono orgânico e de carbonato de cálcio acima de um horizonte B textural ou com caráter argilúvico e argila de atividade alta. Embora formados sob condições climáticas bastante variáveis e a partir de diferentes materiais de origem, esses solos apresentam alto potencial agrícola devido às características químicas: alta fertilidade natural (eutróficos) associada principalmente aos altos teores de cálcio, de magnésio e de matéria orgânica, baixa a mediana acidez e alta capacidade de troca de cátions relacionada à sua mineralogia. Com relação às características físicas, variam de solos pouco profundos a profundos, podendo apresentar suscetibilidade aos processos erosivos pela presença de horizonte subsuperficial B textural ou de horizonte com caráter argilúvico (gradiente textural). Pode ocupar a porção inferior das encostas, em geral, nas encostas côncavas, onde o relevo apresenta-se forte ondulado e, portanto, muito susceptíveis aos processos erosivos.

Aptidão agrícola dos solos Chernossolos está sujeita a limitações como dos solos Cambissolos, deve ser aplicado o manejo adequado que implica na adoção de práticas conservacionistas de prevenção aos processos erosivos, além de serem recomendados preservar a cobertura vegetal.

**Latossolos vermelhos** são solos constituídos por material mineral, apresentando coloração vermelha acentuada, devido aos altos teores de óxidos de ferro presentes no material originário em ambientes bem drenados e com características de textura e estrutura uniformes em profundidade. Em menor expressão, pode ocorrer em área de relevo ondulado. Por serem profundos e porosos ou muito porosos, apresentam condições adequadas para um bom desenvolvimento radicular em profundidade. Em geral, o fator limitante é a baixa fertilidade, contudo, com aplicações adequadas de corretivos e fertilizantes, aliada à época propícia para plantio de culturas, adaptadas a região e ao clima.

Aptidão agrícola dos solos Latossolos vermelhos é passível a utilização agrícola, devido ao tipo de relevo (plano a suave ondulado), que geralmente apresentam declividade inferior a 8%, facilitando a mecanização. Em geral, esse tipo de solo é identificado em extensas áreas na região Centro-Oeste, com ausência de impedimentos

físicos à mecanização agrícola, sendo responsáveis por grande parte da produção de grãos, cana-de-açúcar e, principalmente na atividade da pecuária bovina.

**Neossolos Litólicos distrófico** são compreendidos por solos rasos de baixa fertilidade (presença de alumínio), onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos.

Aptidão agrícola desse solo está sujeita a limitação ao uso por estar relacionados a pouca profundidade, presença de afloramento rochoso e aos declives acentuados. Estes fatores limitam o uso de máquinas e possui restrição natural na penetração de raízes, portanto, tem elevado risco de erosão e normalmente são indicados para preservação ambiental. No entanto, em algumas regiões, são utilizados, para produção de café, milho e pastagem.

### 3.7.3.3 Grupos Hidrológicos

O modelo SWAT requer para a realização da simulação um banco de dados específico que engloba os tipos de solo locais e os parâmetros das propriedades físico-hídricas. Segundo Neitsch et al. (2005), os parâmetros necessários são: número de horizontes, profundidade dos horizontes dos solos, grupos hidrológicos, profundidade da raiz, porcentagem de silte, areia, argila, cascalho, teor de carbono orgânico, argila, silte, areia e rocha.

Carvalho (2014) e Lima et al. (2013) destacam que os dados de solo sugeridos como padrão do modelo SWAT são desenvolvidos em países de clima temperado, portanto, os valores contidos no banco de dados do modelo, não se aplicam aos solos do Cerrado. Esses autores destacam para o limite de profundidade (3,50 m) que é um entrave do modelo SWAT para a representação da realidade em solos do Cerrado, principalmente no caso dos Latossolos, predominantes no bioma que, em geral, tem profundidades muito superiores a esta.

Para alimentar as características físico-hídricas dos tipos de solo existentes na BHRA na modelagem hidrossedimentológica, buscou-se as informações concebida no banco de dados da plataforma do Sistema de Informação de Solos Brasileiros<sup>14</sup>, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

---

<sup>14</sup> <https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>

Os dados dessa plataforma incorporam amostras e perfis de solos de todo Brasil, com descrição detalhada das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos perfis. Para essa pesquisa foram coletados dados específicos de perfis dos solos da BHRA, organizados na planilha Excel e separados de acordo com o formato *Access* (SWAT 2012). Os valores foram convertidos para unidade de medida (milímetros) exigida pelo SWAT, posteriormente inserida no banco de dados do modelo.

As características físico-hídricas dos tipos de solos definidas para o modelo, foram: Tipos de solos (SNAM); Número de horizontes (NLAYERS); Grupo hidrológico do solo (HYDGRP); Profundidade de raiz (SOL\_ZMX); porosidade (ANION\_EXCL); Fração de fissura do solo (SOL\_CRK); Textura; Profundidade dos horizontes (SOL\_Z); Densidade aparente do solo (SOL\_BD); Capacidade de água disponível no solo (SOL\_AWC); Condutividade hidráulica (SOL\_K); Carbono orgânico (CBN); Porcentagens de argila (CLAY), silte (SILT), areia (SAND) e cascalho (ROCK); Valores de albedo (SOL\_ALB); Fator de erodibilidade (USLE\_K). Esses parâmetros devem ser informados para cada um dos horizontes (camadas) de cada tipo de solo (CARVALHO, 2014), tiveram apoio das literaturas de Saxton e Rawls (2006), Salter e Williams (1997;1969) e Rawls et al. (1982).

Quanto ao grupo hidrológico da bacia, seguiu a classificação proposta pelo Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos Estados Unidos (NRCS, 2009), que considera quatro diferentes grupos hidrológicos do solo: A, B, C e D. Ainda de acordo com o NRCS (2009), os grupos hidrológicos combinados com as informações de uso do solo, práticas de manejo e as condições hidrológicas da área influenciam na determinação do valor do parâmetro da curva número (CN), que é atribuído a partir de eventos de chuva-escoamento, observados em bacias hidrográficas, para indicar o seu potencial de escoamento superficial (SANTOS, 2015), podem interferir na taxa de infiltração do solo (NEITSCH et al., 2011).

Os critérios que definem esses grupos hidrológicos, incluem a porosidade e a condutividade hidráulica saturada do solo foram adaptados de Steyaert (1993). Esses são parâmetros necessários para quantificar a água disponível para a vegetação e para modelar o movimento da água no perfil dos solos. A capacidade de água disponível no solo foi determinada a partir do proposto por Salter e Williams (1967), sendo estimada com base na proporção de areia, silte, argila e matéria orgânica no solo. Os valores utilizados de albedo foram propostos por Tsvetsinskaya (2002) e os fatores de erodibilidade calculados a partir da equação de erodibilidade proposta por Williams

(1975), que calcula esse fator com base nas características de areia, silte, argila e matéria orgânica presente no solo da bacia, explicado no trabalho de Farias (2018).

Para o cálculo do escoamento superficial, o modelo SWAT dispõe de dois métodos citados anteriormente, o Método de Curva Número (CN) e Método de infiltração de *Green* e *Ampt*. Portanto, nesse trabalho foi utilizado o método de CN em função da disponibilidade de dados diários de precipitação e é o mais utilizado em estudos com o modelo SWAT.

Segundo Neitsch et al. (2011) a equação de escoamento *Soil Conservation Service* (SCS) é um modelo empírico que começou a ser usado desde a década de 1950, fruto de pesquisa com mais de 20 anos de estudos envolvendo relações de precipitação e escoamento em pequenas bacias hidrográficas rurais nos EUA. O modelo foi desenvolvido para fornecer uma base consistente para estimar as quantidades de escoamento sob diferentes usos e tipos de solo.

O método curva número (SCS-CN) pode ser considerado um modelo de perda combinado, de todas as abstrações (incluindo interceptação, armazenamento em depressões, evaporação e infiltração) que são levadas em consideração nos seus cálculos (VILLELA e MATTOS, 1975).

O CN é um parâmetro adimensional que reflete o potencial de escoamento superficial de um determinado local e está relacionado com a cobertura, tipo e a condição de umidade do solo. Os seus valores encontram-se de acordo com os padrões de infiltração em uma bacia hidrográfica (VILLELA e MATTOS, 1975).

Conforme descrito nos trabalhos de Uzeika (2009), Salles (2012), Carvalho (2014) o valor da Curva Número do SCS (1972) altera de acordo com as condições de umidade do solo. E são definidas por três condições de umidade:

- CN1 – representa a Curva Número para condições I de umidade do solo, em que o solo se encontra seco;
- CN2 – corresponde a Curva Número para condições II de umidade do solo média de um solo, que define a capacidade de campo, como quantidade de água que o solo pode reter naturalmente quando, após o saturamento, cessa a drenagem rápida;
- CN3 – representa a Curva Número para condições III de umidade do solo, a capacidade da saturação dos solos.

Os valores de CN1 e CN3 estão relacionados com o CN2, representado pelas equações 10 e 11:

$$CN1 = CN2 - \frac{20(100-CN2)}{100-CN2+EXP [2,533-0,0636(100-CN2)]} \quad (10)$$

$$CN3 = CN2EXP[0,00673(100 - CN2)] \quad (11)$$

Os fatores de Curva Número têm sido tabelados pelo SCS com base no tipo de solo e uso do solo. Sartori et al. (2005) apresentam uma proposta de extensão para a classificação hidrológica dos solos com critérios baseados em propriedades para uma nova nomenclatura para o atual Sistema Brasileiro de Classificação dos solos brasileiros (EMBRAPA, 2006), no qual determina a CN de referência para os grupos hidrológicos envolvidos no uso de solos brasileiros. Portanto, os grupos hidrológicos aplicados na área da BHRA coincidem com os trabalhos na área de Cerrado, como de Lima et al. (2013), Chaves (2016), Castro (2013) e Carvalho (2014), estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Os tipos de solo e seus respectivos Grupos hidrológicos, na BHRA.

<b>Tipos de solo</b>	<b>Grupo hidrológico</b>
Argissolos Vermelho	<b>C</b>
Cambissolos	<b>C</b>
Chernossolos	<b>D</b>
Latosolos Vermelho	<b>A</b>
Neossolos Litólico distrófico	<b>D</b>

Fonte: Adaptado de Sartori et al. (2005). Org.: FONSECA, C. A. B. (2017).

### 3.8 ETAPA DE EXECUÇÃO NO MODELO SWAT

#### 3.8.1 Etapa de verificação e execução: Análise de sensibilidade

Na fase inicial da simulação do modelo SWAT, este exhibe parâmetros sensíveis a partir de uma série de variáveis de entrada relacionada a cobertura vegetal, aos tipos de solos, uso do solo, clima e outros. Devido ao extenso número de parâmetros de entrada, não é possível identificar ou estimar a incerteza de cada um deles. Desse modo é importante identificar os parâmetros que influenciam no modelo e sua importância nos resultados gerados, para diminuir as incertezas e aumentar a confiabilidade na resposta do modelo (ARNOLD et al., 2012).

Para definir os melhores parâmetros para bacia buscou-se o apoio de trabalhos relacionados ao estudo de modelagem hidrossedimentológica para a área de Cerrado, como de Castro (2013), Carvalho (2014), Chaves (2016), Ferrigo (2014), Salles (2012), Sarmiento (2010), Silva (2016) e Veiga (2014), os quais ajudaram a definir os parâmetros mais ou menos sensíveis de acordo com influência direta no comportamento hidrológico e sob as condições físicas e climáticas da bacia hidrográfica.

Na Tabela 11, apresenta resumidamente, os autores, a área de estudo e os parâmetros utilizados para área do Cerrado.

Tabela 11 - Os parâmetros mais utilizados para área do Cerrado.

<b>Autor</b>	<b>Bacia hidrográfica</b>	<b>Parâmetro utilizado</b>
Castro (2013)	Alto Rio Jardim (DF)	CN2, SOL_K, SURLAG, ALPHA-BF, GWQMN, CH-K2, RCHRG-DP, ESCO, SOL_AWC, Sol-Z
Carvalho (2014)	Alto Rio Jardim (DF)	CN2, SOL_K, ESCO, GW_DELAY, SURLAG.
Chaves (2016)	Córrego Sarandi (DF)	CN2, SOL_K, SOL_BD, GW_REVAP, CH_K2, ALPHA_BD, SOL_AWC
Ferreira (2016)	Ribeirão do Gama (DF)	CN2, ALPHA_BF, CH_K2, CH_N2, DEEPST, ESCO, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, SOL_AWC, SOL_BD, SHALLST, SURLAG
Ferrigo (2014)	Rio Descoberto (DF)	CN2, SOL_K, SOL_AWC, SHALLST, ANION_EXCL, REVAPMN, ESCO.
Salles (2012)	Ribeirão Pípiripau (DF)	CN2, RCHRG_DP, CH_K, SURLAG, ALPHA_BF, ESCO, GWMN, GW_REVAP, REVAPMN.
Sarmiento (2010)	Rio Descoberto (DF)	CN2, SURLAG
Silva (2016)	Rio Preto (DF/GO/MG)	CN2, SOL_K, SOL_AWC, CANMX, GW_DELAY
Veiga (2014)	Córrego Samambaia (GO)	CN2, SOL_K, SOL_Z, GWQMN, REVAPMN, SOL_AWC, GW_REVAP

Org.: FONSECA, C. A. B (2018).

Para definir os parâmetros que afetam a reposta hidrológica no modelo SWAT e aumentar a confiabilidade, utilizou-se as técnicas de calibração automática do programa SWAT-CUP 2012 v. 5.1.6.2, desenvolvido por Abbaspour et al. (2007)<sup>15</sup>. Nesse processo utilizou-se o algoritmo de autocalibração, o SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting Algorithm*). Esse algoritmo foi selecionado como critério de escolha e pela aplicabilidade de estudos em bacia hidrográfica nas regiões Sul, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil.

<sup>15</sup> [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)

Para testar os parâmetros na calibração automática, o SWAT-CUP 2012 indica no campo “*Part\_Inf.txt*” a faixa de variação que deve ser inserido para cada parâmetro com os respectivos intervalos (mínimo e máximo), para obter a análise de sensibilidade. Na testagem o valor de cada parâmetro pode variar dentro de cada intervalo até alcançar o melhor resultado (ABBASPOUR, 2011).

Nessa etapa a faixa de variação de cada parâmetro é definida em conjunto com os três métodos de alterações dentro do SWAT-CUP, que são: por **substituição direta**, quando o modelo usa o melhor valor encontrado para todos os pontos da bacia; método de **adição** quando o valor inicial do parâmetro em cada HRU é adicionado ao valor encontrado na calibração, podendo variar para cada unidade de resposta hidrológica na extensão da bacia; e pelo método de **multiplicação** quando o valor encontrado na calibração é multiplicado pelo valor inicial encontrado no *default* do modelo. O SWAT permite escolher para quais sub-bacias esses parâmetros vão ser alterados. Para o estudo, determinou-se que os parâmetros fossem substituídos em todas as HRU de suas áreas de contribuição.

Os parâmetros que vai ser testados para identificar os mais ou menos sensíveis no processo de execução do SWAT-CUP para as condições físicas e climáticas da BHRA, são: CN2 (adimensional) que é o parâmetro chave do método SCS que corresponde ao valor da Curva Número (CN) para a condição II de umidade do solo. Além dos parâmetros: SURLAG (coeficiente de retardo do escoamento superficial); SOL\_K (condutividade hidráulica saturada do solo); SOL\_AWC (capacidade de água disponível no solo); GWQMN (limite entre a profundidade do aquífero raso e a superfície); RCHRG\_DP (fração de água percolada para o aquífero profundo); ALPLHA\_BF (recessão do escoamento de base); GW\_DELAY (tempo de retardo da água subterrânea); e GW\_REVAP (retardo do escoamento subterrâneo); CANMX (evapotranspiração da vegetação); ESCO (evapotranspiração da camada superior do solo); e Ch\_N2 (coeficiente de rugosidade de *Manning*).

Na Tabela 12 apresentam os processos, os parâmetros, a descrição de parâmetros utilizados na fase de análise de sensibilidade e os melhores intervalos fixos (limites inferior e superior) dos parâmetros e os métodos de aplicação.

Tabela 12 - Conjuntos de parâmetros com os intervalos de variação utilizados na calibração do modelo.

Processo	Parâmetro	Descrição	Limite Inferior	Limite Superior	Método
Escoamento superficial	CN2	Curva número na condição II (adimensional). Utilizado para o cálculo do escoamento superficial pelo método SCS Curve Number. É obtido em função da permeabilidade, do tipo de solo, do uso e da condição antecedente de umidade no solo	-1	100	Multiplicação
	SURLAG	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (adimensional). Menores valores representam maior atraso no escoamento superficial.	0	24	Substituição
	CH_N2	Coefficiente de Manning do canal principal (s.m-1/3)	0	0.3	Substituição
Evapo-transpiração	ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional). É um parâmetro importante no processo de evapotranspiração. Os valores desse parâmetro representam um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais elevados significam maior evaporação na camada superior do solo.	0.5	1.0	Substituição
	CANMX	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm)	0	100	Substituição
Água no solo	SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h). Necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada do solo.	-0.8	100	Multiplicação
	SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm/H <sub>2</sub> O)/mm solo). Utilizado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação.	-0.25	1	Multiplicação
Água subterrânea	ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base (adimensional). É um indicador direto da resposta do fluxo subterrâneo para as mudanças na recarga. Maiores valores desse parâmetro indicam maior recarga do aquífero e menor fluxo de base.	0	1	Substituição
	GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno (mm). Quanto maior o valor desse parâmetro uma porção maior do fluxo de base é retardada.	0	1000	Substituição
	GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água à zona não saturada (adimensional). É designado como uma constante de proporcionalidade para o cálculo da quantidade máxima de água que se move no solo em resposta às deficiências de água.	0	0.2	Substituição
	GW_DELAY	Retardo do escoamento subterrâneo (dias). Retarda o tempo em que a água se move pelas camadas do solo até encontrar o aquífero raso.	-30	450	Adição
	RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (adimensional).	0.1	1	Multiplicação

Fonte: Os melhores parâmetros encontrados por Farias (2018), para as condições reais da BHR. Adaptado de Sarmiento (2010). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

### 3.8.2 Etapa de execução: calibração e validação do modelo SWAT

Sarmento (2010) explica que os algoritmos que permitem a calibração automática do modelo, funcionam a partir de função objetivo que quando otimizadas derivam de conjunto de valores de parâmetros para se ajustar melhor ao modelo. Sendo assim, a calibração tem uma grande interferência no desempenho da modelagem, quanto melhor a calibração maior a aderência dos resultados do modelo em relação aos dados medidos.

Nesse sentido, a execução da etapa da calibração automática foi realizada no SWAT-CUP 2012 utilizando os parâmetros descritos da Tabela 12. No processo de calibração do modelo foi executado em conjunto com as duas estações fluviométricas (Colônia dos Americanos e Jaraguá), no período de dados observados de vazão com frequência de saída mensal para o período de 01 de janeiro de 1974 a 31 de dezembro de 1980 (sete anos), já incluso o período de aquecimento do modelo de três anos (1971 a 1973). Lembrando que esse período de calibração (1974 a 1980) foi escolhido em função da melhor otimização no processo de calibração do modelo.

Nesse processo de calibração automática a execução do modelo será realizada em 500 simulações para cada iteração, dentro de cada intervalo limitado e de acordo com a Tabela 12. O modelo testa os diferentes valores dos parâmetros dentro dos intervalos permitidos para cada 500 combinações e replique as condições antecipadamente a aproximação realística, ou seja, mais próximos da realidade dos dados medidos (ABBASPOUR, 2011).

O processo de calibração termina quando é encontrado um ponto ótimo da função objetivo, através do índice de desempenho da modelagem (Eficiência de *Nash-Sutcliffe* e Coeficiente de determinação de Pearson ( $R^2$ )), de acordo com as recomendações de Moriasi et al. (2007). Na iteração final, o modelo apresenta uma melhor faixa de valores alcançados para cada parâmetro, define no gráfico (*Global Sensitivity*) os parâmetros que são mais e menos sensíveis para uso do solo de 1991, descritos no item 4.4.3.

Após a etapa de definição dos parâmetros aceitáveis e conferidos por meio dos coeficientes estatísticos, utiliza-se os seguintes critérios do manual do SWAT-CUP<sup>16</sup>:

- (a) No campo, *Summary\_Stat.txt file / BEST\_sim\_no*, anote o número (438) da melhor simulação dos pares de parâmetros;

---

<sup>16</sup> [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)

- (b) No *SUF12\_swEdit.Txt*, define o valor inicial (438) e final (438) para o número da melhor simulação na etapa 1.
- (c) E execute a calibração (única), em *SUF12\_run.bat*.

Após esse procedimento, os valores dos parâmetros ajustados no período de calibração (1974-1980) são transpostos para o modelo SWAT, via ArcSWAT, executado de forma que os dados ajustados, correspondesse aos dados medidos. Em seguida, o conjunto de parâmetros ajustados no modelo foi submetido ao processo de validação. Nesse processo foi utilizado o período de 1981 a 1994 (quatorze anos), utilizou os dados do período de 1978 a 1980 para o aquecimento do modelo. Os resultados de análise dos processos hidrológicos na bacia estão descritos no item 4.4.4.

### 3.8.3 Índices de desempenho da modelagem

Para avaliar a eficiência dos dados simulados no modelo SWAT do uso e ocupação do solo de 1991 utiliza-se as comparações gráficas e análises estatísticas. As avaliações gráficas no modelo se dão pela análise da comparação de hidrograma com os dados observados de vazão e os dados simulados. Para o índice de desempenho foi empregada análise da comparação entre as vazões observadas e as simuladas, utilizando os três métodos estatísticos:

- (a) O Coeficiente de Eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NS). O NS pode variar de  $-\infty$  (infinito negativo) a 1 (associação perfeita), obtido pela Equação 12:

$$NS = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \overline{E_s})^2} \right) \quad (12)$$

no qual, NS analisa o comportamento dos dados simulados em relação aos dados observados;  $E_m$  o evento observado;  $E_s$  o evento simulado pelo modelo;  $\overline{E_s}$  a média do evento observado no período de simulação; e  $n$  o número de eventos.

- (b) O Coeficiente de Determinação de Pearson ( $R^2$ ). O  $R^2$  mede a associação linear entre duas variáveis, também variando de  $-\infty$  (infinito negativo) a 1 (associação perfeita), sendo obtido pela Equação 13:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (13)$$

sendo  $x_i$  os valores observados;  $x_m$  a média dos valores observados;  $y_i$  os valores calculados pelo modelo;  $y_m$  a média dos valores calculado pelo modelo; e  $n$  o número de eventos.

A porcentagem BIAS (PBIAS) avalia a tendência geral que os dados simulados, mostram em subestimar (valores PBIAS positivos) ou superestimar (valores PBIAS negativos) os dados medidos (BONUMÁ et al., 2010):

$$PBIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \quad (14)$$

em que: PBIAS é o desvio dos valores simulados ( $Y^{sim}$ ) em relação aos valores medidos ( $Y^{obs}$ ), expresso em porcentagem.

Para análise de sensibilidade e condições climáticas de entrada dos processos hidrossedimentológicos gerado pelo uso do solo de 1991, levou-se em conta o desempenho das estatísticas aplicada de acordo com as recomendações de Moriasi et al. (2007). Esses coeficientes definem a eficiência da modelagem. A simulação sendo classificada insatisfatória é necessário a realização subsequente da calibração do modelo. A classificação da eficiência da modelagem está representada na Tabela 13.

Tabela 13 - Classificação da eficiência da modelagem hidrológica.

Classificação	R <sup>2</sup>	NS
Muito boa	0,80 < R <sup>2</sup> < 1,0	0,75 < NS < 1,0
Boa	0,70 < R <sup>2</sup> < 0,80	0,65 < NS < 0,75
Satisfatória	0,60 < R <sup>2</sup> < 0,70	0,60 < NS < 0,70
Insatisfatória	R <sup>2</sup> = 0,60	NS = 0,50

Fonte: Adaptada de Moriasi et al. (2007).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 COMPORTAMENTO DE CHUVA E VAZÃO NA BACIA EM ESTUDO

A Figura 14 apresenta os dados de precipitação no período de 1974 a 1994. A média de chuva nesse período foi de 1.612,23 mm. Percebe-se que entre os anos de 1974 e 1980 houve uma elevação gradual pluviométrico, em média de 3%, após esse período possui algumas oscilações com tendências crescentes e decrescentes nas precipitações. Os anos que apresentaram chuva acima da média foram os de 1978, 1979, 1980, 1982, 1983, 1985, 1989 e 1992, com: 1.666,84 mm, 1.750,74 mm, 1.978,64 mm, 1.842,74 mm, 1.931,06 mm, 1.943,08 mm, 1.929,72 mm e 2.245,62 mm, respectivamente.

A média anual da vazão ficou em 337,80 m<sup>3</sup>/s. Para os mesmos anos citados anteriormente, os fluxos registrados foram de 351,33 m<sup>3</sup>/s, 430,09 m<sup>3</sup>/s, 588,17 m<sup>3</sup>/s, 473,85 m<sup>3</sup>/s, 481,03 m<sup>3</sup>/s, 428,56 m<sup>3</sup>/s, 310,35 m<sup>3</sup>/s e 439,06 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Portanto, os elevados índices pluviométricos podem ter influenciado nos processos hidrossedimentológicos da bacia.

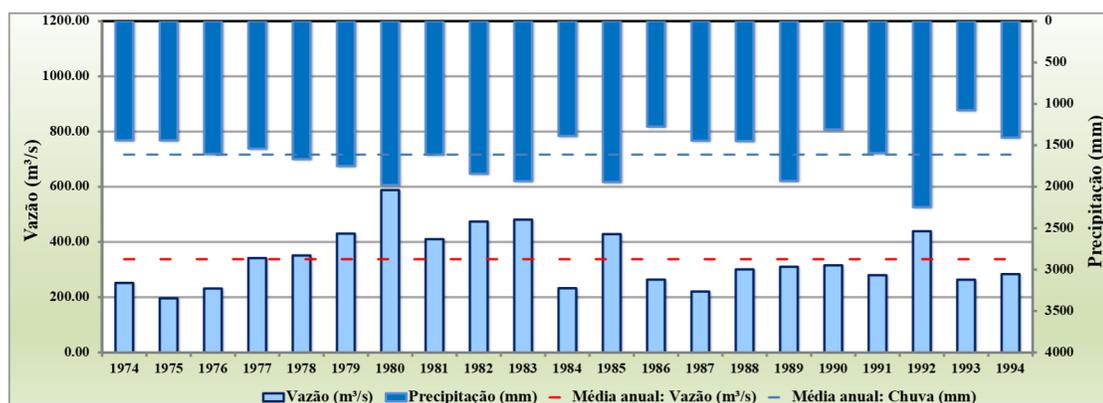


Figura 14 - Eventos da média anual da precipitação e vazão na BHRA (1974 a 1994). Fonte: *HIDROWEB* (2017). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

O hidrograma da Figura 15 mostra o comportamento das médias mensais para chuva e vazão no período de 1974 a 1994, evidenciando regime fluviométrico que tem uma sazonalidade marcante com período maior para vazão que se estendeu de novembro a abril e o período de estiagem de maio a setembro. Percebe-se que os maiores volumes da vazão registrados pela estação Colônia dos Americanos para os meses de janeiro (642,63 m<sup>3</sup>/s), fevereiro (712,75 m<sup>3</sup>/s), março (592,81 m<sup>3</sup>/s) e abril (445,94 m<sup>3</sup>/s) condizem com os meses com as maiores intensidades de chuva na bacia, com 307,72 mm,

234,02 mm, 208,23 e 107,80 mm, respectivamente. Esses índices indicam um grande volume de água disponível, que pode influenciar nos processos hidrossedimentológicos.

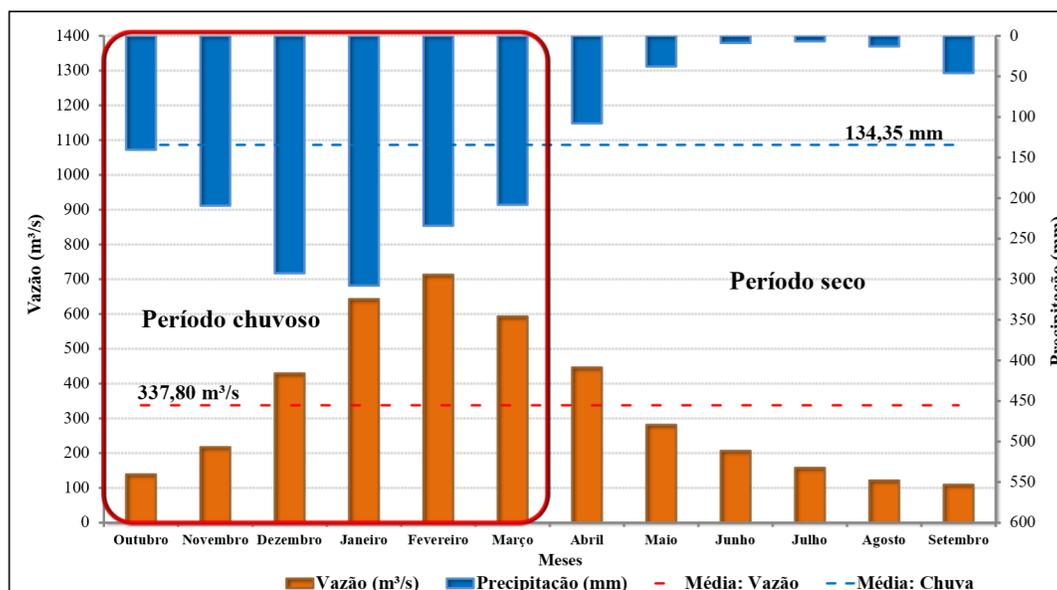


Figura 15 - Comportamento da média mensal de chuva-vazão para período chuvoso e seco na BHRA (1974 a 1994). Fonte: HIDROWEB (2017) Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

As vazões referentes aos meses subsequentes (maio, junho, julho, agosto e setembro) podem estar sendo alimentadas pelos fluxos dos sistemas subterrâneos (Figura 8), em função do período caracterizado como seco, na região do Cerrado. Os decréscimos são bem significativos para as vazões em relação aos meses chuvosos, principalmente entre os meses de junho (29,13%), julho (22,20%), agosto (17,05%) e setembro (15,28%) que não ultrapassam os 108,79 m³/s. A partir do mês de outubro as vazões se elevam gradualmente em 19,44% (140,48 mm), coincidindo com início das chuvas (estação da primavera). Portanto, as vazões retornam ao comportamento ascendente nos meses de novembro e dezembro com 30,31% e 60,29%, respectivamente.

Para os meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março a precipitação ficou acima da média mensais (134,35 mm), enquanto a vazão encontra-se acima da média mensal (337,80 m³/s) a partir dos meses de dezembro, janeiro, fevereiro, março e se estende até mês de abril.

No que tange a distribuição das chuvas, a Figura 16 mostra que na área de estudo a precipitação média anual (1971 a 1994) varia entre 1.210,42 mm a 1.717,4 mm. Nesse comportamento percebe-se que a distribuição espacial das chuvas se apresenta irregular ao longo da bacia. Os altos índices pluviométricos estão situados nas regiões sul e sudeste

da bacia, com altitudes variando entre 700 m a 1.300 m e ao norte da bacia variando entre 300 m e 900 m. As estações pluviométricas que apresentaram os maiores volumes de chuva na região foram: Jaraguá, localizada a montante e a UHE Serra da Mesa Fazenda Cajupira que se encontra a jusante. A primeira variou entre 1.576,25 mm e 1.717,4 mm, enquanto a segunda estação registrou uma quantidade de chuva entre 1.476,84 mm e 1.576,24 mm.

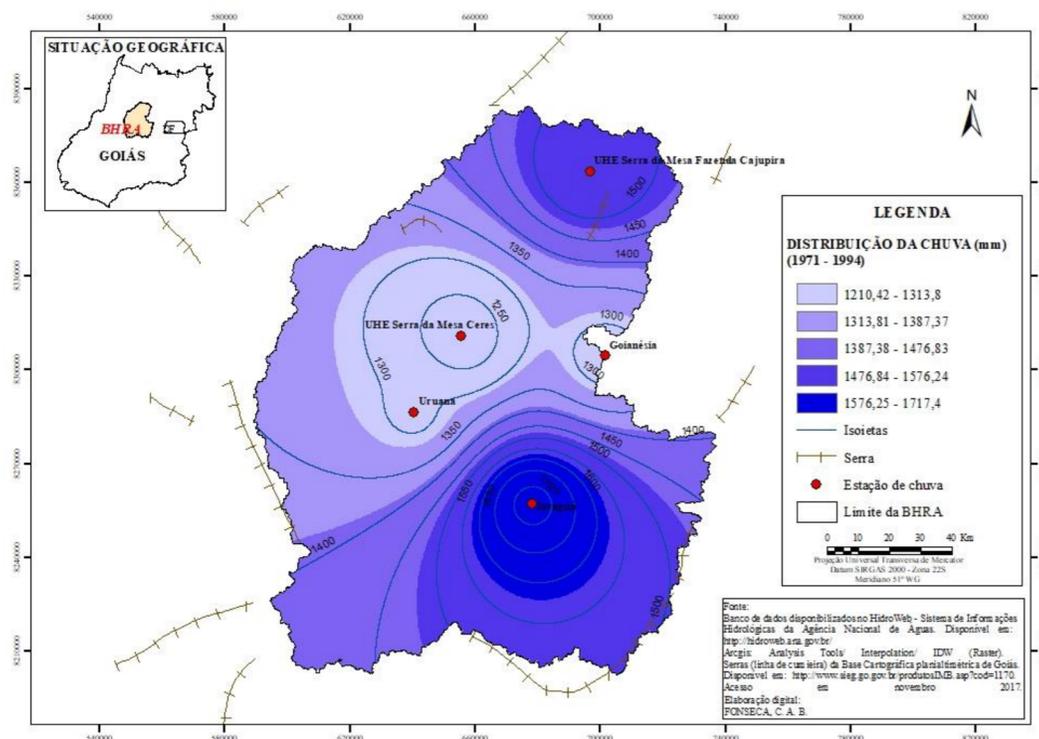


Figura 16 - Distribuição espacial da precipitação média anual da BHR A (1971 e 1994). Fonte: *HIDROWEB* (2017). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Por outro lado, as estações pluviométricas situadas no interior da bacia, como Goianésia, UHE Serra da Mesa Ceres e Uruana apresentaram uma distribuição espacial das precipitações inferior em relação as demais estações pluviométricas citadas anteriormente, com volume que variou entre 1.210,42 mm e 1.313,8 mm. Esse comportamento heterogêneo na distribuição das chuvas pode estar sendo influenciado pelas barreiras naturais do divisor de água da bacia e no interior da mesma, compreendidas pela Serra Dourada localizada a Oeste e os outros alinhamentos de serras ao Sul, Leste e parte ao Centro-Norte da bacia, Serra dos Pirineus, Serra do Cotovelo, Serra da Bocaina e Serra Santa Barbara.

A Figura 17 espacializam as classes de declividades. Essas foram agrupadas em cinco categorias com valores expressos em porcentagem, conforme as normas definidas

pela Embrapa (2006) foram adaptadas ao modelo SWAT, que exige uma distribuição das classes de declividade na simulação. As declividades adotadas para bacia em estudo, são: 0 a 5% de declividade (Relevo plano) com 29,97% da área; 5 a 10% de declividade (Relevo plano a suave ondulado) com 35,39% da área; 10 a 15% de declividade (Relevo moderadamente ondulado a ondulado) com área de 16,66%; para os declives entre 15 a 20% (7,78%) e acima de 20% (10,19%) são caracterizados como relevo ondulado a forte ondulado.

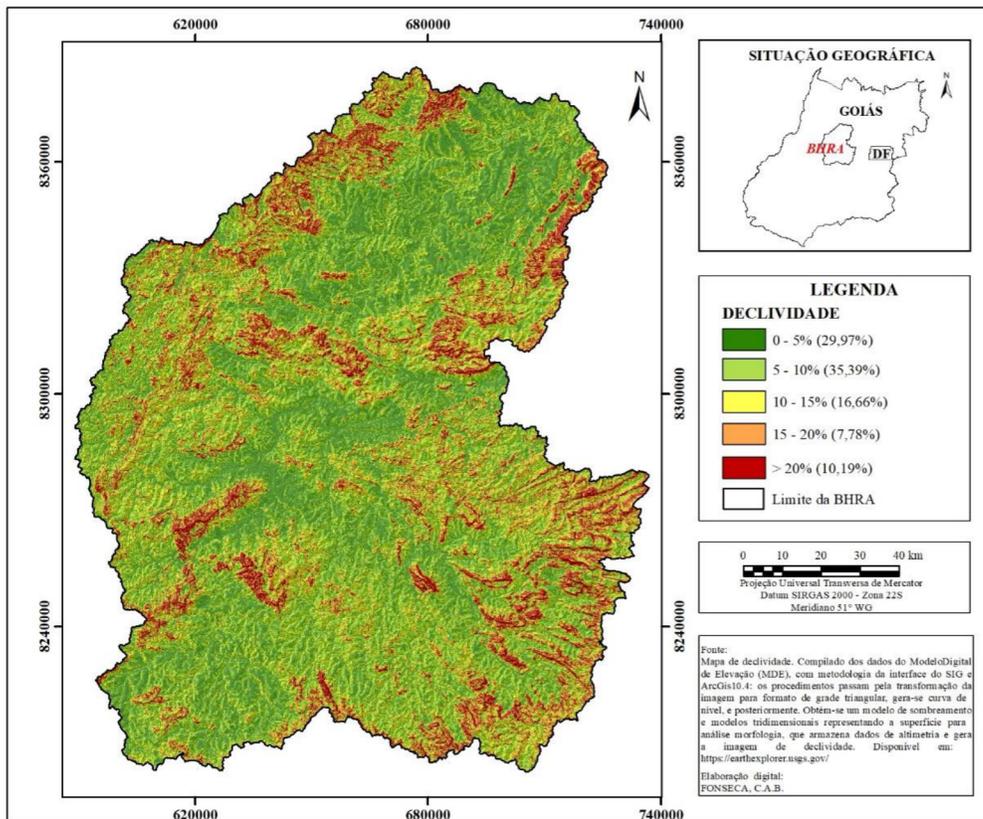


Figura 17 - Declividade da bacia hidrográfica do rio das Almas/GO. Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Observa-se nessa classificação da Figura 17 que as declividades são bem complexas, devido a relação de interdependência entre o comportamento geológico, relevo e aos tipos de solo na bacia. Nesse universo, as características pedológicas se expressam na utilização do uso do solo em determinado espaço, por exemplo, as áreas qualificadas com baixo e médio potencial de geração de escoamento e alto potencial de armazenamento de água são compostos pelas classes de solos: Latossolos vermelhos, Chernossolos e Argissolos vermelhos (LESPSCH, 2002 e 2010), situados sobre o relevo

plano a suave ondulado tendo a presença intensiva de atividades agropecuárias, que também favorece a mecanização agrícola. Enquanto nos declives elevados associados aos relevos movimentados estão relacionados aos solos ditos rasos ou pouco profundos, com maior capacidade de geração de escoamento e menor capacidade de armazenamento de água (LESPSCH, 2002 e 2010), encontram-se os solos Cambissolos e os Neossolos Litólicos distróficos (agrupa as áreas de afloramento rochoso).

#### 4.2 EVOLUÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/GO NOS ANOS DE 1991, 2006 E 2017

A Tabela 14 apresenta as classes de uso do solo no contexto da bacia, para os anos de 1991 (Uso do solo 1), 2006 (Uso do solo 2) e 2017 (Uso do solo 3). Para o uso do solo 1 (1991), as classes de vegetação natural representativas foram: cerradão/floresta, cerrado típico ocupavam respectivamente, 12,70%, 7,44% e as matas ciliares tiveram uma redução mais significativa de 8,41%, em função da associação com a inundação de áreas para formação do lago de barragem de Serra da Mesa. A vegetação ocupou pequenas áreas, por ter sido amplamente retirada nas décadas de 1970 e 1980 estimulado por projeto governamental adotado para as áreas do Cerrado, que demandava grande volume de recursos financeiros para a expansão da agropecuária e favorecer a ocupação da região (SANO et al., 2007; MIRANDA; NETO, 2014; PAULA, 2011; ARRAIS, 2013).

Tabela 14 - Apresenta as classes de uso do solo no contexto da BHRA para os anos de 1991, 2006 e 2017.

Classes de uso do solo	Uso do solo 1 (1991)		Uso do solo 2 (2006)		Uso do solo 3 (2017)		Variação Temporal (1991-2017) (2017-1991/1991)*100
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	
Cerradão/Floresta	2.366,42	12,70	2.028,36	10,88	2.008,49	10,78	-15,13
Cerrado Típico	1.386,46	7,44	1936,24	10,39	1.937,62	10,40	2,96
Mata Ciliar	1.566,73	8,41	1.254,00	6,73	956,39	5,13	-38,96
Área de agricultura	3.620,07	19,42	5.237,09	28,10	6.348,93	34,07	75,38
Área de pastagem	6.893,04	36,99	7.364,46	39,52	6.791,82	36,44	-1,47
Solo exposto	2.667,71	14,31	648,65	3,48	402,00	2,16	-84,93
Corpos hídricos	95,80	0,51	112,24	0,60	104,94	0,56	9,54
Área urbana	40,61	0,22	55,78	0,30	86,64	0,46	113,36

Fonte: Conforme a classificação e interpretação de imagens de satélite, do sensor TM5 e OLI8, para o uso do solo de 1991, 2006 e 2017. Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Sobre a vegetação natural, converteu-se 36,99% para áreas de pastagens e os outros 19,42% foram transformados em agricultura. Nessas conversões de atividades, deixaram a terra desprotegida (14,31%) mais susceptível a concentração do fluxo de água superficial, aos processos erosivos e a degradação do solo. A área urbana teve uma taxa menor com 0,22%, seguido pelo corpo hídrico com 0,51% que é representado por represamento de açudes, lagoa natural e artificial.

A Figura 18 exhibe espacialmente o Uso do solo 1 (1991). Percebe-se que agricultura está distribuída em diferentes áreas a sudoeste, centro e norte da bacia, onde ocorrem superfícies plana a suave ondulado (Figura 17) e a predominância dos solos Latossolos vermelhos, Argissolos vermelhos, Chernossolos e Cambissolos (Figura 13) e também ao longo das planícies do rio das Almas e seus afluentes. As áreas de pastagens naturais estavam sendo paulatinamente substituídas pelas cultivadas no início da década 1990 (SILVA, 2013), se expandiram sobre as áreas de relevo suave ondulado e moderadamente ondulado.

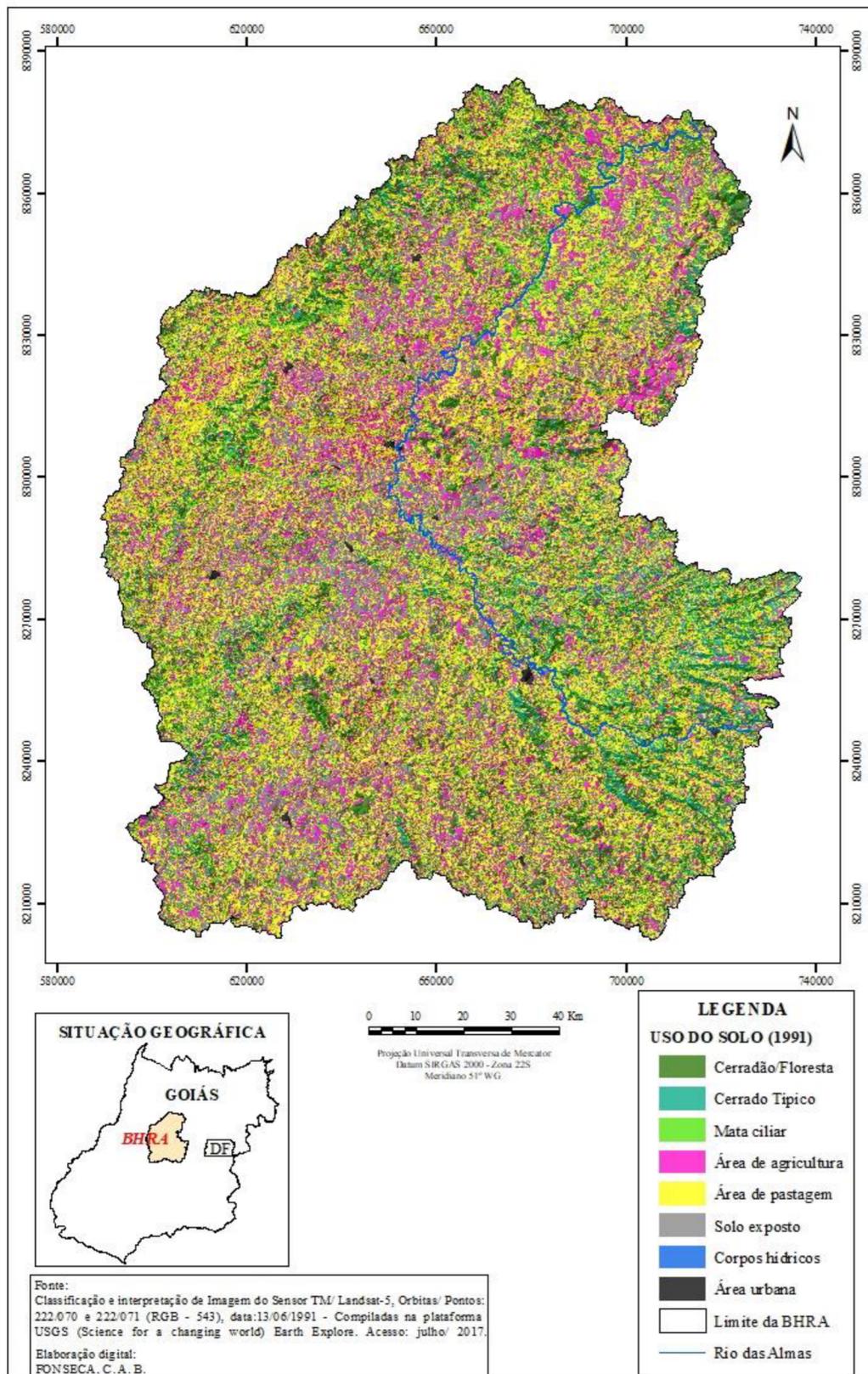


Figura 18 - Mapeamento de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas/GO (1991).  
Org.: FONSECA, C. A. B. (2017).

A pecuária era a principal atividade econômica na década 1990 (SEGPLAN-IMB, 2017), seguida da agricultura que contribuíram para a retirada da cobertura vegetal, promovendo uma aceleração da erosão hídrica, do transporte e produção de sedimento, como citados anteriormente por Carvalho (2008) e Camapum de Carvalho et al. (2006).

No que tange ao uso e ocupação do solo de 2006, os dados referentes a bacia podem ser conferidos também na Tabela 14 e Figura 19. A variação espaço-temporal entre o Uso do solo 1 e 2 (1991 e 2006) quando comparadas as áreas ocupadas pela agricultura (44,67%) e a pecuária (6,84%), observa-se que existe uma inversão em relação ao Uso do solo 1 (1991). As transformações que ocorreram de 1991 para 2006 se deram em função da mudança do padrão tecnológico, principalmente para um sistema produtivo que priorizou algumas culturas de *commodities* (QUEIROZ, 2009). Isso provocou uma competição das áreas de pastagens cultivadas com a agricultura incorporada, pela adoção de técnicas mais avançadas com a consorciação de lavoura-pastagem, que se tornou mais rentável e o uso de pastos em confinamentos, conforme afirma Silva (2013). Em função da incorporação de técnicas do plantio direto, houve uma diminuição das áreas com solo exposto (75,69%).

Em relação aos fragmentos vegetacionais que englobam os tipos fisionômicos das classes do cerradão/ floresta e da mata ciliar que protegem os fluxos de água, houve uma redução significativa de 14,29% e 19,96%, respectivamente, em relação ao Uso do solo 1. Isso se deu em função da expansão das áreas de agricultura, pastagem e da área urbana, pode ter contribuído para o escoamento de partículas de solo para a rede de drenagem até o exutório da bacia, ocasionando a produção de sedimento. No que tange a classe de cerrado típico, área urbana e corpos hídricos houve um aumento da taxa de 10,39%, 0,30% e 0,60%, respectivamente.

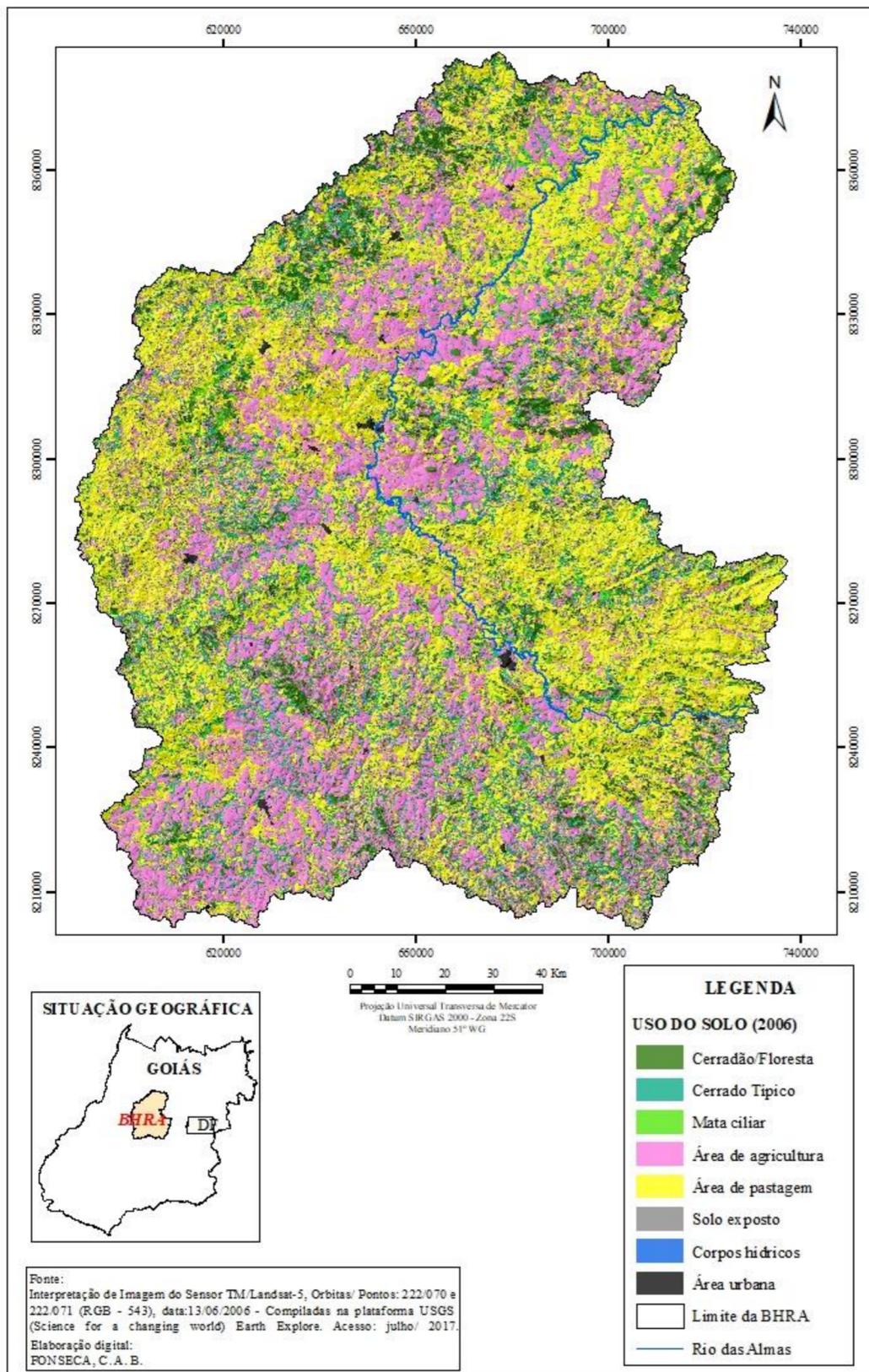


Figura 19 - Mapeamento de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas/GO (2006). Org.: FONSECA, C. A. B. (2017).

No que se refere ao uso e ocupação do solo de 2017, os dados estão dispostos na Tabela 14 e na Figura 20. Essa figura mostra a variação espacial do Uso do solo 3 (2017). Percebe-se um avanço das atividades agrícolas para fins em lavouras de grãos e cana-de-açúcar, que atuavam como um dos principais fatores para a expansão das fronteiras agrícolas na bacia (confirmado no item 4.3).

As áreas agrícolas tiveram um aumento de 21,23% em comparação com uso do solo de 2006, verifica-se que a agricultura ocorre majoritariamente nas porções sul, central e ao norte da bacia, onde o relevo é predominantemente plano a suave ondulado e as pastagens então distribuídas em todas as regiões. E com isso, acarretou numa ampla fragmentação e redução das classes de cerradão/floresta e a mata ciliar com 0,98% e 23,73%, respectivamente, que são essenciais para o processo ecológico do bioma.

Assim também, quando faz a comparação da variação espaço-temporal entre o Uso do solo 2 e 3 (2006 e 2017), observa-se que as áreas de solo exposto e de pastagem tiveram uma redução de 38,02% e 7,78%, respectivamente. A redução nessas áreas pode ser explicada, basicamente pelas áreas já abertas em 1991 que foram convertidas em pastagens e, principalmente, em lavouras nos anos seguintes e na adoção do plantio direto. Este sistema utiliza restos de matéria orgânica advindos de cultivos anteriores e, na recuperação de pastagem degradadas desenvolvida pelo sistema de integração (consorciada) lavoura-pecuária (EMBRAPA, 2010). Principalmente, pela incorporação das culturas de grãos e da cana-de-açúcar que foram ocupando os espaços anteriormente destinados à expansão de pastagem (CORREA, 2013; PERH/GO, 2015). E os corpos hídricos e área urbana tiveram taxas de 0,56% e 0,46%.

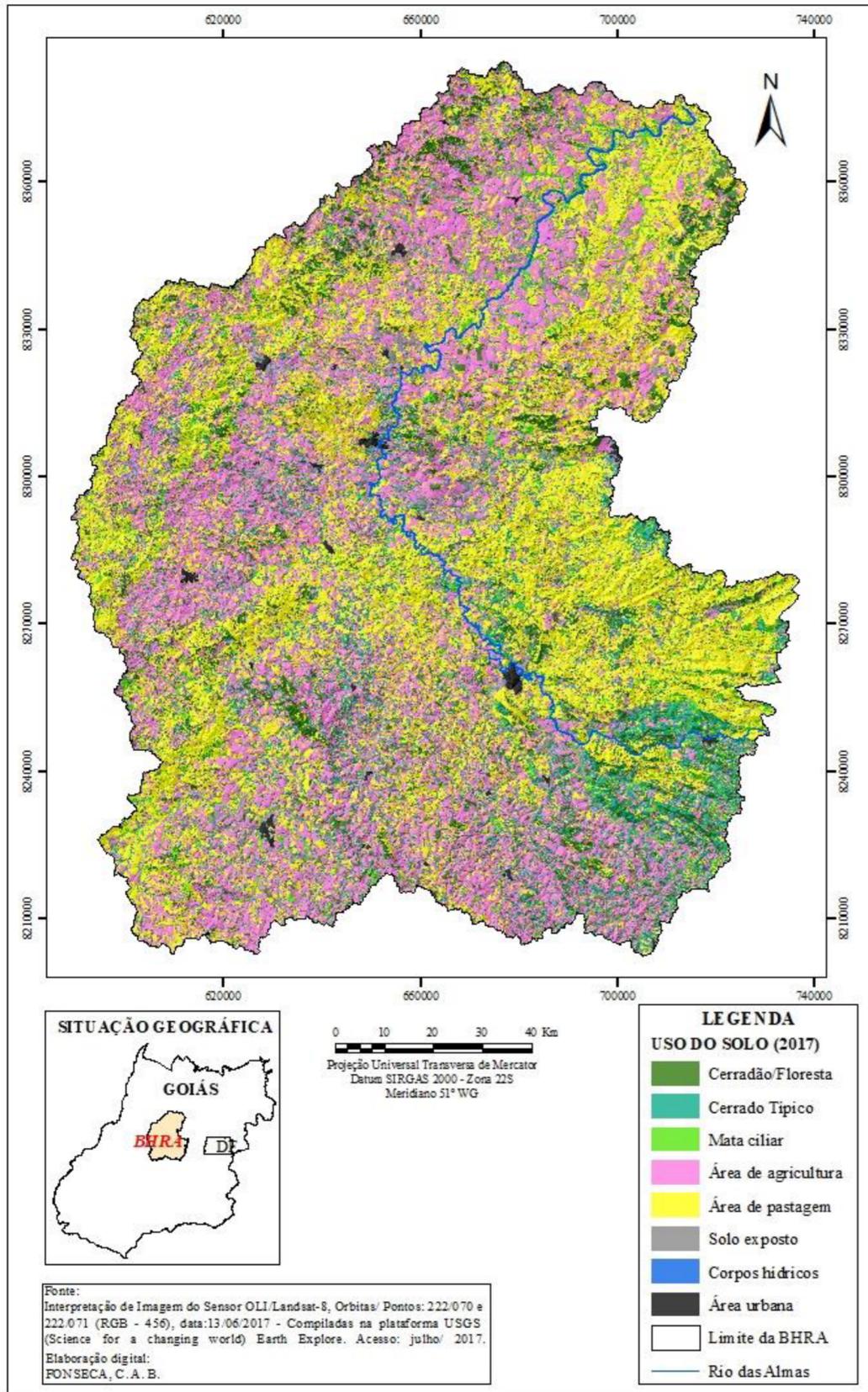


Figura 20 - Mapeamento de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas/GO (2017). Org.: FONSECA, C. A. B. (2018)

A Figura 21 apresenta o gráfico comparativo da variação temporal (1991-2017) dos mapeamentos do uso do solo na BHRA (dispostos na Tabela 14). Ao longo dos vinte e seis anos houve um aumento de 75,38% para as atividades agrícolas, o solo exposto teve uma redução de 84,93% em função da conversão em pastagem e, principalmente, em lavouras nos anos seguintes.

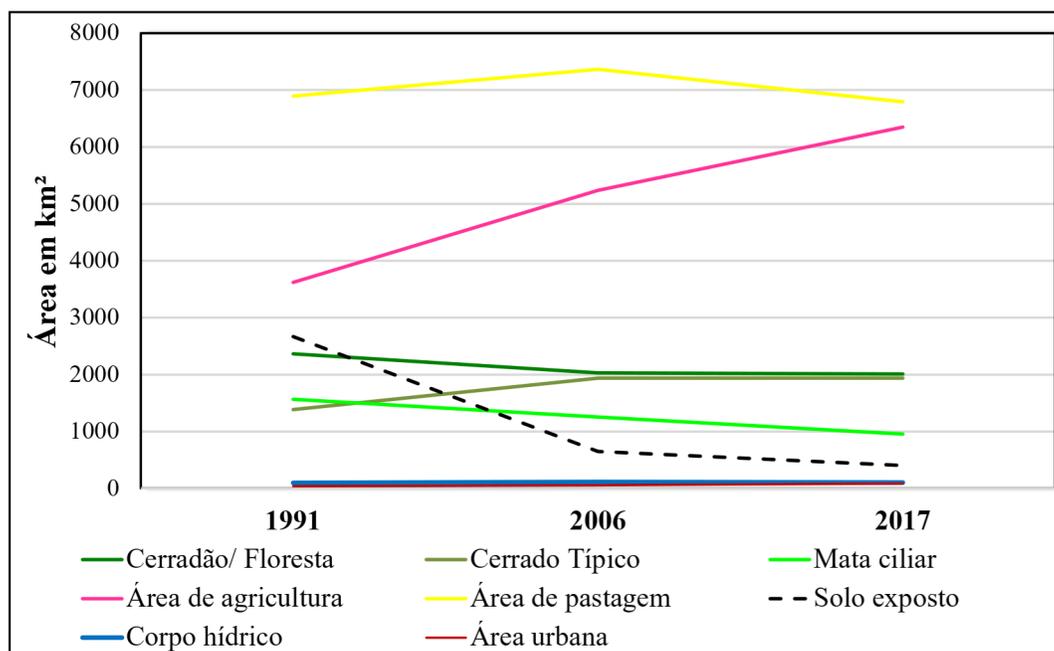


Figura 21 - Gráfico comparativo do mapeamento do uso do solo na BHRA (1991, 2006 e 2017). Fonte: Adaptada à rotina do modelo SWAT, conforme a classificação e interpretação de imagens dos Sensores TM/LANDSAT-5 e OLI/LANDSAT-8, para os usos do solo de 1991, 2006 e 2017. Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Nota-se na variação temporal que os corpos hídricos formados pelos açudes e lagoas naturais e artificiais tiveram uma variação de 9,54%. As áreas de pastagens se mantiveram constantes com uma leve redução de 1,47% em relação a 1991. Os pastos tiveram que se adequar ao sistema de produção moderno, via reutilização das áreas que atualmente se encontram abertas e improdutivas ou mesmo abandonadas, como recurso alternativo para reduzir o desmatamento e tornando-as produtivas e sustentáveis (IBGE-PPM, 2017).

Os resultados dessa variação temporal mostram que as áreas com as classes de cerradão/floresta e mata ciliar tiveram uma redução de 15,13% e 38,96%, respectivamente. Enquanto a classe do cerrado típico teve um acréscimo de 2,96% no período analisado (1991 e 2017). Outro comportamento que é interessante de perceber é que as áreas urbanas tiveram um crescimento de 113,36%, em relação ao Uso do solo 1

(1991). A explicação desse grande crescimento só poderá ser confirmada por meio de estudos sobre a economia, urbanização e ações do poder público na região, que pode ter desencadeado mudanças no processo histórico, com repercussão no território goiano.

#### 4.3 O AVANÇO DA AGROPECUÁRIA E SUAS PERSPECTIVAS MUDANÇAS NO USO DO SOLO ANALISADOS NOS ANOS DE 1991, 2000, 2006, 2011, 2016 E 2017 NA BHRA

A agropecuária na BHRA se modernizou, sob as mesmas condições de inovação tecnológica do setor agropecuário do estado de Goiás. Os dados da área plantada da agricultura temporária e da pecuária bovina dos municípios que compõem totalmente e parcialmente a área de estudos estão indicados na Figura 22. Nessa figura mostram que os cultivos do milho, feijão, arroz e a pecuária bovina se mantiveram em alta em 1991, além dos outros produtos como a cana-de-açúcar, a soja e o sorgo. Percebe-se que ao longo da década de 1990, houve um declínio significativo para o plantio do milho e, principalmente para o item alimentício (feijão e o arroz), nota-se uma forte tendência de queda em 2000 e, nos anos posteriores as áreas plantadas diminuíram. Ao passo que, nessa mesma década a soja e a cana-de-açúcar se mantiveram constante, porém em menor área e a pecuária bovina em ascensão.

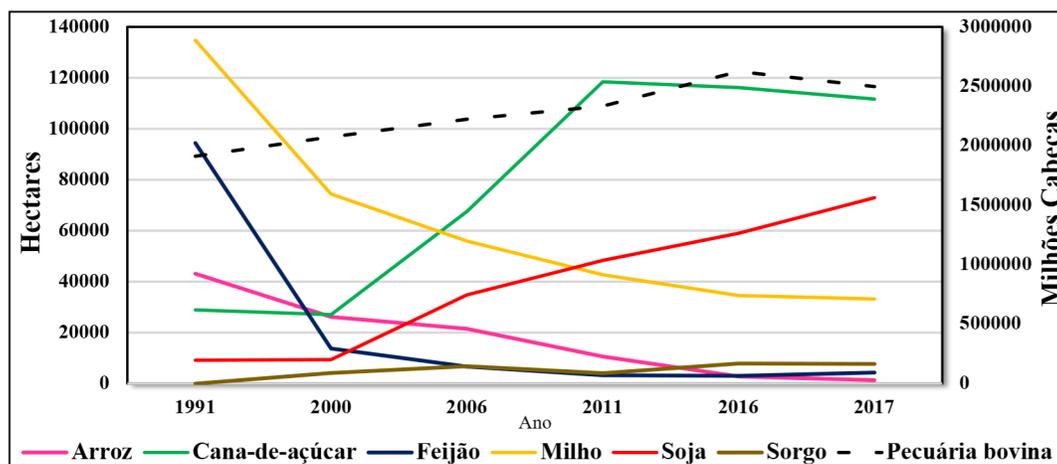


Figura 22 - Gráfico comparativo em área plantada de lavouras temporárias e pecuária bovina nos municípios que compõem totalmente e parcialmente na BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA - IBGE e IBGE - PPM (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Após o ano de 2000 as culturas da soja e cana-de-açúcar predominavam na região da bacia. Entre os períodos de 2006 e 2017 houve a queda no preço da leguminosa (soja) no mercado internacional associado as variações climáticas que afetou a queda nas safras

de grãos (IBGE-PPM, 2016), ocasionando a redução em área plantada. Em contrapartida, a cana-de-açúcar teve uma valorização no mercado internacional em 2006 e com os incentivos fiscais do governo estadual aliado ao complexo agroindustrial, possibilitou a implantação e reativação de algumas usinas sucroalcooleiras e, conseqüentemente a expansão de suas áreas de cultivos (ALVES, 2012). Nesse meio tempo, a contínua área plantada do sorgo perdurou por todo o período (1991 a 2017), porém, limitado à consorciação de cultivos (soja-milho-sorgo). E o rebanho bovino ao longo dos anos expandiu o número de cabeças de gado.

Com o crescimento da área de plantio destes cultivos associado ao efetivo bovino, pode-se dizer que BHRA incorporou no *ranking* da produção e diversificação no campo, marcada pela tecnificação e uso intenso de tecnologias aliada a capacidade competitiva das *comodities* entre as regiões goianas.

Os cultivos requerem grandes extensões de terras e grandes investimentos em tecnologia e insumos. As lavouras envolvem a flexibilidade da rotação de culturas ou consorciação de cultivos que conduz à diversificação das atividades, de modo a atender as particularidades regionais e as perspectivas comerciais, uma vez que se ampliam as demandas pelo produto nos mercados internacionais (ALVES, 2012). Portanto, com a intensificação da agricultura pode ocorrer uma grande perda da vegetação e uma enorme pressão sobre os solos e, conseqüentemente, favorecer os processos hidrossedimentológicos citados anteriormente por Camapum de Carvalho et al. (2006).

Outro aspecto interessante de se observar é em relação a pecuária bovina. A área em estudo oferece facilidade para mecanização devido a topografia que proporciona o manejo de pastagem. A proximidade de grandes centros de produção de grãos e agroindústrias, favorece tanto a criação de animais no pasto, como a instalação de confinamentos orientados para o período de engorda dos animais.

E por fim, essa cadeia produtiva tem o suporte de uma intensa logística, industrialização e a garantia de um mercado consumidor de carne, leite e couro (MMA, 2014). A Tabela 15 e a Figura 23 apresentam as dezoito unidades frigoríficas distribuídas entre os doze municípios da bacia, que são: Anápolis, Ceres, Goiás, Goianésia, Itaberaí, Itapaci, Itapuranga, Jaraguá, Pirenópolis, Rianápolis, Rubiataba e Uruana. A maior parte desses municípios, a agricultura de grãos e cana-de-açúcar estão intensificadas, aliada as áreas predispostas as extensivas pastagens e, aos confinamentos orientados para período de engorda de animais (IBGE-PPM, 2017). Nota-se que essas unidades estão instaladas próximas à cadeia produtiva e, portanto, são responsáveis pelo abate de bovinos e outros

animais da pecuária, além de fornecer produtos embalados e o armazenamento dos cortes de carne, que facilitam o escoamento da produção para Goiás, para outros estados e também para a exportação de carne congelada brasileira.

Tabela 15 - Relação dos estabelecimentos de Frigoríficos instalados na BHRA.

<b>MUNICÍPIO</b>	<b>ESTABELECIMENTO DE FRIGORÍFICO</b>
Anápolis	- FRIGOÍÁS – Frigorífico Indústria e comércio de Goiás - FRIBOI – JBS - Frigorífico Santa Martha - Matadouro Santa Martha
Ceres	- Frigorífico Mundial Carnes
Goiás	- JBS - Frigorífico “FRIVI” – Frigorífico Vila Boa
Goianésia	- Abatedouro Vereda - Minerva S.A.
Itaberaí	- Abatedouro Centro Oeste
Itapaci	- Frigorífico Peso
Itapuranga	- Abatedouro Barrinha
Jaraguá	- FRIGO MAIS+
Pirenópolis	- Frigorífico Boa Vista
Rianópolis	- Frigorífico Bom Sucesso
Rubiataba	- FRIGOVALE – Frigorífico Vale do São Patrício LTDA
Uruana	- Frigoríficos Antunes & Alves - Frigoana – Frigorífico Uruana

Fonte: Frigorífero em Goiás (2017). Disponível em: <https://www.econodata.com.br/setor/INDUSTRIA-ALIMENTOS-CARNE-FRIGORIFICO/GOIAS>. Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

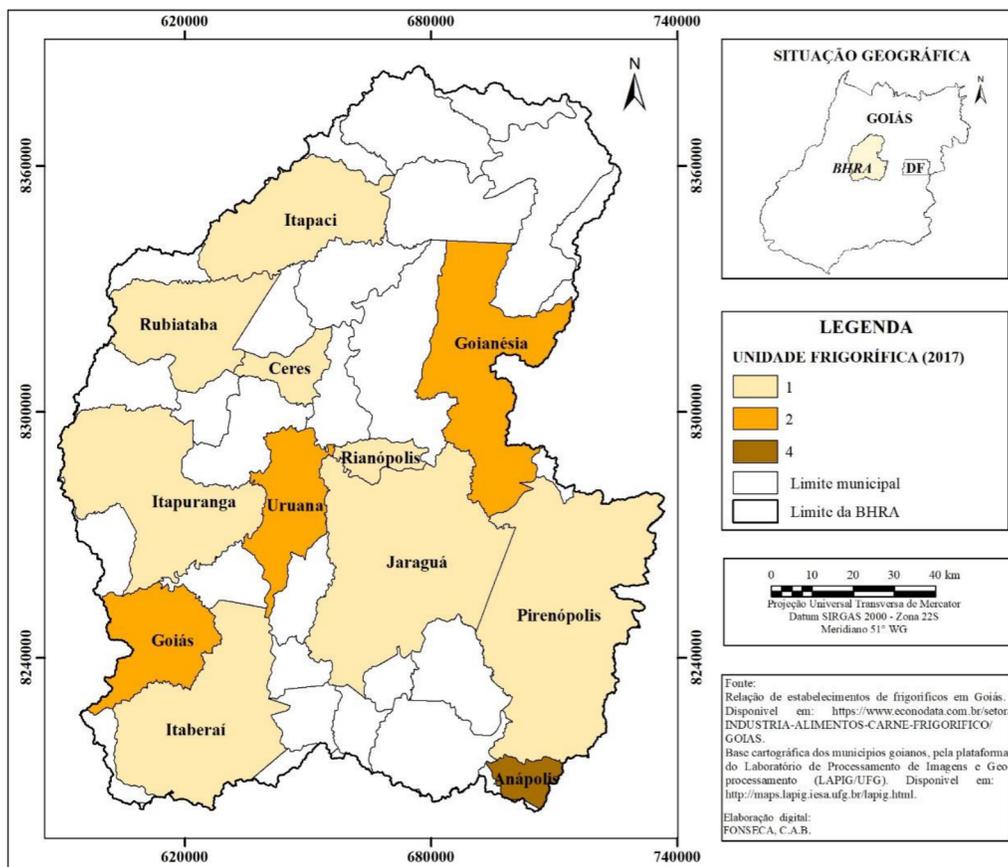


Figura 23 - Localização dos estabelecimentos de frigoríficos na BHRA. Fonte: Frigorífero em Goiás (2017). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Especificamente na Figura 24 mostra a evolução da pecuária bovina nos municípios da bacia no período de 1991 a 2017. Em 1991 havia 1.912.785 cabeças de gado bovino. Em 9 anos (2000) houve um incremento de 8,52% (2.075.739 cabeças). Nos anos sucessivos houve um crescimento nessa atividade em relação aos anos procedentes com taxas de 16,21% para 2006; em 2011 com 22,01%; em 2016 com 37,21% que representava 2.624.452 cabeças de gado. Já 2017 registrou uma redução de 30,58%, que equivale a uma queda de 6,63% em relação ao ano anterior.

Lembrando que os seis municípios que estão sem dados (Guaraíta, Ipiranga de Goiás, Jesúpolis, Santa Rita do Novo Destino, São Luiz do Norte e São Patrício), passaram pelo processo de emancipação na década 1990, com divisão territorial administrativa dos municípios de: Itapuranga, Ceres, São Francisco de Goiás, Barro Alto, Itapaci e Carmo do Rio Verde.

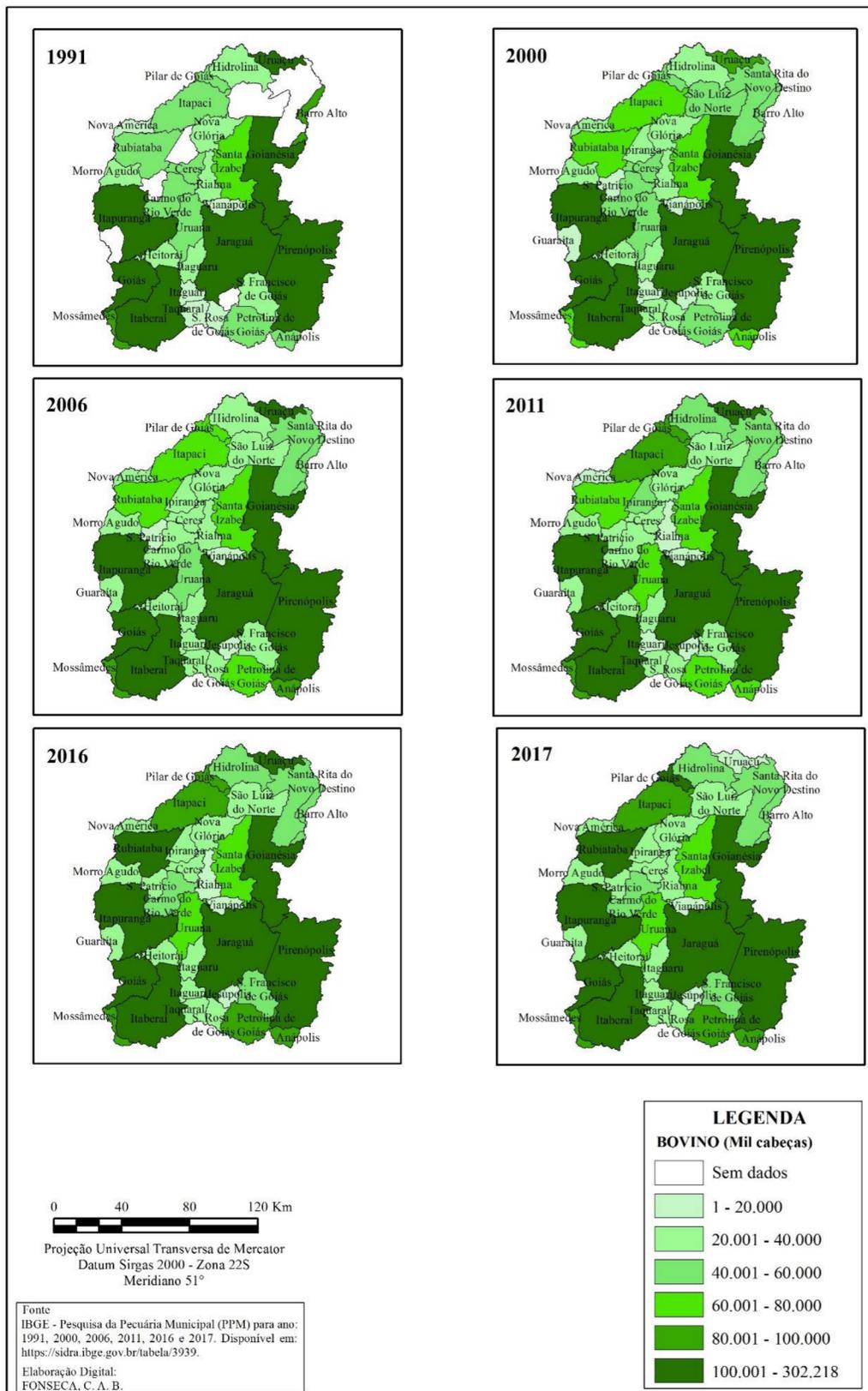


Figura 24 - Evolução da pecuária bovina nos municípios da BHRA (1991 a 2017). Fonte: IBGE – PPM (2018). Org.: FONSECA, C. A. B.

Essa queda no efetivo de bovinos registrado em 2017 se deu em função de três motivos: o primeiro, os fatores climáticos (regime de chuvas) que prejudicaram o desenvolvimento dos pastos, beneficiando a oferta de animais (bovino) para o abate. O segundo, refere-se ao cultivo de grãos, sobretudo a soja, que houve uma redução na safra de 2016, com isso aumentou os custos de produção (insumos e serviços) no setor pecuário. E por último foi marcado por um aumento no abate de matrizes (IBGE-PPM, 2017). Esse segmento é um dos contribuintes decisivos para o crescimento e desenvolvimento da estrutura produtiva e socioeconômica da bacia em estudo e, principalmente para estado de Goiás (SEGPLAN-IMB, 2015).

A Figura 25 mostra a variação temporal entre os anos de 1991 e 2017. Em 1991, oitos municípios (Pirenópolis, Goiás, Goianésia, Itapuranga, Itaberaí, Uruaçu, Jaraguá e Barro Alto) se destacaram com os maiores efetivos de rebanho bovino com mais de cem mil cabeças no pasto e/ ou confinamento, registrando um somatório de 1.095.085 cabeças bovinas, com 58,76% em relação a extensão da bacia. Para esses mesmos municípios em 2017 houve um crescimento nos últimos vinte seis anos de 18,56%, em relação a 1991. Os municípios de Santa Rosa de Goiás, Petrolina de Goiás, Pilar de Goiás tiveram uma taxa de crescimento de 113,84%, 102,02% e 101,66%, respectivamente. Enquanto Carmo do Rio Verde e Goianésia tiveram suas taxas reduzidas em 5,54% e 5,70%, respectivamente, em relação a 1991.

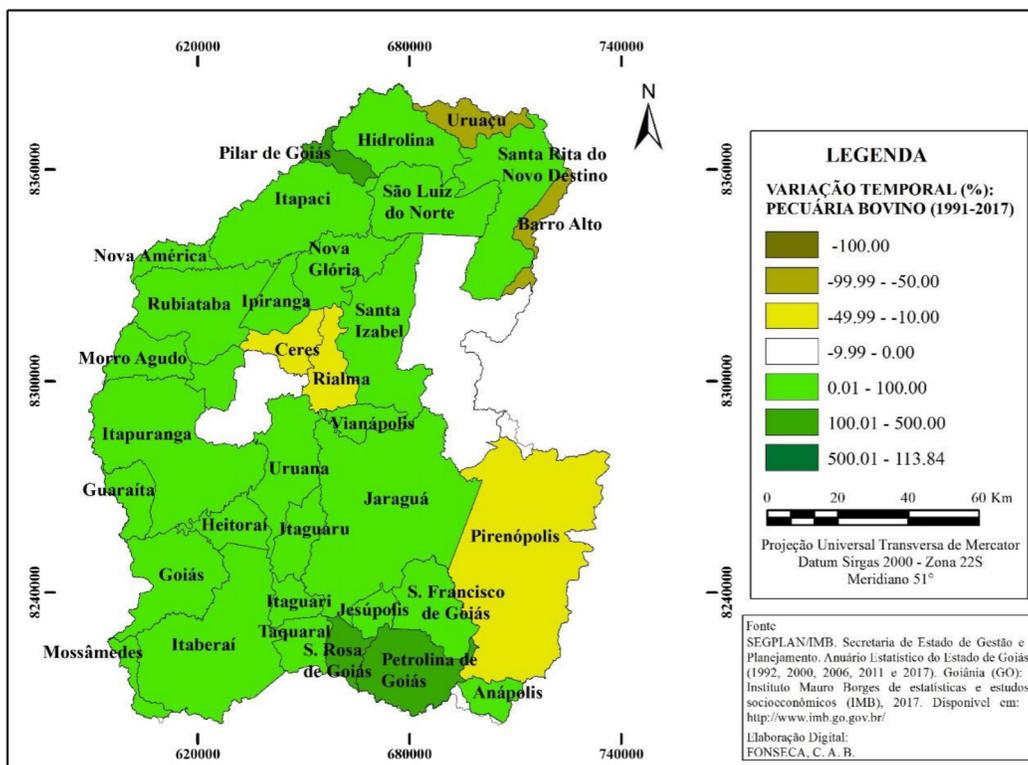


Figura 25 - Variação temporal dos maiores efetivos bovinos por municípios na BHRA (1991 a 2017). Fonte: IBGE - PPM (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Atualmente o setor pecuário está diversificando as práticas no campo, abdicando parcialmente o regime de criação extensiva e adotando práticas modernas, como uso de pastagens cultivadas e a criação do sistema semi-intensivo<sup>17</sup> de rebanho bovino (CORREIA et al., 2000). Outra diversificação na prática da pecuária é a criação e o desenvolvimento do novilho precoce para corte, que tem trazido bons resultados ao setor. Esse modelo de criação animal reduz consideravelmente os custos de produção e o tempo para abate ideal do animal de quatro anos para dois, aumentando consideravelmente os lucros dos criadores (PAULA, 2011).

Por mais que a pecuária bovina exerça uma grande influência na economia da bacia, essa atividade pode provocar ao mesmo tempo impactos de toda ordem, como por exemplo, as questões relacionadas a emissão de gases derivados da pecuária bovina, ao consumo de água pelo rebanho bovino, a forma de uso da terra, os processos erosivos provocados pelos animais em pastos e outros.

<sup>17</sup> Os animais são criados a pasto ou em confinamentos e recebem suplementação alimentar com forrageiras, na época de menor crescimento do pasto, ou até mesmo durante o ano todo.

No estudo e legislações ambientais, Palhares (2013) apresenta uma estimativa do consumo de água por espécie animal, principalmente para efetivo bovino, utilizando algumas variáveis, como o tipo e o tamanho, peso, idade, genética, além de outros fatores (zootécnicos e ambientais) que influenciam diretamente no consumo de água, de modo a mensurar o metabolismo, o desempenho dos animais e seu estado sanitário. Em condições tropicais o uso de água para suprir a sede dos bovinos de corte que tem peso equivalente a 250 kg, 370 kg e 455 kg, o consumo diário médio é de 22-27 Litros/dia, 30-50 Litros/dia e 41-78 Litros/dia, respectivamente. Enquanto os bovinos de leite, dependem do estágio em que se encontra o animal, tais como: a vaca em lactação consome em média 64 Litros/dia, a vaca e novilha no final da gestação (51 Litros/dia), a vaca seca e novilha gestante (45 Litros/dia) e o bezerro lactante (a pasto) consome em média 12 Litros/dia.

Dessa forma, quando se analisa a evolução da pecuária bovina nos municípios da bacia no período de 1991 a 2017 (Figura 24), que inclui bovinos no pasto e em confinamentos, percebe-se a dimensão do impacto sobre os recursos hídricos e solos nessa atividade. Porém, a demanda pela água é crescente em vários segmentos econômicos, principalmente na agropecuária. Por isso há uma necessidade de controle, registro e fiscalização dos órgãos federais e estaduais, por meio de outorga, a fim de assegurar o uso múltiplo desse recurso natural (PALHARES, 2013).

Outro alerta para os riscos ambientais da atividade bovina, estão relacionadas as práticas inadequadas de pastejo com o uso excessivo de queimadas para limpeza da área e aos impactos na estrutura dos solos através da sobrecarga dos animais em confinamentos e também em pastos, através do pisoteio do animal. O movimento dos animais ou mesmo em repouso podem ocasionar a compactação do solo e favorecer o escoamento superficial e dar início aos processos erosivos até mesmo evoluir para o estágio de degradação física do solo em pastagens (DIAS-FILHO, 2012).

#### **4.3.1 Evolução da área plantada com Arroz, Cana-de-açúcar, Feijão, Milho, Soja e Sorgo (1991, 2000, 2006, 2011 e 2017).**

##### **4.3.1.1 Cultivo do Arroz**

Na Figura 26 são mostrados os municípios com cultivo de arroz. Em 1991 a área plantada era de 2,31%, equivale a 43.142 hectares. Em nove anos houve uma redução da área plantada de 1,40%, equivale a uma queda de 39,32% em relação a 1991. E percebe-se claramente que continuou diminuindo a área plantada nos anos seguintes: em 2006 foi

1,16%, em 2011 de 0,57% e em 2017 a área plantada foi de 0,07%, bem inferior em relação aos anos anteriores.

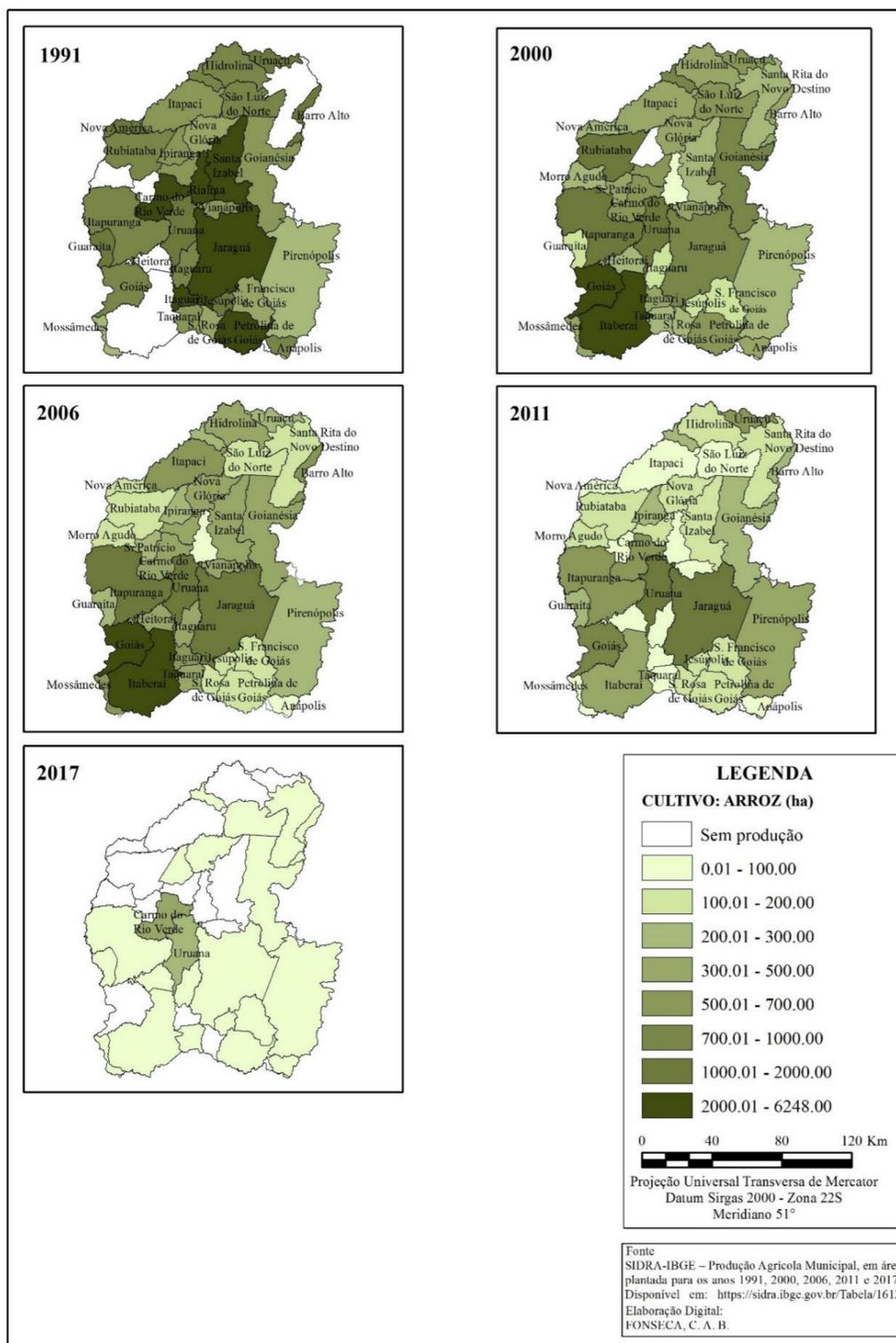


Figura 26 - Evolução do cultivo do Arroz por área cultivada, nos municípios da BHRA (1991 a 2017).  
 Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

A Figura 27 mostra a variação temporal entre 1991 e 2017. E percebe-se que em 2017 teve uma diminuição da área plantada de 96,92% em relação 1991. Ao longo desse período a área plantada e também o número de municípios que detinham o cultivo foram reduzidos de trinta e um municípios em 1991 para vinte e dois em 2017, somando 1.329 hectares. A redução foi bem significativa nos municípios como: Carmo do Rio Verde (82,79%), Uruana (75%), Itaguaru (88,75%), Pirenópolis (73,33%), São Luiz do Norte (91,50%), Jaraguá (98%), Goianésia (93,33%), Guaraitá (98,50%), Anápolis (98%), Pilar de Goiás (97,70%), Itapuranga (97,78%), Petrolina (99,43%), Taquaral (96,83%), Mossâmedes (95%), Barro Alto (98,75%), Jesúpolis (99%), Ipiranga de Goiás (97,50%), Nova Glória (97,50%) e São Francisco de Goiás (99%). Os municípios que se destacam, porém, com menor área plantada são: Santa Rita do Novo Descoberto, Heitorai e Itaberai.

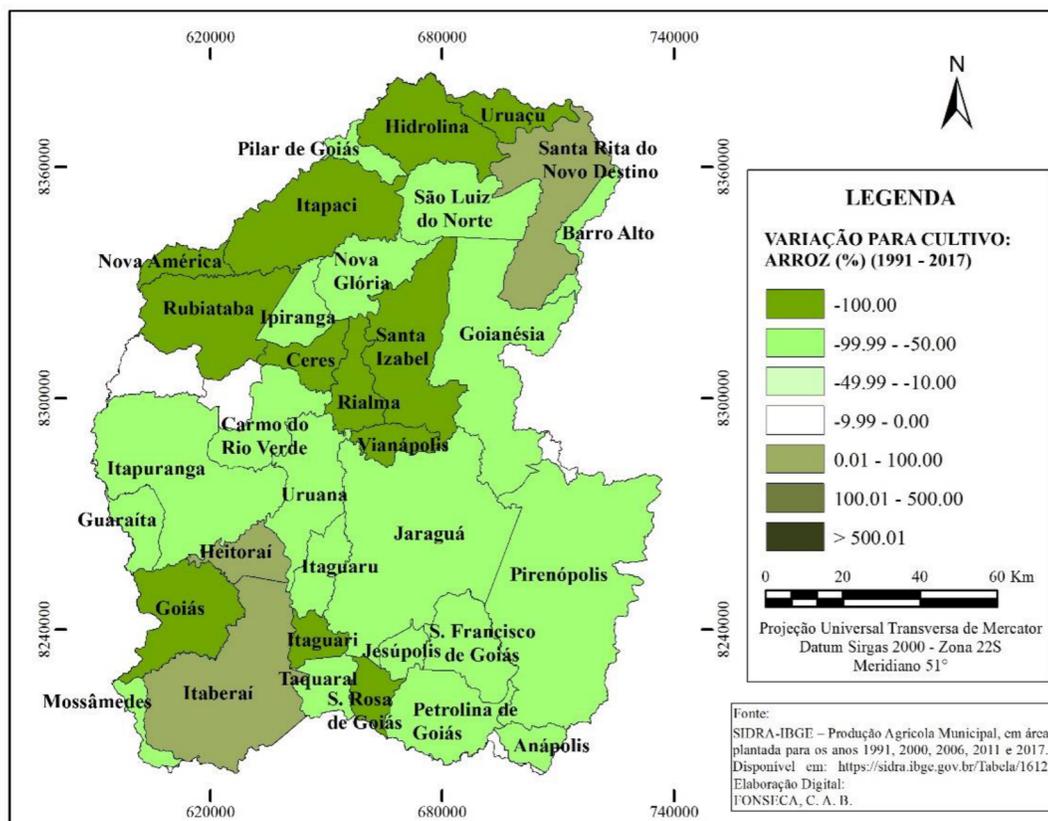


Figura 27 - Variação temporal do cultivo do Arroz por área cultivada, na BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B.

Diante dos dados, percebe-se que o arroz nas décadas de 1990 e 2000 foi cedendo espaço para a pecuária bovina e para outras lavouras como a soja-milho e cana-de-açúcar, que até então não eram cultivadas na região. Conseqüentemente, houve um deslocamento

do cultivo do arroz para outras regiões goianas, enquanto esses cultivos citados anteriormente foram avançando sobre a área da bacia, proporcionado pela atuação recente da agropecuária goiana.

A tradicional ocupação dos solos com base nas pastagens naturais e na lavoura do arroz da década 1970 sofreu transformações nas últimas décadas na estrutura produtiva (ALMEIDA et al., 1995), que fizeram com que o cultivo da rizicultura antes consolidada reduzisse para ceder lugar a uma agricultura de grãos moderna, altamente tecnificada e articulada com as agroindústrias processadoras (ARRAIS, 2013; CALAÇA; DIAS, 2010). A lavoura teve que ser readaptada às novas condições e se consolidar em outras regiões específicas do estado, como o Leste goiano que é considerado o maior produtor do estado de Goiás (MIRANDA; NETO, 2014). Outra hipótese da queda da produção de arroz, citada por esses autores estaria relacionada ao preço recebido pelo produtor.

O cultivo do arroz é feito por dois sistemas: de terras altas (arroz sequeiro) que é dependente das condições climáticas, ou seja, o período que caracteriza a época de plantio que coincide com regime pluviométrico (outubro e novembro) e outro sistema é o de várzeas por inundação. O sistema de plantio é altamente mecanizado, tanto para preparação do solo quanto para colheita, que demanda do tipo de solo e do uso intensivo de insumos e defensivos agrícolas para o preparo da terra (EMBRAPA, 2010).

Percebe-se que do preparo do solo à colheita, os dois sistemas de plantios requerem solos recém desmatados ou convertidos, sejam em áreas de mata ou de terras altas nas áreas de cultivo que podem favorecer o início de processos erosivos, contaminação do solo pelos defensivos agrícolas e ocasionar as perdas de solo e a produção de sedimentos.

#### 4.3.1.2 Cultivo da Cana-de-açúcar

A Figura 28 mostra o contexto histórico da cana-de-açúcar entre 1991 e 2017. Em 1991 esse cultivo até então não tinham uma representatividade na região, equivalente a 1,55% que corresponde a 28.972 hectares de área plantada na bacia. Em nove anos (2000) praticamente estabilizou o cultivo em 1,45%. Os dados de 2006 e 2011 reforçam um crescimento expressivo de área plantada na bacia de 3,62% e 6,36%, respectivamente. Em 2017 houve uma pequena redução de 5,99% equivalente a 111.681 hectares em área plantada na bacia.

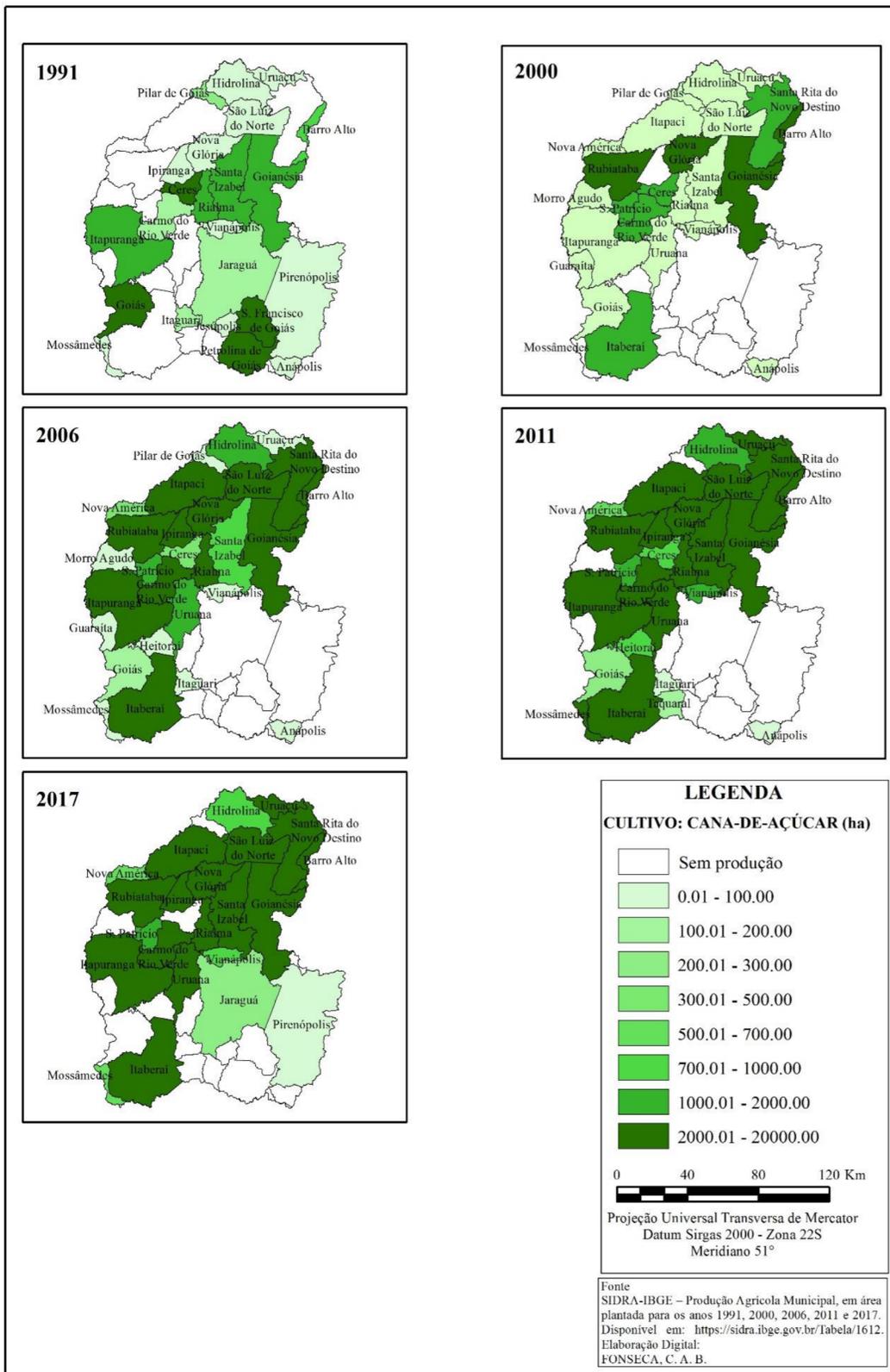


Figura 28 - Evolução do cultivo da Cana-de-açúcar nos municípios da BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

A Figura 29 apresenta a variação temporal em área plantada no período de 1991 a 2017. Ao longo dos vinte e seis anos houve um crescimento notável de 285,48%, registrado em área plantada em relação a 1991. Em 2017 houve a incorporação de mais municípios ao processo produtivo, totalizando vinte e dois municípios o que equivale em área plantada a 111.681 hectares, contrapondo os dados de 1991 (28.972 hectares) representando um aumento de aproximadamente quatro vezes da área plantada na bacia.

Houve uma expansão acelerada do cultivo da cana-de-açúcar na bacia em estudo, nos municípios: São Luiz do Norte (13.233,33%), Nova Glória (12.900%), Ipiranga de Goiás (12.400%), Uruaçu (9.900%), Carmo do Rio Verde (3.946,67%), Goianésia (1.769,16%), Mossâmedes (1.650%), Rianópolis (844,44%), Barro Alto (806,89%), Hidrolina (788,89%), Itapuranga (402,58%), Santa Isabel (271,58%), Itapaci (100%), Rubiataba (100%), Uruana (100%), Santa Rita do Novo destino (100%), Itaberaí (100%), São Patrício (100%), Nova América (100%), Pirenópolis (63,64%), Rialma (40%) e Jaraguá (25%).

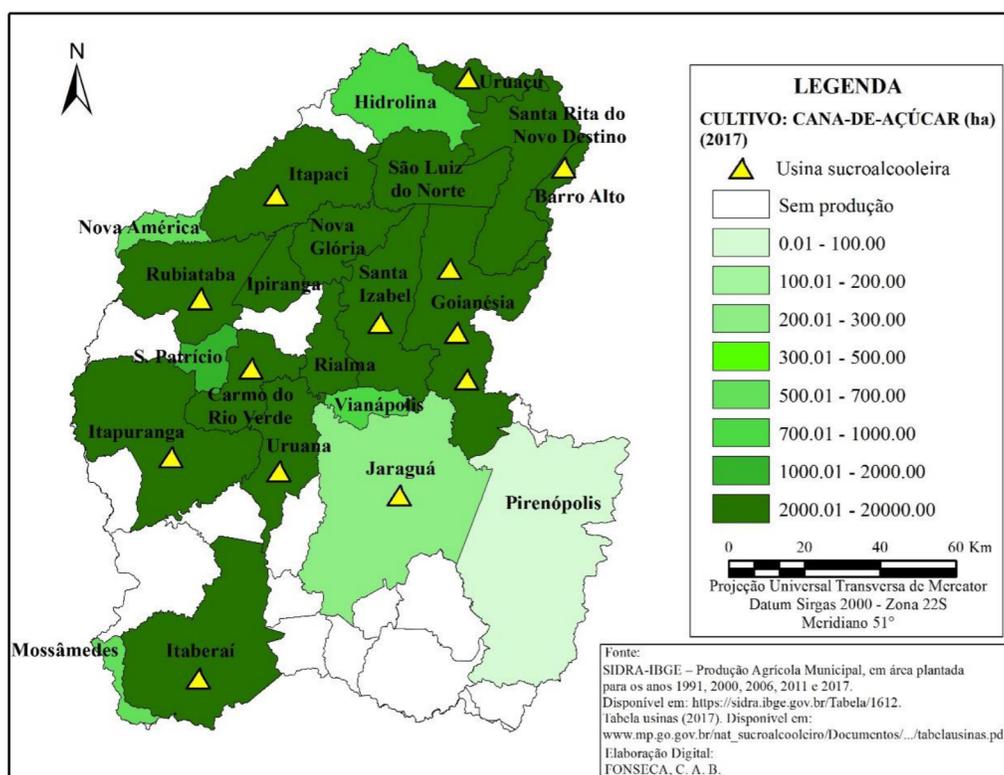


Figura 29 - Variação temporal do cultivo da Cana-de-açúcar por área cultivada na BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

No âmbito da BHRA até ano 2000 o cultivo da cana-de-açúcar figurava como atividade de importância secundária. Nos últimos anos houve uma reconfiguração da

paisagem, induzida pela inserção na economia dos vinte e dois municípios citados anteriormente. Houve um processo de substituição de algumas culturas de grãos para a incorporação da cultura da cana-de-açúcar na região. Percebe-se que a expansão em área plantada vem ocorrendo em espaços anteriormente destinados às áreas de pastagens plantadas e das lavouras como soja e milho, principalmente de grãos alimentícios como arroz e feijão (CORREA, 2013; PERH/GO, 2015).

Para atender a demanda crescente do cultivo da cana-de-açúcar é necessário compreender o motivo que alavancou o aumento da área plantada na BHRA. Isso se deu, em função da necessidade em atender a demanda nacional e mundial por álcool combustível que alavancou um aumento significativo do número de usinas em diversas regiões brasileiras, principalmente no estado de Goiás, onde o governo estadual concedeu subsídios e fomentos atrativos para instalação das agroindústrias canavieiras (MIRANDA; NETO, 2014; ALVES, 2012), sem a preocupação no primeiro momento, de realizar um estudo e uma avaliação do potencial de impactos ambientais que pudesse ocorrer com a expansão desse cultivo (CASTRO et al., 2007).

Os subsídios na região do Centro goiano foram beneficiados pelo Programa de Desenvolvimento Industrial de Goiás – PRODUZIR, criado em 2000, que teve incentivos financeiros às indústrias, com base no faturamento e arrecadação tributária, para implantação e reativação de algumas usinas sucroalcooleiras (ALVES, 2012). O Plano Nacional de Agroenergia (PNA, 2006-2011), que viabilizou a produção sustentável da agricultura bioenergética, aliada a política do uso racional de energias renováveis, promoveu a redução do uso de combustíveis de origem fóssil. Para se ter uma ideia, Leite e Leal (2007) explicam que para a quantidade de um hectare de área plantada de cana, produz-se cerca de seis mil litros por ano de álcool etanol<sup>18</sup>.

Nota-se que em 2006, 2011 e 2017 (Figura 28) especificamente na BHRA, o cultivo da cana-de-açúcar passou a transformar este setor em um dos componentes mais dinâmicos do agronegócio, expandindo os pólos produtores, baseados no modelo de incorporação de áreas por arrendamento e aquisição de terras pelas usinas em área circunvizinhas aos municípios que tiveram implantação de usinas (CASTRO et al., 2010). Segundo esses autores os espaços escolhidos pelas empresas são justificados pelo tipo de relevo (aplainado) que favorece a colheita mecanizada, aos tipos de solos como

---

<sup>18</sup> Etanol é um álcool etílico de origem vegetal usado como combustível para veículos. É uma substância líquida, incolor e volátil que se obtém a partir da fermentação de açúcares ou de substâncias orgânicas (CANASAT, 2007).

Latossolos e Argissolos (consideram também os Cambissolos), que têm elevada aptidão agrícola para cultivo da cana-de-açúcar e a proximidade com as indústrias sucroalcooleiras.

Outro fator explicado por Ferreira e Tokarski (2007) é que o mercado internacional está mais exigente nos padrões de qualidade ambiental, por isso tem refletido na mudança de manejo do cultivo da cana-de-açúcar com tecnologias ambientalmente sustentáveis. As usinas sucroalcooleiras e os produtores desse cultivo tiveram que se adequar a determinação do código florestal brasileiro (Lei Nº 12.651/2012, Art. 29 – Cadastro Ambiental Rural – CAR, do Decreto no 7.830) (BRASIL, 2012). Para a maioria dos produtores de cana-de-açúcar que já utilizavam áreas com grande potencial produtivo desse cultivo em suas propriedades, cumprir esta determinação da legislação se tornou complexo ou até mesmo inviável, uma vez que, o solo já estava coberto pela cana. Então, a alternativa de operacionalizar a compensação ambiental obrigatória de preservação, é desenvolver projetos de recuperação de áreas de preservação permanente, tanto na própria empresa como nas áreas circunvizinhas dos fornecedores de cana-de-açúcar, por meio de investimentos em outras ações, como aquisição de novas propriedades ou a contratação de uma reserva legal de terceiros.

Na região da bacia existem treze usinas sucroalcooleiras operando em onze municípios, estão representadas na Tabela 16 e Figura 30:

Tabela 16 - Usinas sucroalcooleiras operando nos municípios da BHRA.

MUNICÍPIO	USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	SITUAÇÃO
Barro Alto	Destilaria Santa Rita Ltda	Operando
Carmo do Rio Verde	CRV Industrial Ltda	Operando
Goianésia	Jalles Machado S/A	Operando
	Codora álcool e Energia Ltda.	Operando
	Usina Goianésia S/A – Grupo J. Maranhão	Operando
Itaberá	Centroálcool AS	Operando
Itapaci	Vale Verde Itapaci Grupo Farias	Operando
Itapuranga	Vale Verde Itapuranga-Grupo Farias	Operando
Jaraguá	Vale do São Patrício	Operando
Rubiataba	Cooperativa Agroindustrial de Rubiataba Ltda	Operando
Santa Isabel	Destilaria Andradina Açúcar e Álcool	Operando
Uruaçu	Uruaçu Açúcar e Álcool Ltda	Operando
Uruana	CRV Industrial Ltda	Operando

Fonte: Tabela de usinas (2017). Org.: FONSECA, C. A. B. Disponível em: [www.mp.go.gov.br/nat\\_sucroalcooleiro/Documentos/.../tabelausinas.pdf](http://www.mp.go.gov.br/nat_sucroalcooleiro/Documentos/.../tabelausinas.pdf).

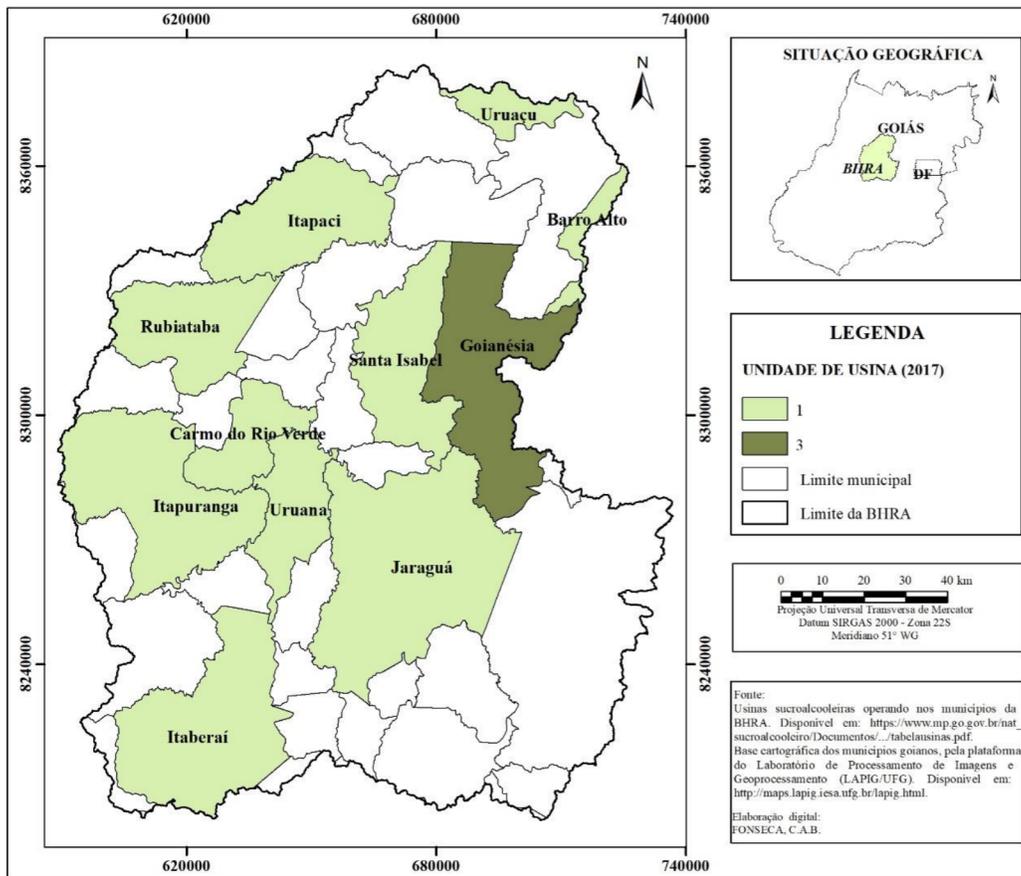


Figura 30 - Localização das Usinas sucroalcooleiras nos municípios da BHRA. Fonte: Tabela de usinas (2017). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Dentre as usinas citadas anteriormente que cumprem o papel de recuperação dessas áreas está a Jalles Machado S/A no município de Goianésia (FERREIRA; TOKARSKI, 2007). Retomando ao mapeamento de uso do solo de 2017 (Figura 20) e a Figura 28, nota-se que os municípios envolvidos com expansão da cana-de-açúcar são justamente os que apresentaram aumento nos remanescente de Cerrado, percebido no período de 1991 e 2017 na classe de uso do cerrado típico (Tabela 16).

Na região da BHRA constata-se uma grande concentração de novas e antigas usinas, cujo incremento vem se intensificando desde 2006 com os efeitos do incentivo à agroenergia, que valoriza a bioenergia de fonte renovável (CASTRO et al., 2010; ALVES, 2012; FERREIRA; TOKARSKI, 2007). Portanto, na bacia em estudo somando aos incrementos da produção sucroalcooleira e a expansão dos canaviais e relacionando a transformação na paisagem, conclui-se que esse cultivo é um dos responsáveis pela mudança na cobertura e uso do solo, simultaneamente com atividade da pecuária bovina.

É interessante perceber que, justamente aqueles municípios que não se mostraram suficientemente aptos ou mesmo importantes em outros momentos, que eram objeto da modernização da agricultura para grãos e pecuária bovina nas últimas décadas passam a ser alvos da nova expansão da cana-de-açúcar, em particular das usinas na região da BHRA, mostradas na Figura 30. Entende-se que é uma reflexão que não pode deixar de ser considerada, pois os municípios que tiveram a inclusão da monocultura da cana-de-açúcar também substituíram aceleradamente as áreas do cultivo de soja e outras culturas consideradas alimentícias (como por exemplo, arroz, feijão e milho), por estarem apoiadas pela intensa logística, industrialização e a garantia de um mercado consumidor.

Nessa mudança do uso da terra, a área do cultivo da cana-de-açúcar está sujeita a perdas de solo e produção de sedimento em decorrência de inúmeras variáveis, dentre elas: o tipo de solo, o manejo para conservação, a época do plantio e a preparação do solo (GUERRA, 2005; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993). Admite-se que o preparo inicial dos solos com maquinário para subsolagem, gradagem pesada, gradagem leve promove o revolvimento da camada superficial e a remoção de efeitos dos usos anteriores cultivados (SILVA; CASTRO, 2015), posteriormente a exposição do solo a ação do impacto das gotas de chuva (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993). Outros fatores são os veículos de corte, de colheita e de transporte que são muito pesados atuando como agentes compactadores e no selamento superficial, prejudicando a estrutura física do solo e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de armazenamento de água e possibilitando uma tendência para o aumento das feições lineares erosivas e da quantidade de sedimentos superficial (CASTRO et al., 2010).

#### 4.3.1.3 Cultivo do Feijão

A Figura 31 mostra que em 1991, o cultivo do feijão ocupava uma área de 5,07% da bacia, o que equivale a 94.406 hectares. Em nove anos (2000) a área plantada diminuiu drasticamente para 0,74%, equivalente a uma redução de 85,43% em relação 1991. Nos anos seguintes de 2006, 2011 e 2017 a área plantada diminuiu ainda, correspondendo a 0,36%, 0,18% e 0,23%, respectivamente, da área da bacia.

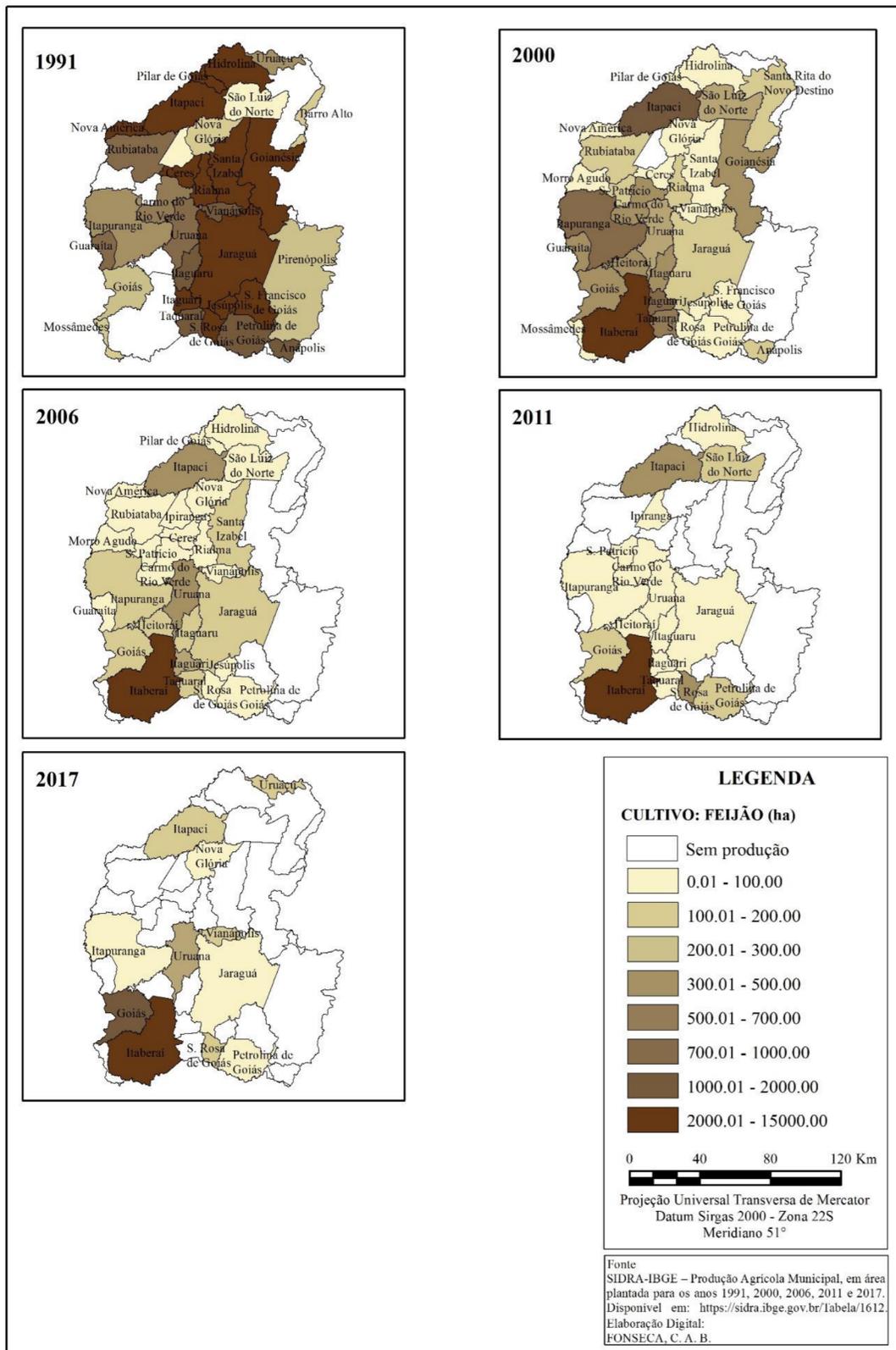


Figura 31 - Evolução do cultivo do Feijão nos municípios da BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

A área plantada com feijão ao longo dos vinte seis anos sofreu uma redução de 95,37%, mostrado na Figura 32. Praticamente em 2017 a área plantada com feijão na bacia era de apenas 0,23%, o que equivale a 4.371 hectares. Desse total, os municípios de Goiás e Itaberaí se destacaram com um aumento da área plantada de 349,05% e 100%, respectivamente, em relação 1991.

Os municípios que apresentaram área cultivada reduzida foram: Uruana (70%), Santa Rosa (91%), Rianópolis (85,51%), Uruaçu (66,67%), Itapaci (98,35%), Petrolina (95,50%), Jaraguá (99,60%), Itapuranga (95,64%) e Nova Glória (97,50%). Esses municípios podem ter sido favorecidos pelas modernas práticas adotadas pelos produtores que utilizam modernas colheitadeiras, sementes selecionadas e o sistema de irrigação (MIRANDA; NETO, 2014).

Os outros quatro municípios (Heitorai, Morro Agudo de Goiás, Santa Rita do Novo Destino e São Patrício) não tiveram área com o cultivo do feijão nesse período.

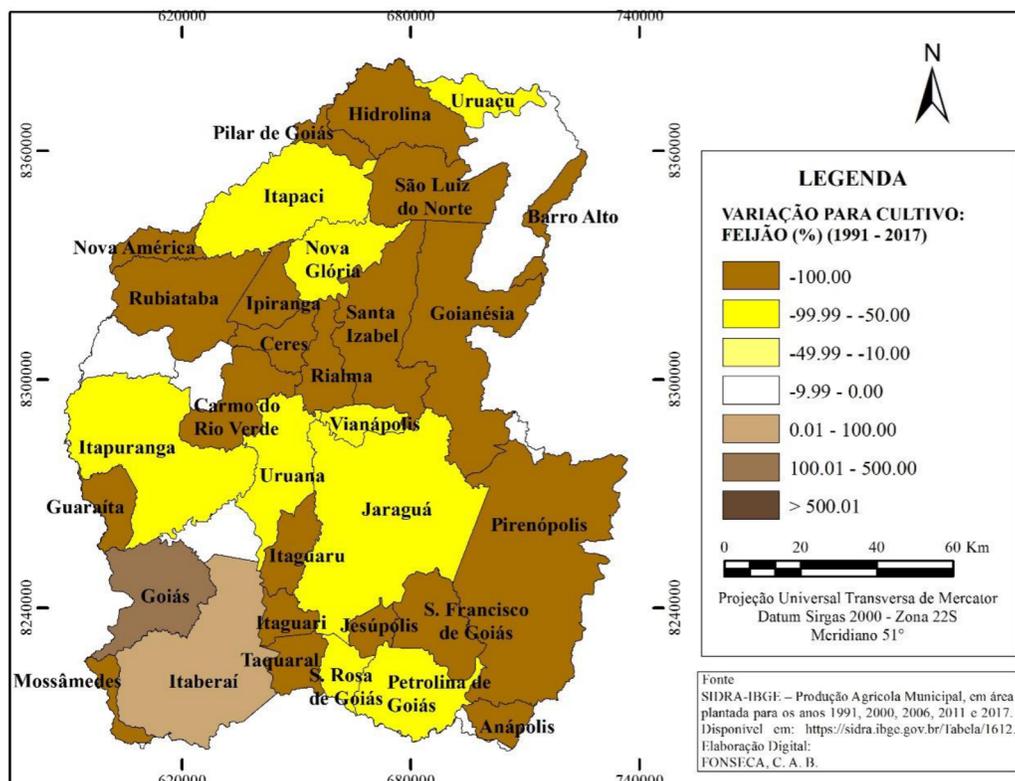


Figura 32 - Variação temporal do cultivo do Feijão por área cultivada na BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Para o cultivo do feijão existem três métodos de preparo do solo citados por Stone e Sartorato (1994), que são: o convencional, cultivo mínimo e o plantio direto. Os dois primeiros métodos partem de um sistema de plantio que necessita de preparo do solo semelhante ao da cana-de-açúcar, como a limpeza da área, desmate da gleba e aração do terreno. Essa operação pode ser realizada manualmente ou com implementos agrícolas usando por exemplo, trator de esteiras, com lâminas e/ ou correntão. A gradagem de pré-plantio é utilizada para o nivelamento do terreno. A aração é indispensável em áreas onde se utilizam grades aradoras com frequência, resultando num revolvimento da camada endurecida que fica abaixo da superfície do solo (pé-de-grade) que geram torrões. E com isso, os autores explicam que se deve tomar algumas precauções como: evitar a passagem excessiva de implementos após aração, pois pode compactar o solo, comprometer a porosidade e a estrutura do solo, impedir a infiltração de água no perfil do solo, além de tornar a superfície mais sensível aos processos erosivos.

O plantio direto para receber a semeadura do feijão é organizado sobre uma superfície contendo uma camada com restos de matéria orgânica advindos de cultivos anteriores (como milho e sorgo), que protegem o solo dos efeitos intempéries e auxilia na conservação e na umidade da terra (STONE; SARTORATO, 1994).

#### 4.3.1.4 Cultivo do Milho

O milho sempre foi um cultivo de subsistência em todos os municípios da área de estudo. No entanto, os dados apontam que esse cultivo tem participação na cadeia produtiva, por meio da adoção do plantio direto na sucessão da cultura da soja (HELFAND; REZENDE,1999). A Figura 33 mostra que em 1991, a área plantada correspondia a 7,23% da área da bacia, o que equivale a 134.750 hectares. Em contrapartida, em 2000 praticamente caiu pela metade a área plantada (3,99%). E posteriormente conservaram um crescimento positivo, porém, com pequena participação entre 2006 e 2011, registrando taxas de 3% e 2,29%, respectivamente. Em 2017 registrou-se a menor área cultivada com 1,78% (33.185 hectares), representando uma redução de aproximadamente quatro vezes em relação a 1991.

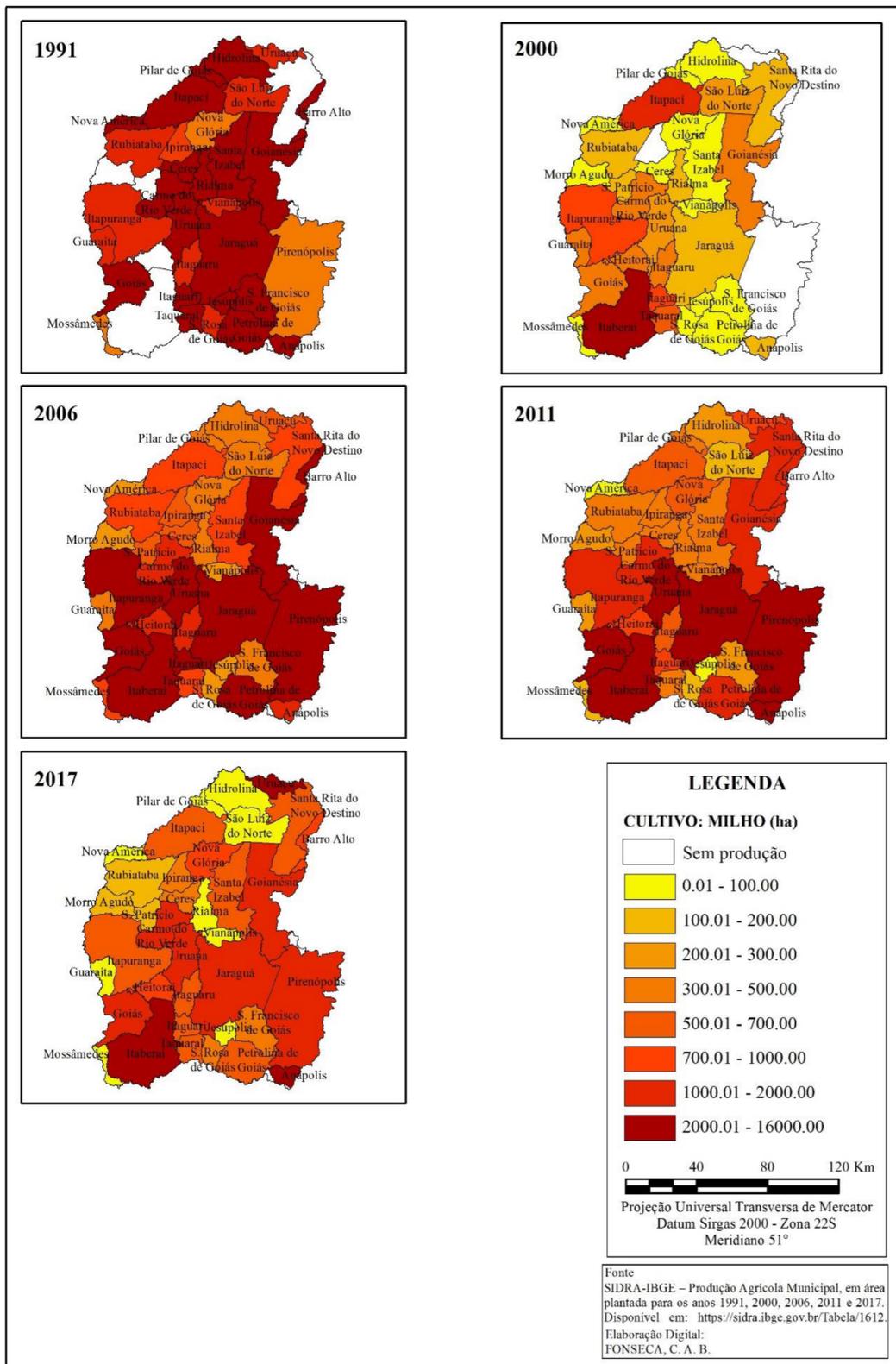


Figura 33 - Evolução do cultivo do Milho nos municípios da BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

A Figura 34 apresenta a variação espaço-temporal ao longo dos vinte e seis anos (1991 e 2017). Praticamente todos os municípios da bacia em estudo passaram a cultivar o milho, uns em grande escala e outros em menor escala. Porém, é possível perceber uma redução da área plantada de 75,37% em relação a 1991. No entanto, nessa figura apresenta três municípios onde houve o aumento da área cultivada, sendo eles: Pirenópolis com 140%, Uruaçu com 37,50% e Anápolis com 12,50%. Os outros sete municípios (Itaberaí, Nova Glória, Heitorai, Santa Isabel, Santa Rita do Novo Destino, São Patrício, Morro Agudo de Goiás), apresentaram área cultivada com o milho em 1991, ocupando um total de 11.362 hectares, ou seja, 0,61% da bacia.

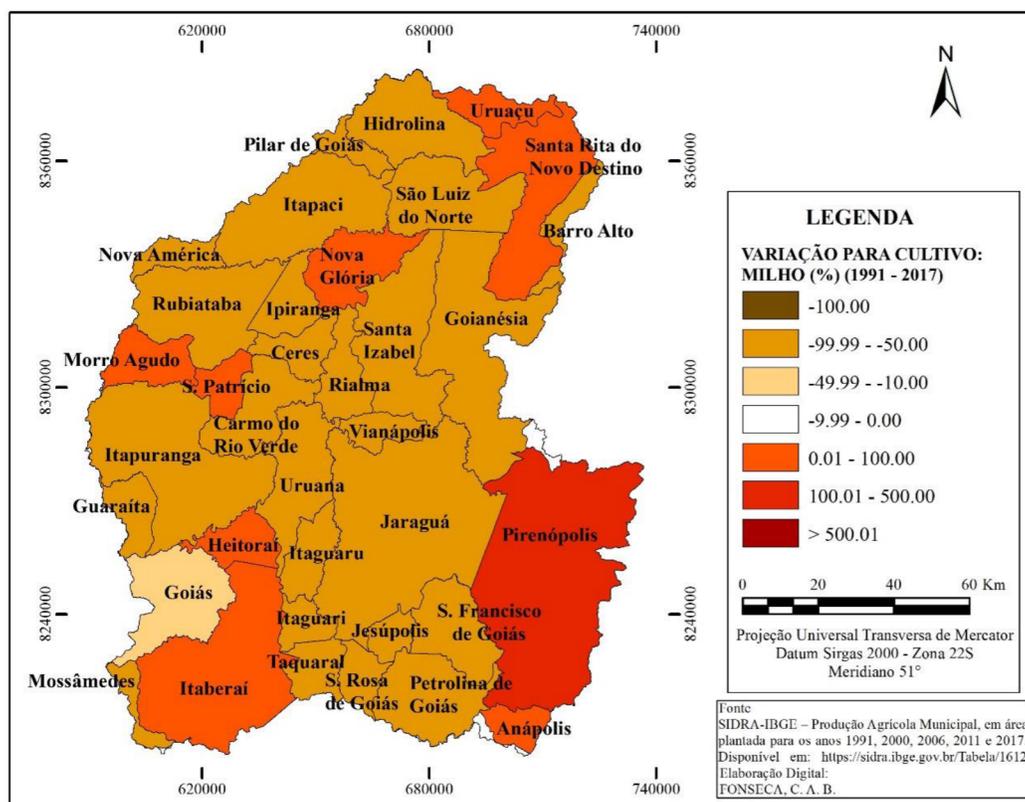


Figura 34 - Variação temporal do cultivo do Milho por área cultivada na BHRA (1991 e 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Em relação aos demais municípios mantiveram a área plantada com o milho em 2017, porém, em pequena proporção em relação a 1991, como: Goiás (20%), Carmo do Rio Verde (69,23%), Jaraguá (84,62%), Goianésia (57,50%), Uruana (50%), Barro Alto (60%), Itapaci (89,23%), Itaguari (95,81%), Itaguaru (69,10%), Petrolina de Goiás (92,50%), Itapuranga (72,50%), Taquaral de Goiás (76%), Ceres (95%), Santa Rosa de Goiás (70%), Ipiranga de Goiás (50%), São Francisco de Goiás (84%), Rubiataba (90%),

Hidrolina (96,15%), Mossâmedes (75%), Rialma (98,68%), Nova América (88%), Pilar de Goiás (99,25%), Rianópolis (96,67%), São Luiz do Norte (96,67%) e Jesópolis (99,65%). Essa perda foi compensada pelo efeito positivo com outros cultivos, que segundo as informações da SEGPLAN-GO/IMB (2017), nas últimas décadas o cultivo do milho veio a competir com a cana-de-açúcar, além de ser consorciado com soja, sorgo e pecuária bovina.

Para a bacia em estudo, assim como no estado de Goiás, o milho safrinha é plantado quase sempre após a colheita da soja e no período chuvoso (janeiro a abril). A Embrapa (2005 e 2010a) recomenda que no sistema de sucessão de culturas seja comum a repetição sazonal de uma sequência de duas espécies vegetais no mesmo espaço produtivo, como por exemplo, soja-milho por anos consecutivos.

A expansão do milho safrinha (1ª e 2ª safras) teve início na década 2000. A crescente adoção desse cultivo no plantio direto com a cultura da soja, favorece a cobertura do solo no inverno e atende à necessidade agrônômica da rotação de culturas. Estima-se que o cultivo do milho tende a acompanhar a expansão da soja no médio e longo prazo, mas não em curto prazo, por serem culturas temporárias e são mais vulneráveis as variações climáticas (HELFAND; REZENDE, 1999).

Tanto a rotatividade com o cultivo do milho e quanto a soja o solo é mais intensamente trabalhado, podendo ocasionar maior probabilidade de aceleração da degradação do solo, aumentar os problemas de compactação do solo com o uso de implementos agrícolas, possibilitar geração dos processos erosivos. Por isso que para essa e outras lavouras se torna fundamental adotar programas de rotação pelo sistema de plantio direto, para garantir a conservação do solo, a sustentabilidade e a preservação ambiental (EMBRAPA, 2005; EMBRAPA 2010a).

#### 4.3.1.5 Cultivo da Soja

A Figura 35 mostra os municípios que aderiram ao cultivo da soja. Em 1991 havia 0,49% de área plantada, o equivalente a 9.185 hectares. Percebe-se o comportamento do cultivo espalhado em poucos municípios, com área superior à 1.000 hectares, como: Rialma, São Luiz do Norte, Barro Alto e Anápolis que detinham uma área plantada de 6.700 hectares. Para se ter uma ideia, só o município de Rialma concentrou 3.000 hectares, onde encontra-se relevo aplainado e Latossolos vermelhos e com potencial produtivo. Enquanto os outros sete municípios detinham 2.485 hectares.

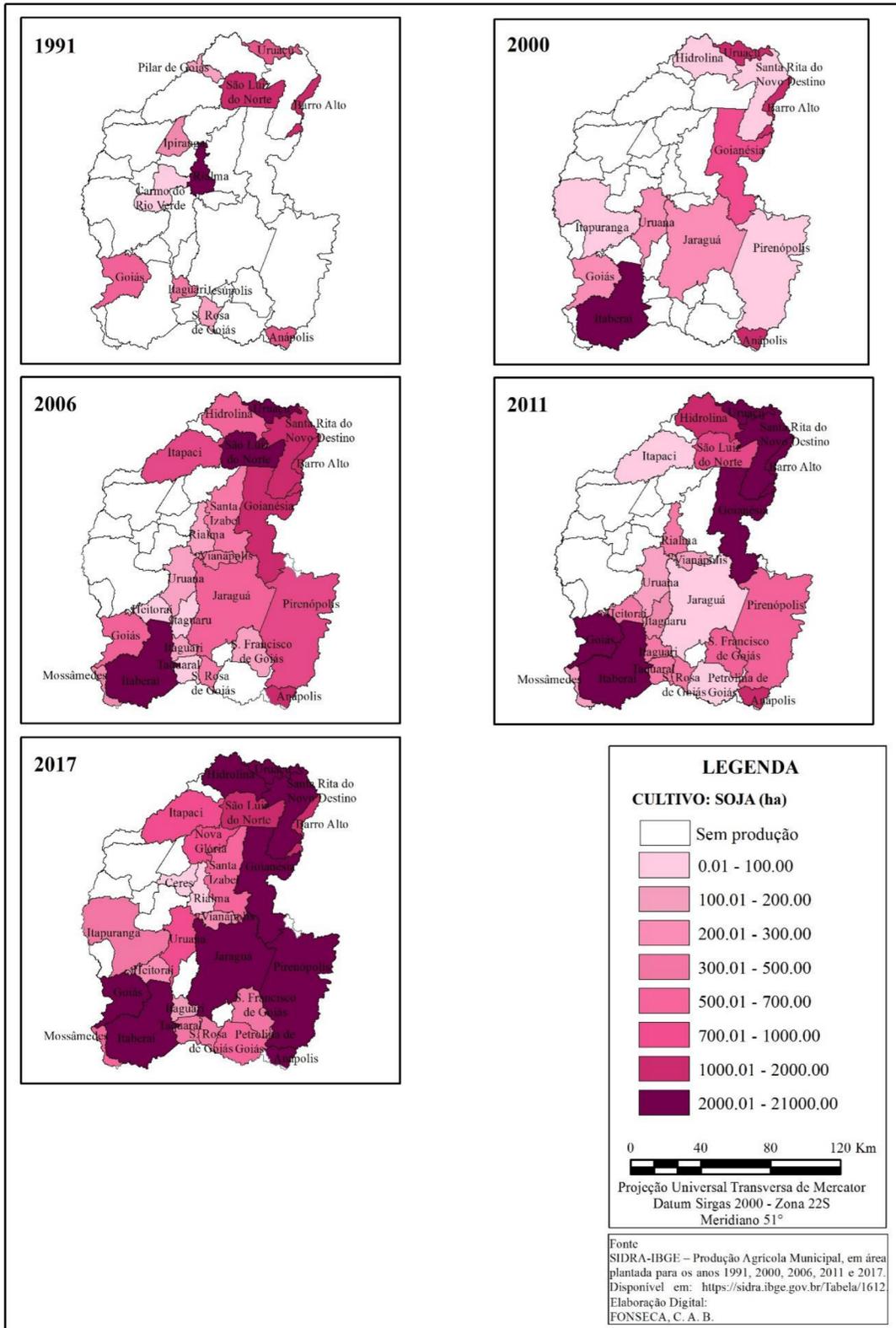


Figura 35 - Evolução do cultivo da Soja nos municípios da BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Em nove anos (2000) a área plantada permaneceu muito pequena, 0,51% (9.450 hectares), até então configurado como atividade de importância secundária. Somente nos anos posteriores a soja expandiu sua área na bacia, por meio do avanço sobre as áreas de pastagens e de outros cultivos. O crescimento gradativo da área plantada para 2006, 2011 e 2017 foram 1,87%, 2,59% e 3,92%, respectivamente.

A Figura 36 apresenta a taxa de variação espaço-temporal entre 1991 e 2017. O cenário mudou em 2017 e a cultura da soja se expandiu rapidamente ao longo dos vinte e seis anos, tendo um aumento significativo de 694,53% em relação 1991. Praticamente, dobrou o número de municípios com cultivo de soja: Uruaçu (2.525%), Goiás (510%), Anápolis (355%), Santa Rosa de Goiás (233,33%), Barro Alto (58,33%) e São Luiz do Norte (20%), incluindo os outros dezoito municípios da bacia que em 1991 não tinham cultivo de soja e atualmente estão cultivando, tendo em conjunto uma área plantada de 2,11% da área da bacia, o que equivale a 39.355 hectares, sendo eles: Ceres, Goianésia, Heitorai, Hidrolina, Itaberaí, Itapaci, Itapuranga, Jaraguá, Mossâmedes, Nova Glória, Petrolina de Goiás, Pirenópolis, Rianópolis, Santa Isabel, Santa Rita do Novo Destino, São Francisco de Goiás e Taquaral de Goiás.

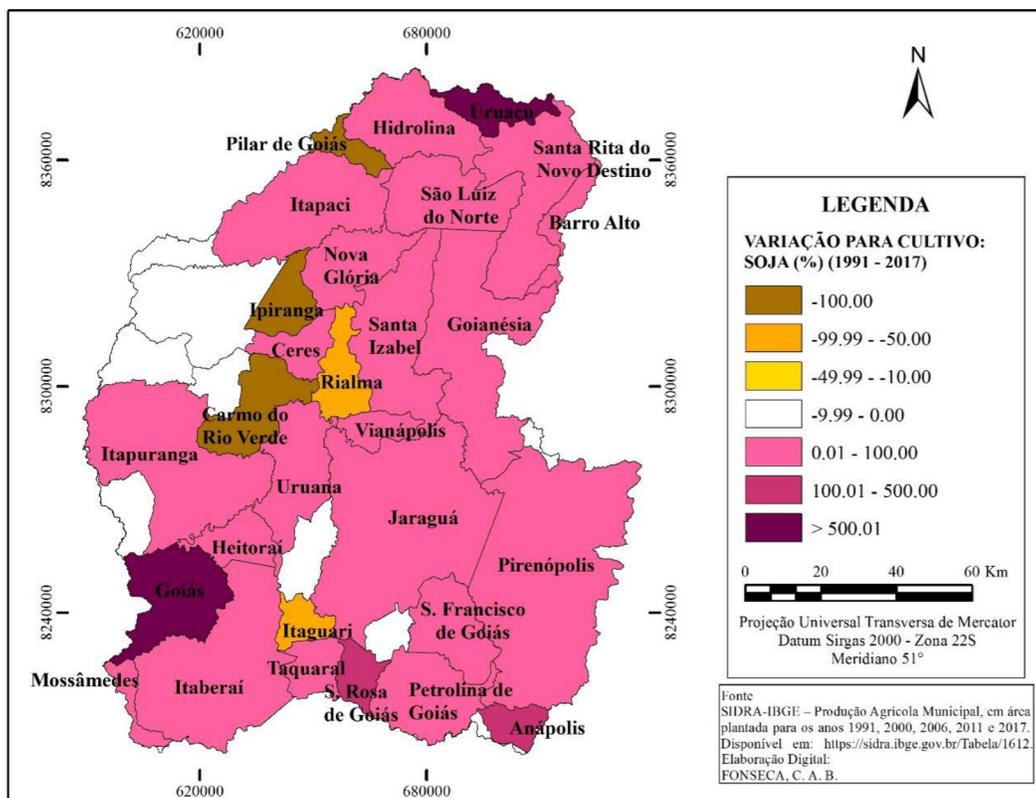


Figura 36 - Variação temporal do cultivo da Soja por área cultivada na BHRA (1991 e 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

Percebe-se que os municípios citados anteriormente substituíram determinados cultivos alimentícios (arroz e feijão) para implantação da soja, milho e/ ou sorgo e também dividiam outros espaços com o cultivo da cana-de-açúcar. Os outros municípios como Rialma e Itaguari, tiveram redução na área de cultivo de soja de 99,67% e 58,33%, respectivamente, em função de privilegiarem o cultivo da cana-de-açúcar (Rialma) e do milho (Itaguari). Os demais municípios não tiveram cultivos nesse período, sendo eles: Guaraita, Itaguaru, Jesúpolis, Morro Agudo de Goiás, Nova América, Rubiataba e São Patrício.

O principal incentivo no processo da expansão da soja nos municípios, se deu por meio do subsídio do crédito rural, ampliação de áreas agricultáveis, uso intensivo de insumos modernos, máquinas e equipamentos (MIRANDA; NETO, 2014). Outro fator contribuinte discutido pelos autores é que a expansão da soja se deu sobre as áreas degradadas de pastagens, que foram incorporadas ao sistema de plantio consorciado.

O que tem que ser entendido é que, o maior impacto no aumento da busca por grãos ou farelos proteicos é devido ao crescimento da demanda mundial do mercado de carnes. Esses grãos são utilizados como fonte de proteína e de carboidratos para fabricação de rações para animais (EMBRAPA SOJA, 2005), que são coligados e encadeados com os complexos grãos-rações-carne.

A soja se adaptou muito bem na região do Cerrado, em função da temperatura (entre 25° a 30°), da disponibilidade de água, do período sazonal, da correção da acidez dos solos, do relevo (plano a suave ondulado) e ao tipo de solo (Latosolos). O preparo do solo é semelhante aos cultivos do feijão, milho e cana-de-açúcar, que necessita de maquinários e implementos agrícolas e colheitadeiras. A monocultura necessita de introduzir no sistema contínuo, a sucessão de outras espécies do tipo soja-milho (ou sorgo) na mesma área agrícola, que seja de preferência gramínea e pastagem plantada (braquiária) com propósito de recuperar o solo. Caso não ocorra, pode provocar a degradação física (condutividade hidráulica), química (permeabilidade da água e do ar) e biológica (atividade microbiana) do solo, ocorrência de processos erosivos, queda da produtividade, desenvolvimento de doenças, pragas e plantas daninhas (EMBRAPA SOJA, 2005).

#### 4.3.1.6 Cultivo do Sorgo

A Figura 37 mostra a evolução do cultivo do sorgo entre 1991 e 2017. Os dados da série histórica indicam que o cultivo do sorgo na área de estudo se configurou como cultivo secundário. Estabeleceu-se quase que constante em área plantada, quando comparado a outras culturas.

Em 1991 há registro do município de Jaraguá com uma área plantada de 0,001% da bacia, equivalente a 16 hectares de área plantada. Em 2000 houve um aumento de área plantada para 0,23% da bacia e agregação de três municípios (Itaberaí, Itaguaru e Uruaçu). Em 2006 e 2011 outros municípios aderiram ao sistema de plantio do sorgo com área de 0,37% e 0,22%, respectivamente. Já em 2017 houve um aumento de 0,42%, o que representa a 7.745 hectares envolvendo oito municípios (Anápolis, Barro Alto, Goiás, Itapaci, Itaberaí, São Luiz do Norte e Uruaçu), que tiveram a participação no cultivo da soja (consorciação).

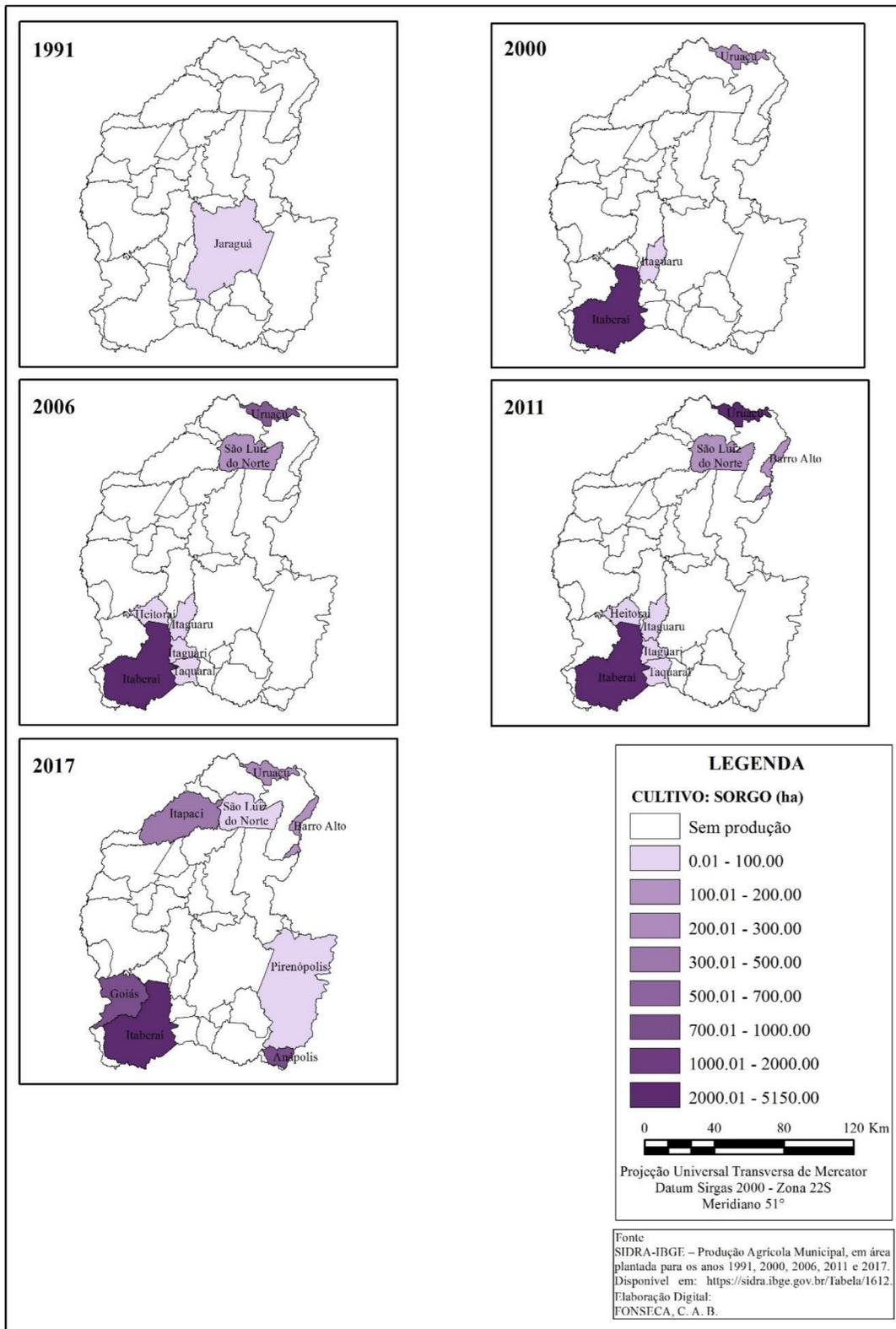


Figura 37 - Evolução do cultivo do Sorgo nos municípios da BHRA (1991 a 2017).Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

A Figura 38 apresenta a variação temporal de 1991 a 2017. Ao longo dos vinte e seis anos o cultivo do sorgo teve um aumento de área de 48.306,25% em relação a 1991. Diante dos dados apresentados, percebe-se que o cultivo espalhou para outros municípios em 2017 e teve uma estreita relação com o sistema produtivo da sucessão da soja e milho, possivelmente na substituição de outros cultivos e manejo de pastagem.

Para se ter uma ideia, a maior área plantada se encontra no município de Itaberaí (5.150 hectares), que incrementou o sorgo ao sistema de consorciação com a soja. Além dos outros municípios, como: Anápolis, Barro Alto, Goiás, Itapaci, Pirenópolis, São Luz do Norte e Uruaçu que até então em 1991 não participavam da integração grão-carne, já 2017 passam a ser parceiros nesse complexo, estão presentes nos municípios produtores citados anteriormente, inclusive em municípios produtores de bovinos.

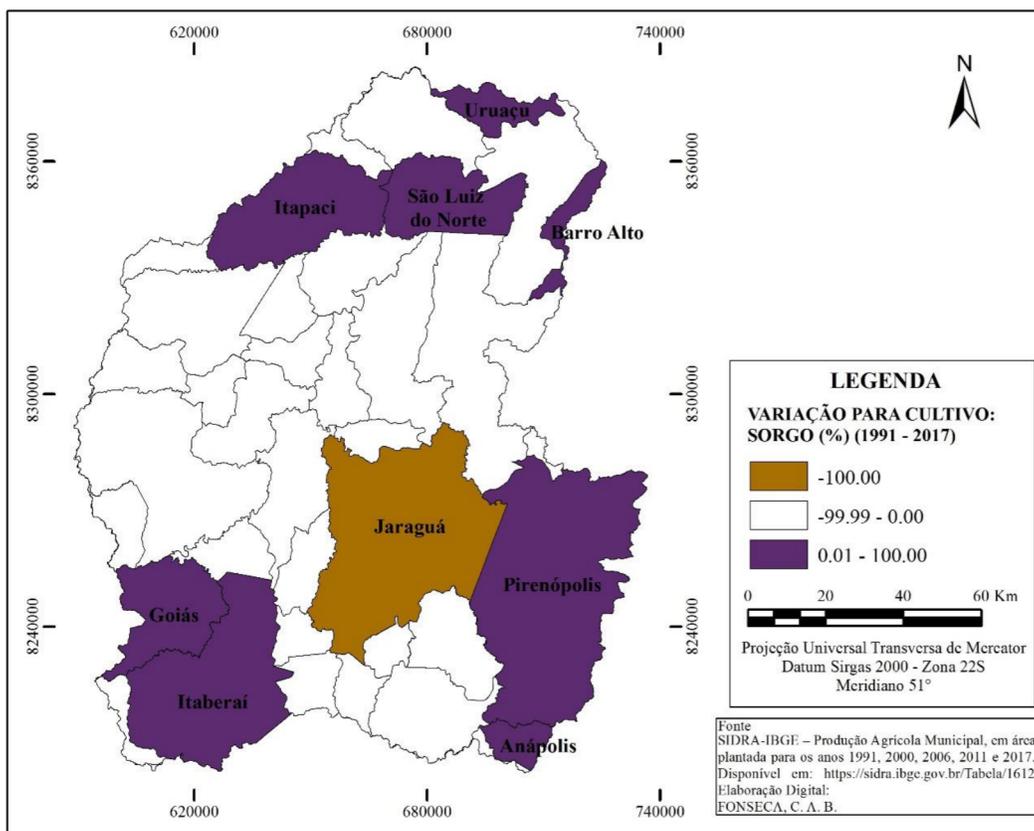


Figura 38 - Variação temporal do cultivo da Sorgo por área cultivada na BHRA (1991 a 2017). Fonte: SIDRA-IBGE (2018). Org.: FONSECA, C. A. B. (2019).

A Embrapa (2012) explica que o cultivo do sorgo é uma alternativa na cadeia de integração de sucessão de lavoura-pecuária, principalmente no período da safrinha após a colheita da soja e pode substituir especialmente o milho que sofre no período de

estiagem na demanda para alimentação de animais. Miranda e Neto (2014) explicam que o sorgo é uma cultura de grande importância nos cultivos de safrinha em Goiás, portanto o grão é usado principalmente na ração animal. Esses autores destacam que o crescimento desse cultivo está presente nas regiões Sul e Leste goianos e, praticamente são as principais responsáveis pelo incremento da produção de sorgo no estado de Goiás.

Esses mesmos autores lembram que a intensificação das atividades da pecuária (corte, leite e de confinamentos bovinos) com o crescimento de granjas e de animais domésticos (suíno), o sorgo passa a ser um suprimento na demanda por alimento, principalmente no caso bovino, durante o período de escassez de forragem e sobretudo na estação seca.

Segundo o sistema de produção da Embrapa (2012) para cultivo de sorgo, esse se adapta muito bem aos ambientes de menor disponibilidade hídrica e aos diferentes tipos de solos (Latosolos, Argissolos, Cambissolos), desde que sejam feitas as devidas correções do solo. O manejo está submetido ao tipo de solo, ao uso e a prática do sistema do plantio direto, como por exemplo os cultivos de sucessão com a soja que tem ganhado importância especialmente no Centro-Oeste brasileiro. Primeiro por manter a camada superficial cobertura por matéria orgânica que desempenha importante papel na preservação da estrutura do solo, significando menor probabilidade de erosão laminar e resultando em maior taxa de infiltração de água no solo. Porém, o sorgo é uma cultura 100% mecanizável e usa os mesmos equipamentos de plantio, cultivo e colheita utilizados para outras culturas de grãos como a soja, milho e o arroz.

#### 4.4 MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BHRA

##### 4.4.1 Simulação do modelo

No modelo SWAT foram inseridos arquivos de entrada necessários, como MDE, uso do solo e tipos de solos, além de dados hidrometeorológicos (1974–1994), os quais possibilitaram realizar a simulação do modelo hidrológico. A Figura 39 mostra o modelo digital de elevação, com as respectivas distribuições espaciais das sub-bacias e as estações fluviométricas da bacia em estudo.

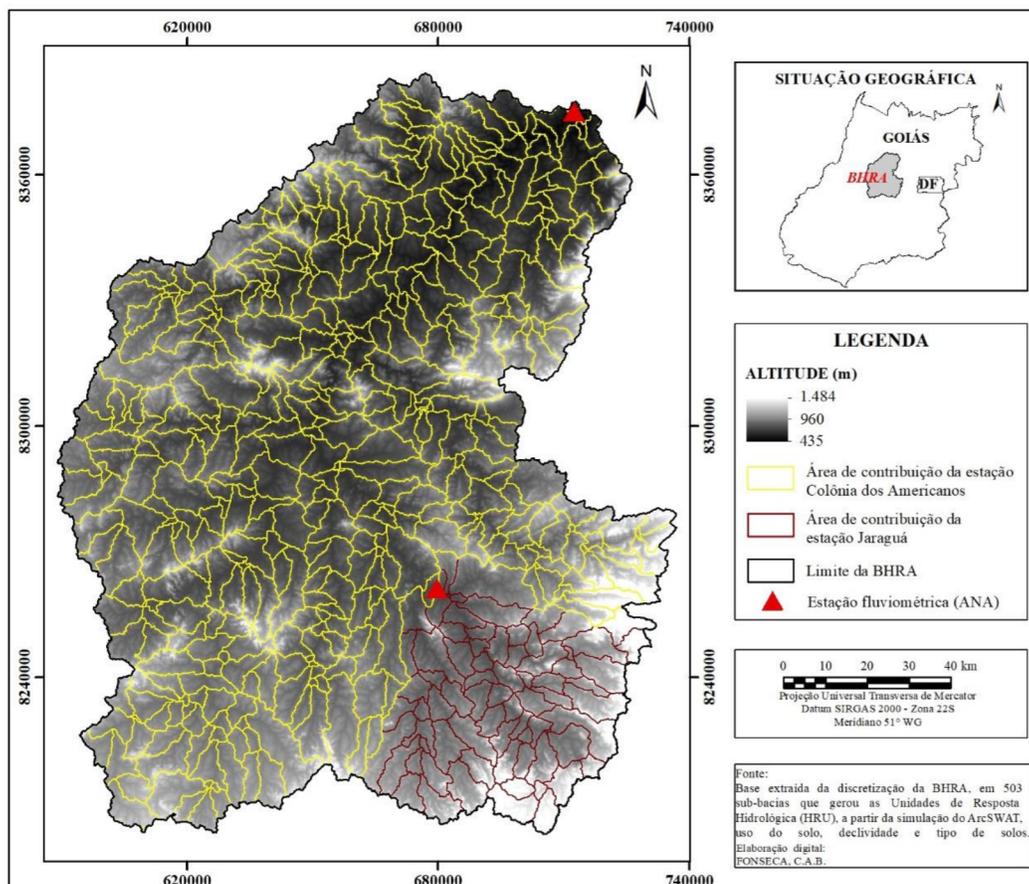


Figura 39 - Modelo digital de elevação (MDE) utilizado no modelo SWAT para delimitação de sub-bacias na BHRA. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

A maior altitude equivale a 1.484 m e a menor é representada por 435 m. Após o delineamento automático da BHRA e da definição da área mínima de acumulação de fluxo (2.000 ha) pelo modelo SWAT gerou-se as quinhentas e três sub-bacias, sucessivamente a mesma quantidade de unidades de respostas hidrológicas (HRU), que representam as características comuns de solo, uso do solo e declividade de cada uma das referidas sub-bacias. Uma vez que, utilizou-se na simulação do modelo uma maior discretização da BHRA em sub-bacias, onde mostrou resultados estatísticos mais eficientes, posterior à calibração do modelo com melhoras significativas, estão apresentados no item 4.4.4.

As sub-bacias apresentaram diferentes tamanhos com áreas territoriais de contribuição variando de 0,12 km<sup>2</sup> a 177,86 km<sup>2</sup>, tendo uma dimensão média de 37,05 km<sup>2</sup>. Em relação a área de contribuição da drenagem entre as duas estações fluviométricas que se encontram no rio das Almas, foram definidas assim: a primeira refere-se à estação

fluviométrica Jaraguá (sub-bacia 342) que se encontra a montante, recebe o fluxo das setenta e três sub-bacias com área de contribuição de 2.923,01 km<sup>2</sup>. A segunda estação fluviométrica Colônia dos Americanos que fica situada a jusante do rio principal, recebe o maior fluxo de água com a área de contribuição de 15.713,82 km<sup>2</sup>.

#### 4.4.2 Modelagem inicial do uso do solo de 1991

As Figuras 40 e 41 apresentam a série de dados das vazões médias mensais no período 1974 a 1994, que foram simuladas no modelo SWAT. A Figura 39 mostra a simulação inicial para estação fluviométrica Jaraguá (sub-bacia 342). Percebe-se que a média mensal da vazão observada e simulada e os coeficientes estatísticos não se mostraram adequados para modelagem, superestimou as vazões máximas para todos os anos e subestimou também as vazões mínimas.

O hidrograma das vazões observada e simulada utilizando o uso do solo de 1991 e o hietograma dos dados de precipitação média observada para essa estação no período, indicaram no primeiro momento da simulação (sem calibração) um resultado pouco favorável com valores de NS = -2,49 e R<sup>2</sup> = 0,76. O resultado obtido apresentou um ajuste ruim para as vazões de pico e quanto aos valores da média mensal da vazão observada e simulada foram de 35,44 m<sup>3</sup>/s e 57,63 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, tendo uma diferença de 22,19 63 m<sup>3</sup>/s. Conforme Moriasi et al. (2007), esse resultado é considerado insatisfatório para a modelagem.

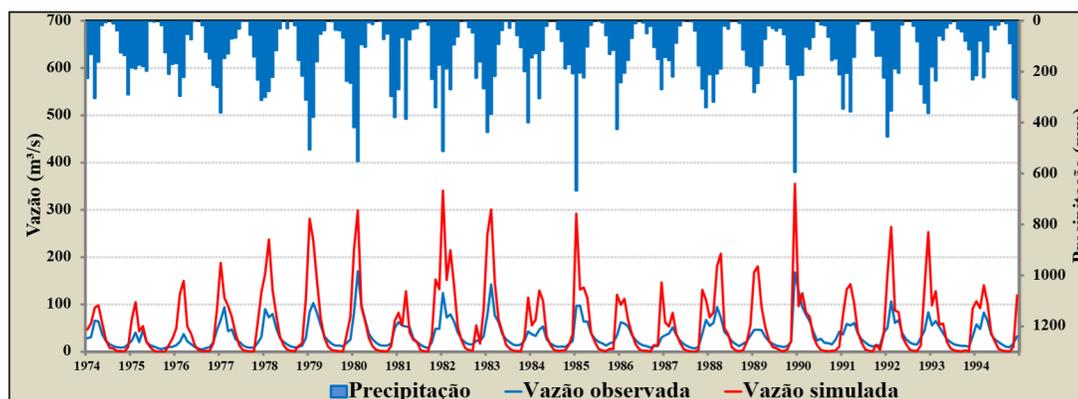


Figura 40 - Hidrograma das vazões das médias mensais observada e simulada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação média mensal observada para estação fluviométrica Jaraguá (1974 a 1994). Org.: FONSECA, C.A.B. (2020).

A Figura 41 mostra o hidrograma da vazão e o hietograma dos dados de precipitação média observada simulada no modelo, para a estação Colônia dos Americanos, utilizando também o uso do solo de 1991. A primeira resposta da simulação quando utilizado sem calibração do modelo, os resultados estatísticos também foram insatisfatórios para essa estação fluviométrica, onde o *Nash-Sutcliffe* e  $R^2$  apresentaram valores de -0,58 e 0,84, respectivamente. A vazão média mensal observada foi de 337,80 m<sup>3</sup>/s, enquanto a simulada foi de 501,02 m<sup>3</sup>/s, tendo uma diferença de 163,22 m<sup>3</sup>/s entre o medido e simulado.

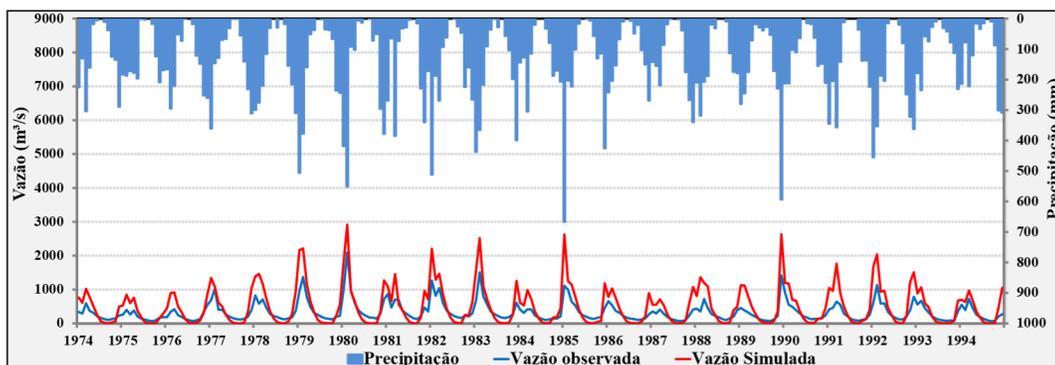


Figura 41 - Hidrograma das vazões médias mensais observada e simulada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação média mensal observada para estação fluviométrica Colônia dos Americanos, (1974 a 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Observa-se nos dois gráficos das simulações no modelo tanto para as estações fluviométricas Jaraguá (Figura 40) quanto para Colônia dos Americanos (Figura 41), que houve uma tendência em subestimar as médias mensais de vazão nos baixos eventos de chuva e superestimar as vazões nos eventos chuvosos ao longo do período (1974 a 1994). Essa observação foi relatada nos trabalhos de Carvalho (2014), Ferrigo (2014) e Castro (2013).

Desse modo, quando se compara as duas estações fluviométricas, percebe-se que para estação fluviométrica Jaraguá a vazão média observada para o período (1974-1994) foi de 35,44 m<sup>3</sup>/s e a simulada pelo modelo foi 57,63 m<sup>3</sup>/s, representando uma superestimativa de 62,6%, em relação a vazão média observada dessa estação. Enquanto para outra estação fluviométrica Colônia dos Americanos mostrou nas vazões médias observada 337,80 m<sup>3</sup>/s e na simulada pelo modelo com 501,02 m<sup>3</sup>/s, representando uma superestimativa de 48,32%, comparada com a vazão observada dessa estação.

Para se buscar um melhor ajuste entre a vazão observada e simulada pelo modelo SWAT foi necessário efetuar a calibração automática do modelo, pelo SWAT-CUP. A

calibração do modelo para uso do solo de 1991 da BHRA, ocorreu conforme descrito anteriormente no item 3.10.2, precedida pela análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo.

Assim, nos itens seguintes serão apresentados os resultados obtidos na fase de análise de sensibilidade com os parâmetros apresentados na Tabela 12 e a fase de calibração e validação no modelo SWAT, para a Bacia Hidrográfica do Rio das Almas.

#### **4.4.3 Análise de sensibilidade**

De acordo com Arnold et al. (2012), Raposo (2020), Santos (2015) e Carvalho (2014) o primeiro passo para o processo de calibração e verificação do modelo é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia em estudo, e com base em opinião de análise de sensibilidade. Na prática Carvalho (2014) explica que essa análise se trata de um procedimento para identificação dos parâmetros, que contribuem mais fortemente para a geração dos resultados do modelo. Desse modo, a etapa seguida de calibração do modelo dos parâmetros mais importantes (SALLES, 2012) seja conduzida mais facilmente, pois se perceberá ao final que muitos dos parâmetros calibrados não tem peso significativo na geração dos resultados (CARVALHO, 2014).

Conforme citado no item 3.10.1, determinou nessa fase a análise de sensibilidade anteriormente a fase do processo de calibração do modelo, com a finalidade de encontrar a faixa de intervalos dos parâmetros mais sensíveis na variação da vazão, escoamento superficial e de produção de sedimentos. Para essa pesquisa optou-se em utilizar todos os parâmetros listados na Tabela 12, em função desses serem os que mais se ajustaram aos dados simulados e observados, permitiram representar melhor a realidade da bacia em estudo, através dos cálculos de estimativa que influenciaram na dinâmica hidrossedimentológica da BHRA para o uso do solo de 1991, no período analisado da calibração (1974-1980).

Nessa análise, os parâmetros foram definidos pelo modelo acrescido de duas estações fluviométricas (Colônia dos Americanos e Jaraguá), executada com quinhentas simulações em cada iteração dentro de cada intervalo limitado e de acordo com a Tabela 12. Para cada quinhentas combinações das faixas de valores dos parâmetros, o modelo testou diferentes valores dentro dos intervalos permitidos, para que replicasse as condições antecipadamente a aproximação realística das condições observadas (ABBASPOUR, 2011).

Para se chegar aos resultados dos melhores parâmetros sensíveis na BHRA, utilizou-se: o CN2 (adimensional) que é o parâmetro chave do método SCS que corresponde ao valor da Curva Número (CN) para a condição II de umidade do solo, que está relacionado diretamente à permeabilidade do solo e à geração do escoamento superficial.

Com a finalidade de diminuir o valor de pico da média de vazão e suavizar o hidrograma gerado pela modelagem, para um determinado tempo de concentração, utilizou o parâmetro SURLAG (coeficiente de retardo do escoamento superficial). Segundo Neitsch et al. (2011) explicam que à medida que o SURLAG diminui, mais água é mantida em armazenamento, sendo que o atraso na liberação do escoamento superficial suavizará o hidrograma de vazão.

Para os parâmetros SOL\_K e SOL\_AWC alterou-se a condutividade hidráulica do solo saturado, para aumentar o fluxo de base que influencia no movimento da água no perfil do solo, ajudando o modelo a não subestimar a vazão de base, quando utilizar o valor próximo de zero nos meses secos.

Carvalho (2014) recomenda obter menor ajuste no valor de SOL\_K na calibração do modelo. Este procura balancear os valores dos parâmetros CN2 e SOL\_K, de forma que um controlasse o outro para buscar uma melhor maximização da função objetivo. Esse ajuste no valor é realizado na tabela de solos recomendada para área de interesse, pois no *default* do modelo SWAT, não existe para esse parâmetro um valor previamente registrado.

Para aumentar a vazão mínima no período de estiagem foram utilizados alguns parâmetros relacionados à água subterrânea, como o GWQMN que é o limite entre a profundidade do aquífero raso e a superfície; RCHRG\_DP que representa a fração de água percolada para o aquífero profundo; ALPLHA\_BF para a constante de recessão do escoamento de base; o tempo de retardo da água subterrânea (GW\_DELAY) e GW\_REVAP é o coeficiente REVAP de água subterrânea.

Para evapotranspiração foram utilizados os parâmetros: CANMX que representa a influência da evapotranspiração na cobertura vegetal do bioma Cerrado e o ESCO que representa o processo de evapotranspiração da camada superior do solo.

E por fim, o parâmetro Ch\_N2, onde N é representado pelo coeficiente de rugosidade de *Manning* e está relacionado a vazão dos canais. Embora, no *default* do modelo SWAT apresenta o valor padrão igual a 0,014 (valor indicado para canais de concreto). Assim, esse parâmetro está associado às características da margem e do leito

do rio que influenciam diretamente nos valores de coeficiente de rugosidade, que por sua vez, tem influência direta na descrição da vazão sobre uma superfície (FERREIRA, 2016).

Aproximação dos valores dos parâmetros encontrados para a bacia em estudo, permitiram distinguir e estimar os parâmetros que mais se identificasse para o contexto hidrológico da bacia hidrográfica. Posteriormente, esses foram usados no processo subsequente à calibração do uso do solo de 1991.

A Tabela 17 e a Figura 42 mostram o conjunto dos melhores parâmetros atribuídos pelo SWAT-CUP 2012, para sensibilidade global dos parâmetros para BHRA. Lembrando que as duas estações fluviométricas foram calibradas em conjunto com os devidos parâmetros (Tabela 12), utilizando os dados de precipitação conforme o item 3.5.2, de forma a representar os processos hidrossedimentológicos.

Tabela 17 - Valores atribuídos para sensibilidade global dos parâmetros da BHRA.

<b>Parâmetro</b>	<b><i>t-stat</i></b>	<b><i>p-value</i></b>
GWQMN.gw	-0,110855733	0,911776419
SOL_AWC(..).sol	-0,146203402	0,883821318
ESCO.bsn	0,336008739	0,737008994
GW_REVAP.gw	-0,342399261	0,732198168
ALPHA_BF.gw	0,478882917	0,632236863
CH_N2.rte	-0,543850946	0,586792927
CANMX.hru	0,615796136	0,538316764
SURLAG.bsn	-0,729329361	0,466150832
GW_DELAY.gw	0,80309628	0,42231086
RCHRG_DP.gw	0,897794554	0,369738717
SOL_K(..).sol	-1,639147179	0,101828411
CN2.mgt	-17,38981567	0,000000000

Fonte: SWAT-CUP (2020). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

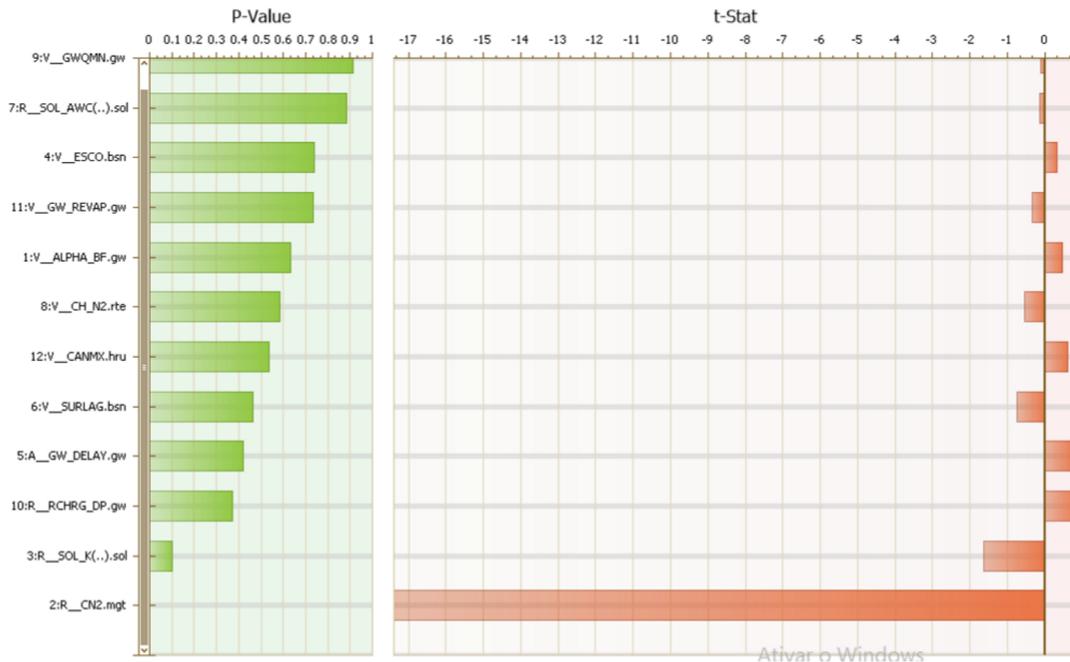


Figura 42 - Análise de sensibilidade realizada pelo Global Sensitivity do SWAT-CUP para BHRA. Em *t-stat*, as maiores barras significam maior sensibilidade. Em *p-value*, as menores barras significam maior significância da sensibilidade. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Essa função (*global sensitivity*) (Figura 42) investigou as variações de saída do modelo de acordo com as mudanças nos parâmetros, que é determinado a partir do cálculo do sistema linear de regressão múltipla (BRIGHENTI et al., 2017), utilizado pelo algoritmo SUFI-2. Essa função identificou a significância do valor absoluto de cada parâmetro, onde apresentou as duas funções que determinam o grau de sensibilidade: o *t-stat*, que fornece uma medida da sensibilidade, onde a maior barra indica maior sensibilidade do parâmetro; e o *p-value* determina maior significância da sensibilidade (valor próximo a zero indica maior significância), portanto, os dois gráficos são complementares (ABBASPOUR, 2011; CARVALHO, 2014).

De acordo com Figura 42 e Tabela 19, o *t-stat* indicou a maior medida da sensibilidade para o parâmetro CN2, seguido do parâmetro SOL\_K. Já o gráfico do *p-value*, identificou os parâmetros CN2 e SOL\_K com maior significância da sensibilidade na modelagem específica, com valor inferior a 0,1 (ABBASPOUR, 2011; SANTOS, 2015). E os parâmetros próximos de 1,0 (*p-value*) que se mostraram com maior significância, foram: GWQMN e SOL\_AWC. Enquanto os oito parâmetros considerados intermediários e pouco influentes na significância da resposta da modelagem (*p-value*), foram: RCHRG\_DP, GW-DELAY, SURLAG, CAMIX, CH\_N2, ALFA\_BF, GW\_REVAP e ESCO.

Os dozes parâmetros considerados mais sensíveis e influentes para calibração da vazão da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas (descritos na Tabela 12), três parâmetros estão relacionados ao escoamento superficial (CN2, SURLAG e CH\_N2), dois parâmetros relacionados aos processos de evapotranspiração (ESCO e CAMIX), dois parâmetros estão relacionados à água no solo e as características físicas dos solos (SOL\_K e SOL\_AWC) e outros cinco parâmetros estão relacionados a água subterrânea (ALFA\_BF, GWQMN, GW\_REVAP, GW\_DELAY e RCHRG\_DP).

Os parâmetros mais sensíveis (CN2 e SOL\_K) apresentaram influência no comportamento hidrológico e sedimentológico da bacia, seja na movimentação da água (vazão), no escoamento superficial, transporte de partículas do solo, perdas de solo e na produção de sedimentos. Esse resultado obtido com os parâmetros identificados como os mais sensíveis para a vazão da bacia após a calibração da modelagem, foi semelhante ao trabalho de Carvalho (2014), em área de Cerrado.

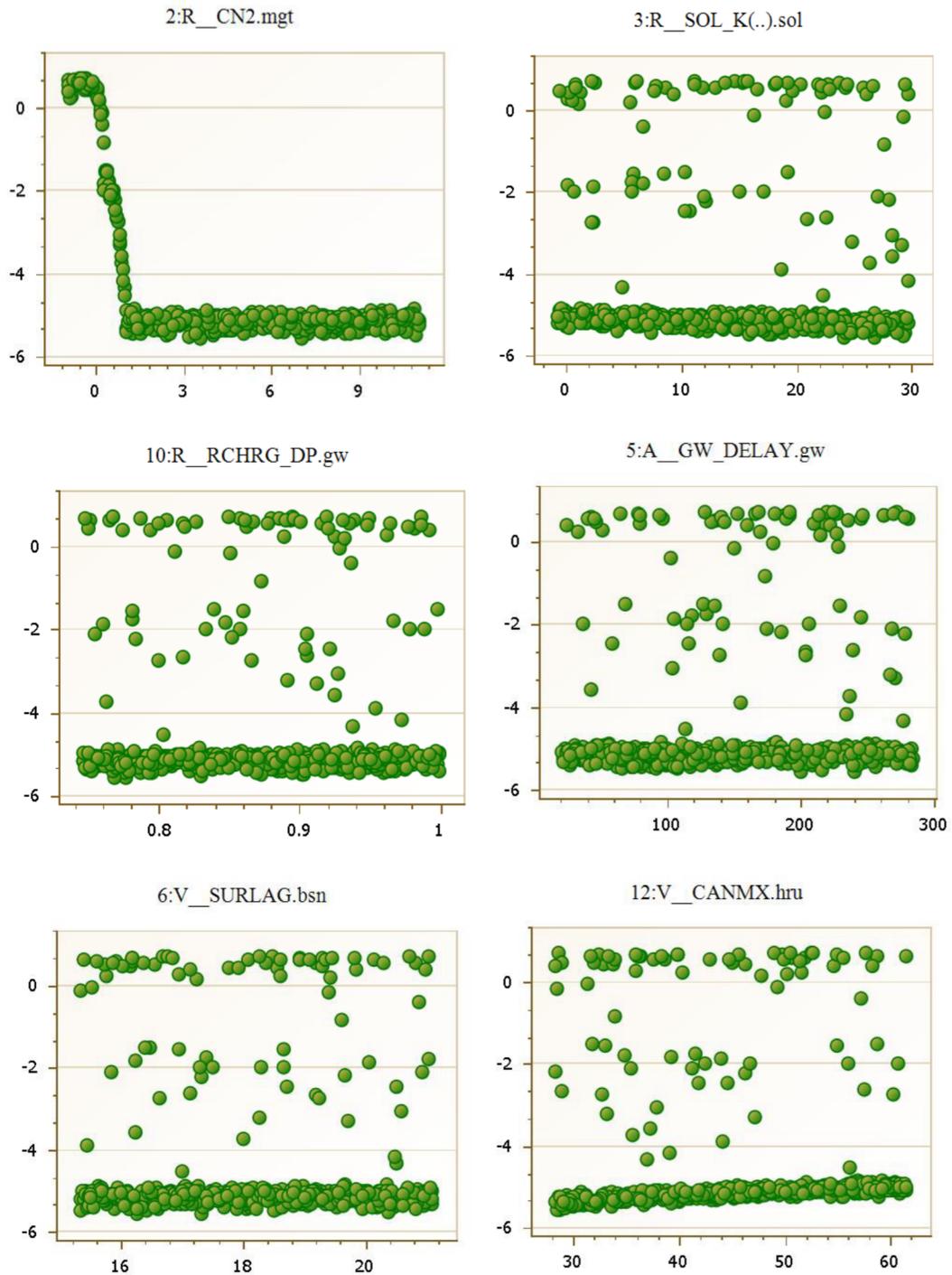
Na modelagem hidrológica desse autor, identificou os parâmetros CN2 e SOL\_K, como os mais sensíveis, os quais tiveram comportamento amplamente dominante no processo. O parâmetro ESCO teve pequena influência, enquanto as alterações nos demais parâmetros produziram pouca ou nenhuma resposta no modelo.

Salles (2012) identificou também em área de Cerrado, os parâmetros CN2 e RCHRG\_DP como os mais sensíveis no processo de ajuste da modelagem hidrológica calibrado manualmente e os oitos parâmetros classificados como menos influentes: Ch\_K, SURLAG, ALPHA\_BF, ESCO, GWQMN, GW\_REVAP E REVAPMN.

Raposo (2020) encontrou os parâmetros com maior sensibilidade: CN2, SOL\_K, SURLAG, EPCO, GW\_DELAY e SHALLIST, para bacia hidrográfica do Ribeirão Piçarrão no estado de Minas Gerais. E Bonumá et al. (2010) obtiveram os parâmetros com maior sensibilidade: CN2, ESCO e ALPHA\_BF na bacia hidrográfica do Rio Lino, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Esses se mostraram ter grande importância na simulação do escoamento e, conseqüentemente no aporte de sedimentos e qualidade da água.

Entretanto, no final de cada iteração o SWAT-CUP fornece para cada parâmetro um gráfico pontilhado, denominado de *dotty plot*, o qual apresenta o cruzamento entre o valor testado na iteração com o valor obtido na função objetivo (RAPOSO, 2020). Na Figura 43 mostra os gráficos de dispersão com a distribuição do valor dos respectivos parâmetros, em forma de pontilhado e em relação a função objetivo (*Nash-Sutcliffe*), fornecido na quarta iteração da calibração do SWAT-CUP. Entre os gráficos dos

parâmetros, o CN2 foi o que resultou no melhor valor para a função objetivo. Enquanto os outros gráficos classificados com pouca influência na modelagem, nenhuma tendência é claramente perceptível.



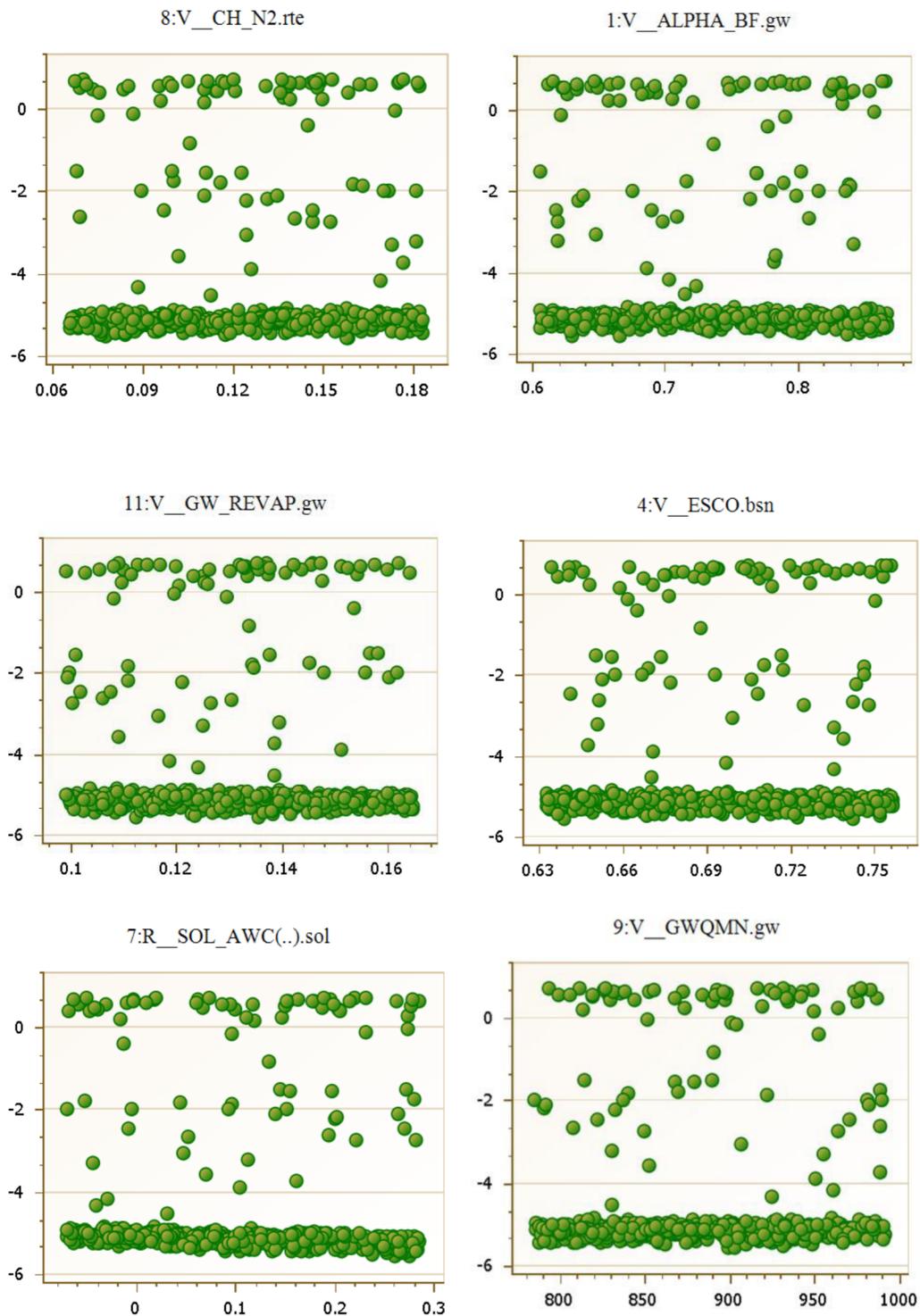


Figura 43 - Gráficos de dispersão dos valores dos parâmetros em relação a função objetivo. Fonte: SWAT-CUP (2020). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

No item seguinte apresenta os dados ajustados no modelo SWAT pela calibração automática e, posteriormente, validados no modelo com as respectivas estações fluviométricas (Colônia dos Americanos e Jaraguá) para o uso do solo de 1991.

#### 4.4.4 Calibração e Validação do uso do solo de 1991

A Tabela 18 apresenta o conjunto de parâmetros calibrados no SWAT-CUP do uso do solo de 1991 para HRU das respectivas sub-bacias fluviométricas (Colônia dos Americanos e Jaraguá), o qual encontrou o melhor ajuste da vazão mensal na bacia, calculada pelo modelo com os dados observados. Nessa fase de calibração automática, foram utilizadas as faixas de variações e métodos matemáticos de alteração dos parâmetros, os mesmos aplicados na fase de análise de sensibilidade (descritos na Tabela 12).

Tabela 18 - Conjuntos de parâmetros calibrados do uso do solo de 1991, para HRU e as respectivas sub-bacias das estações fluviométricas (Colônia dos Americanos e Jaraguá).

Parâmetro	Processo	Método	Valor		
			Simulação inicial	Melhor valor encontrado (SWAT-CUP)	Ajustado no modelo
ALPHA_BF	Água subterrânea Ajuste (.gw)	Substituição	0,048	0,7871	0,7871
CN2	Escoamento superficial (.mgt)	Multiplicação	79,00	-0,407249	46,827
SOL_K	Água no solo (.sol)	Multiplicação	2,3	15,49457	37,938
ESCO	Evapotranspiração (.bsn)	Substituição	0,95	0,7195	0,7195
GW_DELAY	Água subterrânea Ajuste (.gw)	Adição	31,00	168,5042	199,5042
SURLAG	Escoamento superficial (.bsn)	Substituição	2,00	20,7109	20,7109
SOL_AWC	Água no solo (.sol)	Multiplicação	0,18	0,189402	0,218
CH_N2	Escoamento superficial (.rte)	Substituição	0,014	0,176768	0,176768
GWQMN	Água subterrânea Ajuste (.gw)	Substituição	1000	826,7252	826,7252
RCHRG_DP	Água subterrânea Ajuste (.gw)	Multiplicação	0,05	0,767757	0,088
GW_REVAP	Água subterrânea Ajuste (.gw)	Substituição	0,02	0,1473	0,1473
CANMX	Evapotranspiração (.bsn)	Substituição	0,00	52,6664	52,6664

Fonte: SWAT-CUP (2020). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Percebe-se na Tabela 18 que os parâmetros relacionados ao fluxo de base (ALPHA\_BF, GWQMN e GW\_REVAP), escoamento superficial (SURLAG e CH\_N2) e evapotranspiração (ESCO e CAMIX) tiveram o mesmo valor ajustado no SWAT-CUP e final (calibrado), para toda a bacia modelada. Os demais parâmetros (CN2, SOL\_K, GW\_DELAY, SOL\_AWC e RCHRG\_DP), foram alterados por meio dos métodos de multiplicação ou adição que conservaram a variabilidade dos parâmetros, de modo a ajustar cada parâmetro de forma proporcional, em função do seu valor inicial relacionado a classe específica de uso ou tipo de solo ou declividade, que serviram para alcançar os melhores valores de ajuste da vazão simulada na bacia, que estava sendo superestimada, na simulação inicial pelo modelo (SANTOS, 2015), que representasse de maneira satisfatória a vazão de saída.

A Figura 44 mostra o comportamento das vazões observada e ajustada após a calibração da modelagem para estação fluviométrica Jaraguá. Nessa etapa, os dados dessa estação foram divididos em duas partes: o período calibrado entre 1974 e 1980 e o de validação de 1981 e 1994. Os resultados da calibração mostram uma estreita relação entre o fluxo mensal observado e ajustado com valores de  $R^2 = 0,8$  e  $NS = 0,61$  e na validação (1981 a 1994) os valores foram de  $R^2 = 0,76$  e  $NS = 0,5$ . A média anual da vazão observada ( $35,44 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e ajustada no modelo foi de  $41,48 \text{ m}^3/\text{s}$ , onde apresentou uma pequena diferença ( $6,04 \text{ m}^3/\text{s}$ ). O valor do PBIAS para essa estação fluviométrica foi de  $-20,3\%$ , indicando um viés de superestimação do modelo.

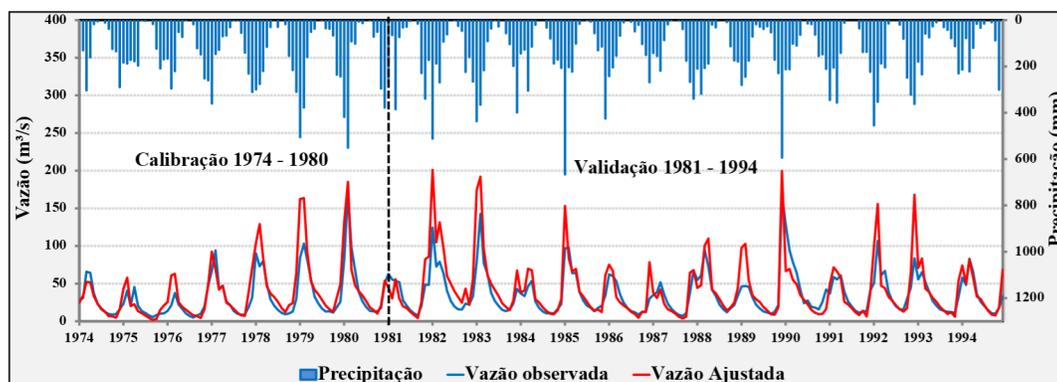


Figura 44 - Hidrograma das vazões médias mensais observada e ajustada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação da média mensal observada para estação fluviométrica Jaraguá (1974 a 1994). Org.: FONSECA, C.A.B. (2020).

A Figura 45 mostra o hidrograma da vazão observada e ajustada após a modelagem e o hietograma dos dados de precipitação média para a estação Colônia dos

Americanos, para o mesmo uso (1991). O PBIAS dessa estação fluviométrica mostrou o valor igual a 0,9 %, apontando um viés de subestimação do modelo em relação aos valores observados (BRIGHENTI et al., 2015, BONUMÁ et al., 2010).

A estação Colônia dos Americanos apresentou um desempenho muito bom nos coeficientes estatísticos de  $R^2 = 0,85$  e  $NS = 0,82$  para período de calibração no modelo de 1974 a 1980 e no período de validação (1981–1994) teve o valor de  $R^2 = 0,84$  e  $NS = 0,80$ . A estação está localizada a jusante da bacia, recebendo a contribuição do fluxo de água de área das quinhentas e três sub-bacias. O resultado da vazão média observada foi de 337,80 m<sup>3</sup>/s e da ajustada foi de 360,60 m<sup>3</sup>/s, um aumento de 6,74%, o que pode ser considerado baixo entre os fluxos medido e ajustado. Desse modo, os dados da média mensal de vazão na calibração do modelo SWAT produziram resultados satisfatórios na validação, desse modo o modelo foi capaz de acompanhar muito bem as tendências sazonais.

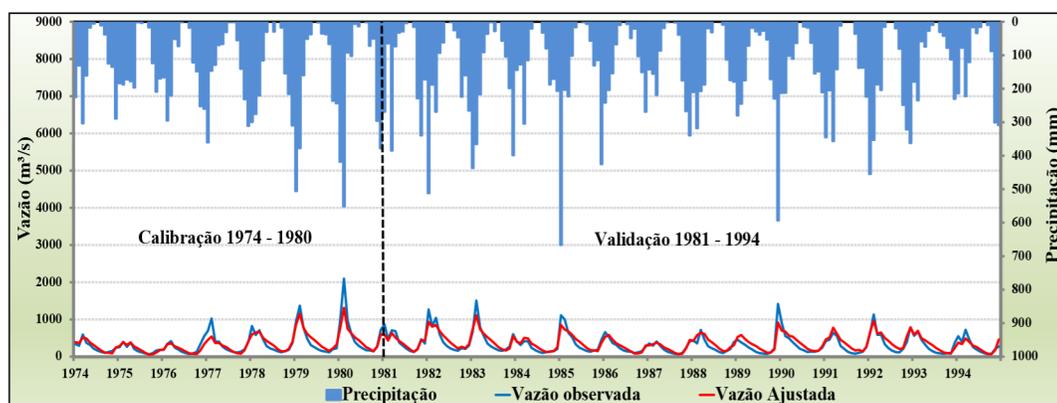


Figura 45 - Hidrográfico das vazões médias mensais observada e ajustada para uso do solo de 1991 e hietograma da precipitação média mensal observada para estação fluviométrica Colônia dos Americanos (1974 a 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020)

Castro (2013) avaliou em área agrícola da bacia hidrográfica do Alto Rio Jardim (DF) os valores dos picos de vazão diária ajustada, após a calibração da modelagem e obteve uma taxa de redução considerável de 32,93%, quando comparados a primeira simulação. E ressalta que, como havia picos com valores muito altos o ajuste não conseguiu representar a todos com a mesma eficiência, sendo que alguns picos foram subestimados e outros apesar de minimizados permaneceram maiores que os observados.

Em contrapartida, na revisão de trabalhos na área de Cerrado, como o de Carvalho (2014), Salles (2012) e Baldissera (2005) enfatizam que obtiveram resultados melhores nas funções objetivo quando utilizaram dados de vazão mensal.

Carvalho (2014) obteve resultados satisfatórios de calibração do modelo numa bacia agrícola, Bacia Hidrográfica do Alto Rio Jardim (DF) com valores da vazão mensal de  $NS = 0,71$  e  $R^2 = 0,85$  e na validação foi  $NS = 0,54$  e  $R^2 = 0,95$ . Salles (2012) simulou a vazão média mensal da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pípiripau (DF), essa modelagem foi calibrada manualmente, obteve resultados satisfatórios de  $R^2 = 0,79$  e  $NS = 0,65$ . Baldissera (2005) simulou no modelo as vazões médias mensais na bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT, com grande extensão territorial e obteve resultados satisfatórios de  $NS = 0,71$  e  $R^2 = 0,75$ .

#### 4.5 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS

A produção de sedimentos na BHRA foi estimada pelo modelo SWAT, após efetuar os processos que ocorrem na fase terrestre de cada sub-bacia (HRU predominante), como mencionados anteriormente. Posteriormente o modelo realiza na fase que se refere ao processo de movimento da água e a estimativa de sedimentos que se destinam para a rede de drenagem e direcionados para exutório da bacia hidrográfica pelo rio principal (SANTOS, 2015; BERTINI, 2014). A partir dessa estimativa de sedimentos por sub-bacia, utilizou-se a técnica do SIG para realizar análise quantitativa da produção de sedimentos no período entre 1974 a 1994 para uso do solo de 1991 calibrado no modelo.

A Figura 46 apresenta o comportamento dos eventos de chuva no período (1974-1994) em relação a estimativa da média anual de produção de sedimento, para o uso do solo de 1991 calibrado no modelo. Percebe-se que os maiores valores registrados da média de precipitação entre os anos, também apresentaram maior produção de sedimentos.

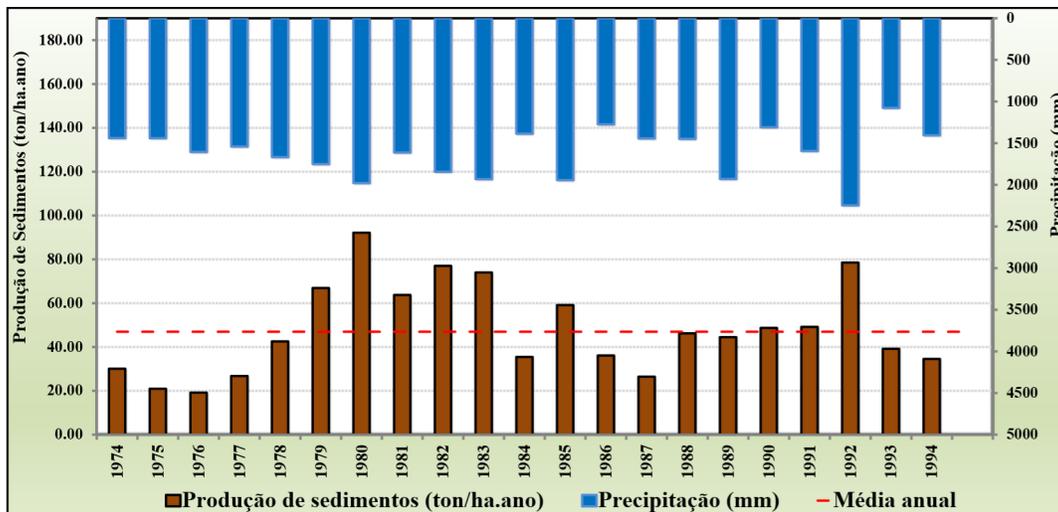


Figura 46 - Comportamento da média anual da produção de sedimentos estimada na estação Colônia dos Americanos em relação à média de precipitação, utilizando o uso do solo de 1991 na BHRA (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

A média anual estimada da produção de sedimento, que atingiu o exutório da bacia foi de 48,17 ton/ha.ano para o período analisado (1974 e 1994). Nota-se que, nos anos 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1985 e 1992 a produção de sedimento se manteve acima da média, os quais apresentaram valores de 66,92 ton/ha.ano, 92,15 ton/ha.ano, 63,77 ton/ha.ano, 77,03 ton/ha.ano, 74,01 ton/ha.ano, 59,15 ton/ha.ano e 78,54 ton/ha.ano, respectivamente.

Enquanto a média mensal da vazão ajustada para os mesmos anos analisados (1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1985 e 1992) para uso do solo 1991, registrou na calibração do modelo valores de: 496,10 m<sup>3</sup>/s, 525,40 m<sup>3</sup>/s, 398,70 m<sup>3</sup>/s, 507 m<sup>3</sup>/s, 500,70 m<sup>3</sup>/s, 447,10 m<sup>3</sup>/s e 522,60 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

A Figura 47 mostra o comportamento da vazão ajustada em relação a estimativa da produção de sedimentos, que proporcionou uma boa correlação no diagrama de dispersão com  $R^2 = 0,9373$ , tendo uma previsão de 93%. O modelo apontou uma tendência em subestimar (0,9%) a média dos valores simulados em relação aos valores observados.

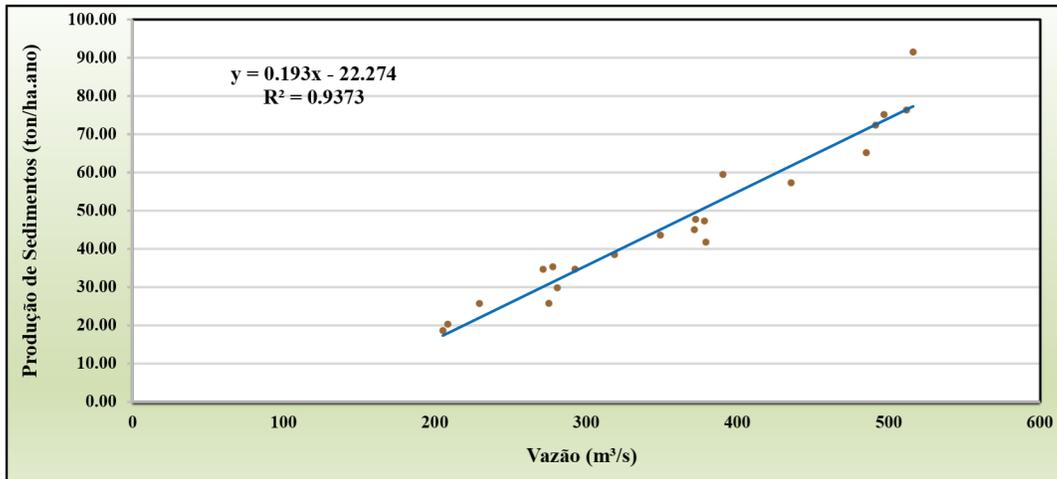


Figura 47 - Diagrama de dispersão da média anual da produção de sedimentos em relação a vazão ajustada no modelo, para uso do solo de 1991 (calibrado) na BHRA (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

A bacia do Rio das Almas apresenta uma forte tendência para os cultivos da cana-de-açúcar, milho e soja e na atividade da pecuária bovina conforme os dados analisados da agropecuária no item 4.3. Sartorato (1994) e Rossetto (2004) explicam que as áreas com cultivo da cana-de-açúcar estão sujeitas a perdas de solos e na produção de sedimentos, dependendo do tipo de solo, do manejo, da época de plantio e do preparo do solo. Rossetto (2004) ressalta para o cuidado no preparo do solo, pois a movimentação do solo logo no primeiro plantio da cultura, a produção de sedimentos pode chegar a 49 ton/ha.ano e a média do volume de sedimentos produzidos para os anos seguintes pode chegar a 16,4 ton/ha.ano.

Klink e Machado (2005) analisam o cultivo da soja sobre a prática de manejo do solo, a deficiência de nutrientes e água, susceptibilidade do solo ao risco de erosão em plantio convencional. No manejo convencional, os autores percebem que a perda da camada superficial do solo é em média de 25 ton/ha.ano e pode ocasionar a degradação do solo. No entanto destacam que as práticas conservacionistas, por exemplo, podem reduzir a produção de sedimentos em torno de 3 ton/ha.ano no plantio direto, na sucessão com outros cultivos.

As atividades de pecuária bovina também geram perdas de solo e produção de sedimentos. Ferreira e Tokarski (2007) explicam que na reforma dos pastos com manejo convencional utilizando aração e gradagens e se ainda, o solo estiver sem cobertura e com elevada precipitação, os índices de sedimentos podem ser maiores nessas áreas, podendo

chegar a 53 ton/ha.ano. E as estimativas de perdas de solo em áreas de pastagem com plantio direto, podem ser menores e reduzir em torno de 5 ton/ha.ano.

Côrreia et. al (2016) monitoraram a erosão hídrica do solo durante um ano agrícola, para a cultura de cana-de-açúcar plantada sobre os solos arenosos e argilosos e em diferentes condições de relevo e de manejo. Nas parcelas instaladas sob preparo convencional e solos Cambissolos Háplicos de textura arenosa/franco arenosa com declividade de 12% e 15% obteve as perdas de solo de 49 ton/ha.ano e 84 ton/ha.ano, respectivamente. Enquanto nas parcelas instaladas em Argissolo Vermelho com declive de 5% e em Cambissolo Háplico, com declive de 11%, ambos de textura argilosa cultivados com cana-de-açúcar e monitorada no terceiro corte sob plantio direto, as perdas foram de 0,8 ton/ha.ano e 3,7 ton/ha.ano.

#### **4.5.1 Estimativa da produção de sedimentos das sub-bacias para o uso do solo de 1991**

Nesse item apresentam os resultados e discussão da estimativa da produção de sedimentos das sub-bacias, escoamento superficial e propagação de sedimentos nos canais obtidos da calibração do modelo SWAT para uso do solo de 1991.

A Figura 48 apresenta a distribuição espacial da produção de sedimentos na BHRA ao longo do período (1974-1994). O modelo calibrado estimou o volume de sedimentos por meio da combinação que reuniu as classes predominantes do tipo de solo, uso e cobertura do solo e a declividade (5%, 10%, 15% e 20%), na geração da HRU por sub-bacias.

Nota-se que o comportamento da produção de sedimentos é muito variável e estão distribuídos entre as diferentes topografias: nas partes elevadas, moderadamente onduladas e as superfícies rebaixadas estão localizadas a leste, sudeste, sudoeste, oeste, noroeste, ao centro e ao norte da bacia hidrográfica.

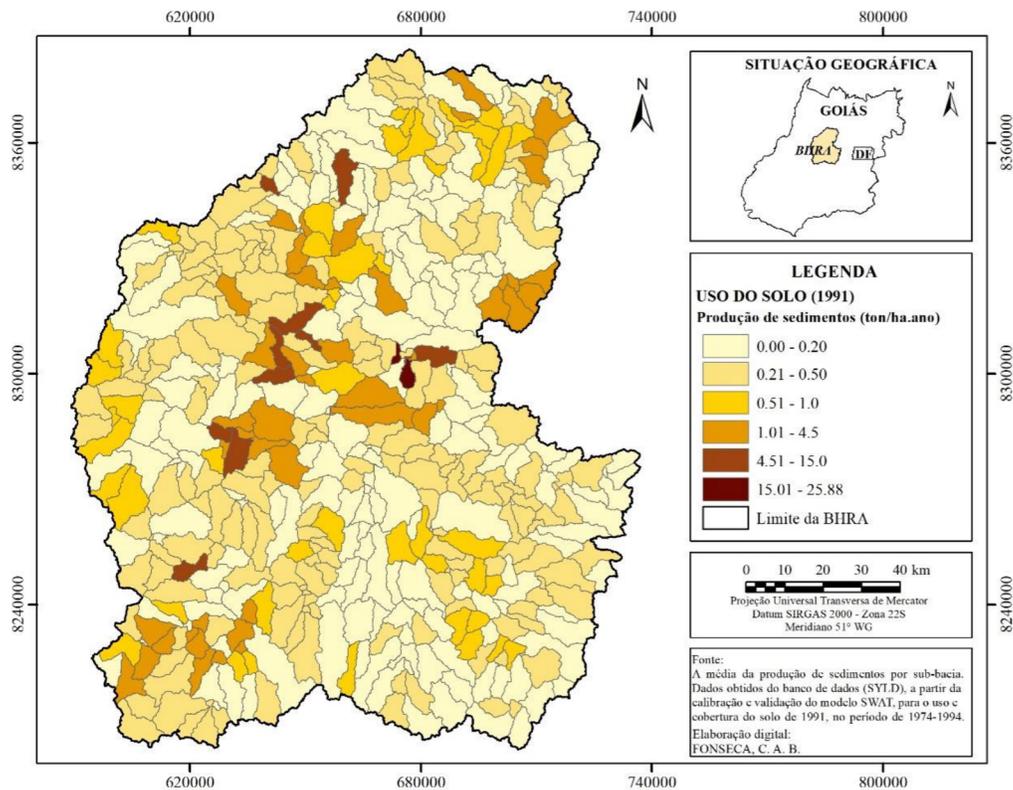


Figura 48 - Espacialização da produção de sedimentos das sub-bacias para uso do solo de 1991 na BHRA (1974 a 1994). FONSECA, C. A. B. (2020).

A produção de sedimentos das sub-bacias variou entre 0,0 a 25,88 ton/ha. Percebe-se que os maiores volume de sedimentos das sub-bacias sob as condições do uso para agricultura e o solo exposto estimados no período (1974-1994) foram maiores em relação a superfície cobertura pela vegetal natural.

Os maiores valores de produção de sedimentos foram estimados para as sub-bacias 184 (25,88 ton/ha.ano), 177 (21,42 ton/ha.ano), 183 (14,28 ton/ha.ano) e 211 (8,83 ton/ha.ano). Nessas sub-bacias encontram-se solo exposto e sob a predominância dos tipos de solos Cambissolos e Argissolos vermelhos, situados na porção leste da bacia que apresentaram valores no escoamento superficial variando entre 263,81 a 297,58 mm (Figura 49) e a média de precipitação foi de 1.590,25 mm (Figura 50). As demais sub-bacias com mesmo tipo de uso, sob as condições dos solos Latossolos vermelhos com declividade variando entre 0 e 5% tiveram produção de sedimento entre as sub-bacia com valores entre 1,77 ton/ha.ano a 6,22 ton/ha.ano, o escoamento superficial entre 19,88 a 44,30 mm, com média de precipitação variando entre 1.463,53 a 1.783,42 mm (Figura 50).

As sub-bacias com predomínio de áreas agrícolas apresentaram produção de sedimentos com valores de 9,63 ton/ha.ano, 9,42 ton/ha.ano, 7,85 ton/ha.ano, 7,80 ton/ha.ano, 6,88 ton/ha.ano, 6,85 ton/ha.ano, 5,92 ton/ha.ano para as sub-bacias 176, 371, 273, 191, 187, 60 e 168, respectivamente. Nessas áreas os valores de escoamento superficial variaram entre 53,49 a 108, mm (Figura 49), com declive entre 5 e 10% e a média de chuva foi de 1.549 mm (Figura 50), sobre a predominância dos solos Cambissolos e Chernossolo. As demais sub-bacias com mesmo tipo de uso do solo e declividade entre 0 e 5% tiveram produção de sedimento entre 0,11 a 7,85 ton/ha.ano, situadas na porção sul, sudeste, noroeste, centro, leste e norte da bacia. Nessas áreas os valores de escoamento superficial variaram entre 8,71 a 251,12 mm (Figura 49) e a média de chuva variou entre 1.462,35 e 1.783,42 mm (Figura 50).

Nota-se que essas sub-bacias se caracterizam pelo predomínio da agropecuária, que inclui a atividade da pecuária bovina. O comportamento da média de chuva na bacia é muito variável (Figura 50), portanto, na porção norte, sul e sudeste da bacia recebe maior quantidade de precipitação. Com isso, permite interpretar que o uso e cobertura do solo é um fator determinante associado a tendência de tipos solo existentes na bacia serem ou não suscetíveis a erosão hídrica, transporte e produção de sedimentos.

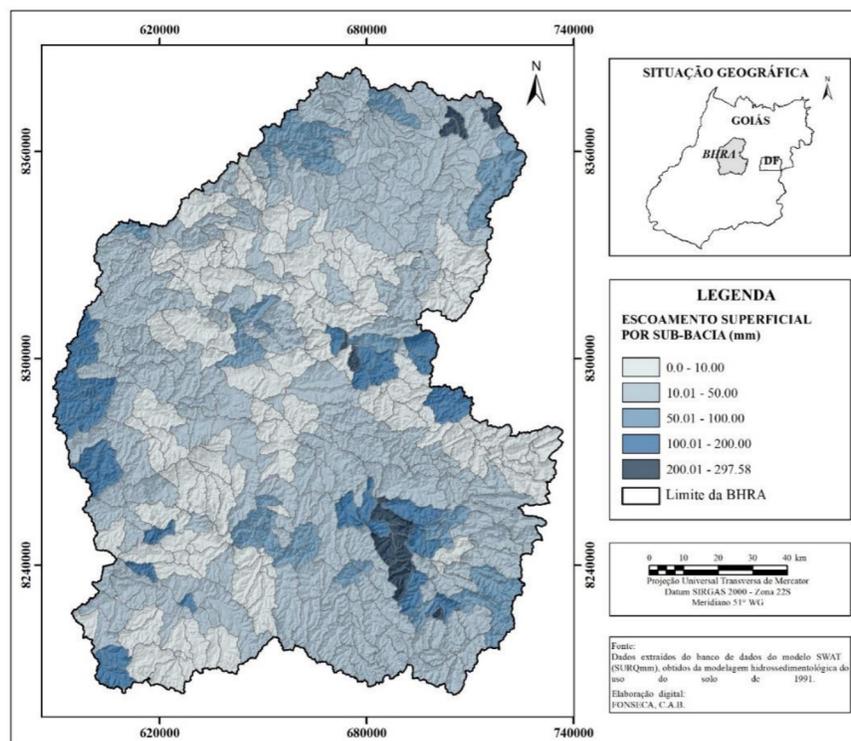


Figura 49 - Comportamento espacial da média anual do escoamento superficial por sub-bacias para o uso do solo de 1991 (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

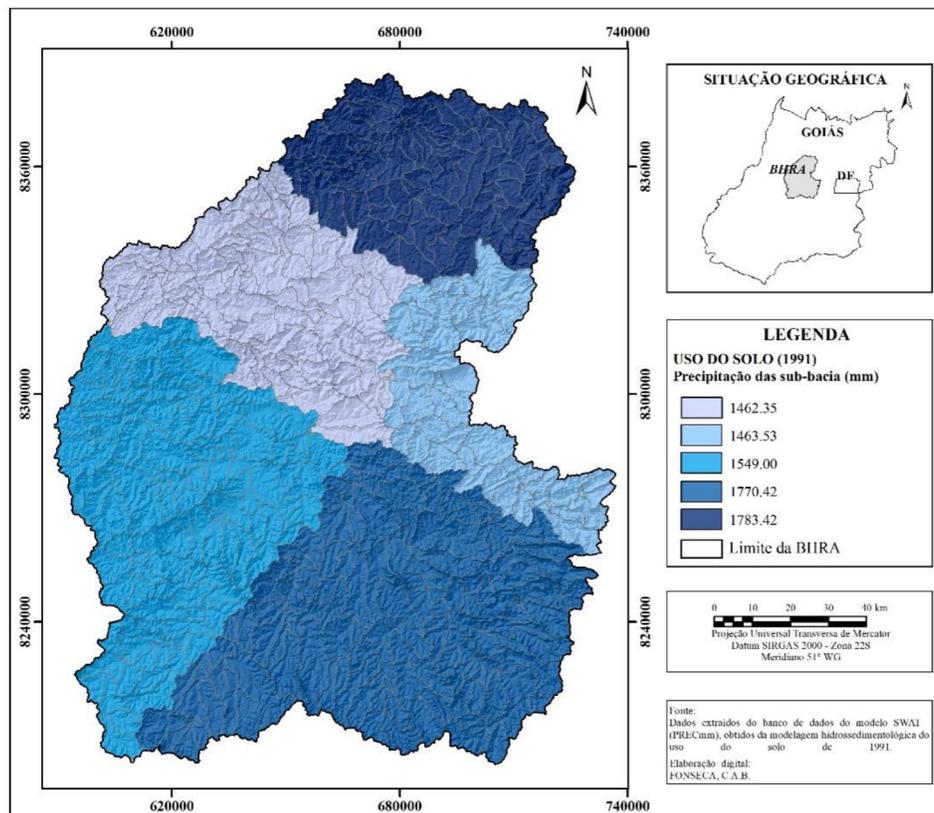


Figura 50 - Comportamento espacial da média de precipitação da bacia, para o uso do solo de 1991 (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Nota-se na Figura 50 que a porção norte da bacia recebeu maior quantidade de precipitação (1.783,42 mm) no período analisado (1974-1994), do que a porção noroeste. Essa variabilidade espacial de chuva entre as sub-bacias situadas na porção norte apresentaram produção de sedimentos entre as sub-bacia (10, 17, 18, 20, 27, 30, 36, 40 e 49), com predomínio do uso do solo para agricultura (Figura 48) e sob as condições de um relevo plano a suave ondulado e de solos Latossolos vermelhos.

A ocorrência simultânea de vários fatores associados aos efeitos da erosividade das precipitações, à erodibilidade do solo existente na bacia e relacionados ao uso e cobertura do solo são condicionantes que determinam a susceptibilidade do solo à erosão hídrica, o escoamento superficial, perdas de solo e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica (CARVALHO, 2008; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1995).

#### 4.4.6 Classificação de perdas de solo para o uso do solo de 1991 na BHRA

Para analisar a classificação de perdas de solo entre as sub-bacias, utilizou-se dos dados do modelo SWAT calibrado para uso do solo de 1991 que envolveram a combinação das classes predominantes do tipo de solo, uso e cobertura do solo e os variados declives (5%, 10%, 15% e 20%), gerados pela HRU de cada sub-bacia.

Na pesquisa adotou a classificação de perdas de solo propostas por Irvem et al. (2007) e o limite de tolerância dessas perdas que variam entre 4,5 e 15 ton/ha.ano, da literatura de Bertoni e Lombardi Neto (1995). Esse limite é que mais se aproxima da realidade dos solos em questão, na área de estudo. Ao final, permitiu classificar e analisar a vulnerabilidade do solo à erosão hídrica desde: muito baixa a extremamente severa.

Na Figura 49 mostra a distribuição espacial dessas faixas de classes de perdas de solo e o risco de erosão por sub-bacias, na BHRA, ao longo do período (1974-1994).

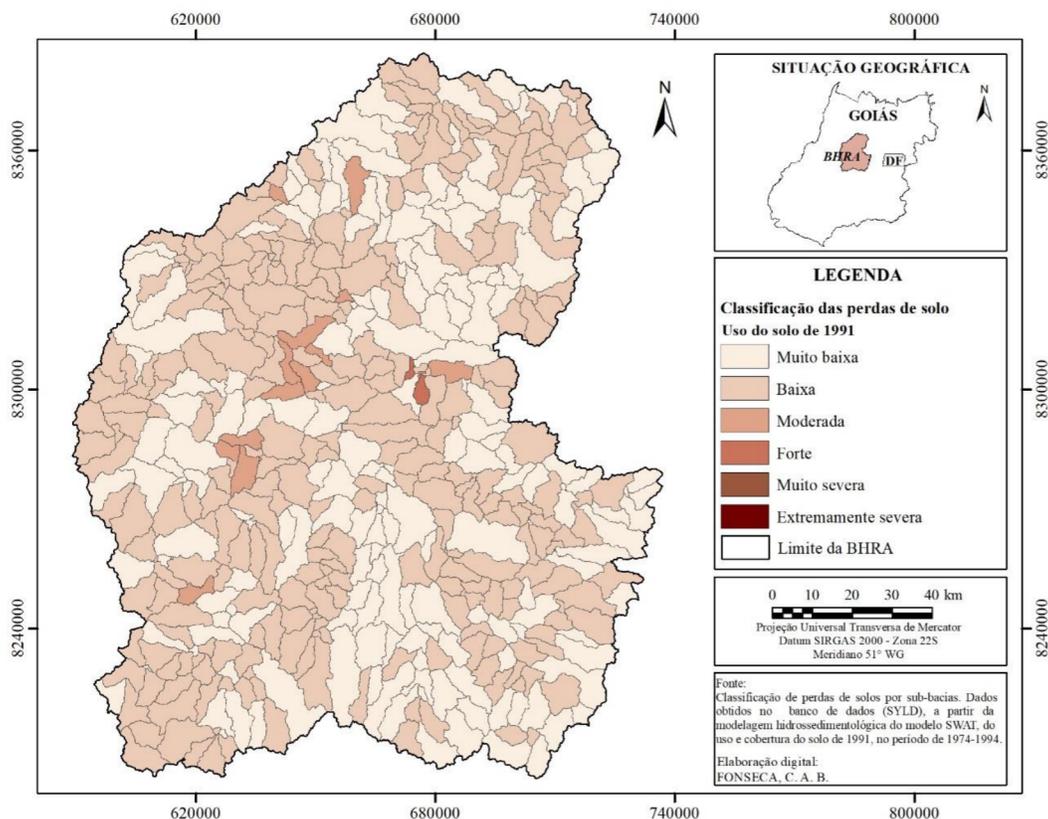


Figura 51 - Distribuição espacial da média anual de perdas de solo estimada por sub-bacia, para o uso do solo de 1991 (calibrado) na BHRA (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Os resultados mostrados na Figura 51, classifica as quatrocentos e oitenta e nove sub-bacias como muito baixa a erosão hídrica com 97,99% da área da bacia (< 4,5

ton/ha.ano); baixo risco a erosão com 1,85% da área (4,5-10 ton/ha.ano); com risco moderado a forte suscetibilidade erosiva com 0,01% da área (10-15 ton/ha.ano) e 0,15% da área (15-50 ton/ha.ano), respectivamente.

Cabe destacar que, as áreas com dominância de declividade sob as condições de superfície suavizada que variam entre 0 e 10% ocupam cerca de 65,36%, da extensão da bacia. Entende-se que a BHRA apresentou uma tendência muito baixa a baixa para a susceptibilidade erosiva (99,84%), o que pode refletir nas perdas de solo e na produção de sedimentos da bacia.

Entretanto, os resultados mostram que 0,16% da área da bacia (aproximadamente 29,56 km<sup>2</sup>) apresentou perdas de solo superior a 15 ton/ha.ano com declive entre 0 e 10% e solos que colaboraram com nível de susceptibilidade erosiva (Cambissolos e Argissolos vermelhos). Ação do escoamento superficial sob as condições desses tipos solos resultam em elevadas taxas de perdas de solo em sub-bacias desprovidas de vegetação (SANTOS et al., 2018).

O predomínio de classes com vulnerabilidade ao risco moderado à erosão, indica a existência de áreas susceptíveis aos processos erosivos (IRVEM et al., 2007) e a necessidade de implementação de práticas conservacionista, via recomposição da cobertura vegetal que são essenciais para os processos ecológicos do bioma Cerrado (PERH/GO, 2015).

Ao identificar as áreas susceptíveis a erosão hídrica, os resultados mostraram que as sub-bacias caracterizadas pelas atividades antrópicas (agropecuária), encontram-se nas porções leste, oeste e centro-norte da bacia, com predomínio de solos vulneráveis aos processos erosivos e situados em variados declives.

Assim, a dinâmica erosiva da BHRA está condicionada por diversos fatores como o material de origem, clima, relevo, as características pedológicas (físicas, químicas, textura, estrutura, permeabilidade, teor de matéria orgânica entre outros) que interagem entre si e em conjunto com as atividades antrópicas (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1995). Conclui-se que o uso e cobertura do solo é um fator determinante associado a tendência dos tipos solos existentes na bacia, serem ou não suscetíveis a erosão hídrica do solo, perdas de solo, transporte de partículas e na produção de sedimentos.

Com base nessa estimativa dos processos erosivos na bacia, o SWAT modela a propagação de sedimentos nos cursos d'água. A Figura 52 espacializa a fração de sedimentos que cada segmento da rede drenagem transporta para o trecho dos canais subsequente.

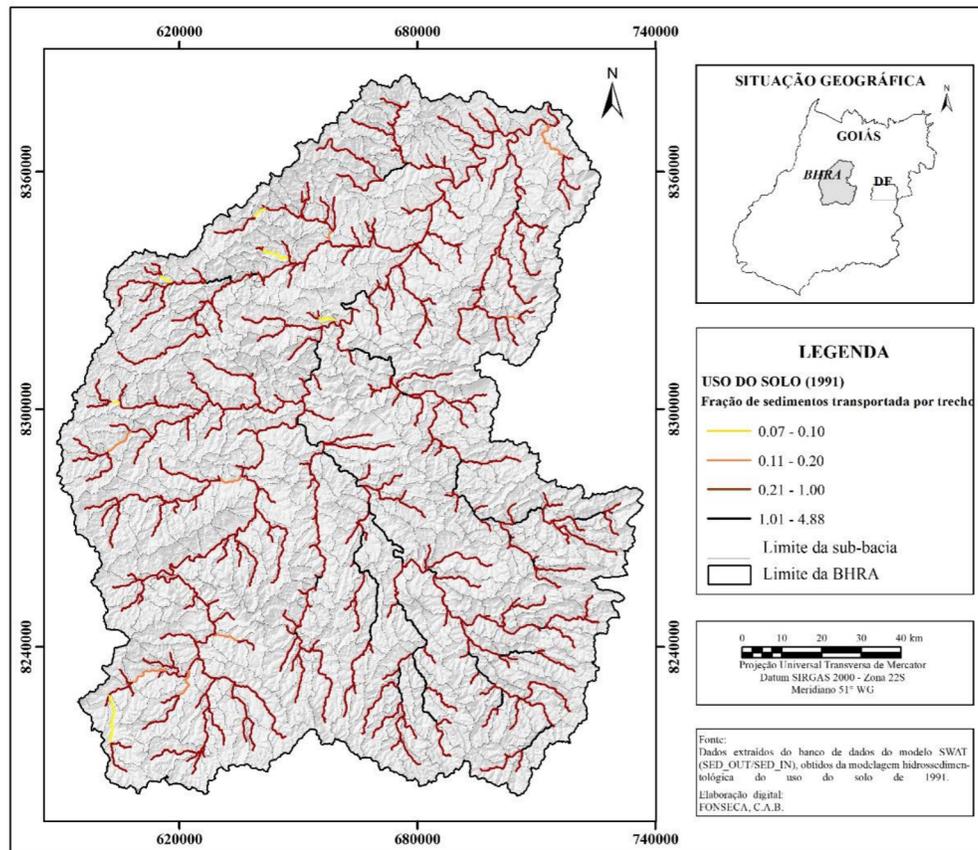


Figura 52 - Fração de sedimentos transportada por cada segmento de rio na BHRA (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Percebe-se na extensão da bacia (Figura 52), o comportamento da fração de sedimentos dos trechos de rios situados nas sub-bacias próxima ao divisor da BHRA com maior declividade, ocorreu pouca ou nenhuma deposição e também em outras sub-bacias, as quais não receberam fluxo de nenhuma outra sub-bacia. Isso significa que todo o sedimento produzido nessas sub-bacias foi transportado para as sub-bacias subsequentes através da rede de drenagem.

Nessa análise nota-se que a deposição de sedimentos foi registrada nos canais de rio das sub-bacias, as quais possuem menor declividade (0 – 5%). Os canais de rio que apresentaram maior deposição de sedimentos foram para as seis sub-bacias (89, 60, 111, 148, 196 e 484). Essas sub-bacias receberam a contribuição de sedimentos das sub-bacias a montante e transportaram cerca de 12,29%, 25,47%, 16,77%, 10,05%, 22,09% e 27,70%, respectivamente, do total de sedimento recebido e produzido, para os seus exutórios.

Isso demonstra que em algumas sub-bacias ocorreram o processo de deposição das partículas do solo no período analisado (1974–1994). Ou seja, nem todo o material sedimentar sucedido do processo erosivo entre as sub-bacias foi transportado pelos canais fluviais (SANTOS, 2015; UZEIKA, 2009), como pode ser percebido na Figura 46.

Embora, os tipos de solos presentes na área de estudo apresentem fragilidades e naturezas distintas, esses solos sempre fizeram parte do sistema produtivo na área do bioma Cerrado em decorrência da expansão da fronteira agrícola. Porém, podem trazer consequência negativas ao ambiente quando são inadequadamente manejados (CASTRO; HERNANI, 2015).

Em vista disso é fundamental identificar as perdas de solo entre as sub-bacias e entender os diversos fatores envolventes no processo, que contribuem para perdas de solo e produção de sedimentos em bacia hidrográfica. Pois, podem contribuir para controlar os processos erosivos, auxiliar na implementação de práticas conservacionistas que ajudam a reduzir as perdas de água e solo e com isso, melhorar o gerenciamento ambiental (SANTOS, 2015). Desse modo, a modelagem hidrológica pode contribuir para o subsídio de gestão e planejamento dos recursos hídricos e sedimentológicos em bacia hidrográfica (PERAZZOLI et al., 2013).

## 5 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO E A SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS PARA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS ALMAS/ GO

Neste trabalho considerou-se a realização de dois cenários hipotéticos de uso do solo (otimista e pessimista) simulados no modelo SWAT. Objetivando estimar e analisar os processos hidrossedimentológicos nas diferentes unidades de paisagens da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas.

Esses cenários permitiram interpretar em conjunto os processos envolventes que podem exercer maior ou menor impacto na produção de água e de sedimentos sob as diferentes condições de cobertura do solo (com maior ou menor cobertura vegetal e com maior ou menor atividade agropecuária), tipos de solo e declividade.

Na Tabela 20 apresenta as classes de uso e ocupação do solo para o Cenário 1 (otimista) e Cenário 2 (pessimista), referentes as áreas totais e relativas da BHRA.

Tabela 19 - Dados das classes de uso do solo para os dois cenários hipotéticos de uso do solo da BHRA, simulados no modelo SWAT.

Classes de uso do solo	Cenário 1 (Otimista)		Classes de uso do solo	Cenário 2 (Pessimista)	
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)		Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Cerradão/Floresta	4.333,38	23,25	Cerrado Típico*	4.312,03	23,14
Cerrado Típico	4.615,64	24,77			
Mata ciliar	2.668,76	14,33			
Área de agricultura	3.190,74	17,12	Área de agricultura	13.058,11	70,07
Área de pastagem	3.765,72	20,21	Área de pastagem	1.181,39	6,34
Área urbana	62,59	0,34	Área urbana	85,31	0,46

Fonte: Adaptada à rotina do modelo SWAT, conforme as classificações dos cenários 1 (otimista) e 2 (pessimista) de uso do solo da BHRA. Org.: FONSECA, C.A.B. (2020).

\* Contempla a vegetação natural dos remanescentes do bioma Cerrado, adaptado de Ferreira (2009).

Na Figura 53 espacializa as classes de uso do solo geradas para o cenário otimista hipotético, onde manteve-se a cobertura vegetal e prática de manejo com propósito de obter o maior teor de matéria orgânica sobre o solo, proteger os recursos hídricos e conter os processos erosivos.

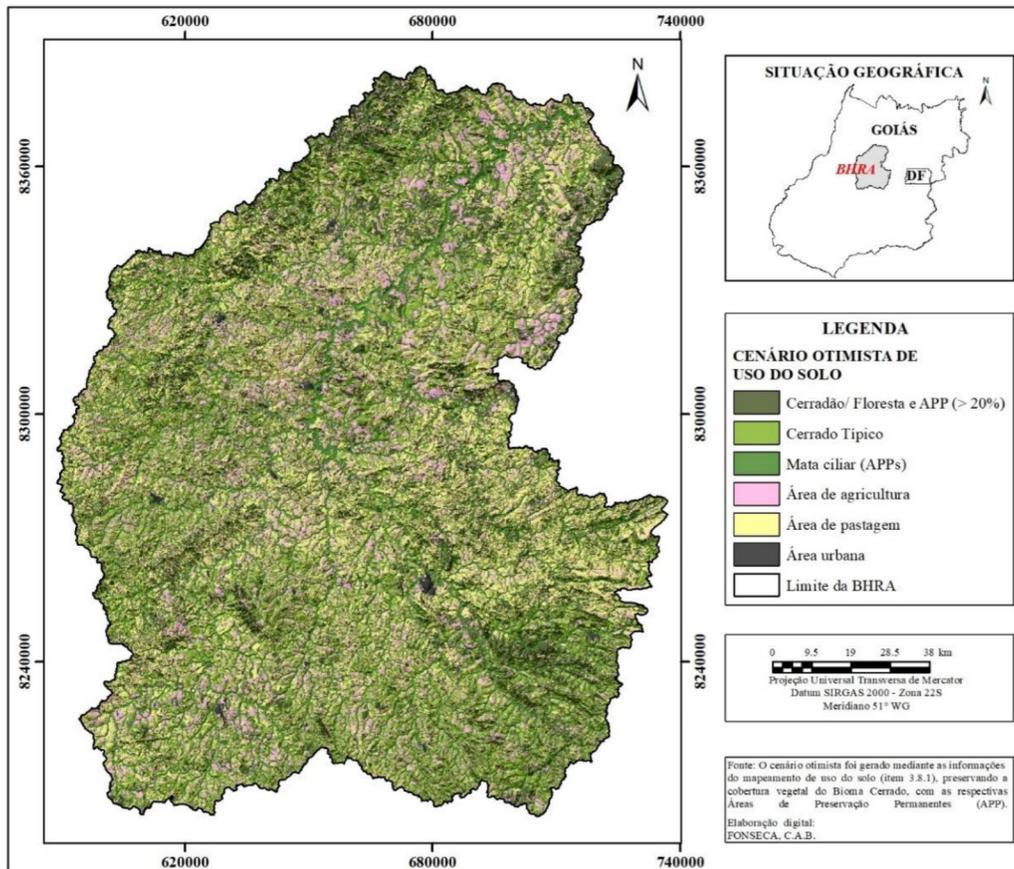


Figura 53 - Cenário Otimista (CEN1) de uso do solo na BHRA. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020)

O resultado da simulação do cenário otimista mostrou que 62,34% das classes da vegetação natural do bioma Cerrado ficaram distribuídos ao longo da bacia, assim: 23,25% para o cerradão/floresta, o cerrado típico teve 24,77% e os corredores lineares das matas ciliares com 14,32%. Enquanto as áreas antrópicas definidas pela agricultura, pastagem e área urbana tiveram as taxas de 17,12%, 20,21%, 0,34%, respectivamente. Assim, torna-se importante salientar que, quando uma bacia hidrográfica possui maior cobertura vegetal para a proteção do solo, outros fatores são favorecidos, como: menor escoamento superficial em função da interferência dessa cobertura, grande parte desse fluxo de água se infiltra no solo, aumentando a capacidade de manter a umidade do solo e assim, possibilitando um maior controle de processos erosivos das áreas elevadas e no movimento de sedimentos em direção as redes de drenagens, na bacia hidrográfica do Rio das Almas.

No que tange o Cenário 2 (pessimista), os dados da simulação podem ser conferidos também na Tabela 20 e na Figura 54. Em face das dimensões que se apresenta

esse cenário, percebe-se a intensa mudança no uso do solo que pode causar situações ambientais impactantes, em relação aos processos hidrossedimentológicos na bacia.

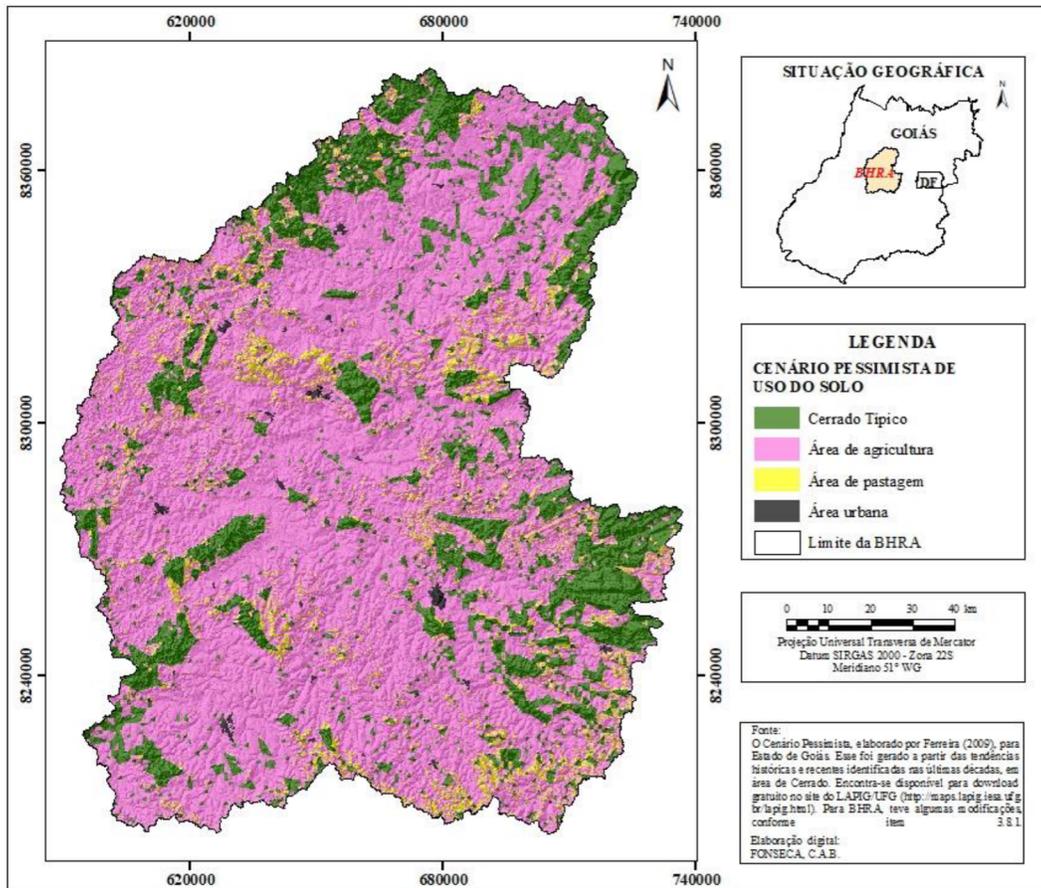


Figura 54 - Cenário pessimista (CEN2) de uso do solo na BHRA. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Nota-se na Figura 53 e Tabela 20 que a fragilidade do ecossistema da bacia foi modificada, quando grande parte dos fragmentos da vegetação natural do bioma foram substituídos por atividades antrópicas, como: agricultura (70,07%), pastagem (6,34%) e área urbana (0,46%), totalizando 76,86% em relação a área de estudo. Restando apenas 23,14% dos remanescentes do bioma Cerrado (cerrado típico), onde teve uma taxa de redução de 62,88% em relação ao Cenário 1 (otimista). Indicando nesse cenário, uma menor proteção contra os impactos direto de gotas de água da chuva no solo, tendo uma maior contribuição no escoamento superficial e no desprendimento e transporte de partículas no solo.

Com base no déficit de vegetação e na escala decrescente de teores de matéria orgânica no terreno na maior parte do tempo, pode causar modificações nas condições

naturais dos solos, principalmente na mudança do uso do solo que apresentou uma tendência histórica para o cultivo de grãos, cana-de-açúcar e a pecuária bovina (item 4.3).

Conforme citado anteriormente, no sistema de produção agrícola a mobilização do solo é intensa com a utilização de equipamentos para o preparo da terra convencional e mecanização e também no setor pecuário, com sobrecarga das pastagens para criação de gado (sobrepastoreio). Que em conjunto são fatores decisivos para originar e acelerar os processos erosivos na bacia, que tende a aumentar o volume de sedimentos produzidos e, posteriormente serem transportados para o canal da rede de drenagem e atingirem outras bacias hidrográficas e reservatórios.

### 5.1 SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BHRA PARA OS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO OTIMISTA E PESSIMISTA

Para avaliar a eficiência do modelo SWAT, os dados simulados da média mensal de vazão entre cenários hipotéticos foram comparados com os dados observados. A Figura 55 mostra a simulação inicial no modelo SWAT para os dois cenários hipotéticos de uso do solo, CEN1 (otimista) e CEN2 (pessimista) analisados no período (1974 a 1994). Nota-se no hidrograma da vazão observada e simulada que, praticamente superestimou as vazões máximas para todos os anos e também subestimou as vazões mínima.

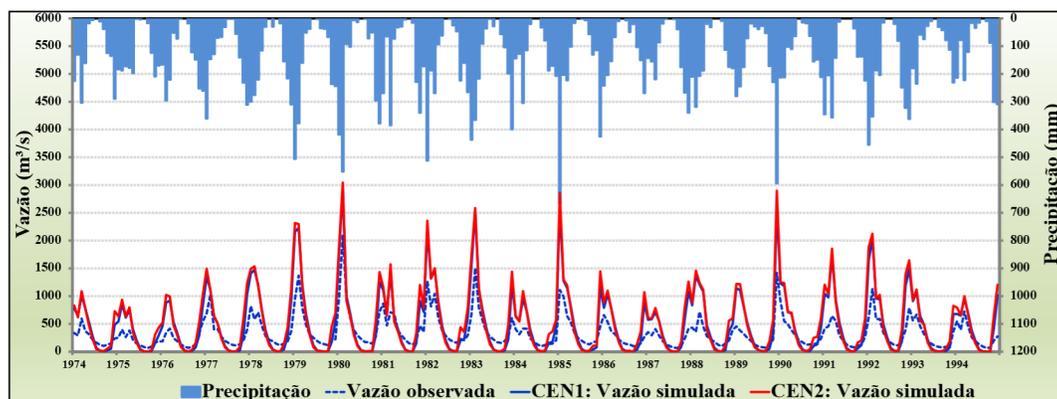


Figura 55 - Hidrograma das vazões observada e simuladas da média mensal para o uso do solo dos cenários hipotéticos, otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) e o hietograma da precipitação média observada (1974 a 1994). Org.: FONSECA, C.A.B. (2020).

Percebe-se no comportamento do hidrograma das vazões observada e simulada não se mostraram adequados, já que esses cenários de uso do solo indicaram no primeiro momento da simulação, resultados pouco favoráveis para o NS = -0,49 (CEN1) e -1,19

(CEN2). Porém, um bom desempenho para CEN1 com  $R^2 = 0,87$  e para o CEN2 teve  $R^2 = 0,80$ , conforme a classificação de Moriasi et al. (2007). A vazão observada é de 337,80  $m^3/s$  e as vazões simuladas foram: 504,17  $m^3/s$  (CEN1) e 547,23  $m^3/s$  (CEN2), mostrando que existiram diferenças significativas entre os valores observado e simulado de 166,36  $m^3/s$  e 209,43  $m^3/s$ , respectivamente. Portanto, consideradas insatisfatórias para a modelagem, pois superestimou as vazões em 49,25% e 62%, respectivamente, em relação a vazão observada.

Na Figura 56 mostra o gráfico da simulação do modelo com atribuição dos melhores parâmetros encontrados no modelo para uso do solo de 1991, os quais definiram as vazões estimadas para o uso do solo dos cenários hipotéticos (otimista e pessimista). Visto que nessa etapa, o modelo SWAT apresentou muito bom o desempenho estatístico para os dois cenários: otimista (CEN1) com  $R^2 = 0,85$  e  $NS = 0,7$  e o pessimista (CEN2) foi de  $R^2 = 0,85$  e  $NS = 0,5$  analisados no mesmo período (1974 – 1994).

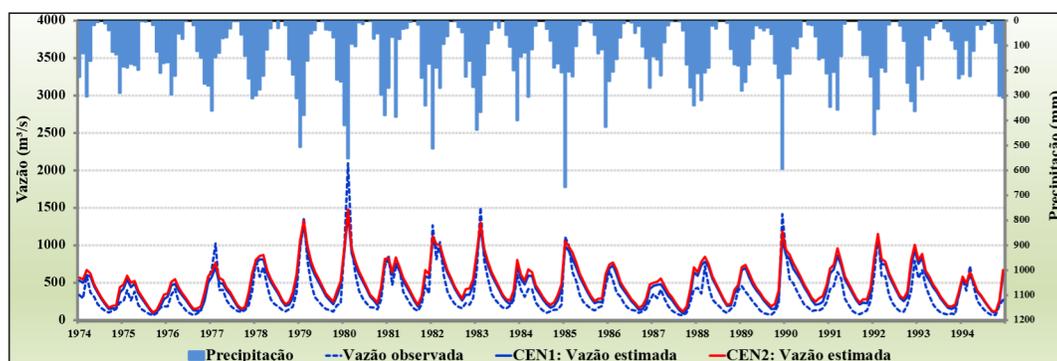


Figura 56 - Hidrográfico das vazões observada e estimadas da média mensal para uso do solo dos cenários hipotéticos, otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) e o hidrograma de precipitação média observada (1974 a 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Em geral, o comportamento da vazão (observada e estimada) para cenário otimista (CEN1) acompanhou bem as tendências sazonais. Porém na simulação do modelo, a média mensal da vazão estimada mostrou-se superestimada ao longo do período (1974-1994), com a taxa de 34,95% entre o fluxo observado e o estimado. Embora, a simulação desse cenário foi considerada satisfatória pela classificação de eficiência de modelagem hidrológica de Moriasi et al. (2007). O resultado da vazão média mensal para esse cenário, foi a seguinte: a vazão observada é 337,80  $m^3/s$  e a estimada foi de 455,88  $m^3/s$ , tendo uma diferença de 118,07  $m^3/s$ , do fluxo total medido e estimado.

No entanto, na premissa dos dados de vazão simulado no modelo se adequarem a realidade do uso e ocupação do solo no cenário otimista (CEN1), sob as diferentes condições de cobertura do solo (com maior cobertura vegetal e menor atividade

agropecuária), percebe-se que o modelo não reproduziu os efeitos para a vazão média estimada nesse cenário. Havendo uma diferença nas vazões médias simuladas, entre os dois cenários de uso do solo (otimista e pessimista) de aproximadamente 44,57 m<sup>3</sup>/s.

Esse resultado assemelha-se ao trabalho de Uzeika (2009), que avaliou as diferenças no escoamento superficial para os três cenários de uso do solo simulados no modelo SWAT. No cenário 1, o resultado demonstrou que os valores de vazão média para alguns dias foram considerados nulos, o que na realidade, não deveria acontecer. Assim a autora conclui que, para esse cenário o modelo não foi capaz de simular a vazão líquida média, pois esse fato pode estar vinculado à superestimação da evapotranspiração, devido à cobertura do solo ser integralmente composta por floresta. Entretanto, na simulação dos cenários 2 e 3, o modelo também não reproduziu os efeitos das alterações de manejo para os resultados das vazões líquidas médias anuais, aplicado para os dois cenários de uso do solo, onde as médias das vazões anuais foram irrelevantes, quando se comparou o cultivo convencional do cultivo mínimo entre os cenários.

No cenário pessimista (CEN2), o modelo também apresentou tendência a superestimar a vazão (48,15%), quando comparada ao comportamento da vazão observada no período analisado (1974-1994). De tal modo, que a vazão observada foi de 337,80 m<sup>3</sup>/s e a estimada foi de 500,44 m<sup>3</sup>/s, tendo uma diferença de 162,64 m<sup>3</sup>/s entre vazão medida e estimada.

Na tabela 21 apresenta a comparação estatística das vazões: observada, vazão ajustada no modelo calibrado para o uso do solo de 1991 e das vazões simuladas para os cenários hipotéticos de uso do solo: otimista (CEN1) e pessimista (CEN2).

Tabela 20 - Comparação estatística da vazão observada com uso do solo de 1991 (calibrado) e os cenários simulados pelo modelo SWAT: otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA, no período de 1974-1994.

Estatísticas	Precipitação (mm)	Vazão observada (m <sup>3</sup> /s)	Uso do solo (1991): Vazão ajustada (m <sup>3</sup> /s)	CEN1: Vazão estimada (m <sup>3</sup> /s)	Diferença de vazões: ajustada (1991) e simulada (CEN1) (m <sup>3</sup> /s)	CEN2: Vazão estimada (m <sup>3</sup> /s)	Diferença de vazões: ajustada (1991) e simulada (CEN2) (m <sup>3</sup> /s)
<b>Média</b>	1.612,23	337,80	360,60	455,88	95,28	500,44	139,84
<b>máxima</b>	2.245,62	2.095,41	1.310,00	1.424,00	114,00	1.478,00	168,00
<b>mínima</b>	1.075,84	64,48	55,56	88,14	32,58	103,70	48,14
<b>Desvio padrão</b>	285,70	286,36	219,64	247,72	28,08	257,16	37,52
<b>R<sup>2</sup></b>	---	---	<b>0,85</b>	---	---	---	---
<b>NS</b>	---	---	<b>0,82</b>	---	---	---	---

Fonte: Adaptada à rotina do modelo SWAT. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Nota-se nessa Tabela 23 que a média de chuva (1.612,23 mm) está relacionada a vazão média mensal observada que foi de 337,80m<sup>3</sup>/s. Enquanto a vazão ajustada no modelo para o uso do solo de 1991 foi igual a 360,60 m<sup>3</sup>/s, tendo a diferença de 22,80 m<sup>3</sup>/s (equivale a taxa de 6,75%). A diferença entre essa vazão média ajustada da modelagem (uso do solo de 1991) e a simulada do cenário otimista (CEN1) foi de 95,27 m<sup>3</sup>/s, isso equivale a variação de 26,42% e para o cenário pessimista (CEN2) a diferença foi de 139,84 m<sup>3</sup>/s (equivale a variação de 38,78%).

Os valores estatísticos obtidos de R<sup>2</sup> e NS para a modelagem hidrossedimentológica do uso do solo de 1991 foram considerados como muito boa e satisfatórias na classificação proposta por Moriasi et al. (2007). O resultado satisfatório dessa modelagem estão semelhantes aos resultados obtidos na área de Cerrado, para os trabalhos de Ferreira (2016), Carvalho (2014), Salles (2012), Veiga (2014) e Baldissera (2005).

Na Figura 57 mostra a relação entre a média pluviométrica associada à geração do escoamento superficial estimado no modelo SWAT, para os dois cenários hipotéticos de uso do solo (otimista e pessimista) durante o período analisado (1974-1994). Nota-se que, o comportamento do escoamento superficial do cenário otimista (CEN1) apresentou uma estimativa da média mensal com valor em torno de 51,98 mm. Praticamente esse valor médio do fluxo superficial na bacia se manteve inferior ao longo do período (1974-1994).

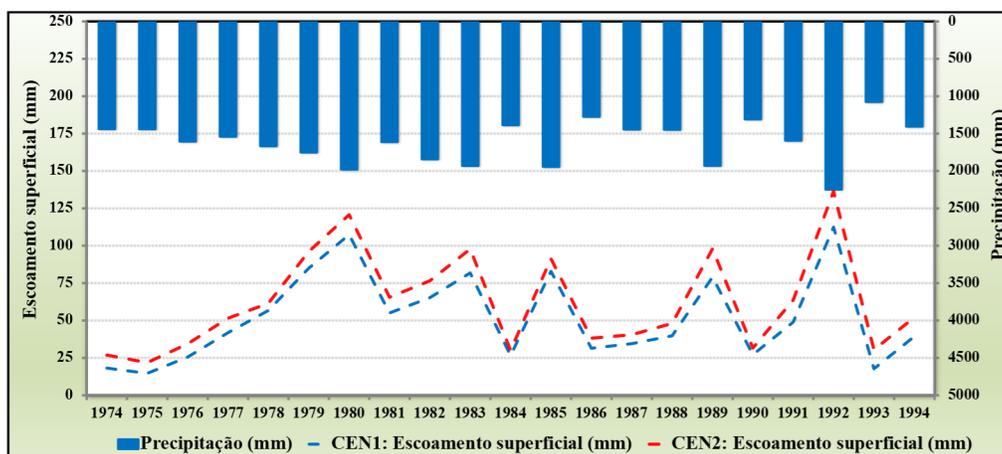


Figura 57 - Comportamento da média mensal do escoamento superficial para o uso do solo os cenários hipotéticos otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) em relação à média de precipitação na BHRA (1974 e 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

As maiores médias do fluxo superficial obtidos na simulação do modelo para esse cenário (CEN1), foram para os anos: 1979, 1980, 1982, 1983, 1985, 1989 e 1992, que ficaram em torno de: 85,01 mm, 107,40 mm, 65,32 mm, 81,84 mm, 82,91mm, 78,99 e 112,48 mm, respectivamente. O que definiu esses resultados no cenário otimista foram os principais elementos que intercederam no escoamento superficial, através da implementação de práticas de manejo via recomposição e conservação da cobertura vegetal, que contribuíram na minimização dos processos erosivos.

Em contrapartida, o cenário pessimista (CEN2) mostrado também na Figura 52, apresentou estimativa da média do escoamento superficial de 62,55 mm, no mesmo período analisado (1974-1994), tendo um aumento de 20,32% quando comparado ao cenário otimista. Os maiores fluxos superficiais registrados na simulação do modelo, foram para os anos: 1979, 1980, 1982, 1983, 1985, 1989 e 1992, com valores de: 96,15 mm, 120,75 mm, 76,57 mm, 97,80 mm, 91,34 mm, 97,95 mm e 136 mm, respectivamente. Esses elevados fluxos estão estreitamente relacionados ao uso do solo desse cenário, ocupado quase que exclusivamente pelas atividades antrópicas (agricultura, pecuária e urbana), que correspondem a 76,86% da área da bacia, que favoreceram a desagregação, transporte e produção de sedimentos na rede de drenagem.

A observação do escoamento superficial do cenário pessimista, condiz com trabalho de Bertini (2014) que aplicou o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Papagaio (MT), para analisar o escoamento superficial e a produção de sedimentos sob a influência da expansão agrícola na bacia. E os resultados mostraram que, os maiores valores na correlação entre o escoamento superficial e o volume de sedimentos produzidos foram registrados onde houve a expansão da agropecuária.

## 5.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS DE USO DO SOLO OTIMISTA E PESSIMISTA PARA A BHRA

A Figura 58 mostra as mesmas condições pluviométricas da bacia em relação à geração do volume de sedimentos no canal fluvial, para os dois cenários hipotéticos de uso do solo: otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) ao longo do período (1974-1994). Na série histórica percebe-se que a variação da média anual de sedimentos está compatível com uso do solo de cada cenário.

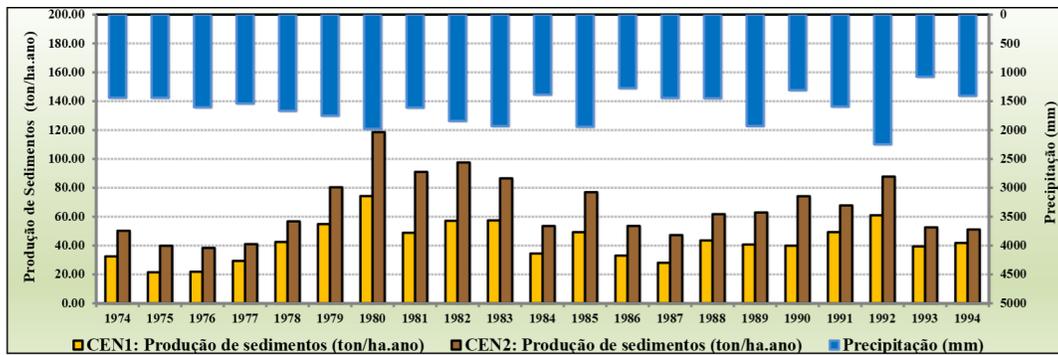


Figura 58 - A estimativa da média anual da produção de sedimentos para o uso do solo dos cenários hipotéticos otimista e pessimista em relação à média de precipitação na BHRA (1974 a 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

A média anual de produção de sedimento registrada para o cenário otimista (CEN1) foi de 42,89 ton/ha.ano. O que se evidencia nesse cenário é que houve uma redução bem significativa na média anual (35,19%) do volume de sedimentos, quando se compara com o cenário pessimista (CEN2), mesmo nos maiores picos pluviométricos (Figura 53). Essa redução nos sedimentos se deu, em função do aumento da cobertura vegetação ao longo da bacia e também na adoção de APPs de nascentes, corredores lineares de matas ciliares, topo de moro e serra que atenuou os processos erosivos oriundos das encostas e atuou como barreira física para reter parte desses sedimentos que seriam transportados pela rede de drenagem.

Nota-se que, os maiores volumes de sedimentos no canal da rede de drenagem apresentaram para os anos: 1979 (54,88 ton/ha.ano), 1980 (74,29 ton/ha.ano), 1982 (57,13 ton/ha.ano), 1983 (57,42 ton/ha.ano) e 1992 (60,95 ton/ha.ano). Possui uma queda gradativa no fluxo-erosão para os anos de 1981 (48,86 ton/ha.ano), 1984 (34,49 ton/ha.ano), 1986 (33,06 ton/ha.ano), 1987 (28,07 ton/ha.ano), 1990 (39,87 ton/ha.ano) e 1993 (39,42 ton/ha.ano).

No que tange o cenário pessimista (CEN2) mostrado também na Figura 53, apresentou a estimativa média anual de produção de sedimentos na bacia com 66,18 ton/ha.ano. Esse resultado apresentado na simulação do modelo SWAT mostrou desfavorável para uma bacia hidrográfica em relação ao uso do solo e o comportamento de sedimentos produzidos. Observa-se na relação entre fluxo-erosão, praticamente os picos na produção de sedimentos apresentaram evidentes ao longo do período (1974-1994), obtendo assim um aumento na taxa média anual estimada de 54,29%, em relação ao cenário otimista (CEN1).

O maiores valores da produção de sedimento registada no período (1974-1994) em relação à média de chuva (1.629,61 mm), no cenário pessimista foram para os anos de 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1985, 1989, 1991 e 1992, onde indicaram maiores taxas na variação média estimada de sedimentos, em relação ao cenário otimista (CEN1) que foi de: 46,47% para o ano de 1979 (80,38 ton/ha.ano); 59,64% para o ano de 1980 (118,59 ton/ha.ano); 86,25% para o ano de 1981 (91,01 ton/ha.ano); 97,57% para o ano de 1982 (97,57 ton/ha.ano); 50,78% para o ano de 1983 (86,58 ton/ha.ano); 56,26% para o ano de 1985 (76,97 ton/ha.ano); 37,58% para o ano de 1991 (67,82 ton/ha.ano); e 43,99% para o ano de 1992 (87,76 ton/ha.ano).

Esse cenário corresponde a intensa mudança no uso do solo (descrita na Tabela 20), déficit da cobertura vegetal (desmatamento) e expansão das fronteiras agrícolas, que possibilitou uma maior capacidade de geração do escoamento concentrado e pode ocasionar erosões do tipo laminar (erosão hídrica) e em sulcos denominada de ravinamentos e voçorocas (BERTONI; LOMBARDI NETO,1995). E toda essa carga sedimentar gerada pode ser transportada pelo Rio das Almas e atingir outras bacias hidrográficas, bem como, alcançar o reservatório a jusante, ocasionando possível assoreamento.

No trabalho de Pinto (2011), realizado na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha (MG) simulou dois cenários de uso do solo no modelo SWAT. No primeiro, substituiu as áreas de pastagens por florestas de eucalipto, resultando na redução de 47% da produção de sedimentos. Enquanto no segundo cenário, adotou a recomposição dos remanescentes de Cerrado e os corredores lineares das matas ciliares ao longo da rede de drenagem com ênfase na APP evidenciou uma redução de 38% no volume de sedimentos.

Nos resultados dos cenários de Machado (2002), apresentou diferentes padrões espaciais na produção de sedimentos nos dois cenários de uso do solo simulados no modelo SWAT, para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). No cenário 1, onde manteve o uso atual acrescido da faixa mínima de mata ciliar de 30 m em toda a extensão dos cursos d'água e de 50 m nas nascentes, obteve uma redução de 10,8%, na produção de sedimentos. Já no cenário 2, a redução foi de 84,4% na produção de sedimentos com a substituição da pastagem por vegetação nativa.

Lino (2009) simulou no modelo SWAT dois cenários hipotéticos para na bacia hidrográfica do Rio Negro (SC), onde foram analisados os usos desses cenários substituídos por agricultura e mata nativa. O primeiro cenário simulado com agricultura, obteve maior escoamento superficial e de sedimentos na bacia. Enquanto no segundo

cenário simulado, substituído por mata nativa, houve uma redução no escoamento superficial e na produção de sedimentos.

Já nos resultados do trabalho de Perazzoli et al. (2013) simularam dois cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão Concórdia (SC). No primeiro cenário que foi substituído por pastagem, teve o valor médio maior para escoamento superficial e de sedimentos. Em contrapartida no segundo cenário, toda a bacia estava coberta por mata nativa, que resultou numa estimativa menor para fluxo superficial e na produção de sedimentos.

Uzeika (2009) simulou três cenários em condições de uso e manejo do solo na bacia hidrográfica rural no município de Arvorezinha (RS). Os resultados mostraram que, o sistema convencional e cultivo mínimo, mostraram não haver diferença no volume de escoamento superficial entre os cenários adotados, entretanto teve uma redução de 30% na produção de sedimentos para cenário com cultivo mínimo, quando comparado com sistema convencional.

Ferrigo et al. (2011) simularam dois cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do Córrego Capão Comprido (DF), em área de Cerrado. No primeiro cenário ocupado inteiramente pela agricultura e urbanização evidenciaram um aumento no escoamento superficial e na produção de sedimentos. Enquanto no outro cenário de uso do solo, que corresponde à substituição de toda área da bacia pela vegetação nativa do bioma e sem ocupação antrópica, obteve uma estimativa menor no escoamento superficial e na produção de sedimentos, ao longo dos dezoito anos.

Bonumá et al. (2010) ressaltam que o escoamento superficial é o principal componente hidrológico do modelo que atua diretamente no deslocamento das partículas erodidas do solo, tornando-se o responsável pelo aumento expressivo de sedimentos para dentro do canal da rede de drenagem.

Desse modo, o modelo SWAT foi capaz de mostrar entre os dois cenários de uso do solo, a relação existente entre a precipitação, o escoamento superficial e a produção de sedimentos no canal do rio principal, durante os eventos de maior e menor precipitação, ao longo do período (1974-1994), na bacia hidrográfica do Rio das Almas.

A Figura 59 mostra a comparação dos resultados da estimativa da produção de sedimentos entre a modelagem calibrada no modelo SWAT para o uso do solo de 1991 e os dois cenários hipotéticos de uso do solo (otimista e pessimista) simulados no modelo. Resumidamente a análise da estimativa do volume de sedimentos produzidos no cenário otimista de uso do solo, teve uma redução significativa de 10,96% em relação ao uso do

solo de 1991 (calibrado no modelo) e de 35,19% em comparação ao cenário pessimista. Em contrapartida, o cenário pessimista apresentou elevada produção de sedimentos de 54,29%, quando se compara com os sedimentos produzidos no cenário otimista e também em relação ao uso do solo de 1991 calibrado no modelo, teve um aumento de 37,37%.

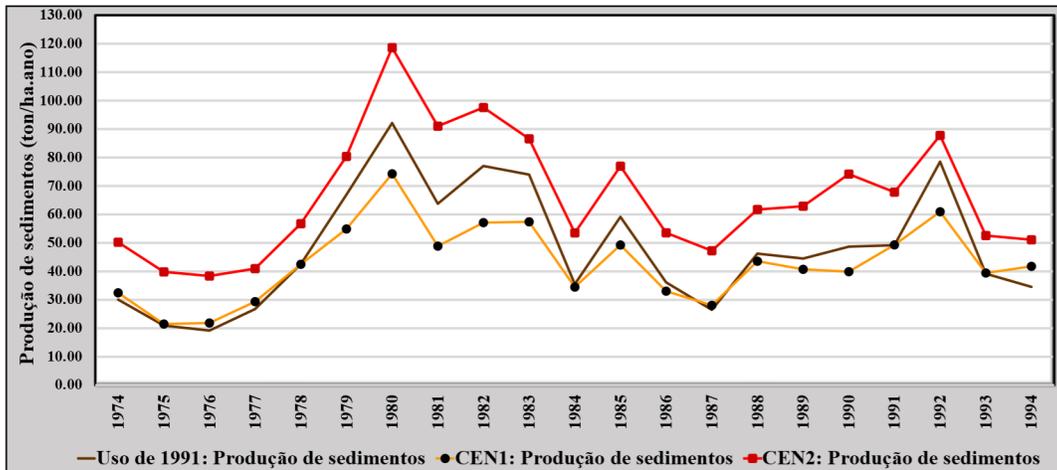


Figura 59 - Comparação temporal da produção de sedimentos entre o uso do solo de 1991 (calibrado) e os cenários hipotéticos de uso do solo (CEN1:otimista; CEN2: pessimista) na BHRA (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

Na Figura 60 mostra o comportamento dos sedimentos acumulados, para os cenários hipotéticos simulados no modelo (CEN1 (otimista) e CEN2 (pessimista) e o cenário de uso do solo de 1991 calibrado no modelo, onde apresentam uma discrepância significativa entre as curvas, para as diferentes unidades de paisagens.

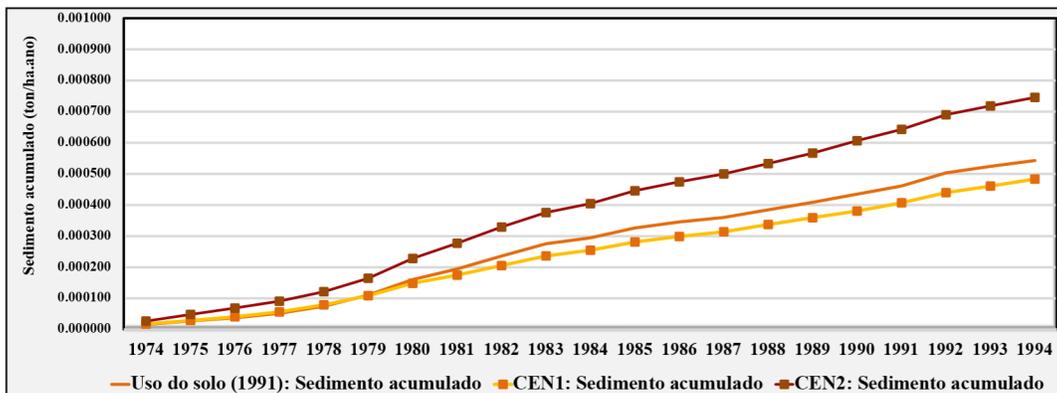


Figura 60 - Comportamento anual dos sedimentos acumulados entre o uso do solo de 1991 (calibrado) e os cenários hipotéticos de uso do solo (CEN1: otimista e CEN2: pessimista) na BHRA (1974 e 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

No CEN2 (pessimista) simulado no modelo SWAT expressou uma curva ascendente e contínua dos sedimentos acumulados, derivados das práticas agropecuárias

e do desmatamento, que alterou o comportamento hidrológico e gerou perdas de solo e produção de sedimentos ao longo do período (1974 – 1994). Em contrapartida, no cenário otimista (CEN1), onde houve uma maior preocupação com a preservação da cobertura vegetal, com a recomposição dos remanescentes de Cerrado e corredores lineares de mata ciliar, assegurou um cenário ambiental prospectivo e menos vulnerável aos processos erosivos. O uso do solo de 1991 calibrado no modelo, gerou um comportamento mediano dos sedimentos acumulados, em relação aos cenários simulados no modelo.

### 5.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NAS SUB-BACIAS PARA OS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS OTIMISTA E PESSIMISTA DE USO DO SOLO

Nas Figuras 61, 62 e 63 espacializam a distribuição da produção de sedimentos das sub-bacias, do escoamento superficial e a precipitação na BHRA para os cenários hipotéticos de uso do solo: otimista (CEN1) e pessimista (CEN2). Os dados foram obtidos dos resultados da simulação do modelo SWAT para o período de 1974 e 1994 e considerado o mesmo índice pluviométrico.

No cenário CEN1 (otimista), a produção de sedimentos das sub-bacias variou entre 0,0 a 16,81 ton/ha.ano, cujo maior volume de sedimentos estimados foram para as seis sub-bacias: 342 (16,81 ton/ha.ano), 371 (12,30 ton/ha.ano), 14 (11,37 ton/ha.ano), 344 (10,87 ton/ha.ano), 223 (9,19 ton/ha.ano) e 104 (7,64 ton/ha.ano) sob a predominância do uso para agricultura, solos Cambissolos com declive entre 5 e 10% e estão no sob viés do elevado escoamento superficial variando entre 59,32 a 296,86 mm (Figura 62), com média de precipitação de 1.633,22 mm (Figura 63).

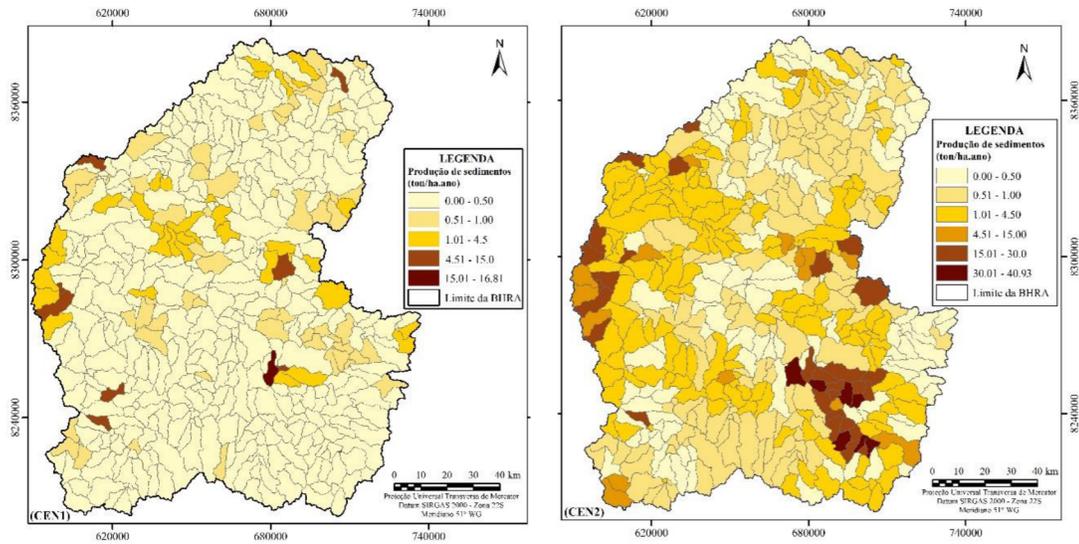


Figura 61 - Espacialização da produção de sedimento das sub-bacias para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974 e 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

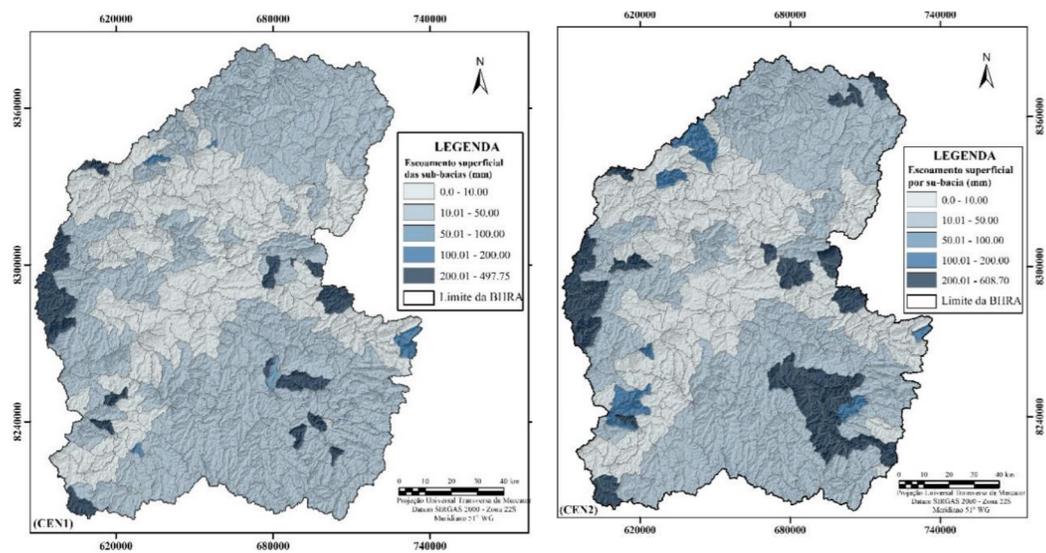


Figura 62 - Espacialização do escoamento superficial das sub-bacias para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974 e 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

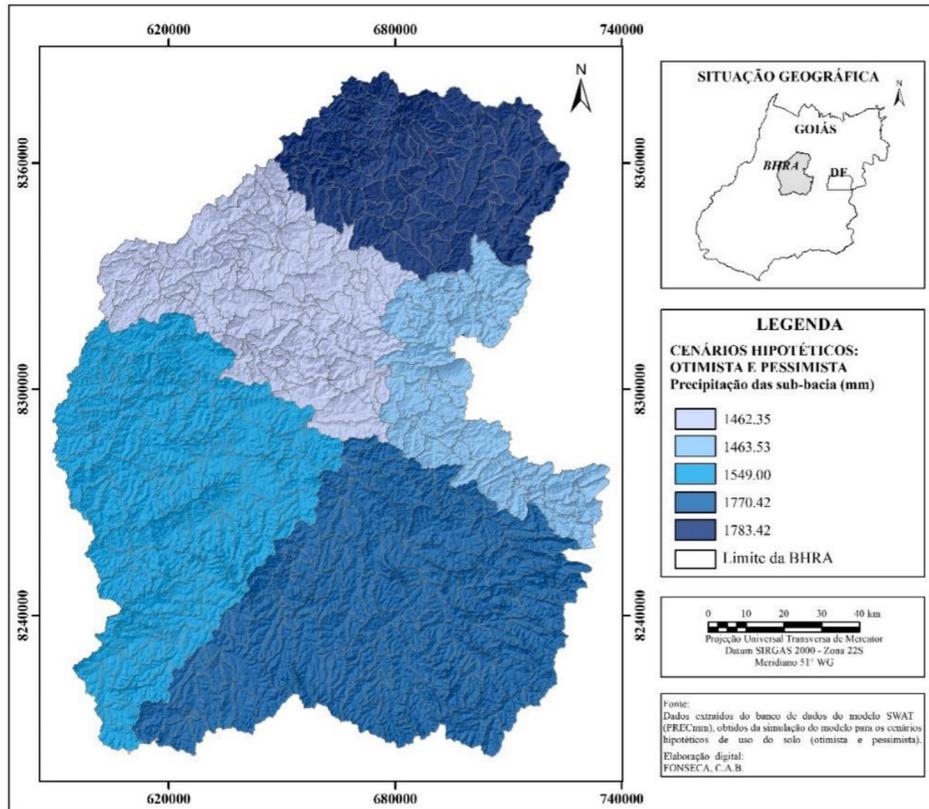


Figura 63 - Espacialização da média de precipitação para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974 e 1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

A análise da média de produção de sedimentos das sub-bacias (Figura 61) estimados para cenário otimista (CEN1) no período (1974-1994), mostraram que as sessenta e duas sub-bacias com o declive (0-5%), predominância de agricultura, tipos de solos e escoamento superficial tiveram os seguintes resultados na simulação do modelo: os solos Cambissolos, Chernossolos, Argissolos vermelhos caracterizados como solos rasos e ou pouco profundos obtiveram valores de 1,23 ton/ha.ano, 0,66 ton/ha.ano e 0,94 ton/ha.ano, respectivamente, enquanto os Latossolos vermelhos foi de 0,79 ton/ha/ano. Esses mesmos tipos de solos tiveram uma média de escoamento superficial com: 224,40 mm, 60,81 mm, 19,70 mm e 20,70 mm (Figura 62). Essas divergências podem ser esclarecidas pelo comportamento diferencial dos atributos mineralógicos, físicos e químicos em relação ao processo erosivo (CASTRO; HERNANI, 2015; SANTOS et al., 2018).

Silva et al. (2005) explicam que os Cambissolos mais caulinitico apresentam baixos teores de óxidos de ferro, estrutura em blocos e baixa permeabilidade, justificando os maiores valores de perdas de solo e produção de sedimentos. Enquanto os Latossolos

vermelhos apresentam mineralogia gibbsítica que, aliada aos maiores teores de óxidos de ferro e matéria orgânica, contribui para uma estrutura granular, maior aglutinação das partículas menores, maior porosidade e permeabilidade, propiciando menores taxas na produção de sedimentos.

Enquanto os Argissolos vermelhos tendem a ser mais suscetíveis aos processos erosivos, devido a relação textural existente entre os horizontes superficiais e subsuperficiais, que dificulta a infiltração de água no solo, além de restrição da profundidade efetiva do solo. Com relação as características físicas dos Chernossolos, variam de solos pouco profundos a profundos, que indica suscetibilidade aos processos erosivos pela presença de horizonte subsuperficial B textural, ou de horizonte com caráter argilúvio (gradiente textural) (EMBRAPA, 2006).

Nota-se na análise dos resultados da simulação do cenário otimista (CEN1) (Figura 61), que o modelo apresentou um pequeno volume de sedimentos entre as trezentas e trinta e três sub-bacias compostas pela cobertura vegetal hipotética entre as classes de uso (mata ciliar, cerradão/floresta e cerrado típico), sob as diferentes condições dos tipos de solos e declividade. Embora, o escoamento superficial não apresentou intenso nessas sub-bacias.

A média da produção de sedimentos das sub-bacias para vegetação de mata ciliar sob as condições dos solos Argissolos vermelhos, Chernossolos, Cambissolos e Latossolos vermelhos, obtiveram valores médios de: 0,65 ton/ha.ano, 0,66 ton/ha.ano, 0,36 ton/ha.ano e 0,26 ton/ha.ano, respectivamente. Enquanto as demais classes de vegetações (cerradão/floresta e cerrado típico) com os mesmos tipos de solos, obtiveram valores na média de: 0,02 ton/ha.ano e 0,04 ton/ha.ano (Argissolos vermelhos); 0,04 ton/ha.ano e 0,03 ton/ha.ano (Chernossolos); 0,17 ton/ha.ano e 0,12 ton/ha.ano (Cambissolos); 0,02 ton/ha.ano e 0,04 ton/ha.ano (Latosolos vermelhos). Com exceção dos solos Neossolos Litólicos distrófico, que evidenciou uma menor produção de sedimentos, com valores próximos de zero, que pode ter sido influenciado pela característica do grupo hidrológico, que foi definido anterior a modelagem hidrossedimentológica.

Na modelagem hidrossedimentológica do uso do solo de 1991, o modelo também apresentou valor de 0,42 ton/ha.ano na média de sedimentos produzidos nas sub-bacias no mesmo período analisado (1974-1994), para vegetação de mata ciliar. Embora, os estudos relacionados a vegetação na modelagem, Machado (2002) ressaltou que a maior parte das pesquisas foram realizadas para bacias do Cinturão do Milho e Nordeste dos

Estados Unidos, sendo ainda necessários dados mais detalhados sobre sua eficiência na modelagem em outras condições ambientais.

No que tange o cenário CEN2 (pessimista) espacializado também na Figuras 61, apresenta a produção de sedimentos nas sub-bacias variando entre 0,0 a 40,93 ton/ha.ano. O modelo registrou a maior produção de sedimentos nas cinquenta e uma sub-bacias, que correspondem a 10,30% da bacia, as quais tiveram escoamento superficial variando entre 185,16 a 524,63 mm (Figura 62) e a média pluviométrica entre 1.549,20 a 1.770,42 mm (Figura 63).

Nessas sub-bacias o volume de sedimentos produzidos tiveram valores entre 10,23 ton/ha.ano a 40,93 ton/ha.ano, com a predominância do uso para agricultura com tendência para os cultivos de grãos, cana-de-açúcar e na sucessão da atividade de pecuária bovina, sob as condições das classes de solos Cambissolos seguido do Argissolos vermelho e declividade variando entre 5 e 10%.

No cenário pessimista (CEN2) o modelo registrou no declive entre 0 e 5% a produção de sedimentos com valores entre 0,11 a 9,79 ton/ha.ano, para as trezentas e setenta e sete sub-bacias (Figura 61) que em conjunto somam 59,77% da área da bacia. Essas sub-bacias estão sob a predominância dos solos Latossolos vermelhos e Chernossolos com escoamento superficial entre 5,83 a 494,69 mm (Figura 62) e a média de precipitação variando de 1.462,35 a 1783,42 mm (Figura 63). Esses dados condizem com trabalho de Bertini (2014), que aplicou o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Papagaio (MT), para analisar a produção de sedimentos e escoamento superficial sob a influência da expansão agrícola (1981–2010). E os resultados mostraram que, os maiores valores na correlação entre o escoamento superficial e a produção de sedimentos foram registrados onde houve expansão agrícola.

As sub-bacias sob o predomínio do uso do solo para pastagem (definitiva) no cenário pessimista (CEN2), o modelo mostrou no resultado que as oito sub-bacias (153, 171, 409, 430, 472, 474, 476 e 479) registraram um volume de sedimentos para os três tipos de solos predominantes, declive na faixa entre 10-15% e acima de 20% para os solos: Argissolos vermelhos, Chernossolos e Neossolos Litólicos distrófico, que obtiveram valores inferiores em relação as áreas agrícolas, com média de 0,21 ton/ha/ano, 0,42 ton/ha/ano e 0,07 ton/ha/ano, respectivamente. O escoamento superficial variou conforme a declividade: entre 10 e 15% teve valor de 9,65 a 10,17 mm e acima de 20% foi entre 12,93 a 19,28 mm (Figura 62), a precipitação variou entre 1.463,53 a 1.770,42 mm (Figura 63).

Enquanto para as sessenta e sete sub-bacias, com uso do solo revestido pelos fragmentos hipotéticos remanescentes de Cerrado em diferentes tipos de solos, tiveram também uma média menor na produção de sedimentos, com: 0,18 ton/ha.ano para os Cambissolos e os demais solos registraram valores próximo de zero: 0,04 ton/ha.ano (Argissolos vermelhos), 0,06 ton/ha.ano (Chernossolos), 0,02 ton/ha.ano (Latosolos vermelhos) e 0,002 ton/ha.ano (Neossolos Litólicos). A média do fluxo superficial foi de 95,21 mm (Figura 62) e a média de precipitação foi de 1.650,42 mm (Figura 63).

#### 5.4 CLASSIFICAÇÃO DE PERDAS DE SOLO PARA O USO DO SOLO DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS OTIMISTA E PESSIMISTA

A análise qualitativa da produção de sedimentos das sub-bacias entre os cenários hipotéticos de uso do solo (otimista e pessimista) simulados no modelo SWAT. Para isso, utilizou o ambiente SIG para identificar e estimar as sub-bacias que são mais propensas à erosão laminar na bacia hidrográfica do Rio das Almas, classificando-as desde: a muito baixa a extremamente severa ao risco de erosão.

A Figura 64 mostra a distribuição espacial da classificação de perdas de solo das sub-bacias nos cenários hipotéticos de uso do solo (otimista e pessimista) que são mais ou menos susceptível à erosão hídrica.

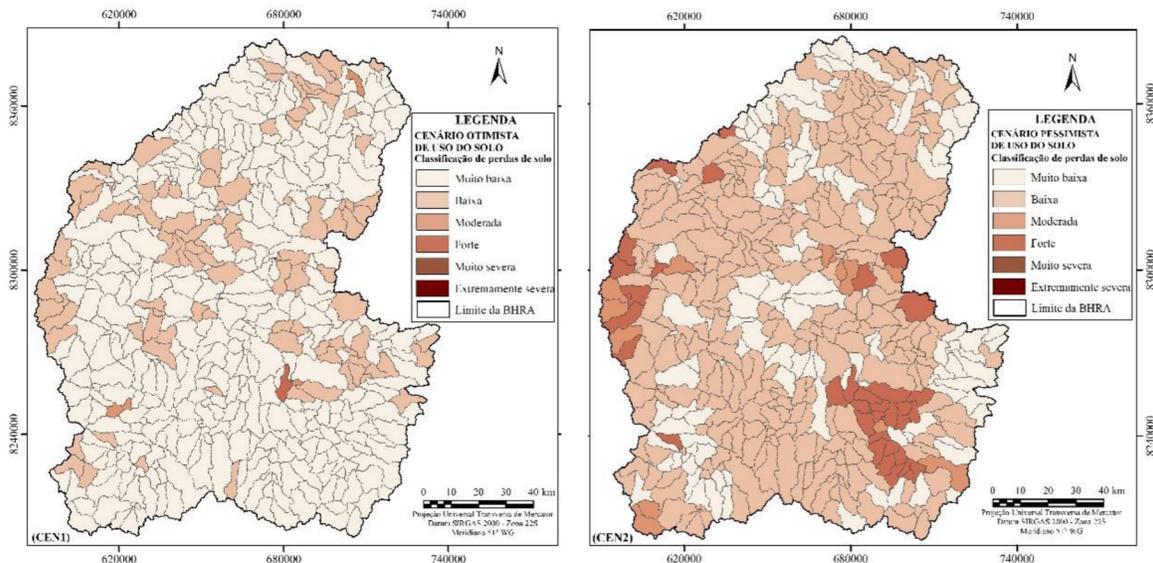


Figura 64 – Classificação de perdas de solos das sub-bacias, para os cenários hipotéticos de uso do solo otimista (CEN1) e pessimista (CEN2) na BHRA (1974-1994). Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).

No âmbito do cenário otimista (CEN1) apresentado na Figura 64, identificou-se quatrocentos e noventa e uma sub-bacias como muito baixa ao risco à erosão (< 4,5 ton/ha.ano) com 98,36% da área da bacia (equivale 18.330,79 km<sup>2</sup>). Enquanto, a classificação de baixo risco (4,5-10 ton/ha.ano) foi registrada com 1,08% da área da bacia; o risco moderado à erosão (10-15 ton/ha.ano) foi de 0,35% da área da bacia e forte risco a susceptibilidade erosiva (15-50 ton/ha.ano) com 0,22% da área da bacia.

Verifica-se que, 99,44% do cenário otimista apresentou tendência muito baixa a baixa a susceptibilidade à erosão nas sub-bacias desse cenário. Isso pode ser explicado pelo fato da recomposição hipotética da cobertura vegetal e corredores lineares de mata ciliar, que atuaram como barreira física para reter os sedimentos originados das encostas.

Com a finalidade de identificar as áreas críticas entre as sub-bacias que são mais propensas a erosão laminar no cenário otimista, o modelo registrou 0,56% da área da bacia (equivalente a 104,77 km<sup>2</sup>) para faixa de classe moderada a forte risco erosivos, ocupada pela agropecuária, com o predominância dos solos Cambissolos e declividade variando de 0 e 5%.

No que tange o cenário hipotético pessimista (CEN2) mostrado também na Figura 64. Percebe-se que o comportamento da estimativa de perdas de solo das sub-bacia nesse cenário foi muito variável entre as classes de risco à erosão e estão distribuídos entre as diferentes topografias: superfícies rebaixadas, moderadamente onduladas e superfícies elevadas, com a predominância dos solos Latossolos vermelhos, Cambissolos, Chernossolos e Argissolos vermelhos.

O modelo estimou as perdas de solo para as trezentas e trinta e uma sub-bacias com níveis muito baixos ao risco de erosão (< 4,5 ton/ha.ano) com 89,32% da área da bacia (equivale a 14.547,52 km<sup>2</sup>); o risco baixo à erosão foi 0,42% (4,5-10 ton/ha.ano); vulnerabilidade moderada a forte risco de erosão foi de 3,22% (10-15 ton/ha.ano) e 7,04% (15-50 ton/ha.ano), respectivamente, em relação a área da bacia.

Ao identificar as áreas críticas nesse cenário de perdas de solo nas sub-bacias sob as condições de uso do solo, tipos de solos e declividade no limite de tolerância de perdas de solo superior a 15 ton/ha.ano, o modelo registrou cinquenta sub-bacias, ou seja 10,26% da área da bacia (equivale a 1.912,19 km<sup>2</sup>) ocupada pela agropecuária, declive entre 5 e 10% e predominância dos solos Cambissolos e Argissolos vermelhos com características pedológicas variada (textura e estrutura), profundidade que variam entre solos rasos e pouco profundos susceptíveis aos processos erosivos (EMBRAPA, 2006; SANTOS et al., 2018). E quando se compara as áreas susceptíveis a perdas de solos entre os cenários

hipotéticos, o cenário pessimista teve um aumento significativo de 1.725,21%, em relação ao cenário otimista.

A priori, quando se compara com os resultados de perdas de solo nas sub-bacias entre os três cenários de uso do solo (sendo um cenário calibrado no modelo e dois cenários hipotéticos simulados): o cenário de uso do solo de 1991 (calibrado) foi considerado baixo a moderadamente vulnerável ao risco de erosão. Os cenários hipotéticos de uso do solo simulado tiveram diferenças significativas, onde o cenário otimista apresentou muito baixo a baixo risco à erosão hídrica ou laminar, enquanto o outro cenário pessimista mostrou-se desfavorável para uma bacia hidrográfica, o qual apresentou forte risco à suscetibilidade erosiva e maior predisposição de sedimentos serem transportados para canal da rede de drenagem.

É importante ressaltar que, os cenários hipotéticos adotados nesse estudo foram utilizados para analisar as mudanças do uso do solo e sua influência nos processos hidrossedimentológicos da bacia hidrográfica do Rio das Almas. Assim, determinar a distribuição espacial de perda de solo é necessário para identificar as sub-bacias que são propensas aos processos erosivos e desenvolver planos específicos de manejo de erosão, sobretudo para as áreas de alto risco de erosão (IRVEM et al., 2007).

Os cenários hipotéticos de uso do solo da BHRA, alertaram para as possíveis situações futuras que possam ocorrer numa bacia hidrográfica, nas questões relacionadas aos processos hidrológico e sedimentológicos. A tomada de medidas rigorosas para a preservação da cobertura vegetação e de reflorestamento implica na diminuição dos impactos ambientais, nas perdas de solos e na produção de sedimentos na bacia. Nesse contexto, a metodologia adotada para geração desses cenários hipotéticos, permitiram mostrar de forma satisfatória, que os processos hidrológicos associados ao uso e manejo do solo exercem um papel fundamental para a compreensão da produção hídrica e sedimentológico na bacia hidrográfica.

Desse modo, a modelagem hidrossedimentológica do SWAT tornou-se uma ferramenta indispensável nessa pesquisa, pois permitiu entender os processos envolventes e pode auxiliar futuramente no planejamento e na gestão territorial dos recursos hídricos e sedimentológicos dessa bacia. E definir políticas públicas voltadas para o controle do desmatamento, na preservação, manutenção e recuperação do bioma Cerrado.

A partir dessas perspectivas futuras de uso do solo dos cenários hipotéticos, em diferentes paisagens, permitiu analisar as respostas dos efeitos da ação antrópica sobre os processos hidrossedimentológicos na bacia. Portanto, a conservação da vegetação é

fundamental para o equilíbrio e o funcionamento do ecossistema da bacia, para que essa exerça sua função no controle e no comportamento hidrológico, na disponibilidade hídrica e, conseqüentemente gerar menor produção de sedimentos no canal fluvial.

Em contrapartida, ignorar as eventuais mudanças históricas no uso do solo em área do Cerrado e suas variações climáticas e tipos de solo implica em desconhecer as relações de causas e efeitos do ciclo hidrológico e as características físicas de uma bacia hidrográfica, que podem originar inúmeros problemas ambientais, como mencionados anteriormente. Portanto, conhecer todos esses eventuais comportamentos é uma condição básica para subsidiar um planejamento ordenado, bem-sucedido para a produção de água e de sedimentos em uma unidade de paisagem e também para o reservatório de geração de energia elétrica situado a jusante.

## 6 CONCLUSÃO

A hipótese levantada inicialmente para essa pesquisa foi comprovada durante o desenvolvimento e a análise dos resultados. Os dados apontaram que, a BHRA tem um potencial agrícola como também tem a função de gerar e produzir água para o reservatório de geração de energia elétrica. Portanto, as atividades agropecuárias são os principais fatores da mudança do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio das Almas, no período de 1991 e 2017, consequentemente na produção de sedimentos.

A análise da mudança no uso do solo para os anos de 1991, 2006 e 2017 e dos dados censitários da agropecuária permitiram entender a reconfiguração da paisagem da bacia ao longo dos vinte e seis anos, que se mostrou rápida e progressiva no processo da expansão da atividade econômica. Essa complexidade envolve a substituição dos grãos alimentícios (arroz e feijão) para incorporação dos cultivos em área plantada da cana-de-açúcar e soja e na expansão da pecuária bovina.

Conciliar a pressão do agronegócio com a preservação das áreas naturais é um desafio para planejamento ambiental e de gestão dos recursos hídricos, pois as alterações no uso do solo e o desmatamento interferem no ciclo hidrológico, ocasionando a redução da infiltração da água no solo e aumenta o escoamento superficial afetando assim, a dinâmica fluvial, perdas de solo e produção de sedimentos.

No que tange a aplicação da modelagem hidrossedimentológica na BHRA apresentou uma importante ferramenta para entender os processos que ocorrem no ciclo hidrológico (superfície e subsuperfície) e na fase que regem a vazão líquida e sedimentológica dessa bacia. Nessa modelagem foi possível identificar os melhores parâmetros que exerceram maior ou menor sensibilidade no modelo e foi capaz de simular de forma aceitável a predição da vazão e a estimativa de perdas de solo e produção de sedimentos, no período analisado (1974-1994).

A proposta da simulação de cenários hipotéticos de uso do solo (otimista e pessimista) no modelo SWAT, gerou resultados muito bom e satisfatórios para previsão de vazão, perdas de solo e produção de sedimentos. Para o cenário otimista de uso do solo que propôs a recuperação hipotética de área de preservação permanente (APP) de cursos d'água, topo de morro e serra e de acordo com a determinação do código florestal brasileiro (Lei Nº 12.651/2012), resultou em uma taxa menor na produção de sedimentos (35,19%) em relação ao cenário pessimista de uso do solo. No segundo cenário de uso do solo simulado, as transformações de uso e ocupação do solo foi baseado na tendência

histórica para a área de Cerrado, com o aumento do desmatamento e o crescimento de atividades agropecuárias para os cultivos dos grãos, cana-de-açúcar e pecuária bovina que tiveram um aumento médio de 37,75% na predição da vazão e de 54,29% estimado para produção de sedimentos, em relação ao cenário otimista.

A preservação natural de uma bacia hidrográfica depende da prática de manejo do solo, da preservação e recuperação da vegetação nativa e da conciliação dos setores da economia. A modernização da agropecuária por incremento tecnológico vem apresentando aumento progressista nos índices de produtividade no agronegócio. Por exemplo, a BHRA tem uma pecuária muito extensiva que pode ser tornar mais intensiva, pois existem extensas áreas de pastos abertos que podem ser recuperados e reaproveitados sem que houvesse abertura de novas terras. Além de se utilizar modelos de sucessão de cultivos de grãos e cana-de-açúcar com pecuária bovina que permitem integrar o uso do solo com emprego de práticas conservacionistas.

A contínua atividade agropecuária na bacia perpassa pelo enfrentamento e pressão do agronegócio sobre a regulamentação fundiária, o controle de queimadas na área no bioma Cerrado, a falta fiscalização e de regulamentação do código florestal. Diante dos dados do cenário pessimista simulado no modelo a tendência é clara, para o crescimento das práticas socioambientais como o desmatamento, mudança no clima, uso da água para irrigação da agricultura, erosão hídrica, assoreamento dos cursos d'água, produção de sedimentos entre outros.

O crescimento sustentável na bacia hidrográfica independem do sistema de produção, pois as práticas conservacionista na agropecuária segue alguns preceitos como na manutenção e forragem de resíduos de culturas na superfície para manter a umidade do solo, diversificação de espécies em rotação de culturas que elimina o preparo do solo, com isso, haverá menor gastos financeiro no revolvimento e correção dos solos.

Sugere-se a continuidade de dados de monitoramento de precipitação, vazão e, principalmente de sedimentos. Essas variáveis são fatores condicionantes para se ter um bom ajuste no modelo, com isso, alcançar uma série de informações consecutivas e estimativas do comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica e ser aplicado também para avaliações de cenários em vários estudos.

Recomenda-se para estudos posteriores, simular cenários de uso do solo, mudanças climáticas, se possível inserir o reservatório a jusante na simulação usando dados espacialmente distribuídos e séries temporais incluindo períodos úmidos e secos no processo de calibração. Tendo como finalidade, oferecer mais uma contribuição

científica da dinâmica sedimentológica da bacia e estimar o volume de sedimento que possam ser depositados no reservatório de Serra da Mesa (GO).

## REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, 333, 2007, p.413–430. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406004835>. Acesso em: 4 mai. 2018.

ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R. b, YANG H.; KLOVE B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology** 524, 2015, p. 733–752. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol). Acesso em: 3 fev. 2018.

ABBASPOUR, K.C. *SWAT-CUP2: SWAT. Calibration and Uncertainty version 2 - a user manual*, 2009.

ABBASPOUR, K.C. **User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs**. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Technol., Duebendorf, Switzerland, 2011. 100p. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>. Acesso em: 19 mar. 2018.

ALMEIDA, J.; IGREJA, A. C. M.; YOKOYAMA, L. P.; ROCHA, M.B. Cultura do arroz nos estados de Goiás e Tocantins: aspectos socioeconômicos e tecnológicos nos sistemas de cultivo. **Revista Agricultura em São Paulo**, São Paulo, 1995, p.65-93. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=1080>. Acesso em: 2 jul. 2019.

ALMEIDA, L.; RESENDE, L.; RODRIGUES, A. P.; CAMPOS, J. E. G. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Goiânia (GO): Superintendência de Geologia e Mineração Secretaria de Indústria e Comércio, 2006. 232p. Disponível em: [http://www.sieg.go.gov.br/downloads/Livro\\_Hidrogeologia.pdf](http://www.sieg.go.gov.br/downloads/Livro_Hidrogeologia.pdf). Acesso em: 23 mar. 2018.

ANA. **Agência Nacional das Águas**. Banco de dados HIDROWEB. Brasília (DF), 2017. Disponível em: [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br). Acesso em: 1 out. 2017.

ALVES, G. L. F. **Expansão canavieira e seus efeitos na violência em Goianésia**. Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-graduação em Agronegócio da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Goiás. Goiânia (GO), 2012. 103p.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M.A.S.; AMORIM, J.R.A.; MENDONÇA, L.C.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, 2013, p.1091-1102. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/94876/1/Analise.-.Marcos-Cruz.pdf>. Acesso em: 2 mai. 2018.

ARNESEN, A. S. Mapeamento de APP de declividade e topos de morro - Técnicas de mapeamento: exercícios práticos Instituto de Estudos Pecuários (IEPEC) – Multidisciplinar, 2015. Disponível em: <https://iepec.com/wp-content/uploads/2015/03/sensoriamento-cap-4-parte-1.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2019.

ARNESEN, A. S.; GENOFRE, F.; CURTARELLI, M. FERREIRA, M. Sensoriamento remoto e SIG aplicados ao novo Código Florestal. Instituto de Estudos Pecuários (IEPEC) – Multidisciplinar, 2015. 28p. Disponível em: <http://iepec.com/wp-content/uploads/2015/03/sensoriamento-apostila-1.pdf>; Acesso em: 1 ago. 2019.

ARNOLD, J.G.; KINITY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. **Input/Output Documentation Version 2012**. Texas Water Resources Institute. 2012, 650p. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>. Acesso em 5 jul. 2017.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. 2012. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Transactions of the ASABE, v. 55(4), 2012, p. 1491-1508.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I: Model development. 1998. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, 1998, p. 73-89.

ARRAIS, T. A. **A produção do território goiano.:** economia, urbanização, metropolização. Goiânia (GO): Editora UFG, 2013, 221p.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os trópicos**. São Paulo (SP): Difel, 1986.

BACCARIN, J. G. **Sistema de produção agropecuário brasileiro:** características e evolução recente. 2.ed. São Paulo (SP): Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Pró-Reitoria de Graduação, 2011. 254p. Disponível em: <http://www.creasp.org.br/biblioteca/wp-content/uploads/2013/09/Sistema-de-Prod-Agropecuario.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2019.

BARROS, J. G. C. Caracterização geológica e hidrogeológica do Distrito Federal. IN: PINTO, M. N. (org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília: UNB, 1994, p. 265-281.

BEKIARIS I.G.; PANAGOPOULOS I.N.; MIMIKOU M. Application of the SWAT (Soil and water assessment tool) model in the Ronnea catchment of Sweden. **Global NEST International Journal**. 7(3), 2005, p.313 – 322. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/262419942\\_Application\\_of\\_the\\_SWAT\\_Soil\\_and\\_water\\_assessment\\_tool\\_model\\_in\\_the\\_Ronnea\\_catchment\\_of\\_Sweden](https://www.researchgate.net/publication/262419942_Application_of_the_SWAT_Soil_and_water_assessment_tool_model_in_the_Ronnea_catchment_of_Sweden). Acesso em: 1 fev. 2019.

BERTINI, G. **Influência da expansão agrícola no escoamento superficial e na produção de sedimento no Cerrado do meio norte do Mato Grosso**. São José dos Campos (SP): INPE, 2014. 93p. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FML92S>. Acesso em: 24 fev. 2018.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 2007, p. 177-241.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (Coord.) **Conservação do solo**. Piracicaba – SP, Editora: Livrocere, 1995. 368p.

BLAINSKI, E.; ACOSTA, E.; NOGUEIRA, P. C. do P. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Revista Ambiente e Água** (Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science) vol. 12 n. 2. Taubaté (SP), 2017, p. 226-237. ISSN 1980-993X – doi:10.4136/ambi-agua.1951. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v12n2/1980-993X-ambiagua-12-02-00226.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2018.

BONUMÁ, N. B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil**. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria (RS), 2011. 136p. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3324/BONUMA%2c%20NADIA%20BERNARDI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 jan. 2019.

BONUMÁ, N. B.; CORSEUIL, C. W.; KOBIYAMA, M.; ZANIN, P. R.; CORRÊA, F. Estimativa do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com o modelo SWAT. **XX – Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** - Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Bento Gonçalves (RS), 2013, p. 1-8. Disponível em: <https://docplayer.com.br/10770150-Estimativa-do-balanco-hidrico-de-uma-bacia-hidrografica-com-o-modelo-swat.html>. Acesso em: 5 mar. 2020.

BONUMÁ, N. B.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P.; BARROS, C. A. P. de; RODRIGUES, M. F.; BUARQUE, D. C. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. **IX - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (ENES)**, 2010, p. 1-17. Disponível em: [http://www.fiscadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao\\_Resumos/IXENES\\_1.pdf](http://www.fiscadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Resumos/IXENES_1.pdf). Acesso em: 15 jan. 2020.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacias hidrográficas e qualidade ambiental. IN: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro (RJ): Bertrand Brasil, 2004, p. 153-192.

BRASIL. **Decreto nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Institui o Novo Código Florestal. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acesso em: 2 out. 2019.

BRASIL. **Decreto no 7.830, de 17 de outubro de 2012**. Dispõe sobre o Sistema de Cadastro Ambiental Rural, o Cadastro Ambiental Rural, estabelece normas de caráter geral aos Programas de Regularização Ambiental, de que trata a Lei no 12.651, de 25 de

maio de 2012, e outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Decreto/D7830.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Decreto/D7830.htm). Acesso em: 2 out. 2019.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, V. 8, n. 3, 2015. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/3a40/0804692be6f89588042d3f2d8ed19aeda2cc.pdf> . Acesso em: 2 fev. 2018.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B.; GRISON, F.; KOBİYAMA, M. Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: estudo de caso do o modelo SWAT. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Florianópolis (SC), 2017. Disponível em: [http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/XXIISBRH/Artigos/XXIISBRH\\_Tassia.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/XXIISBRH/Artigos/XXIISBRH_Tassia.pdf). Acesso em: 5 mar. 2018.

CALAÇA, M.; DIAS, W. A. A modernização do campo no Cerrado e as transformações socioespaciais em Goiás. **CAMPO-TERRITÓRIO: Revista de Geografia Agrária**, v.5, n.10, 2010, p.312-332. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/386815521/Calaca-a-Modernizacao-Do-Campo-No-Cerrado-e-as-Transformacoes-Socioespaciais-Em-Goiias>. Acesso em: 4 abr. 2018.

CAMPOS, A. B.; LUIZ, G. C.; MACEDO, R. A. R.; PEIXOTO, V.M.R. Análise do comportamento espacial e temporal das temperaturas e pluviosidades no estado de Goiás. IN: ALMEIDA, M.G. (Org.). **Abordagem Geográfica de Goiás: o natural e o social na contemporaneidade**. Goiânia (GO): IESA, 2002, p. 91-118.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, 1995, p.121-126. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/292006506\\_Estabilidade\\_estrutural\\_de\\_um\\_Latossolo\\_Vermelho-Escuro\\_distrofico\\_apos\\_sete\\_anos\\_de\\_rotacao\\_de\\_culturas\\_e\\_sistemas\\_de\\_manejo\\_de\\_solo](https://www.researchgate.net/publication/292006506_Estabilidade_estrutural_de_um_Latossolo_Vermelho-Escuro_distrofico_apos_sete_anos_de_rotacao_de_culturas_e_sistemas_de_manejo_de_solo). Acesso em: 4 abr. 2018.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUSA, N. M.; MELO, M. T. S. (org.). **Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro**. Brasília (DF): Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. 1198p.

CANASAT. **Mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da Terra**. INPE/ Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/canasat/> . Acesso em: 2 mai. 2017.

CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, ISSN: 2176-5774, n. 42, v. 1. Presidente Prudente (SP), 2020, p. 140-161. Disponível em

<https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/download/6953/5482> Acesso em 4 ago. 2020.

CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S.; PINTO, F. M.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J.G.M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, 2009, p. 3-9. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n1/v13n01a01.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2018.

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília (DF), 2014. 154p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/17371>. Acesso em: 5 jan. 2018.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. rev., atual., ampliada. Rio de Janeiro (RJ): Interciência, 2008. 599p.

CASTRO, S. S.; ABDALA, K.; SILVA, A. A. S.; BÔRGES, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e no estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia** – UFG, v. 30, n. 1. Goiânia (GO), 2010, p. 171-191.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências Aplicadas (Geoprocessamento e Análise Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2013, 122p.

CASTRO, S. S.; BORGES, R. O.; SILVA, R. A. A.; BARBALHO, M. G. S. Estudo da expansão da cana-de-açúcar no estado de Goiás: subsídios para uma avaliação do potencial de impactos ambientais. In: **SBPC, II Fórum de C&T no Cerrado**. Goiânia: SBPC, 2007.

CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade**. Editores técnicos. Brasília (DF): Embrapa, 2015. 367 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1039217/solos-frageis-caracterizacao-manejo-e-sustentabilidade>. Acesso em: 3 set. 2019.

CASTRO, W. J.; LEMKE-DE-CASTRO, M. L.; LIMA, J. O.; OLIVEIRA, L. F. C.; RODRIGUES, C.; FIGUEIREDO, C. C. Erodibilidade de Solos do Cerrado Goiano. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**, v.4, n.2, ISSN 2176-9168 *online*. Maringá (PR), 2011, p. 305-320. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/1656>. Acesso em: 6 set. 2018.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. Simulação hidrológica de grandes bacias. Porto Alegre (RS): RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.6, n.1, Jan/Mar 2001, p.95-118, 2001. Disponível em: [https://abrh.s3-sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/42/b0a907b2f768dd79ee670aedd81b1e87\\_a70d73b3aa2ef8d5a8926eab4d2513e3.pdf](https://abrh.s3-sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/42/b0a907b2f768dd79ee670aedd81b1e87_a70d73b3aa2ef8d5a8926eab4d2513e3.pdf). Acesso em: 12 nov. 2017.

CORREA, V. H. C. **O desenvolvimento e a expansão recente da produção agropecuária no Centro-Oeste.** Tese de Doutorado - Instituto de Economia/Universidade Estadual de Campinas. Campinas (SP), 2013. 255p.

CORRÊA, E. S.; VIEIRA, A.; COSTA, F. P.; CEZAR, I. M. **Sistema semi-intensivo de produção de carne de bovinos nelores no Centro-Oeste do Brasil.** Embrapa Gado de Corte. Campo Grande (MS), 2000. 49 p. Disponível em: [http://old.cnpgc.embrapa.br/publicacoes/doc/doc\\_pdf/DOC095.pdf](http://old.cnpgc.embrapa.br/publicacoes/doc/doc_pdf/DOC095.pdf). Acesso em: 10 mar. 2019.

CORREA, E. A.; MORAES, I. C.; PINTO, S. A. F.; LUPINACCI, C. M. Perdas de Solo, Razão de Perdas de Solo e Fator Cobertura e Manejo da Cultura de Cana-de-Açúcar: Primeira Aproximação. **Revista do Departamento de Geografia** - Universidade de São Paulo, V.32 (ISSN 2236-2878). São Paulo (SP), 2016, p. 72-87. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/116671> Acesso em: 11 out. 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise de bacias hidrográficas. IN: **Geomorfologia**. 2ª ed. São Paulo (SP): Edgard Blücher/EDUSP, p. 102-127, 1980.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. Caracterização do sistema ambiental. IN: **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, UNESP, 1999, p. 34-50.

DAMBRÓS, G. **Qual o papel das geotecnologias na estruturação de um novo paradigma da Geografia?** Caderno de Geografia (PUC Minas), v. 30, n. 60, 2020, p. 163-171 (ISSN-2318-2962). Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/22325>. Acesso em: 2 fev. 2020.

DE MARIA, I. C.; DECHEN, S. Perdas por erosão em cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, álcool e subprodutos**, v.17, n. 2, 1998, p. 20-21.

DEDECEK, R. A. **Erosão e práticas conservacionistas nos Cerrados**. Planaltina (DF): EMBRAPA-CPAC, 1986, 16p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/99062/1/cirtec-22.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2018.

DIAS-FILHO, M. B. **Desafios da produção animal em pastagens na fronteira agrícola brasileira**. Belém (PA): EMBRAPA Amazônia Oriental, 2012. 34p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/925646/1/Doc382.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2019.

EITEN, G. Vegetação do Cerrado. IN: PINTO, M. N. (org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília: UNB, 1994, p. 17-73.

EMBRAPA (2006). **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA (2012). **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Cultivo do sorgo, 2012. Disponível em: [https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducaolf6\\_lgalceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_lgalceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p)

[\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=8301&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=9212](#). Acesso em: 1 jun. 2019.

EMBRAPA (2010). **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Sistema de cultivo. Agência EMBRAPA de Informações Tecnológica (AGEITEC), 2010. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000g1wcnzza02wx5ok0ha2lipwbeel46.html>. Acesso em: 9 mai. 2017.

EMBRAPA (2010a). Milho safrinha. Agência EMBRAPA de Informações Tecnológica (AGEITEC), 2010. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONT000fya0krse02wx5ok0pvo4k3mp7ztkf.html>. Acesso em: 9 mai. 2017.

EMBRAPA SOJA (2005). **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil. Londrina: EMBRAPA Soja: EMBRAPA Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 220p. (Sistemas de Produção/ EMBRAPA Soja, ISSN 1677-8499; n.9).

FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K.C.; YANG, H.; SCHULIN, R. Application of SWAT to quantify internal renewable water resources in Iran. **4<sup>th</sup> International SWAT Conference Proceeding**, session 10, v.35, UNESCO-IHE – Institute for Water Education – Delft, The Netherlands, 2007, p. 210-219. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/docs/swat/conferences/2007/docs/4thConfProceedings.pdf>. Acesso em: 2 out. 2018.

FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K. C.; VAGHEFI, S. A.; FARZANEH, M. R.; ZEHNDER, A. J. B.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. **Jornal of Hydrology**, v. 480, 2013, p. 85-101. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.016> e <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412010761>. Acesso em: 2 out. 2018.

FARIAS, V. E. M. **A influência do uso do solo na calibração do modelo SWAT para a bacia do rio das Almas – Goiás**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Paraíba/PB. João Pessoa (PB), 2018. 79p.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3<sup>a</sup> ed. Rev. e ampl. Rio de Janeiro (RJ): CPRM – LABHID, 2008. 812p.

FERNANDES, C. T. C. **Impactos Socioambientais de Grandes Barragens e Desenvolvimento: a percepção dos atores locais sobre a Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa**. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília. Brasília, 2010. 412p. Disponível em: [http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7175/1/2010\\_ClaudioTadeuCardosoFernandes.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7175/1/2010_ClaudioTadeuCardosoFernandes.pdf). Acesso em: 3 jun. 2018.

FERNANDES, J. G. **Estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. Tese (doutorado) - programa de pós-graduação em Geografia – Universidade Federal de Pernambuco/UFPE. Recife (PE), 2015. 185p.

FERREIRA, E. A. B.; TOKARSKI, D. J. (Org.). Bacia hidrográfica do Alto Tocantins: retrato e reflexões. **ECODATA. WWF-Brasil**, 2007. 102p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/570866/bacia-hidrografica-do-alto-tocantins-retrato-e-reflexoes>. Acesso em: 5 jan. 2018.

FERREIRA, L. G.; FERNANDEZ, L. E.; SANO, E. E.; FIELD, C.; SOUSA, S. B.; ARANTES, A. E.; ARAÚJO, F. M. Biophysical properties of cultivated pastures in the brazilian savanna biome: An analysis in the spatial-temporal domains based on ground and satellite data. *Remote Sensing*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 5, n. 1, p. 307–326, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/234683711\\_Biophysical\\_Properties\\_of\\_Cultivated\\_Pastures\\_in\\_the\\_Brazilian\\_Savanna\\_Biome\\_An\\_Analysis\\_in\\_the\\_Spatial-Temporal\\_Domains\\_Based\\_on\\_Ground\\_and\\_Satellite\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/234683711_Biophysical_Properties_of_Cultivated_Pastures_in_the_Brazilian_Savanna_Biome_An_Analysis_in_the_Spatial-Temporal_Domains_Based_on_Ground_and_Satellite_Data). Acesso em: 5 ago. 2019.

FERREIRA, M. E. **Modelagem da dinâmica de paisagem do Cerrado**. Tese (Doutorado) pela Universidade Federal de Goiás. Programa Multidisciplinar de Doutorado em Ciências Ambientais. Goiânia (GO), 2009. 115p. Disponível em: <https://www.lapig.iesa.ufg.br/lapig/index.php/produtos/publicacoes/send/8-tese/689-modelagem-da-dinamica-de-paisagem-do-cerrado>. Acesso em: 2 out. 2019.

FERREIRA, R. S. **Análise da produção da carga líquida na bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia. Brasília (DF), 2016. 126p. Disponível em [https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/20891/1/2016\\_RainaSantosFerreira.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/20891/1/2016_RainaSantosFerreira.pdf). Acesso em: 5 jan. 2020.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do Lago Descoberto – DF**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília (DF), 2014. 147 p.

FERRIGO, S.; MINOTI, R. T.; KOIDE, S. Utilização do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na estimativa de produção de sedimentos decorrentes de diferentes cenários de uso do solo na bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2011, Maceió. Anais Porto Alegre: ABRH.

FISHER, J.; LINDENMAYER, D. B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 16, 2007, p. 265-280. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1466-8238.2007.00287.x>. Acesso em: 7 fev. 2019.

FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo (SP): Oficina de Textos, 2008, p. 31-317.

FLORENZANO, T. G. Interpretação de imagens. IN: **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3 ed ampl. e atualiz. São Paulo (SP): Oficina de Textos, 2011. 128 p.

FONSECA, C. A. B. **Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas, no Estado de Goiás**. Trabalho apresentado como atividade da disciplina de Hidrologia, pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia/ UFPB. João Pessoa (PB), 2017.

FUKUNAGA, D. C., **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo**. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Jerônimo Monteiro (ES), 2012. 98p.

GARRIDO, J. M. **Aplicação de modelo matemático de simulação com utilização de SIG à Bacia do rio Jiquiriçá - Bahia**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília (DF), 2003, 198p.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers**, St. Joseph, v. 50, n. 4, 2007, p. 1211-1250. Disponível em: [http://publications.iowa.gov/5419/1/paper\\_12744.pdf](http://publications.iowa.gov/5419/1/paper_12744.pdf). Acesso em: 2 fev. 2019.

GASSMAN, P. W; JHA, M; SECCHI, S; ARNOLD, J. Initial calibration and validation of the swat model for the upper Mississippi river basin. Pollution diffuse. **Conference Dublin**. Center of Agricultural and Rural Development. Iowa State University. v. 10B, p. 10-40. 2003. [https://www.researchgate.net/publication/267679409\\_Initial\\_calibration\\_and\\_validation\\_of\\_the\\_SWAT\\_model\\_for\\_the\\_upper\\_Mississippi\\_river\\_basin](https://www.researchgate.net/publication/267679409_Initial_calibration_and_validation_of_the_SWAT_model_for_the_upper_Mississippi_river_basin). Acesso em: 2 fev. 2019.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. IN: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p. 93-149-209.

GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. Erosões dos solos e a questão ambiental. IN: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004, p. 225-256.

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R, G, M. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005, p. 17-50.

HELFAND, S. M.; REZENDE, G. C. **Mudanças na distribuição espacial da produção de grãos, aves e suínos no Brasil: o papel do Centro-Oeste**. Planejamento e Políticas Públicas – PPP, n. 19, 1999 – ISSN: 01034138. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/93>. Acesso em: 19 fev. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico em geociências n. 5: Manual Técnico de Geomorfologia**. 2º Edição, 2009. 182p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv66620.pdf> . Acesso em: 9 mar. 2016.

IBGE – PPM. **Pesquisa da Pecuária Municipal**. Tabela 3939 – Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939#resultado>. Acesso em: 8 fev. 2019.

IRVEM A.; TOPALOGLU F.; UYGUR, V. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan river basin in Turkey. **Journal of Hydrology**. v. 336, n. 2, p. 30-37, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169406006652> Acesso em: 2 out. 2020.

JHA, M.; ARNOLD, J.; GASSMAN, P. Water Quality Modeling for the Raccoon River Watershed Using SWAT. **Center for Agricultural and Rural Development (CARD)** at Iowa State University, Publications. 50. 10.13031/2013.22660, 2006, p.1-26. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/5103830\\_Water\\_Quality\\_Modeling\\_for\\_the\\_Raccoon\\_River\\_Watershed\\_Using\\_SWAT](https://www.researchgate.net/publication/5103830_Water_Quality_Modeling_for_the_Raccoon_River_Watershed_Using_SWAT). Acesso em: 13 out. 2018.

KHALIDA, K.; ALIB, M. F.; RAHMANC, N. F. A.; MISPAND, M. R.; HARONE, S. H.; OTHMANA, Z.; BACHOKA, M. F. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. **International Conference on Efficient & Sustainable Water Systems Management toward Worth Living Development**. Procedia Engineering v. 162, 2016, p. 441–447. Disponível em: [https://ac.els-cdn.com/S1877705816333951/1-s2.0-S1877705816333951-main.pdf?\\_tid=6b53d905-69c6-4939-935d-67d6e2569e89&acdnat=1551382927\\_9751a5a3e4c22a04f27388ff8cb452c4](https://ac.els-cdn.com/S1877705816333951/1-s2.0-S1877705816333951-main.pdf?_tid=6b53d905-69c6-4939-935d-67d6e2569e89&acdnat=1551382927_9751a5a3e4c22a04f27388ff8cb452c4). Acesso em: 13 out. 2018.

KLINK, C.A., MACHADO, R.B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**. Volume 1, N° 1, 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228342037\\_A\\_conservacao\\_do\\_Cerrado\\_brasileiro](https://www.researchgate.net/publication/228342037_A_conservacao_do_Cerrado_brasileiro). Acesso em: 16 dez. 2018.

LACERDA FILHO, J. V. de; REZENDE, A.; SILVA, A. Programa Levantamento Geológicos Básicos do Brasil. **Geologia e Recursos Minerais do estado de Goiás e do Distrito Federal**. Escala 1:500.000. 2º Ed. Goiânia (GO): CPRM/METAGO/ UnB, 2000 (CD-ROM). Acesso em: 2 jul. 2017.

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos Estudos CEBRAP** v. 78, 2007, p. 15-21. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/nec/n78/03.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2019.

LESPOCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo (SP): Oficina de textos, 2002.

LESPOCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2 ed. São Paulo (SP): Oficina de Texto, 2010.

LIMA, J.E.F.W; SILVA, E.M; STRAUCH, M; LORZ, C. Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma Cerrado. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves (RS), 2013.

LINO, J. F. L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia do Rio Preto (SC) com o Modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) pela

Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis (SC), 2009. 150p. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/92750>. Acesso em: 6 jan. 2020.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. E.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistema e ciência da informação geográfica**. 3ª ed. Porto Alegre (RS): Bookman, 2013. 540p

LOPES, E. E.; NOGUEIRA, R. E. Proposta Metodológica para Validação de Imagens de Alta Resolução do Google Earth para a Produção de Mapas. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. Curitiba (PR): INPE, 2011, p.2308-2315. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/266032536\\_Proposta\\_Metodologica\\_para\\_Validacao\\_de\\_Imagens\\_de\\_Alta\\_Resolucao\\_do\\_Google\\_Earth\\_para\\_a\\_Producao\\_de\\_Mapas](https://www.researchgate.net/publication/266032536_Proposta_Metodologica_para_Validacao_de_Imagens_de_Alta_Resolucao_do_Google_Earth_para_a_Producao_de_Mapas). Acesso em: 30 mar. 2017.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2º ed. Oficina de textos. Campo Grande (MS): UNIDERP, 2006. 908p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=YNEtCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT811&dq=LIU,+W.+T.+H.+Aplica%C3%A7%C3%B5es+de+sensoriamento+remoto&ots=vybnz2KFVp&sig=udsD9qhhNNctpeYvlyapVmq44NI#v=onepage&q&f=true>. Acesso em: 15 jun. 2017.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese de doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo. Piracicaba (SP), 2002. 154 p. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-10072002-161200/publico/ronalton.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2020.

MAMEDE, L.; NASCIMENTO, M.A.L.S. do; FRANCO, M do S. **Geomorfologia**. In: PROJETO RADAMBRASIL. Folha SD.22 Goiás. Rio de Janeiro (RJ), 1981 (Levantamento de Recursos naturais, 25).

MAPBIOMAS - **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil**. Coleção 5 (1985-2019). Disponível em: [http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas\\_collection](http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas_collection). Acesso em: 1 mar. 2020.

MELO, H. A., CUNHA, J. B. L., NÓBREGA, R. L. B., RUFINO, I. A. A. e Galvão, C. O. Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG): Integração possível. **IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265885707\\_MODELOS\\_HIDROLOGICOS\\_E\\_SISTEMAS\\_DE\\_INFORMACAO\\_GEOGRAFICA\\_SIG\\_integracao\\_possivel](https://www.researchgate.net/publication/265885707_MODELOS_HIDROLOGICOS_E_SISTEMAS_DE_INFORMACAO_GEOGRAFICA_SIG_integracao_possivel). Acesso em: 12 dez. 2018.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo (SP): Oficina de Textos, 2007. 206p.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Org.). **PPCerrado** – Plano de Ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no Cerrado: 2ª fase (2014-2015). Brasília: MMA, 2014, 132 p.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Org.). **Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado 2013**. Brasília: MMA, 2015, 69 p.

MIRANDA, I. M.; NETO, W. A. **Mapeamento agropecuário das mesorregiões do estado de Goiás (1970 – 2010)**. Série de Textos para Discussão do Curso de Ciências Econômicas – FACE/UFG – TD (n. 039). NEPEC/FACE/UFG. Goiânia (GO), 2014. 64p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 4ª ed. Atual. e Ampl. Viçosa (MG): UFV, 2011. 422p.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, 2007, p.885-900

NASCIMENTO, M. A. L. Geomorfologia do Estado de Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**. Goiânia: UFG, vol.12, n.1, 1991.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - **Agricultural Research Service**; Blackland Research Center – Texas Agricultural Experiment Station, 2011. 647p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool**: theoretical documentation - version 2005. Texas: Blackland Research Center, 2005. 525p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool – user's manual - version 2000**. Temple: Blackland Research Center – Texas Agricultural Experiment Station, 2002, 458p.

NETTO, A. L. C. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. IN: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª ed. Rio de Janeiro (RJ): Bertrand Brasil, 1998, p. 93-148.

NRCS. Natural Resources Conservation Service. Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. In: **NRCS. Natural Resources Conservation Service**. National Engineering Handbooks Hydrology Chapters (Part 630). Washington, DC: USDA, 2009, p. 1-5.

OLIVERA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H., KOKA, S., AGRAWAL, A. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v.42, n.2, 2006, p.295-309. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1752-1688.2006.tb03839.x>. Acesso em: 3 mai. 2018.

PALHARES, J. C. P. Consumo de água na produção animal. **EMBRAPA - Comunicado Técnico 102** - ISSN 1981-206X. São Carlos (SP), 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/92401/1/PROCIJCPP2013.00165.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2019.

PAULA, J. L. **Pecuária Bovina de Corte em Goiás (1940-2009)**. Dissertação de Mestrado. Desenvolvimento e Planejamento Territorial, Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia (GO), 2011. 100p.

PAZ, A. R. Hidrologia Aplicada. **Texto básico**. Disciplina Ministrada na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, para o curso de graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia na unidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul (RS), 2004. 138p. Disponível em: [http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila\\_HIDROLOGIA\\_APLICADA\\_UE\\_RGS.pdf](http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UE_RGS.pdf) Acesso em: 5 abr. 2017.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia – SC. **Revista Árvore**, v.37, n.5. Viçosa (MG), 2013, p.859-869. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622013000500008&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622013000500008&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 8 out. 2019.

PEREIRA, R. C. G.; BRAGA, C. C.; PAZ, R. L. F. Estudo da Pluviometria no Estado de Goiás. Aplicando a Técnica de Análise Fatorial em Componentes Principais. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, v.16, 2010, Belém-PA. Anais eletrônicos. Belém: SBMET, 2010. Disponível em: [http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/363\\_65246.pdf](http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/363_65246.pdf). Acesso em: 12 ago. 2018.

PERH/GO. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Goiás (PERH/GO)**. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos de Goiás – SECIMA, 2015. Disponível em: [http://www.meioambiente.go.gov.br/images/imagens\\_migradas/upload/arquivos/2016-01/p05\\_plano\\_estadual\\_de\\_recursos\\_hidricos\\_revfinal2016.pdf](http://www.meioambiente.go.gov.br/images/imagens_migradas/upload/arquivos/2016-01/p05_plano_estadual_de_recursos_hidricos_revfinal2016.pdf) . Acesso em: 6 abr. 2019.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. Tese de doutorado pela Universidade Federal de Lavras. Lavras (MG), 2011. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3150>. Acesso em: 4 fev. 2020.

PNA - **Plano Nacional de Agroenergia (2006-2011)**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia. 2ª. ed. rev. Brasília (DF): EMBRAPA Informação Tecnológica, 2006. 110 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos (SP): Parêntese, 2007. 135p.

PPM-IBGE (2016) – **Produção da Pecuária Municipal**. Brasil. Ministério da Agricultura. Pecuária. Diretoria de Agropecuária, Recursos Naturais e Geografia. ISSN: 0101-4234. Periodicidade, (Anual para Downloads), v. 44. Rio de Janeiro (RJ): IBGE, 2016, p. 1-51. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=784>. Acesso em: 8 nov. 2018.

PPM-IBGE (2017) – **Produção da Pecuária Municipal**. Brasil. Ministério da Agricultura. Pecuária. Diretoria de Agropecuária, Recursos Naturais e Geografia. ISSN:

01014234. Periodicidade, (Anual para Downloads), v. 45. Rio de Janeiro (RJ): IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=784>. Acesso em: 8 nov. 2018.

PROBIO. Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - **Ministério do Meio Ambiente**. Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado. Relatório Final. Edital PROBIO 02/2004 Projeto Executivo B.02.02.109. Brasília (DF), 2007. 93p. Disponível em: [http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documento\\_s/relatorio\\_final.pdf](http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documento_s/relatorio_final.pdf). Acesso em: 6 jan. 2019.

QUEIROZ, F. A. Impactos da sojicultura de exportação sobre a biodiversidade do Cerrado. **Sociedade & Natureza**, 21 (2): 193-209. Uberlândia (MG), 2009. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1982-45132009000200013](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132009000200013). Acesso em: 7 jan. 2019.

RAPOSO, V. M. B. **Impacto na produção de sedimentos devido ao uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão Piçarrão, Triângulo Mineiro**. (Dissertação de Mestrado) Programa De Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia (MG), 2020. Disponível em: <http://clyde.dr.ufu.br/bitstream/123456789/28933/1/ImpactoProducaoSedimentos.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2020.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. Estimation of Soil Water Properties. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**. St. Joseph, v. 25, n. 5, 1982, p. 1316-1328.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas - relatório técnico parcial. MCT/INPE. São José dos Campos: INPE, 2000. 60p. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8911375-Modelos-hidrolgicos-para-gestao-ambiental.html>. Acesso em: 5 jan. 2019.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Discretização espacial de bacias hidrográficas. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 10, Foz do Iguaçu, abr. 2001. Anais. São José dos Campos: INPE, 2001. Sessão Técnica Oral. p. 485-492. Disponível em: <https://docplayer.com.br/57187830-Discretizacao-espacial-de-bacias-hidrograficas.html>. Acesso em: 5 jan. 2019.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina (DF): EMBRAPA-CERRADOS, 1998, p.89-166. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/554094/fitofisionomias-do-bioma-cerrado>. Acesso em: 6 set. 2008.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora** v. 2. Brasília (DF): EMBRAPA-CERRADOS, 2008. 876 p.

ROSSETTO, R. A cultura da cana, da degradação à conservação. **Revista Impacto Ambiental: Agricultura multifuncional**. Visão Agrícola n.1 jan/jun 2004, p. 80-85, 2004.

Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/cana-impacto-ambiental01.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2018.

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para predição de vazão na bacia do ribeirão Pipiripau**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Florestal - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia/ UnB. Brasília (DF), 2012. 114p. Disponível em: [http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012\\_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf). Acesso em: 27 nov. 2017.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV: A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field. **Journal of Soil Science**, v. 18, n. 1, 1967, p. 174-181.

SANO, E.E.; Dambrós, L.A.; OLIVEIRA, G.C.; BRITES, R.S. 2006. Padrões de cobertura de solos do estado de Goiás. In: Ferreira, L.G. (org.). **Conservação da biodiversidade e sustentabilidade ambiental em Goiás**. Goiânia (GO): SEMARH/AGMA, 2006. Cap. 3, p. 85-100. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/286763249\\_Padrees\\_de\\_cobertura\\_de\\_solos\\_do\\_Estado\\_de\\_Goias](https://www.researchgate.net/publication/286763249_Padrees_de_cobertura_de_solos_do_Estado_de_Goias). Acesso em: 10 mai. 2015.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado: estratégias e resultados**. Planaltina (DF): EMBRAPA Cerrados, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/570887/1/doc190.pdf> . Acesso em: 3 abr. 2017.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. **Mapeamento semidetalhado (escala 1:250.000) da cobertura vegetal antrópica do bioma Cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 43, n. 1, 2008, p.153-156.

SANTOS, J. Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá** (Pernambuco, Brasil) - Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco/ CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife (PE), 2015. 205p.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. Revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, I. L. N.; GOMES FILHO, R. R.; SANTOS, K. V.; MASSARANDUBA, W. M.; CARVALHO, C. M. Análise da condutividade hidráulica em um Argissolo vermelho amarelo no cultivo de milho e cobertura de Crotalária. **XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão (SE), 2015, p. 972- 977. Disponível em: <http://www.abid.org.br/cd-xxv-conird/PDF/164.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl.

Brasília (DF): Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 1 jul. 2020.

SAR - **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**, 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin?dropDownListEstados=10&dropDownListReservatorios=19128&dataInicial=01%2F01%2F1991&dataFinal=31%2F12%2F2017&button=Buscar>. Acesso em: 2 dez. 2018.

SARMENTO, L. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**. Tese de Doutorado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília (DF), 2010. 241p.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. 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. In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10 n. 4, 2005, p. 05-18. Disponível em: [www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id\\_arq=7318](http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=7318). Acesso em: 3 nov. 2017.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of Agronomy Journal**, v. 70, 2006, p. 1569-1578.

SEGPLAN-IMB. Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento. **Cenário Socioeconômico e Ambiental - 2015**. Goiânia (GO): Instituto Mauro Borges de estatísticas e estudos socioeconômicos (IMB), 2015. Disponível em: <http://www.sgc.goias.gov.br/upload/arquivos/2015-04/estudo-do-cenario-socioeconomico-e-ambiental.pdf> - Acesso em: 15 mar. 2018.

SEGPLAN-IMB. Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento. **Anuário Estatístico do Estado de Goiás - 2016**. Goiânia (GO): Instituto Mauro Borges de estatísticas e estudos socioeconômicos (IMB), 2016. Disponível em: <http://www.imb.go.gov.br/> - Acesso em: 15 mar. 2018.

SEGPLAN-IMB. Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento. **Anuário Estatístico do Estado de Goiás - 2017**. Goiânia (GO): Instituto Mauro Borges de estatísticas e estudos socioeconômicos (IMB), 2017. Disponível em: <http://www.imb.go.gov.br/> - Acesso em: 15 mar. 2018.

SIDRA-IBGE: **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (SIDRA)**, tabela 1612. para os anos 1991, 2000, 2006, 2011 e 2017, com os principais cultivos em área plantada, de lavoura temporária: arroz, cana-de-açúcar, feijão, milho, soja e sorgo. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612>. Acesso em: 3 nov. 2018.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no Cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar: o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás. **Ateliê Geográfico**, v. 9, n. 2. Goiânia (GO), 2015, p.114-135.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.12, Brasília (DF), 2005,

p.1223-1230. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/pab/v40n12/27513.pdf>. Acesso em: 2 out. 2019.

SILVA, E. B. **A dinâmica socioespacial e as mudanças na cobertura e uso da terra no bioma Cerrado**. Tese de doutorado pelo Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geografia/ Instituto de Estudos Sócio-Ambientais da Universidade Federal de Goiás. Goiânia (GO), 2013. 148p.

SILVA, F. D. M. **Aplicabilidade do modelo Swat na simulação de vazão em bacia hidrográfica do Cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília. Brasília (DF), 2016. 90p. Disponível em: [http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/22452/1/2016\\_FelippeDami%C3%A3oMellod%20iSilva.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/22452/1/2016_FelippeDami%C3%A3oMellod%20iSilva.pdf). Acesso em: 18 mai. 2018.

SILVA, M. M. **Estudos dos efeitos da implantação de uma Usina Hidrelétrica sobre comunidades de mamíferos do Cerrado**. Belo Horizonte (MG): Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ECMVS - Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre do Instituto de Ciências Biológicas, 2014. 58p. <http://pos.icb.ufmg.br/pgecologia/dissertacoes/D310%20-%20Marcos%20Martins.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2017.

SILVA, M. K. A.; ROSA, R. Estudo da vazão e construção de cenários a partir das mudanças de uso da terra e cobertura vegetal nativa da bacia hidrográfica do alto curso do Rio Misericórdia – MG. **XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada – I Congresso Nacional de Geografia Física. Os Desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. Instituto de Geociência – UNICAMP. DOI - 10.20396/sbgfa.v1i2017.2591 - ISBN 978-85-85369-16-3. Campinas (SP), 2017, p. 5816-5824. Disponível em: [ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2591/2115](https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2591/2115). Acesso em: 15 dez. 2018.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica**. In: TUCCI, C. E. M. (org.). Hidrologia: Ciência e aplicação. Porto Alegre: UFRGS, 1998, p. 35-51.

SRINIVASAN, R., ARNOLD, J.G. Integration of the basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, v. 30, n. 03, 1994, p. 453-462.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2ª ed. Brasília (DF): Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.

SOUSA, S. B.; ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G. Modelagem e estimativa dos tipos de relevo das pastagens brasileiras. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. INPE. João Pessoa (PB), 2015, p.1090-1096. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0201.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2018.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. **A avaliação da geração de sedimentos ao longo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Carmo**. Potencial natural de erosão, feições morfológicas e cicatrizes de movimentos de massa. **Revista Geociências UNESP**, v. 36, n. 2, 2017, p. 285–299. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/11608>. Acesso em: 9 mai. 2018.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes fluviais**. 2ª Ed. Florianópolis (SC): UFSC/UFPR, 1990. 178p.

STEYAERT, L.T. **A perspective on the state of environmental simulation modeling**. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. Environmental modeling with GIS. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 3, p. 16-30.

STONE, L. F.; SARTORATO, A. (Org.). **O cultivo do feijão**: recomendações técnicas. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. Brasília (DF): EMBRAPA-SPI, 1994. 83p. (EMBRAPA-CNPAF. Documento, 48). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/202889/o-cultivo-do-feijao-recomendacoes-tecnicas>. Acesso em: 28 jul. 2019

TEIXEIRA, C. A. **Apostila de hidrologia aplicada**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná/UTFPR Campus Curitiba - Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC. Curitiba, 2010. 133p. Disponível em: [https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2014/03/hidro\\_celimar.pdf](https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2014/03/hidro_celimar.pdf). Acesso em: 6 jan. 2019.

TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S.M.B. de; MELFI, A.J. Capítulo 8: Da Rocha ao Solo: Intemperismo e pedogênese. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2ª ed. São Paulo: IBEP Editora Nacional-Conrad, p.128-239, 2009. Disponível em: [https://midia.atp.usp.br/impressos/lic/modulo02/geologia\\_PLC0011/geologia\\_top07.pd](https://midia.atp.usp.br/impressos/lic/modulo02/geologia_PLC0011/geologia_top07.pd). Acesso em: 8 mai. 2018.

TERSTRIEP, M. L.; STALL, J. B. The Illinois Urban Drainage Area Simulator, ILLUDAS. **Illinois State Water Survey, Urbana, Bulletin** v. 58, 1974. Disponível em: <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/B/ISWSB-58.pdf>. Acesso em: 4 mai. 2018.

TSVETSINSKAYA, E. A.; SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; DICKINSON, R. E.; ZENG, X.; LUCHT, W. Relating MODIS-derived surface albedo to soils and rock types over Northern Africa and the Arabian peninsula. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 9, 2002, p. 67-1-67-4.

TUCCI, C. E. M. **Regularização de vazões**. 1 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 2002.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto alegre – RS. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 652p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto alegre – RS. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005. 678p.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. Dissertação de Mestrado pelo Instituto de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), 2009. 129p.

VALENTE, C. R. Caracterização geral e composição florística do Cerrado. In: GUIMARAÕES, L. D.; SILVA, M. A. D.; ANACLETO, T. C. (Org.). **Natureza viva Cerrado: caracterização e conservação**. Goiânia (GO): Ed. UCG, 2006, p.21-44.

VALERIANO, M. M., Dados topográficos. In: FLORENZANO, Tereza Gallotti. (Org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo (SP): Oficina de Textos, 2008, p.72-104.

VEIGA, A. M. **Calibração hidrossedimentológica do modelo SWAT na bacia hidrográfica do córrego Samambaia, Goiânia – GO**. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA) da Universidade Federal de Goiás. Goiânia (GO), 2014. 130p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources**. Washington D.C.: USDA, 1975, p. 244–252.

WINCHELL, M., SRINIVASAN, R., DI LUZIO, M., ARNOLD, J.G. ArcSWAT interface for SWAT2009 User's guide. **USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center**, Temple, Texas, 2010. 431p.

## APÊNDICE A - Metodologia do cenário hipotético otimista de uso do solo

Com vista ao planejamento do uso do solo aplicou uma metodologia para criar o cenário otimista, tomando-se por base a condição atual do mapeamento de uso do solo de 2017 (item 3.3), o que refletia melhor as mudanças no uso do solo ocorridas ao longo dos vinte e seis anos. Para análise desse cenário hipotético consistiu em estimar a influência da vegetação sobre os processos hidrossedimentológicos.

O cenário otimista considerado ideal manteve-se as classes de vegetação nativa existente e previu um acréscimo de remanescentes de Cerrado (cerradão/floresta, cerrado típico e mata ciliar) sob as classes antropizadas (agricultura, pastagem, solo exposto e urbana), usando o ambiente SIG do *software* ArcGis 10.4 e os procedimentos metodológicos descritos por Arnesen et al. (2015) e Bacani et al. (2015).

Nesse *software* gerou-se a estrutura vetorial formada pela rede de drenagem, utilizando o modelo digital de elevação (MDE) com os respectivos níveis hierárquicos do sistema fluvial ( 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª ordem) e a proposta de Strahler (1952) para determinação da ordem dos canais fluviais (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Em seguida foi necessário estimar a média da largura das ramificações do sistema fluvial para a geração das zonas tampão das Áreas de Preservação Permanente (APP), estabelecida pelo Código Florestal (Lei Nº 12.651/2012) (BRASIL, 2012). E como não havia essa informação referente a largura dos canais da bacia em estudo, utilizou-se os dados procedidos da simulação do modelo SWAT, que primeiramente utiliza-se como base os atributos topográficos derivados do MDE, como: a topografia, declividade, perfil de curvatura para o processo de análise morfométrica.

Nesse processo, o modelo define a direção do fluxo, fluxo acumulado e gera a rede drenagem, com base nas características topográficas do terreno. A partir dessas características do terreno o modelo assume que os canais fluviais traçados possuem formato trapezoidal e estabelece dados de comprimento, largura e profundidade dos canais fluviais (NEITSCH et al., 2011; CARVALHO, 2014). Essas informações são armazenadas na tabela de atributos do parâmetro de entrada, *shapefile Reach*, a qual é especificada na coluna Wid2 (*Stream reach Width* (m)), onde estima-se a largura dos canais ao nível da água através da simulação do modelo (NEITSCH et al., 2011). Em seguida estabelece a estimar da média da largura de cada hierarquia fluvial. Os dados estão apresentados na Tabela 1a:

Tabela 1a – Relação hierarquia, quantidade de canais fluviais, extensão dos cursos d’água, as médias da largura dos canais e a faixas marginais das APPs.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Ordem (Strahler)	Quantidade de canais fluviais	Extensão dos cursos d’água (km)	Média da largura dos canais (m)	(4) / 2	Área de Preservação Permanente (APP) (m)	Área APP km <sup>2</sup>
Nascentes	10.979	-----	----	----	50	63,07
1ª ordem	10.979	26.863,35	8,79	4,40	30	622,53
2ª ordem	4.857	4.828,20	21,05	10,53	50	597,36
3ª ordem	728	2.250,79	92,53	46,27	100	440,69
4ª ordem	152	657,01	92,53	46,27	100	194,99
5ª ordem	45	113,50	92,53	46,27	100	549,19
6ª ordem	1	693.33	389,32	194,66	200	201,99

Fonte: Dados são adaptados à rotina do ArcGis 10.4. ORG.: FONSECA, C. A. B. (2020).

A fim de se aplicar a metodologia descrita de acordo com determinação do código florestal brasileiro (Lei N° 12.651/2012), separou-se cada sistema fluvial (1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª ordem). Em seguida com os dados da média de largura dos canais definidas na coluna (4) da Tabela 1a, gera-se os polígonos dos vetores lineares da rede de drenagem de cada sistema fluvial. A partir do centroide do comprimento dos cursos d’água, transforma-se os vetores lineares em polígonos, usando a ferramenta *Buffer*, presente o módulo *Proximity* da extensão *Analysis Tools*. As informações estão definidas no campo da coluna (5) da Tabela 1a, onde indica os dados da metade da média de largura dos canais (unidade em metros).

Após poligonizar todo o sistema fluvial, em seguida define-se a dimensão da APP que varia de acordo com a largura dos rios. E para atender a determinação do Código Florestal (2012), que estabelece legalmente uma faixa mínima de proteção as florestas e as demais formas de vegetação natural situada no entorno das nascentes, topo de morro e ao longo dos cursos d’água. Para definir essas faixas utilizou-se do mesmo método citado anteriormente, através da ferramenta *Buffer* e o campo da coluna (6) da Tabela 1a, a qual considera a dimensão mínima da APP e consta no parágrafo I do Artigo 4º (BRASIL, 2012):

- Cinquenta metros de diâmetro no entorno das nascentes e dos olhos d’água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica;
- Trinta metros, para os cursos d’água de menos de dez metros de largura;
- Cinquenta metros, para os cursos d’água que tenham de dez a cinquenta metros de largura;

- Cem metros, para os cursos d'água que tenham de cinquenta a duzentos metros de largura;
- Duzentos metros, para os cursos d'água que tenham de duzentos a seiscentos metros de largura;
- Quinhentos metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a seiscentos metros.

Para gerar a APP das nascentes utilizou o vetor pontual, criado a partir dos vértices de todos os cursos d'água de 1ª ordem e define uma zona de influência (50 m) em torno de cada feição, utilizando na operação a ferramenta *Buffer*, presente no módulo *Features* da extensão *Data Management Tools/ Feature Vertices To Points*, com opção *START* e a informação contida no campo da coluna (6) da Tabela 1a.

Para a instituição de APP de topos de morro, prescrito no inciso IX do art. 4º do novo Código Florestal (2012), define a partir da superfície que tenha relação entre o topo e a base de morro, com declividade média maior que vinte cinco graus (ou > 25%). E para seguir a rotina de simulação do modelo SWAT, definiu a segregação dessas áreas com declividade superior a 20%. Para isso, utilizou os procedimentos metodológicos de Arnesen (2015). Na primeira etapa, gera-se o *raster* de declividade (em porcentagem), derivado do MDE. Em seguida obteve-se o desmembramento das áreas com declividade superior a 20%, com o ajuste da simbologia da camada. Em seguida fez-se a reclassificação para novo *raster*; e depois a conversão para *shapefile* que permitiu a eliminação das feições das encostas com declividade inferior a 20% e, posteriormente foram incluídas na classe de Cerradão/Floresta.

Determinou-se nesse cenário que as faixas de declives entre 5% e 10% que já se encontravam suprimidas pelas atividades agropecuárias e solo exposto fossem transformadas hipoteticamente em “cerrado típico”.

Diante desses procedimentos metodológicos criados nessa pesquisa pode-se gerar uma reconstituição hipotética da vegetação natural do bioma Cerrado. Ao final, todo o conjunto de feições criados foram reunidos em um único arquivo *shapefile* contendo: a vegetação natural existente, as APPs, a reconstituição parcial hipotética da vegetação natural e de áreas suprimidas pelas atividades antrópicas (agricultura, pastagem e urbana). Para cada categoria, relacionou-se um número de controle (conforme a Tabela 1b) para associar as diversas informações contidas no banco de dado do simulador do modelo

SWAT. E posteriormente, converteu-se a base cartográfica do cenário (Figura 53), de formato vetorial para o formato *raster*, utilizando o mesmo *software*.

Tabela 1b - Classes de uso do solo para cenário otimista na BHRA, associado as classes correspondentes ao banco de dados do modelo SWAT.

<b>Classes de uso do solo</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Classes de uso correspondentes ao modelo SWAT</b>
Área de agricultura	<i>crop</i>	AGRL ( <i>Agricultural Land</i> )
Área de pastagem	<i>crop</i>	PAST ( <i>Pasture</i> )
Área urbana	<i>urban</i>	URLD ( <i>Residential-Low Density</i> )
Cerrado/Floresta	<i>crop</i>	FRSD ( <i>Forest-Deciduous</i> )
Cerrado Típico	<i>crop</i>	FRST ( <i>Forest-Mixed</i> )
Mata Ciliar	<i>crop</i>	FRSE ( <i>Forest-Evergreen</i> )

Fonte: Adaptada à rotina do modelo SWAT e conforme a classificação apropriada para o uso do solo do cenário otimista. Org.: FONSECA, C. A. B. (2020).