

Trabalho de Graduação

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO DE SUB-BACIAS DO ATLÂNTICO LESTE NO
ESTADO DA BAHIA, BRASIL**

Mikaella Cardoso Uemura

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang
Coorientador: Prof. Dr. Roger Dias Gonçalves

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

MIKAELLA CARDOSO UEMURA

ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO DE SUB-BACIAS DO ATLÂNTICO LESTE NO
ESTADO DA BAHIA, BRASIL

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro (SP)

2022

U22a

Uemura, Mikaella Cardoso

Análise do balanço hídrico de sub-bacias do Atlântico Leste no Estado da Bahia,
Brasil / Mikaella Cardoso Uemura. -- Rio Claro, 2022

61 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro

Orientador: Chang Hung Kiang

Coorientador: Roger Dias Gonçalves

1. Balanço hídrico. 2. Atlântico Leste. 3. Semiárido. 4. Análise de tendência. 5.
Mann-Kendall. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas,
Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MIKAELLA CARDOSO UEMURA

ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO DE SUB-BACIAS DO ATLÂNTICO LESTE NO
ESTADO DA BAHIA, BRASIL

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

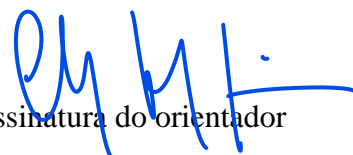
Dr. Miguel Angel Alfaro Soto

Dr. Elias Hideo Teramoto

Rio Claro, 16 de dezembro de 2022.



Assinatura da aluna



Assinatura do orientador

Aos professores.

Suas ações mudam vidas e transformam a realidade.

AGRADECIMENTOS

Esses agradecimentos começam pela pessoa que inspirou com apenas uma conversa meu ingresso na Universidade Pública, que sempre me deu espaço para decidir meu caminho, e que deu base para me tornar Engenheira Ambiental. À minha mãe, Rita de Cassia Cardoso Costa, professora e diretora escola pública.

À Gabriela Barbosa da Costa, pessoa que tornou a publicação do tema do presente trabalho possível. Agradeço por todas as horas dedicadas, pelos conhecimentos e dúvidas compartilhadas, além de toda parceria e amizade durante e após esse período intenso.

Ao Prof. Dr. Roger Dias Gonçalves por todos seus ensinamentos dentro e fora de sala de aula, por oferecer a oportunidade de realizar tal projeto, por ser um guia e uma luz em momentos de dúvidas e por aceitar me orientar neste trabalho de conclusão de curso.

Ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang por aceitar ser meu orientador e por fazer parte da construção de um imenso legado na ciência e na UNESP.

Ao MSc. Atila Ferreira Pessoa pelas horas de conversa sobre estatística de parâmetros ambientais e uma explicação incrível sobre o *Mann-Kendall Trend Test*, que fez toda a diferença na composição bibliográfica desse trabalho.

À minha família por acreditar tanto em mim e por todo o suporte, especialmente durante o final do meu período acadêmico.

Ao Rodolfo Rodrigues da Costa por todo o suporte e apoio essenciais para a conclusão desse trabalho.

Aos meus amigos Mauricio Pane (Tone), Karina Chung (Mulan), Gabriela Barbosa da Costa (Caloura), Beatriz Cavalheri (Poli), Soraya Carvalho (Xavier), Natalia Garcia e Ariel Cardoso (Omo) que sempre me lembram a graça e a alegria de ser parte da Engenharia Ambiental de Rio Claro.

À República Tatu do Bem, que de perto acompanhou toda minha trajetória ao longo dos anos em Rio Claro e que hoje vejo seguir por belas gerações.

O presente trabalho foi realizado com apoio tecnológico e intelectual do Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC).

Um dia... Sim, quando as secas desaparecessem e tudo andasse direito... Seria que as secas iriam desaparecer e tudo andar certo? Não sabia. (GRACILIANO RAMOS, 2012, p. 25).

RESUMO

A crescente demanda dos diversos usos da água evidencia a necessidade de uma constante melhora em sua gestão e conservação. Como recurso vital para sobrevivência e desenvolvimento humano, dentre os mais diversos usos, é necessário o conhecimento da disponibilidade da água e suas tendências para uma adequada gestão - conhecimento especialmente necessário em regiões que sofrem com intensas secas, como a região do semiárido que se estende pela porção norte da Região Hidrográfica do Atlântico Leste (Brasil). O balanço hídrico foi estimado nas sub-bacias do Rio Inhambupe, Rio Pojuca e Rio Paraguaçu por dados de vazão, precipitação e evapotranspiração real de séries históricas disponíveis no período de 2000 a 2014. Quanto aos resultados para cada bacia, foram calculados seus respectivos balanços hídricos e realizadas a tendências de seus componentes com a aplicação do teste de tendência não paramétrico “Mann-Kendall Test”.

Palavras chave: Balanço hídrico. Semiárido. Análise de tendência. Mann-Kendall. Atlântico Leste.

ABSTRACT

The growing demand for the diverse water uses highlights the need for a constant management and conservation improvement. As a vital resource for survival and human development in the most diverse uses, it is necessary to know the water availability and its trends for adequate management – knowledge especially necessary in regions that suffer from intense droughts, such as the semi-arid of Atlântico Leste (Eastern Atlantic) Hydrographic Region northern portion, Brazil. The water balance was estimated in the sub-basins of the Inhambupe River, Pojuca River and Paraguaçu River using flow, precipitation and real evapotranspiration data from historical series available from 2000 to 2014. As for the results for each basin, their respective balances were calculated, and the trend of its components was determined by the non-parametric “Mann-Kendall” trend test.

Keywords: Water balance. Semi-arid. Trend analysis. Mann-Kendall. East Atlantic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização das áreas de estudo no contexto da Região Hidrográfica do Atlântico Norte e bacias hidrográficas.....	20
Figura 2 – Localização das áreas de estudo no contexto dos biomas da Caatinga e Mata Atlântica.	23
Figura 3 – Localização das áreas de estudo no polígono do semiárido.....	24
Figura 4 – Mosaico de Modelo Digital de Elevação (SRTM 90m).....	28
Figura 5 – Ilustração da execução da ferramenta Fill.....	29
Figura 6 – Codificação da ferramenta Flow Direction.....	30
Figura 7 – Determinação do acúmulo de fluxo.....	31
Figura 8 – Vetorização de um raster de rede linear originados por Con e Flow Accumulation.....	32
Figura 9 – Determinação da área de contribuição de uma bacia.....	32
Figura 10 – Localização das estações fluviométricas.	33
Figura 11 – Aquisição dos dados TRMM para validação com os valores de precipitação total acumulada das estações pluviométricas. Exemplo do TRMM de janeiro de 2008.....	36
Figura 12 – Aquisição dos dados indiretos MOD16 de evapotranspiração real mensal. Exemplo de janeiro de 2008.	38
Figura 13 – Bacias hidrográficas delimitadas para as três estações fluviométricas.	46
Figura 14 – Resultado gráfico e numérico R ² de dados de precipitação mensal para validação de dados indiretos (produto TRMM 3B43).....	47
Figura 15 – Gráficos de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação de armazenamento da sub-bacia do Rio Paraguaçu entre março de 2005 e junho de 2013.....	50
Figura 16 – Gráficos de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação de armazenamento da sub-bacia do Rio Pojuca entre dezembro de 2000 e dezembro de 2014.....	51
Figura 17 – Gráficos de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação de armazenamento da sub-bacia do Rio Inhambupe entre dezembro de 2000 e dezembro de 2014.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças nos valores de dados necessários para calcular a estatística S de Mann-Kendall para testar a tendência da variação do armazenamento. Exemplo da Bacia Tiririca.....	42
Tabela 2 – Valores de $Z_{1 - \alpha/2}$ para diferentes níveis de significância α	43
Tabela 3 – Saldo acumulado dos componentes de balanço hídrico das sub-bacias dos rios Paraguaçu, Pojuca e Inhambupe.....	48
Tabela 4 – Médias dos componentes do balanço hídrico das sub-bacias dos rios Paraguaçu, Pojuca e Inhambupe.	49
Tabela 5 – Resultados estatístico de parâmetros e de tendência de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento da sub-bacia do Rio Paraguaçu. 54	
Tabela 6 – Resultados estatístico de parâmetros e de tendência de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento da sub-bacia do Rio Pojuca.....	55
Tabela 7 – Resultados estatístico de parâmetros e de tendência de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento da sub-bacia do Rio Inhambupe.....	55
Quadro 1 – Dados utilizados no estudo.....	25
Quadro 2 – Dados das estações fluviométricas selecionadas.	26
Quadro 3 – Dados das estações pluviométricas selecionadas para validação dos dados indiretos de precipitação TRMM 3B43.	34
Quadro 4 – Relação dos pixels não vegetados para evapotranspiração global mensal.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS

CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
ESDS	<i>Earth Science Data Systems</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GES DISC	<i>Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center</i>
LEBAC	Laboratório de Estudo de Bacias
MDE	Modelo Digital de Elevação
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NTSG	Numerical Terradynamic Simulation Group
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
SCF	<i>Science Compute Facility</i>
SIG	Sistema de Informações Georreferenciadas
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TFPW	<i>Trend Free Pre-Whitening</i>
TRMM	Tropical Rainfall Measurement Mission
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Balanço Hídrico	16
3.2	Análise de tendência	17
5	MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....	25
5.1	Aquisição de dados diretos de vazão	26
5.2	Delimitação das áreas das sub-bacias do estudo.....	27
5.3	Aquisição, manuseio e validação de dados diretos e indiretos de precipitação	34
5.4	Aquisição e manuseio dos dados indiretos de evapotranspiração real	37
5.5	Balanço Hídrico	39
5.6	Teste de Mann-Kendall.....	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6.1	Áreas das sub-bacias do estudo	45
6.2	Validação dos dados de precipitação do TRMM.....	47
6.3	Balanço hídrico das sub-bacias.....	48
6.4	Teste de tendência de Mann-Kendall	53
7	CONCLUSÕES.....	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A água fornece suporte fundamental à vida, além de ser insumo essencial para diversos fins, como industrial, agrícola, humano, animal, transporte, lazer e geração de energia. De acordo com o relatório da ANA (2021), em 2020 o total do uso consultivo setorial do Brasil foi de 1.947,55 m³/s. Somada com a Evaporação Líquida, esse valor sobe para 2.831,65 m³/s. A maior parte é representadas pela Irrigação (34%), Evaporação Líquida dos Reservatórios (31%) e Abastecimento Urbano (17%). Em 2021, a Agência Nacional das Águas (ANA) estimou um aumento de 42% das retiradas de água até 2040. Esses dados reforçam a necessidade de ações de planejamento para que os usos se desenvolvam com segurança hídrica, principalmente quando considerados os efeitos das mudanças climáticas no ciclo da água. Em um cenário de crescente demanda, é imprescindível planejamento e técnicas adequadas de manejo hídrico, pois a gestão das regiões hidrográficas impacta diretamente a disponibilidade hídrica da bacia que as compreende e, conseqüentemente, a população e as diversas atividades que dependem destas águas. É necessária a aplicação profissional dos conhecimentos fundamentais sobre o ciclo hidrológico para garantir a manutenção da qualidade e quantidade da água (CARVALHO et al, 2012). O balanço hídrico, que contabiliza as transformações do ciclo hidrológico na área, permite entender a dinâmica da água das bacias em relação às mudanças que experimentam em seu entorno (MOREIRA et al, 2019).

Segundo a ANA (2019), na região Atlântico Leste, diversos corpos hídricos estão enquadrados como críticos em relação a quantidade de água. Os baixos índices de precipitação, a irregularidade do seu regime, temperaturas elevadas durante todo ano, entre outros fatores, como a estiagem prolongada, contribuem para os reduzidos valores de disponibilidade hídrica observados no Nordeste brasileiro.

Crucial em termos de disponibilidade de água (e mapeamento de eventos climáticos extremos, como secas e inundações) e gestão dos recursos hídricos, entende-se por balanço hídrico o resultado da quantidade de água que entra e sai de um sistema, em um determinado intervalo de tempo. Neste cálculo, a bacia hidrográfica é o melhor espaço de avaliação do comportamento hídrico, pois tem definido o espaço de entrada, o local de saída e a seção de rio que define a bacia hidrográfica (TUCCI, 1993).

As bacias dos rios Inhambupe, Pojuca e Paraguaçu, delimitadas para o presente trabalho, encontram-se no estado da Bahia, região hidrográfica Atlântico Leste e encontram-se sob coordenação dos Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH) Recôncavo Norte e Paraguaçu. Com dados obtidos através do HidroWeb, sistema para visualização e disponibilização de dados do Sistema de Informações Hidrológicas – HIDRO, os exutórios para o estudo são determinados pelas estações fluviométricas Corte Grande (situada no município de Esplanada, abrangendo 4380 km² de área de drenagem), Tiririca (município de Camaçari, com 4700 km² de área de drenagem) e UHE Pedra do Cavalo Barramento (município de Governador Mangabeira, com 53620 km² de área de drenagem). Correspondendo à um total de 62.700 km², a área de drenagem abrange cerca de 120 municípios e 3.219.365 de pessoas (IBGE, 2020).

Mesmo diante do histórico de estresse hídrico conhecido na região nordeste, há uma escassez de estudos nas Bacias Inhambupe, Pojuca e Paraguaçu, quanto ao volume de água disponível nesta região. Esse estudo propõe fornecer um diagnóstico quantitativo do volume de água que circula na região, de maneira a fornecer subsídios técnicos indispensáveis para o planejamento e manejo sustentável dos recursos hídricos.

2 OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo é realizar o balanço hídrico e o teste de tendência hídrica de três sub-bacias localizadas na Região Hidrográfica do Atlântico Leste, especificamente das bacias do Rio Paraguaçu, Recôncavo Norte e Rio Inhambupe. A realização do balanço hídrico em escala mensal quantifica os componentes de entrada e saída da bacia, enquanto o teste de tendência analisa se a série apresentou crescimento ou decréscimo de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento. Esses dados produzidos e analisados contribuem para a região de estudo sob uma perspectiva de análise de riscos de disponibilidade e gestão hídrica.

Um dos objetivos a Política Nacional de Recursos Hídricos é assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos. Para isso, é também prevista a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (BRASIL, 1997). A região determinada possui distintas características quando à disponibilidade hídrica e esse trabalho propõe entregar uma análise da disponibilidade hídrica na região entre 2000 e 2014 com base nos componentes de entrada e saída de balanço hídrico. Para cumprimento dessa proposta, seis objetivos específicos foram definidos:

1. Delimitar os limites físicos da área de contribuição das sub-bacias, com base em estações fluviométricas que possuem considerável série histórica mensal sem ausência de medições.
2. Validar o uso de dados indiretos de precipitação mensal obtidos de sensoriamento remoto.
3. Adquirir séries mensais de evapotranspiração real provenientes de sensoriamento remoto.
4. Determinar o balanço hídrico para cada sub-bacia e a variação do armazenamento hídrico, resultante do uso combinado de dados abertos de componentes de entrada e saída hídrica e *software* de Sistema de Informações Geográficas (SIG).
5. Determinar as tendências de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento hídrico.
6. Comparar o cenário obtido com a contextualização regional e os riscos associados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No decorrer desta seção serão abordados os conceitos de balanço hídrico e seus componentes em uma bacia hidrográfica e o método de análise de tendência hidrológica.

3.1 Balanço Hídrico

O ciclo hidrológico é um sistema fechado com armazenamento de água que circula na superfície do terreno, no solo, no subsolo e na atmosfera (TUCCI, 1993). O intercâmbio entre as circulações da superfície terrestre e da atmosfera no sentido superfície-atmosfera se refere ao fluxo de água na forma de vapor como decorrência dos fenômenos de evaporação e de transpiração, enquanto no sentido atmosfera-superfície a transferência de água ocorre em qualquer estado físico, como as precipitações de chuva, que parte é evaporada e parte escoada para os oceanos (SILVEIRA, 2001).

O ciclo hidrológico é normalmente estudado na fase terrestre, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica, uma área de captação natural da água da precipitação que converge os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. Tucci (1993) descreve composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório. Ou seja, é um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e saída é o volume de água que pode ocorrer através de eventos como evapotranspiração, vazão, escoamentos, infiltração e outros.

Existem conjuntos de dados globais de balanço hídrico climatológico, mas não apontam ser uma melhor escolha para estudos regionalizados, no quesito de gestão hídrica local (ABATZOGLOU, 2018). O método de balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) calcula um balanço hídrico cíclico mensal climático. É frequentemente usado em regiões com baixa disponibilidade de dados devido a seus baixos requisitos de entrada e às estimativas coerentes dos componentes do balanço hídrico (DOURADO, 2010). No procedimento inicial de cálculo, assume-se que o armazenamento de água no solo está na capacidade de campo no final do último mês da estação chuvosa, a menos que o clima seja semiárido, pois ocorre o caso de o armazenamento de água no solo ser menor do que a capacidade de retenção de água no solo. Para Tucci (1993), o balanço hídrico possibilita a determinação da evapotranspiração com base na equação da continuidade do lago ou

reservatório. É um método simplificado, mas ainda adequado para um cenário de baixa disponibilidade de dados específicos, como orvalho, vapor d'água, irrigação, infiltração e escoamentos. Além disso, possibilita o cálculo do balanço hídrico para locais de climas semiáridos.

Embora seja difícil estimar evapotranspiração real em grande escala e por um longo período, existem vários conjuntos de dados de evapotranspiração real globais disponíveis com incerteza associada a várias suposições em relação a seus algoritmos, parâmetros e entradas. Os produtos de evapotranspiração do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) são utilizados em estudos hidrológicos. Elnashar (2021) propõe em seu estudo de atual evapotranspiração global o uso de produto evapotranspiração real sintetizado de longo prazo e Rudorff (2007) apresenta as possíveis aplicações no Brasil do sensor de extensão intercontinental.

Assim como os dados de evapotranspiração, é difícil obter dados de precipitação em áreas de grande escala, como uma bacia hidrográfica pela questão de distribuição espacial dos pluviômetros. Mas existem vários conjuntos de dados de precipitação global disponíveis em uma escala de tempo longa. A validação do produto TMPA 3B43 Versão 7 *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) realizada por ERAZO (2018) aponta que dados de precipitação TRMM mensal possuem características mais realistas se comparadas com outros conjuntos de dados. Ainda, possível validar os dados remotos de precipitação média através da correlação com dados de pluviômetros presentes na mesma área ou bacia (CASIMIRO, 2009).

Dados de vazão e precipitação medidos *in situ*, no local do evento, podem constituir uma importante fonte de informações como série histórica. Dados fornecidos pela Agência Nacional de Água (Brasil) são utilizados em estudos de análises hidrológicas de séries históricas (GONÇALVES, 2016; GONÇALVES, 2018).

3.2 Análise de tendência

Em contexto de mudança climática e seus efeitos nos eventos hidrológicos, a detecção de tendências em dados hidrológicos tem se apresentado importante para discussões e tomada de ações. O teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), é amplamente utilizado para detectar as tendências em séries temporais hidrológicas e suas significâncias de tendência em um grau de confiança.

O teste requer que os dados de amostra sejam serialmente independentes. A capacidade do teste de avaliar corretamente a significância da tendência é afetada quando os dados da amostra são correlacionados serialmente. Por isso, diversos estudos modificam para levar em conta o efeito de escala dos eventos hidrológicos (HAMED, 2008; DOS SANTOS, 2020; YUE, 2004).

Diante disso, serão calculadas as tendências de todos os parâmetros relacionados à disponibilidade hídrica nas bacias através do significativo número de dados adquiridos nas séries históricas entre os anos de 2000 e 2014, para precipitação, evapotranspiração, vazão e volume armazenado, utilizando o Teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Este é um método utilizado para determinar se a série de dados sequenciada possui uma tendência estatisticamente significativa, apresentando o cenário temporal do parâmetro referente à série testada.

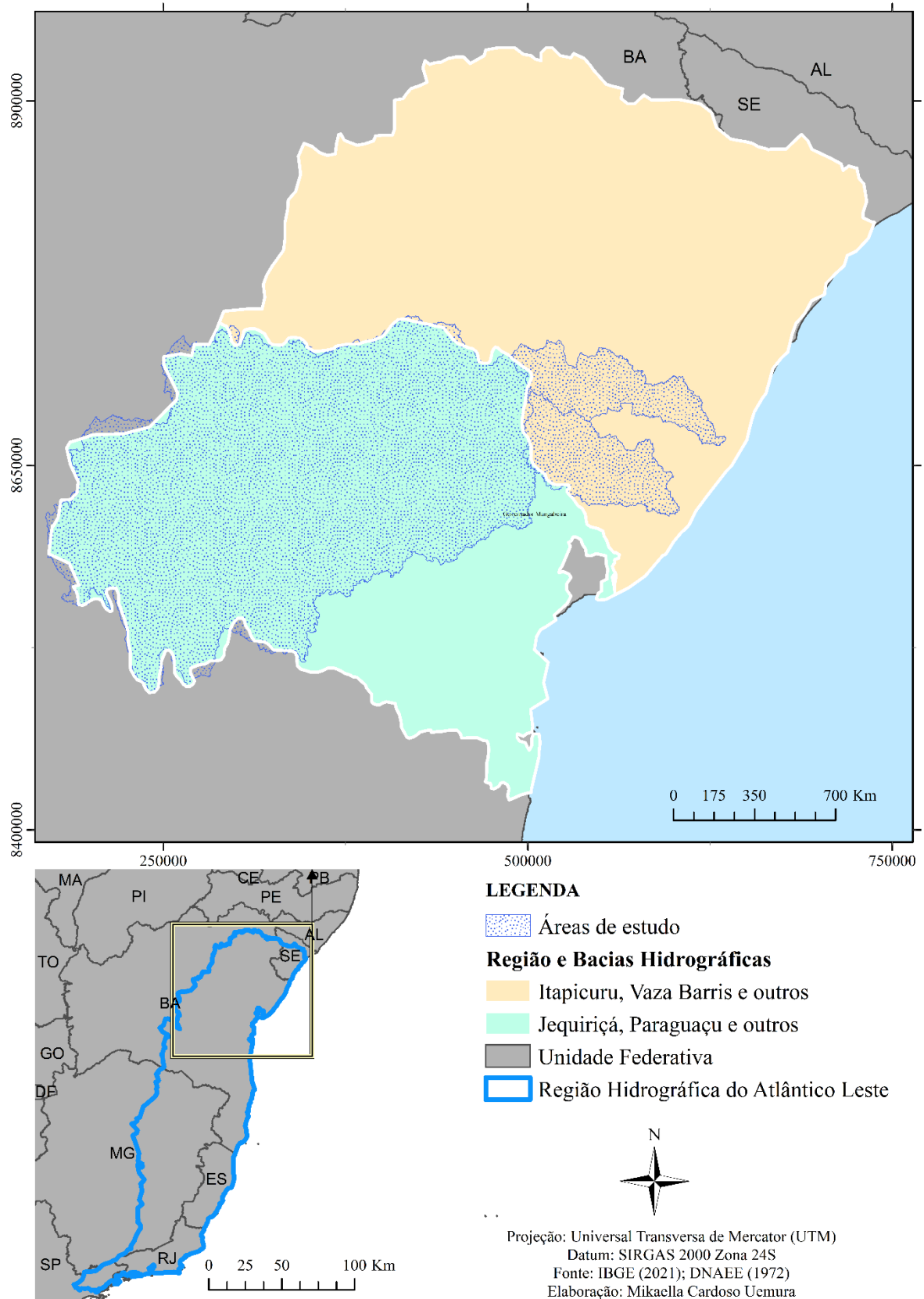
4 **ÁREA DE ESTUDO**

A Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) monitora e disponibiliza informações de diferentes parâmetros de interesse hidrológico, como dados de precipitação e vazão em toda extensão nacional. Com base em série de dados ininterruptos de vazão mensal, foram delimitadas três sub-bacias como áreas de estudo, sendo elas a sub-bacia do Rio Paraguaçu, sub-bacia do Rio Pojuca e sub-bacia do Rio Inhambupe. Pertencentes à Região Hidrográfica do Atlântico Norte (Código 5 pela RHN), a sub-bacia do Rio Paraguaçu se localiza na Bacia Hidrográfica Paraguaçu-Jequiriçá (código 51 pela RHN) sob coordenação do Comitê de Bacias Hidrográficas (CBH) Recôncavo Norte, enquanto a sub-bacias do Rio Pojuca e do Rio Inhambupe se localizam na Bacia Hidrográfica Vaza Barris-Itapicuru (código 50 pela RHN) sob coordenação dos Comitê de Bacias Hidrográficas (CBH) Recôncavo Norte. A Figura 1 apresenta a disposição das áreas de estudo sobre as bacias.

A sub-bacia delimitada pela estação Corte Grande (código 50660000), situa-se no município de Esplanada. Pertence à bacia Vaza Barris-Itapirucu e tem como principal curso hidrográfico o Rio Inhambupe, que nasce na região dos municípios de Serrinha (BA) e Teofilândia (BA) no domínio da região semiárida e percorre 224,4 km nas mesorregiões do nordeste baiano e centro norte baiano até desaguar no oceano Atlântico pelo município de Esplanada (BA). Sua área de drenagem é de 4380 km² (4378,66 pela delimitação no ArcGIS) e engloba os 15 seguintes municípios da região Acajutiba, Água Fria, Aporã, Barrocas, Biritinga, Cardeal Da Silva, Entre Rios, Esplanada, Inhambupe, Lamarão, Olindina, Santanópolis, Sátiro Dias, Serrinha, Teofilândia.

A sub-bacia delimitada pela estação Tiririca (50795000), situa-se no município de Camaçari. Pertence também à bacia Vaza Barris-Itapirucu e tem como principal curso hidrográfico o Rio Pojuca, que tem origem no município de Santa Bárbara (BA), na serra da Mombaça (226,7 m) e percorre 200,8 km até o oceano Atlântico entre os municípios de Mata de São João (BA) e Camaçari (BA). Sua área de drenagem é de 4700 km² (4694,93 pela delimitação no ArcGIS). Os municípios de abrangência são: Água Fria, Alagoinhas, Amélia Rodrigues, Araçás, Aramari, Camaçari, Catu, Conceição Do Jacuípe, Coração De Maria, Feira De Santana, Irará, Itanagra, Lamarão, Mata De São João, Ouriçangas, Pedrão, Pojuca, Santa Bárbara, Santanópolis, São Sebastião Do Passé, Serrinha, Teodoro Sampaio e Terra Nova, totalizando 23 municípios

Figura 1 – Localização das áreas de estudo no contexto da Região Hidrográfica do Atlântico Norte e bacias hidrográficas.



Fonte: Autoria própria (2022).

Já a sub-bacia delimitada pela estação UHE Pedra do Cavalo Barramento (51490080), situa-se no município de Governador Mangabeira. Pertence à bacia do Rio Paraguaçu-Jequiriçá e tem como principal curso hidrográfico o Rio Paraguaçu, que nasce na Chapada Diamantina, no município de Barra da Estiva (BA). Sua área de drenagem é de 53620 km² (53966,76 pela delimitação no ArcGIS) e engloba um total de 82 municípios da região: Andaraí, Anguera, Antônio Cardoso, Baixa Grande, Barra Da Estiva, Barro Alto, Barrocas, Boa Vista Do Tupim, Boninal, Bonito, Cabaceiras Do Paraguaçu, Cachoeira, Canarana, Candeal, Capela Do Alto Alegre, Capim Grosso, Castro Alves, Conceição Da Feira, Conceição Do Coité, Feira De Santana, Gavião, Governador Mangabeira, Iaçú, Ibicoara, Ibiquera, Ibitiara, Ichu, Ipecaetá, Ipirá, Iramaia, Iraquara, Itaberaba, Itaeté, Itatim, Lajedinho, Lamarão, Lençóis, Macajuba, Mairi, Maracás, Marcionílio Souza, Miguel Calmon, Milagres, Morro Do Chapéu, Mucugê, Mulungu Do Morro, Mundo Novo, Muritiba, Nova Fátima, Nova Itarana, Nova Redenção, Novo Horizonte, Palmeiras, Pé De Serra, Piatã, Pintadas, Piritiba, Planaltino, Quixabeira, Rafael Jambeiro, Retirolândia, Riachão Do Jacuípe, Ruy Barbosa, Santa Bárbara, Santaluz, Santa Teresinha, Santo Estêvão, São Domingos, São Gonçalo Dos Campos, São José Do Jacuípe, Seabra, Serra Preta, Serrinha, Serrolândia, Souto Soares, Tanquinho, Tapiramutá, Utinga, Valente, Várzea Da Roça, Várzea Do Poço e Wagner.

A classificação climática para as três bacias, segundo Koppen-Geiger, é predominantemente As, BSh, Aw e Af. As é caracterizado por clima tropical quente e úmido, com precipitação anual média em torno de 1600 mm. BSh é o clima semiárido quente, caracterizado por pouca chuva uma estação seca no verão, com temperatura média anual superior a 18 °C. Já Aw é denominado como clima tropical, com verão chuvoso e inverno seco, temperatura média no inverno superior a 18 °C e a precipitação anual ultrapassa 750 mm. A classificação Af representa o clima tropical úmido ou super úmido, com ausência de estação seca e com precipitações anuais que ultrapassam 1500 mm, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 18°C (ALVARES et al, 2013; MARIANO, 2014). As predominâncias climáticas para a sub-bacia do Rio Inhambupe são as classes As e Af, para a sub-bacia do Rio Pojuca a classe Af e Aw e para a sub-bacia do Rio Paraguaçu são as classes As e BSh desta classificação climática.

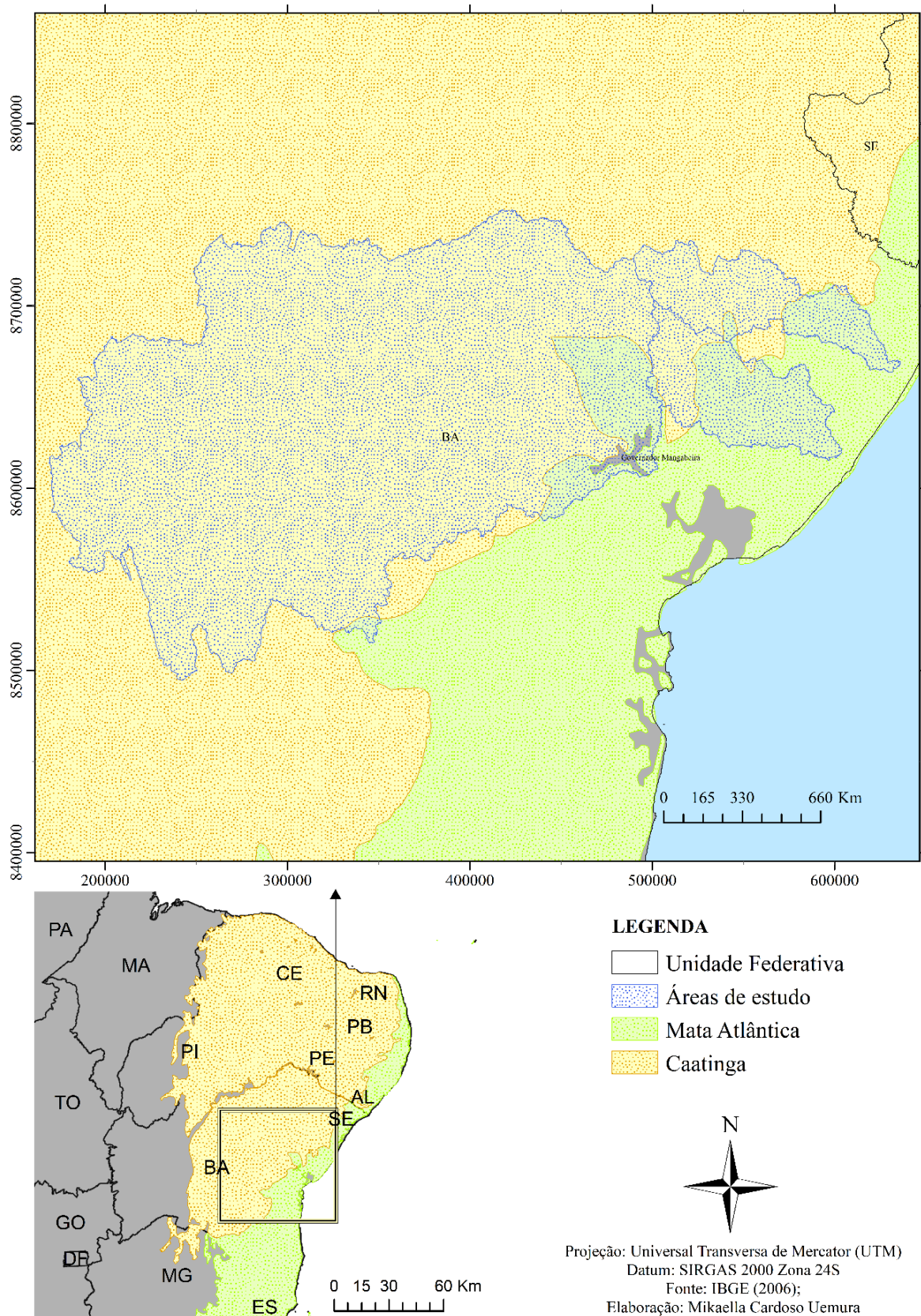
Além de descrever a localização e caracterização nas bacias hidrográficas, é importante descrever o bioma em que as áreas se encontram. As três áreas de estudo se encontram entre o bioma Caatinga e Mata Atlântica. A maior parte da sub-bacia do Rio

Paraguaçu se localiza na Caatinga, com uma pequena parcela de Mata Atlântica. Já a sub-bacia do Rio Pojuca se encontra em maior parte na região de Mata Atlântica e com uma parcela menor na região de Caatinga. A Figura 2 mostra a localização das áreas de estudo.

Para isso, é importante pontuar que a Caatinga possui predominantemente o clima semiárido. Ou seja, uma precipitação entre 1.000mm e 200mm por ano, temperatura média anual entre 25°C a 30°C e com sistema de chuvas determinado em período chuvoso ou seco. O período chuvoso 3 a 5 meses de duração, geralmente de janeiro a maio, com chuvas são torrenciais e irregulares concentradas nesse período. O período seco (ou estiagem) ocorre de 7 a 9 meses, entre junho e dezembro.

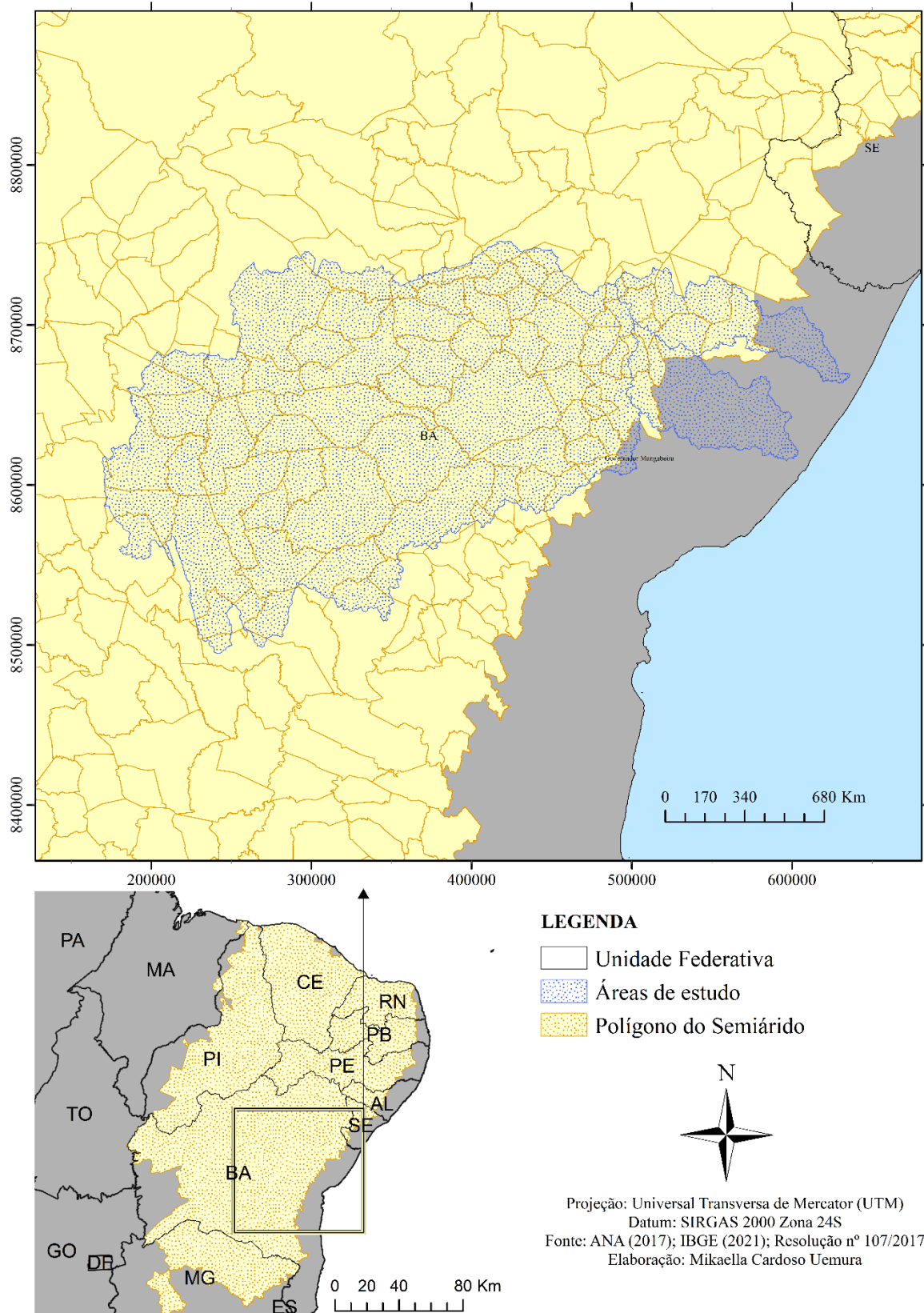
Em quase toda a sub-bacia do Rio Paraguaçu, na parte superior da bacia do Rio Inhambupe e em mais da metade da área da sub-bacia do Rio Inhambupe ocorre o clima Semiárido (Figura 3), que possui características climáticas muito diferentes quanto ao regime de chuvas, se comparado com a região litorânea ou a central de transição.

Figura 2 – Localização das áreas de estudo no contexto dos biomas da Caatinga e Mata Atlântica.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 3 – Localização das áreas de estudo no polígono do semiárido.



Fonte: Autoria própria (2022).

5 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Para a realização do trabalho foram utilizados dados de sensoriamento remoto, dados georreferenciados e dados temáticos. Esses dados são listados no Quadro 1. Para a aquisição dos dados de séries históricas, foram utilizados o Portal Hidroweb, a plataforma Giovanni – *National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)* e o protocolo de transferência de arquivo do *Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG)*. Os dados georreferenciados foram processados e manipulados com o *software ArcGIS 10.8*.

Quadro 1 – Dados utilizados no estudo.

Tipo	Dado	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Ano	Fonte
Dados de Sensoriamento Remoto	Modelo de Elevação Digital – SRTM	90m	-	2007	Embrapa
	TRMM <i>Multi-Satellite Precipitation Analysis</i> 3B43 Versão 7	0,25°	Mensal	2000 a 2014	NASA GES DISC
	MOD16A2	1 km	Mensal	2000 a 2014	NTSG
Dados Georreferenciados	Divisão Política Municipal	-	-	2021	IBGE
Dados Temáticos	Polígono do Semiárido	-	-	2021	ANA
	Biomassas	-	-	2021	IBGE
	Bacias Hidrográficas	-	-	1972	DNAEE
Dados Hidrometeorológicos	Estações Fluviométricas	-	-	-	Portal Hidroweb
	Estações Pluviométricas	-	-	-	Portal Hidroweb

Fonte: Autoria própria (2022).

5.1 Aquisição de dados diretos de vazão

Para os dados diretos de vazão média, foram utilizadas as séries históricas disponibilizadas Agência Nacional de Águas (ANA) através do Portal HidroWeb. O Portal Hidroweb é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) que oferece acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

Foram adquiridos os dados de vazões médias mensais de três estações fluviométricas. Essas estações foram selecionadas com o requisito de possuírem um intervalo de dados que abrange o período do ano de 2000 ao ano de 2018 ininterrupto, ou seja, sem lacunas (ausência de medições). O quadro 2 apresenta os dados e informações gerais sobre as três (3) estações fluviométricas selecionadas. Para cada estação fluviométrica foram utilizados os dados de data e vazão para a criação do hidrograma utilizado na análise do balanço hídrico.

Quadro 2 – Dados das estações fluviométricas selecionadas.

	Estação Corte Grande	Estação Tiririca	Estação Uhe Pedra Do Cavalo Barramento
Código da Estação	50660000	50795000	51490080
Rio	Rio Inhambupe	Rio Pojuca	Rio Paraguaçu
Município/Estado	Esplanada/BA	Camaçari/BA	Governador Mangabeira/BA
Responsável	ANA	ANA	VOTORCIM I
Operadora	CPRM	CPRM	VOTORCIM I
Latitude	-12.0536	-12.5119	-12.5844
Longitude	-37.755	-38.0667	-38.9989
Altitude (m)	6	22	124
Área de Drenagem (km²)	4380	4700	53620

Fonte: Hidroweb (2022).

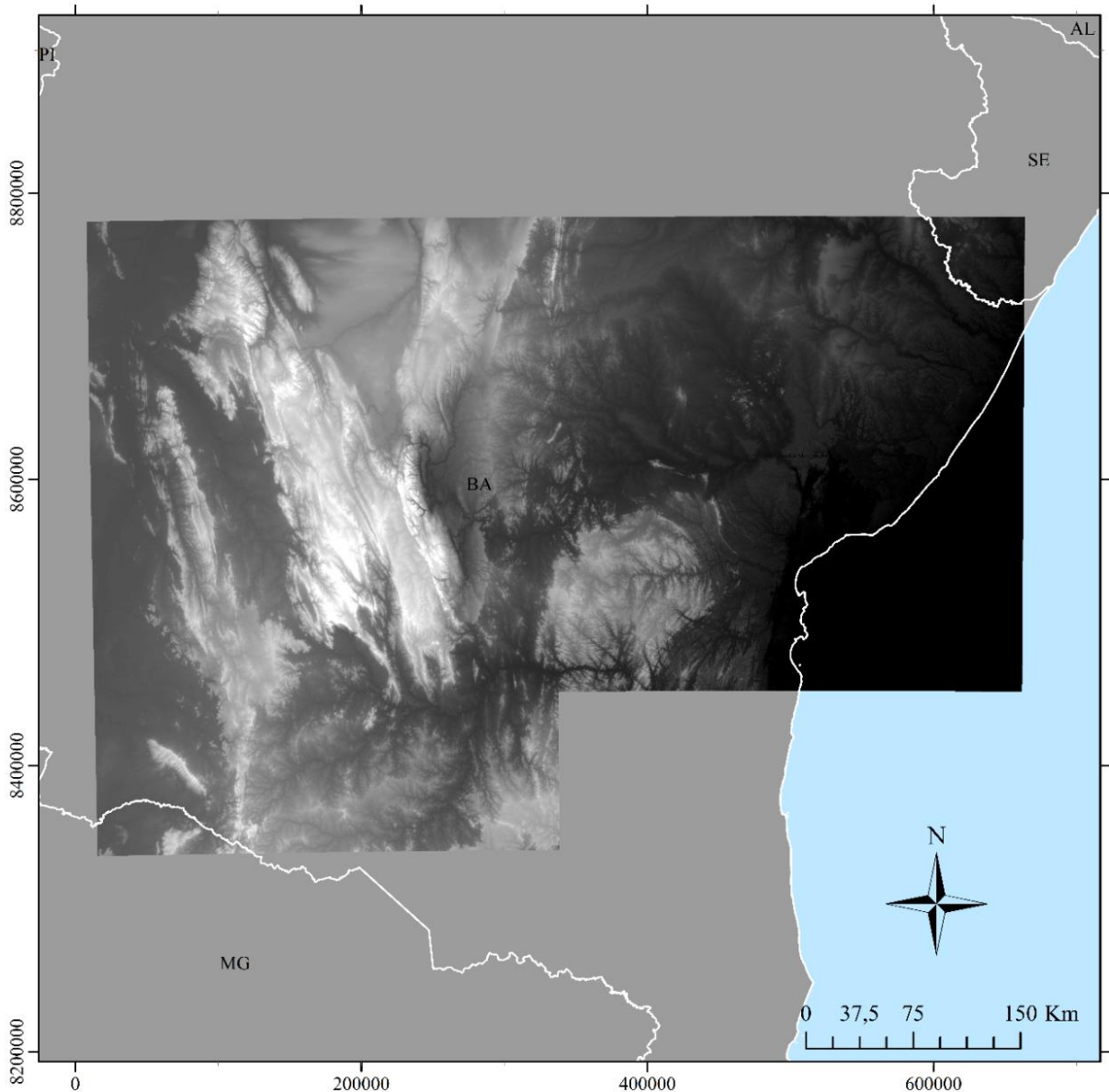
5.2 Delimitação das áreas das sub-bacias do estudo

Usando um *software* de Sistema de Informações Geográficas (SIG), é possível delimitar uma bacia hidrográfica utilizando um Modelo Digital de Elevação (MDE) e um ponto focal, ou seja, um exutório ou a foz, sendo nesse caso as estações fluviométricas selecionadas. Basicamente, o algoritmo do SIG vai pesquisar pelas células mais altas da região que ligam ao ponto do exutório e criar uma linha que envolva esse ponto.

Para uma delimitação automática e precisa dos limites da bacia hidrográfica é necessário como dados de topografia um Modelo Digital de Elevação adequado à magnitude da área da bacia hidrográfica. O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi um projeto conjunto da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) com as agências espaciais alemã e italiana que voou em fevereiro de 2000 para produzir a elevação digital mais completa e de maior resolução da época. Precisamente, voou em um ônibus espacial que usava duas antenas de radar para adquirir dados de radar interferométrico, processados em dados topográficos digitais em 1 arco-segundo resolução (FARR, 2007). Como fonte de dados topográficos foi utilizado as imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução original de 90 metros, disponível gratuitamente no site da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária).

Para a primeira etapa da delimitação das bacias foram adquiridas 14 imagens em formato GeoTIFF (16 bits) e resolução espacial de 90 metros (a unidade de altitude também é fornecida em metros). Os arquivos do tipo *raster* foram unidos através da elaboração de um mosaico no *software* ArcMap 10.8, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Mosaico de Modelo Digital de Elevação (SRTM 90m).



LEGENDA

Modelo Digital de Elevação

■ Máximo: 2021 m

■ Mínimo: 0 m

■ Unidade Federativa

Projeção: Universal Transversa de Mercator (UTM)

Datum: SIRGAS 2000 Zona 24S

Fonte: IBGE (2021); Embrapa (2022)

Elaboração: Mikaella Uemura

Fonte: Autoria própria (2022).

É necessária uma rede de drenagens extraídas a partir do mosaico do Modelo Digital de Elevação para delimitar as bacias de interesse. Jenson e Domingue (1988) apresentam um método de derivar a direção do fluxo a partir de um Modelo Digital de Elevação. Se duas células fluem uma para a outra, elas são sumidouros e têm uma direção de fluxo indefinida.

Para obter uma representação precisa da direção do fluxo através de uma superfície, os sumidouros devem ser preenchidos antes de usar um *raster* de direção de fluxo. Para isso, é possível utilizar a ferramenta *Fill* do ArcToolbox após converter o formato TIFF do mosaico do MDE em GRID para no ArcMap 10.8.

A ferramenta *Fill* do ArcToolBox no ArcMap 10.8 preenche sumidouros em um *raster* de superfície para remover pequenas imperfeições nos dados, como seria o caso de uma *sink* (Figura 5). Uma *Sink* é um ponto ou uma célula com valores inferiores às adjacentes de onde a água não escorrerá para lado nenhum, ou seja, uma célula com uma direção de drenagem indefinida pois nenhuma célula ao seu redor é inferior. Esse caso atrapalharia o processamento do algoritmo na hora de delimitar as drenagens que alimentam o curso principal da bacia até o exutório, e por isso é necessário retirar essas depressões do *raster*, no caso, o mosaico do MDE.

Figura 5 – Ilustração da execução da ferramenta *Fill*.



Fonte: ArcGIS Desktop (2022).

Para derivar as características hidrológicas de uma superfície é necessário determinar a direção do fluxo de cada célula no *raster* com a ferramenta *Flow Direction* (também do ArcToolBox no ArcMap 10.8) a partir do arquivo *Fill*. Essa ferramenta recebe uma superfície, o MDE, como entrada e emite um *raster* mostrando a direção do fluxo de cada célula. Existem oito direções de saída válidas relacionadas às oito células adjacentes nas quais o fluxo pode viajar de cada célula para seu vizinho, ou vizinhos, de inclinação. Essa abordagem é comumente chamada de modelo de fluxo de oito direções (D8) e segue uma abordagem apresentada em Jenson e Domingue (1988).

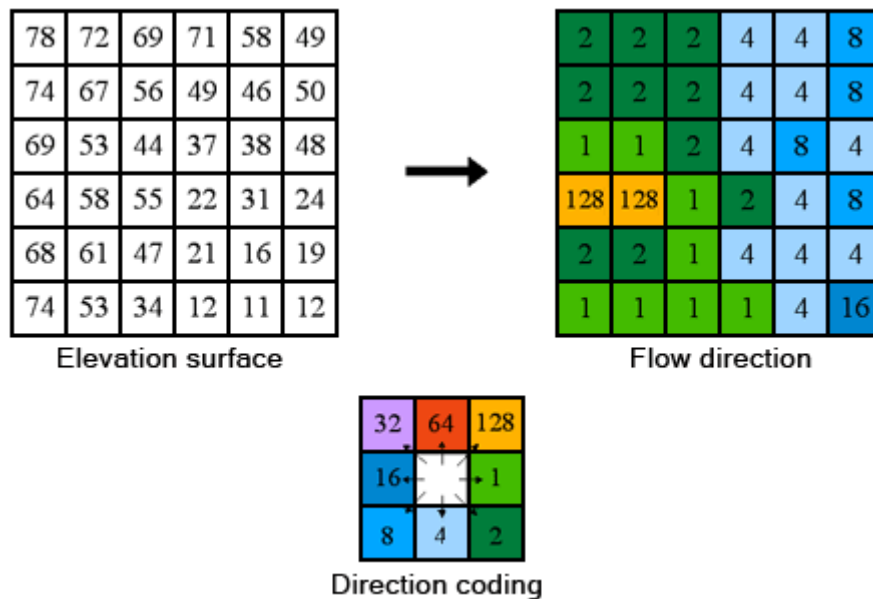
A direção do fluxo é determinada pela direção de descida mais acentuada, ou queda máxima, de cada célula. Isso é calculado da seguinte forma:

$$\text{maximum_drop} = \text{change_in_z-value} / \text{distance} * 100 \quad (\text{Fórmula 5.2.1})$$

A distância (ou o termo “*distance*” na fórmula 5.2.1) é calculada entre os centros das células. Se a descida máxima para várias células for a mesma, a vizinhança é ampliada até que

a descida mais acentuada seja encontrada. Quando uma direção de descida mais íngreme é encontrada, a célula de saída é codificada com o valor que representa essa direção. Se todos os vizinhos forem maiores que a célula de processamento, ela será considerada ruído, será preenchida até o valor mais baixo de seus vizinhos e terá uma direção de fluxo em direção a esta célula. No entanto, se um coletor de uma célula estiver próximo à borda física do raster ou tiver pelo menos uma célula sem dados como vizinha, ele não será preenchido devido a informações vizinhas insuficientes (Figura 6).

Figura 6 – Codificação da ferramenta *Flow Direction*.



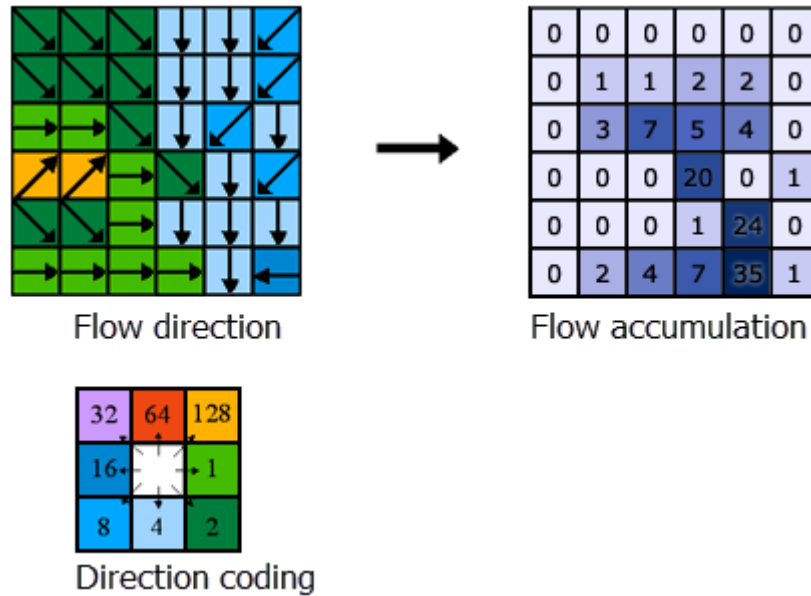
Fonte: ArcGIS Desktop (2022).

Para tornar precisa a delimitação da bacia, foi necessário criar a rede de drenagem derivada do *raster* de *Flow Direction* de maneira a tornar preciso o posicionamento dos exutórios adotados. Para isso, foi criado o *raster* do *Flow Accumulation* do ArcToolBox no ArcMap 10.8 a partir do *Flow Direction*. Essa ferramenta calcula o fluxo acumulado como o peso acumulado de todas as células que fluem para cada célula de declive no raster de saída. Se nenhum raster de peso for fornecido, um peso de 1 será aplicado a cada célula e o valor das células no *raster* de saída será o número de células que fluem para cada célula.

Células com alto acúmulo de fluxo são áreas de fluxo concentrado e podem ser usadas para identificar canais de fluxo. Células com acúmulo de fluxo de 0 são elevações

topográficas locais e podem ser usadas para identificar cristas. A Figura 7 mostra a direção de deslocamento de cada célula e o número de células que fluem para cada célula.

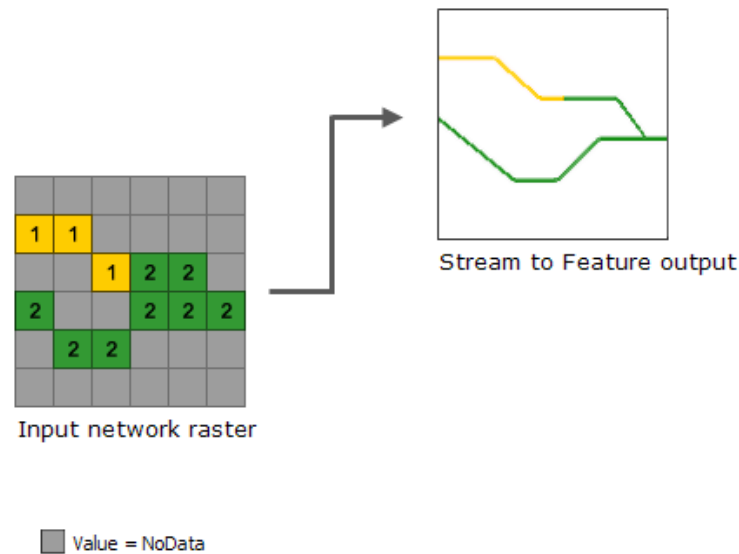
Figura 7 – Determinação do acúmulo de fluxo.



Fonte: ArcGIS Desktop (2022).

Os resultados da ferramenta *Flow Accumulation* podem ser usados para criar um *raster* de rede de fluxo aplicando um valor limite para selecionar células com alto fluxo acumulado (por exemplo, as células que têm mais de 100 células fluindo para si são usadas para definir a rede de fluxo). A ferramenta *Con* do ArcToolBox no ArcMap 10.8 foi utilizada para criar um *raster* de rede de fluxo onde os valores de acumulação de fluxo de 100 ou mais vão para um e o restante é colocado em segundo plano com ausência de valor (*NoData*). Ela executa uma avaliação condicional *if/else* em cada uma das células de entrada de um *raster* de entrada (Figura 8). Assim, essa rede de fluxo resultante pode ser usada em *Stream to Feature* para a criação do *shapefile* de drenagem. A ferramenta *Stream to Feature* do ArcToolBox no ArcMap 10.8 converte um *raster* de rede linear em recursos que representam a rede linear. Ou seja, o algoritmo usado por essa ferramenta vetoriza redes de fluxo ou qualquer outro *raster* de rede linear para qual a direcionalidade é conhecida.

Figura 8 – Vetorização de um raster de rede linear originados por *Con e Flow Accumulation*.



Fonte: ArcGIS Desktop alterado (2022).

Com o *shapefile* das redes de drenagem vetorizados, os exutórios necessitam ser posicionados para coincidir exatamente com as drenagens originadas pelo raster com a ferramenta *Snapping* do ArcToolBox no ArcMap 10.8. Como exutório de cada sub-bacia são adotadas as estações fluviométricas, como já mencionado. É então gerado um *shapefile* de ponto com os dados de latitude e longitude das estações fluviométricas presentes no Quadro 2 e foram posicionadas para se localizar exatamente coincidente às drenagens. A Figura 10 apresenta mostra a localização das estações fluviométricas adotadas.

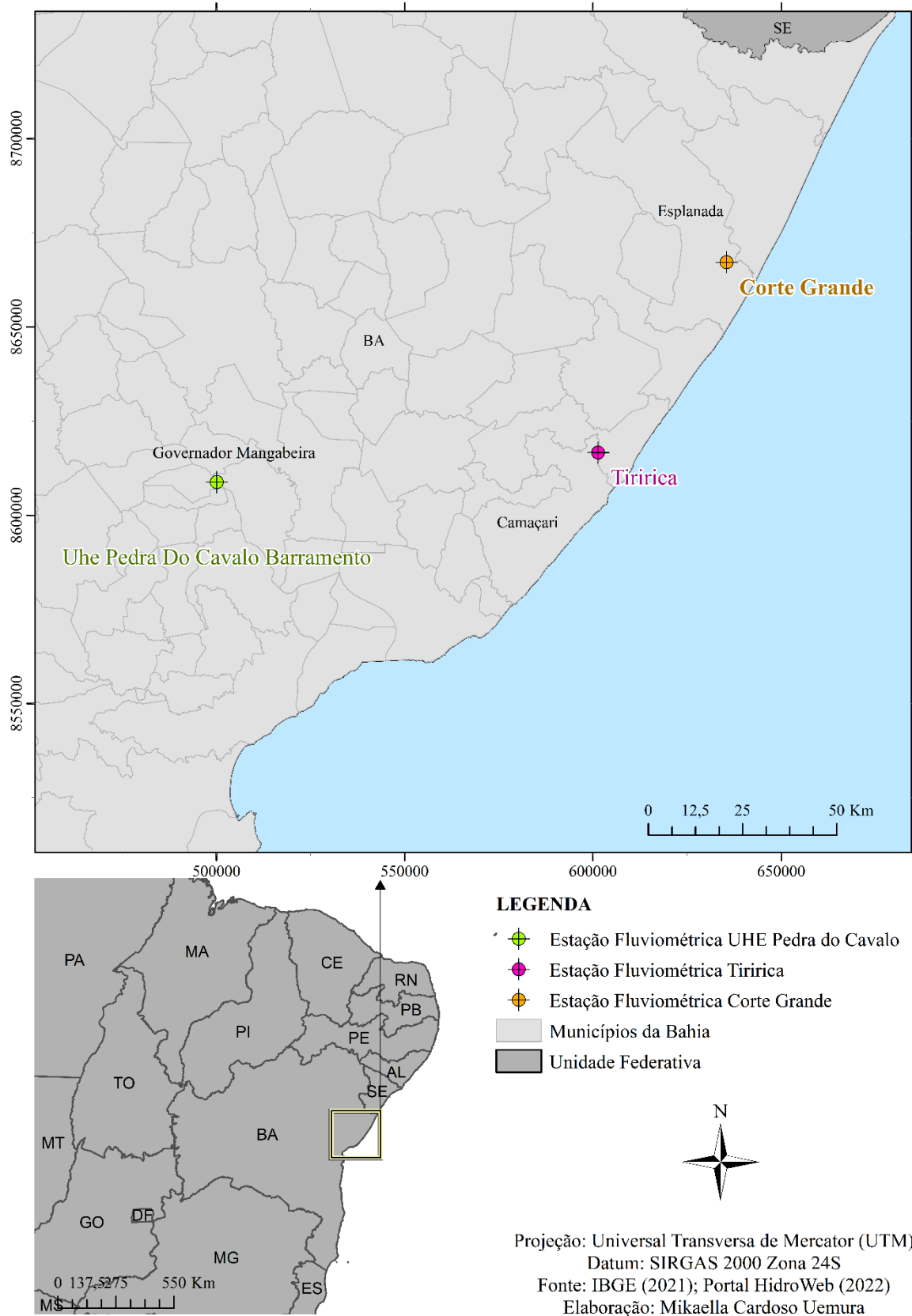
A ferramenta *Watershed* do ArcMap10.8 determina a área de contribuição de uma bacia acima de um conjunto de células em um *raster*. É necessário um *raster* representando a direção do fluxo criado a partir da ferramenta *Flow Direction* e fornecer os locais para os quais deseja determinar a área de captação, ou seja, os pontos de exutório adotados pelas estações fluviométricas posicionadas precisamente em cima das drenagens originadas. A saída é um *raster* das bacias hidrográficas (Figura 9). A partir desse raster de saída é possível derivar um *shapefile* de polígono das bacias com a ferramenta *Raster to Polygon* do ArcMap10.8.

Figura 9 – Determinação da área de contribuição de uma bacia.



Fonte: ArcGIS Desktop (2022).

Figura 10 – Localização das estações fluviométricas.



Fonte: Autoria própria (2022).

5.3 Aquisição, manuseio e validação de dados diretos e indiretos de precipitação

Para os dados de precipitação, temos como fonte direta os dados coletados *in situ* das estações pluviométricas também fornecidos pelas séries históricas do Portal HidroWeb da ANA. O Quadro 3 apresenta informações sobre as 23 estações pluviométricas selecionadas. Todas as estações listadas são de responsabilidade da ANA e operadas pela CPRM/SGB (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Essas estações foram selecionadas por possuírem um intervalo de dados de precipitação mensal total que abrange o período do ano de 2000 a 2018 sem muitas lacunas. Um *shapefile* de pontos com a localização das estações pluviométricas foi criado a partir das colunas de latitude e longitude presentes no Quadro 3.

Quadro 3 – Dados das estações pluviométricas selecionadas para validação dos dados indiretos de precipitação TRMM 3B43.

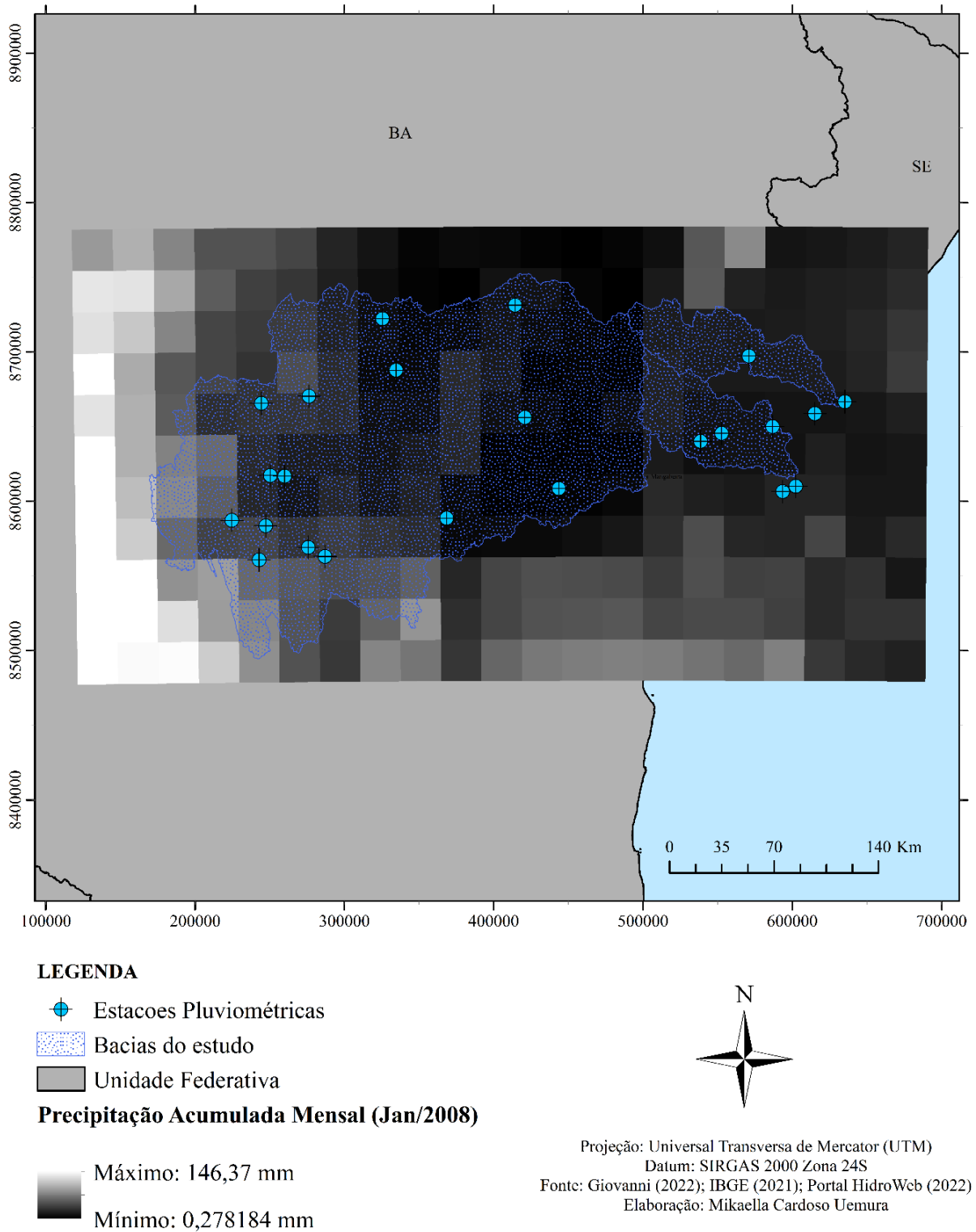
Nome Estação	Código	Município	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Gavião II	1139022	Gavião/BA	-11.4742	-39.7847	-
Andaraí	1241008	Andaraí/BA	-12.8017	-41.3275	330
Araças	1238010	Araças/BA	-12.2103	-38.2006	80
Jangado	1237003	Cardeal da Silva/BA	-12.1303	-37.9417	-
França	1140010	Piriti/BA/BA	-11.5533	-40.6	-
Fazenda Iguaçu	1241001	Itaeté/BA	-12.9347	-41.0658	317
Itaeté	1240012	Itaeté/BA	-12.99	-40.9633	299
Argoim	1239007	Rafael Jambeiro/BA	-12.585	-39.5183	159
Porto	1241017	Lençóis/BA	-12.4975	-41.2961	355
Teodoro Sampaio	1238051	Teodoro Sampaio/BA	-12.3003	-38.6439	116
Iaçu	1240016	Iaçu/BA	-12.7622	-40.2108	237
Barra do Mundo Novo	1140031	Mundo Novo/BA	-11.8656	-40.5178	515
Guiné	1241032	Mucugê/BA	-12.7664	-41.5361	-
Usina Mucugê	1241033	Mucugê/BA	-13.0075	-41.37	870
Estação Experimental	1241028	Utinga/BA	-12.0192	-41.0547	511
Utinga	1241026	Utinga/BA	-12.5019	-41.2078	357
Inhambupe	1138002	Inhambupe/BA	-11.7828	-38.3481	158
Fazenda Ribeiro	1241027	Bonito/BA	-12.06	-41.3475	-
Buracica	1238042	Alagoinhas/BA	-12.2514	-38.515	130
Emboacica	1238046	Camaçari/BA	-12.6031	-38.1375	13
Tiririca	1238000	Camaçari/BA	-12.5703	-38.0567	34
Corte Grande	1237000	Esplanada/BA	-12.0575	-37.7564	34
Ipirá	1239042	Ipirá/BA	-12.1544	-39.7272	-

Fonte: Hidroweb (2022).

Esses dados de precipitação foram utilizados para validar, pelo coeficiente de determinação R^2 , as estimativas de precipitação mensal do *Tropical Rainfall Measurement Mission* (TRMM). De cada localização onde se encontram as estações pluviométricas de medição direta de precipitação foram adquiridos os valores de precipitação acumulada mensal estimada pelo produto de dados 3B43 (Figura 11). Esse produto de precipitação estimada é criado usando a taxa de precipitação de infravermelho de micro-ondas mesclada ajustada pelo TRMM (em mm/h) e estimativas de erro de precipitação de valor eficaz, ou média quadrática (RMS). Descontinuado em 31 de dezembro de 2019, possui uma resolução temporal mensal e uma banda global de resolução espacial de $0,25^\circ$ por $0,25^\circ$ estendendo-se de 50°S a 50°N de latitude (MACRITCHIE, 2015). Os dados do produto TRMM *Multi-Satellite Precipitation Analysis* 3B43 Versão 7 (V7) foram encontrados no site de visualização de dados da NASA (programa *Earth Science Data Systems* - ESDS) chamado Giovanni disponível na unidade de milímetro (mm) para cada mês.

Cada dado de precipitação mensal acumulada das estações pluviométricas da ANA foi comparado ao valor correspondente do *pixel* das imagens do TRMM, como representa a Figura 11. Como resultado do modelo estatístico linear aos valores observados se obteve um coeficiente de determinação R^2 para expressar a quantidade da variância dos dados. R^2 mede o grau de aproximação existente entre as variáveis e apresenta um intervalo entre 0 e 1, sendo zero (0) total alienação e um (1) a perfeita relação entre as variáveis. Quanto maior o R^2 , mais representativo é produto indireto de precipitação mensal do TRMM, ou seja, melhor ele se ajusta para representar a precipitação acumulada mensalmente nas bacias desse estudo. Para essa validação foram utilizados ao total 5.107 dados mensais de chuva mensal acumulada das estações pluviométricas no Quadro 3.

Figura 11 – Aquisição dos dados TRMM para validação com os valores de precipitação total acumulada das estações pluviométricas. Exemplo do TRMM de janeiro de 2008.



Fonte: Autoria própria (2022).

Após validação, os dados de precipitação acumulada total do TRMM serão adotados como dados de entrada no balanço hídrico. Para o cálculo das médias mensais de cada

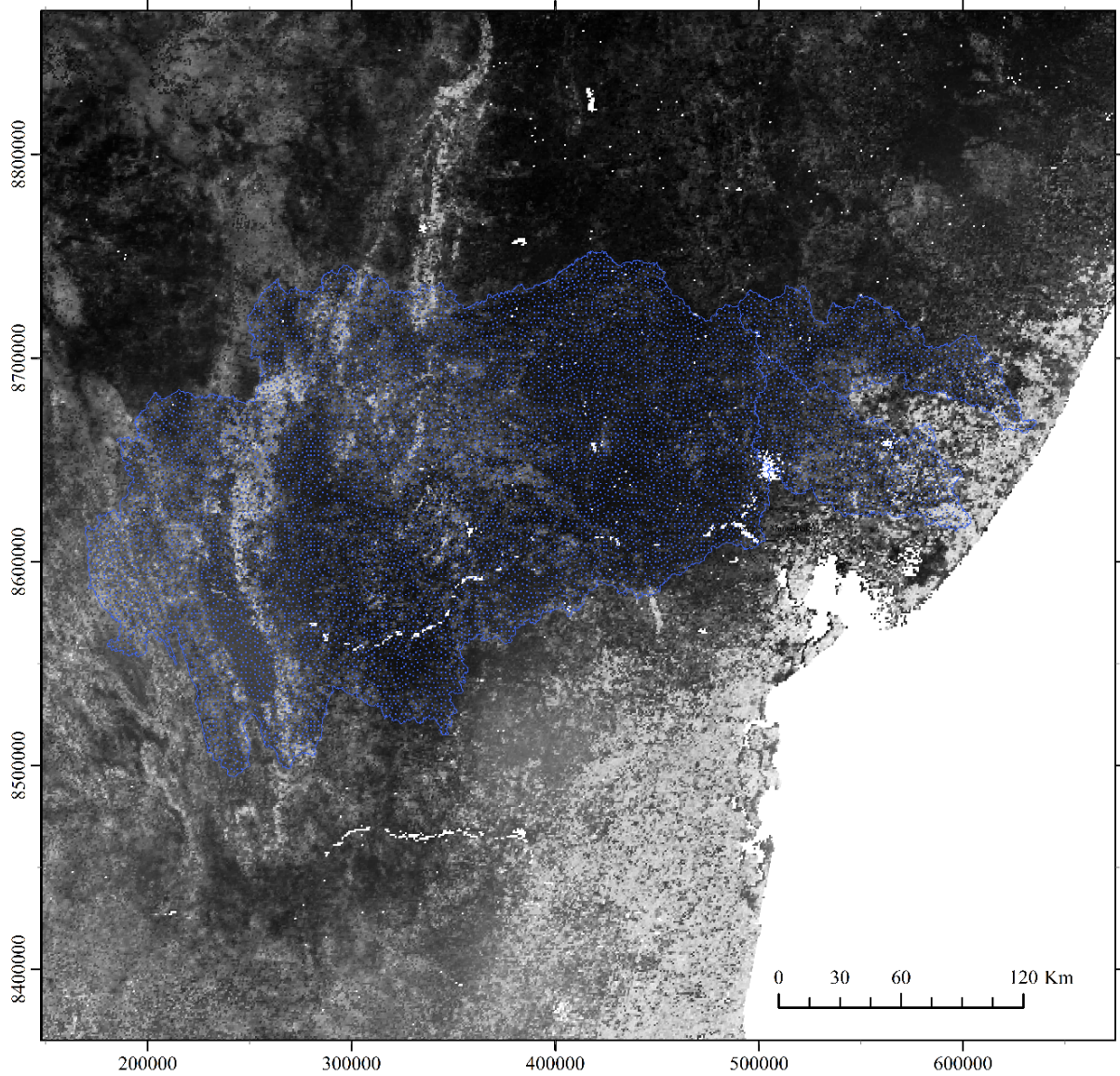
componente do balanço na bacia hidrográfica, foram selecionados apenas os dados que estão dentro da bacia com a ferramenta *Extract by Mask* do ArcMap10.8. Como dados de entrada foram selecionadas as imagens, ou produtos de precipitação acumulada total mensal TRMM *Multi-Satellite Precipitation Analysis 3B43 Versão 7 (V7)*. Como dados de recorte, ou forma para recorte, são adotados individualmente cada shapefile de polígono das bacias hidrográficas delimitadas no Item 5.2. Com as imagens de precipitação já recortadas, é possível visualizar o histograma de precipitação acumulada total das bacias e adquirir a média representativa para cada mês.

5.4 Aquisição e manuseio dos dados indiretos de evapotranspiração real


Para aquisição dos dados indiretos de evapotranspiração real, é utilizado o produto MOD16A2 do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), de evapotranspiração em resolução temporal mensal, disponibilizado pela Universidade de Montana através do centro de pesquisa *Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG)* em seu *site* protocolo de transferência de arquivos, ou *File Transfer Protocol (FTP)*.

MODIS é o sensor central a bordo da Plataforma de Satélites Terra. O laboratório NTSG da Universidade de Montana está sob contrato com a NASA como um *Science Compute Facility (SCF)* na equipe Land Science, encarregado de desenvolver os algoritmos pós-lançamento, incluindo o MOD16. Esse algoritmo pode ser descrito como um conjunto de dados de evapotranspiração global (em regulares 1 km² de resolução espacial) de 109,03 milhões de km² de da superfície terrestre com vegetação global em intervalos de 8 dias, mensais e anuais. A evapotranspiração global terrestre inclui a evaporação do solo úmido, da água da chuva interceptada pelo dossel antes de atingir o solo e a transpiração através dos estômatos nas folhas e caules das plantas (UM et al., 2005). O algoritmo MOD16 tem um bom desempenho na geração de produtos de dados de evapotranspiração global, fornecendo informações críticas sobre ciclos globais de água e energia terrestre e mudanças ambientais (Mu et al., 2007, 2009, 2011). A Figura 12 mostra a disposição das áreas de estudo no mosaico do MODIS com as imagens de janeiro de 2012 adquiridas.


Figura 12 – Aquisição dos dados indiretos MOD16 de evapotranspiração real mensal.
Exemplo de janeiro de 2008.




LEGENDA

 Bacias do estudo

Evapotranspiração Mensal (Jan/2012)

 Máximo : 3276,6 (mm/mês)

 Mínimo : 16,9 (mm/mês)



Projeção: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum: SIRGAS 2000 Zona 24S
Fonte: Portal HidroWeb(2022);
Numerical Terradynamic Simulation Group (2022)
Elaboração: Mikaela Cardoso Uemura

Fonte: Autoria própria (2022).

A resolução escolhida do produto é definida pela soma mensal da evapotranspiração global, e para obter os valores reais de evapotranspiração em unidade de milímetro por mês (mm/mês), os valores foram multiplicados pelo fator de escala 0,1 com a ferramenta *Times* do ArcMap10.8. Além disso, todos os conjuntos de dados em MOD16A2 têm valor válido variando de -32767 a 32700. Existem sete (7) valores de preenchimento listados para pixels não vegetados para evapotranspiração global mensal (MU et al., 2005), ou seja, valores que não se calculou a evapotranspiração e foram anulados. O Quadro 4 apresenta a relação de *pixels* que foram anulados com a ferramenta *SetNull* do ArcMap 10.8.

Quadro 4 – Relação dos pixels não vegetados para evapotranspiração global mensal.

Valor do pixel não vegetado	Descrição do pixel não vegetado para evapotranspiração global mensal
32767	Valor do preenchimento, fora da terra.
32766	Corpo d'água.
32765	Estéril ou com vegetação esparsa.
32764	Neve e gelo permanentes.
32763	Zona húmida permanente.
32762	Urbano ou Construído.
32761	Não classificado.

Fonte: MU, Qiaozhen (2005).

Para o cálculo das médias mensais de cada componente do balanço na bacia hidrográfica, foram selecionados apenas os dados que estão dentro da bacia com a ferramenta *Extract by Mask* do ArcMap10.8. Como dados de entrada foram selecionados os mosaicos das imagens ou produtos de evapotranspiração global MOD16A2 de resolução temporal mensal. Como dados de recorte, ou forma para recorte, são adotados individualmente cada *shapefile* de polígono das bacias hidrográficas delimitadas no Item 5.2. Com as imagens de evapotranspiração já recortadas, é possível visualizar o histograma de evapotranspiração de cada bacia e adquirir a média representativa para cada mês.

5.5 Balanço Hídrico

A hidrologia leva em conta todos os parâmetros que entram no fenômeno do ciclo da água e geralmente é estudada em um volume fechado que se chama sistema hidrológico. O balanço hídrico de um sistema hidrológico bem definido como uma bacia hidrográfica pode se resumir, para um intervalo de tempo dado, segundo a formulação simples de conservação da massa (CHEVALIER,1993):

$$\text{Entradas} + \text{Armazenamento Inicial} = \text{Saídas} + \text{Armazenamento Final}$$

Ou:

$$\text{Entradas} - \text{Saídas} = \text{Variação Armazenamento}$$

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. É composta basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório. A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados, além dos infiltrados profundamente (SILVEIRA, 2001).

Tucci e Beltrame (1993) afirmam que, devido à falta de medição de todas as variáveis envolvidas, o balanço hídrico objetivando o cálculo da evapotranspiração normalmente é elaborado para intervalos de tempo superiores a 1 semana. É uma simplificação considerável ao considerar todos os processos que envolvem o escoamento na bacia, mas para um intervalo de tempo suficientemente grande, o erro cometido no termo armazenamento quanto à propagação do escoamento (incluindo as perdas dos infiltrados profundamente) é pequeno se comparado com a precipitação, vazão e evapotranspiração. Assim, com base na equação da continuidade do lago ou reservatório, intervalos superiores a uma semana, mês ou ano, pode-se quantificar a evapotranspiração de uma bacia pela Equação 5.5.1.

$$\frac{dARM}{dt} = I - Q - (E \times A) + (P \times A) \quad (\text{Equação 5.5.1})$$

Nessa equação, a variação do volume de água contido no reservatório em relação ao tempo ($dARM/dt$) é equivalente às relações de entrada e saída de: vazão total de entrada (I), de vazão de saída (Q), de evaporação distribuída na área ($E \times A$) e de precipitação sobre a área ($P \times A$). Como menciona Chevallier (1993), a bacia hidrográfica é um sistema hidrológico bem definido, ou seja, é estudada em um volume fechado. Assim, pode-se anular o componente de vazão total de entrada no reservatório (I) da equação e obter uma expressão de balanço hídrico aplicada para uma bacia hidrográfica, conforme a Equação 5.5.2.

$$\frac{dARM}{dt} = (P \times A) - Q - (E \times A) \quad (\text{Equação 5.5.2})$$

Como os dados de precipitação e evapotranspiração foram adquiridos em milímetro mês (mm/mês), foram adaptados para a mesma unidade os dados de vazão de saída adquiridos inicialmente em metros cúbicos por segundo (m³/s). Após adquirir os valores correspondentes de vazão em metros cúbicos mês (m³/mês), distribuiu-se pelas áreas (em m²) das respectivas bacias e converteu-se para o cálculo efetivo da variação do armazenamento também em milímetro mês (mm/mês). Assim, o cálculo base de variação do armazenamento para análise ficou para cada metro quadrado das bacias, conforme a Equação 5.5.3.

$$ARM(t) - ARM(0) = \left(P - \frac{Q}{A} - E \right) \cdot dt \quad (\text{Equação 5.5.3})$$

Onde $ARM(t)$ e $ARM(0)$ são o armazenamento total de umidade na bacia no final e no início do intervalo de tempo, P , $\frac{Q}{A}$ e E são respectivamente a precipitação, vazão de saída distribuída pela área da bacia e evapotranspiração no período. Dessa forma, podemos determinar a variação do armazenamento em um período mensal da seguinte através da Equação 5.5.4.

$$\Delta ARM = P - E - \frac{Q}{A} \quad (\text{Equação 5.5.4})$$

Após aquisição dos dados de evapotranspiração do MODIS e validação dos dados de precipitação TRMM, o período de análise é determinado pela disponibilidade de informações de vazão mensal fornecidas pela ANA.

5.6 Teste de Mann-Kendall

O teste de tendência Mann-Kendall é um teste não paramétrico para identificar tendências em dados de séries temporais (MANN, 1945; KENDALL, 1975). O teste é útil no caso deste estudo porque os dados não precisam estar em conformidade com nenhuma distribuição específica, pois compara as magnitudes relativas dos dados em vez dos próprios valores dos dados em uma série temporal ordenada (GILBERT, 1987).

Para o presente estudo, foi adotada a unidade de tempo mês para o período e listados em ordem cronológica os dados que foram coletados ao longo do tempo. O procedimento de teste é primeiro calcular a estatística S , que indica se a tendência do parâmetro ao longo do tempo é geralmente decrescente (valor S negativo), nula (valor S nulo) ou crescente (valor S

positivo). Para esse cálculo se compara cada valor de dados com todos os valores de dados subsequentes e com esse valor de comparação se determina o sinal de todas as diferenças. A função $sgn(X_j - X_k)$ assume os valores 1, 0 ou -1 de acordo com o sinal dessa diferença, conforme o esquema:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(X_j - X_k) &= 1 \text{ se } X_j - X_k > 0 \\ &0 \text{ se } X_j - X_k = 0 \\ &-1 \text{ se } X_j - X_k < 0 \end{aligned}$$

Cada um dos n valores de dados é comparado a todos os valores de dados subsequentes e posteriormente incrementado ou decrementado. O resultado líquido de todos esses incrementos e decrementos produz o valor final de S , que é o número de diferenças positivas menos o número de diferenças negativas conforme a Equação 5.6.1 e a Tabela 1.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \binom{n}{k} \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (\text{Equação 5.6.1})$$

Tabela 1 - Diferenças nos valores de dados necessários para calcular a estatística S de Mann-Kendall para testar a tendência da variação do armazenamento. Exemplo da Bacia Tiririca.

	Data				
	jan-00	fev-00	...	nov-14	dez-14
Variação do Armazenamento (mm) Tiririca	-15,18	21,56	...	-2,11	16,62
-15,18	0				
21,56	1	0			
...		
-2,11	1	-1	...	0	
16,62	1	-1	...	1	0
					S = -3202

Fonte: Autoria própria, 2022.

Como o número de valores analisados (n) é maior que 40, foi calculada a variância (VAR) de S pela Equação 5.6.2 que leva em conta o número de empates (t) que podem estar presentes.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)] - \sum_{p=1}^q [t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (\text{Equação 5.6.2})$$

Então S e $\text{VAR}(S)$ são usados para calcular a estatística de teste (Z) como segue:

$$\begin{aligned} Z &= (S-1) / [\text{VAR}(S)]^{1/2} && \text{se } S > 0 \\ &= 0 && \text{se } S = 0 \\ &= (S + 1) / [\text{VAR}(S)]^{1/2} && \text{se } S < 0 \end{aligned}$$

Um valor positivo de Z indica uma tendência ascendente, enquanto um valor negativo indica uma tendência descendente. Com esse valor, podemos aceitar ou rejeitar a hipótese nula (H_0) de não tendência da série histórica. Gilbert (1987) descreve que se a hipótese nula (H_0) de não tendência for falsa, a estatística Z terá uma distribuição normal padrão e, portanto, será utilizada a Tabela 2 para decidir se rejeitamos H_0 ou assumir um nível α de significância para a aplicação da estatística em uma distribuição normal. Para teste para tendência ascendente ou descendente (um teste bicaudal) em um nível α de significância, H_0 é rejeitado se o valor absoluto de Z for maior que $Z_{1-\alpha/2}$ ou aceito se o valor absoluto de Z for menor que $Z_{1-\alpha/2}$. A Tabela 2 pode utilizada para julgar a significância estatística dos testes e provavelmente introduzirá pouco erro desde que n seja maior ou igual à 10, a menos que há muitos grupos de laços e muitos laços dentro dos grupos (GILBERT, 1987).

Tabela 2 – Valores de $Z_{1-\alpha/2}$ para diferentes níveis de significância α .

α :	0,2	0,1	0,05	0,01
$Z_{1-\alpha/2}$:	1,2816	1,6449	1,96	2,5758

Fonte: Gilbert, 1987.

Como mencionado, além de utilizar a Tabela 2 para rejeitar H_0 , é possível assumir um nível α de significância para a aplicação da estatística em uma distribuição normal (GILBER, 1987), método utilizado neste trabalho. Após a padronização de S (Z), a sua significância é então estimada a partir da função de distribuição normal (BLAIN, 2013). Ao adotar a posição central da distribuição (média) como zero (0) a dispersão da distribuição (desvio padrão) como um (1), a função de distribuição normal cumulativa segundo Correia (2003) aplicada à Z fica definida pela Equação 5.6.3.

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (\text{Equação 5.6.3})$$

Como foi detectada para cada parâmetro uma tendência ascendente ou descendente, se caracteriza como um teste bicaudal. Portanto, o nível de probabilidade correspondente ao valor absoluto de $Z f(z)$ é dobrado, identificado nesse estudo como ρ (GILBERT, 1987). H_0 (hipótese nula) é rejeitado se esse valor dobrado ρ é menor que o nível de significância α adotado (GILBERT, 1987). Assim, é preciso definir com base nos possíveis níveis de significância ($0 < \alpha < 1$) a interpretação dos resultados. Muitos autores utilizam o nível de significância α igual à 0,05 (FARHAT, 2012; KHAMBHAMMETTU, 2005; OLIVEIRA, 2014) e α igual à 0,01 (GOCIC, 2013; ZHOU, 2015) para rejeitar a hipótese nula H_0 para retornar a não tendência. Para esse estudo foi adotado α igual à 0,01.

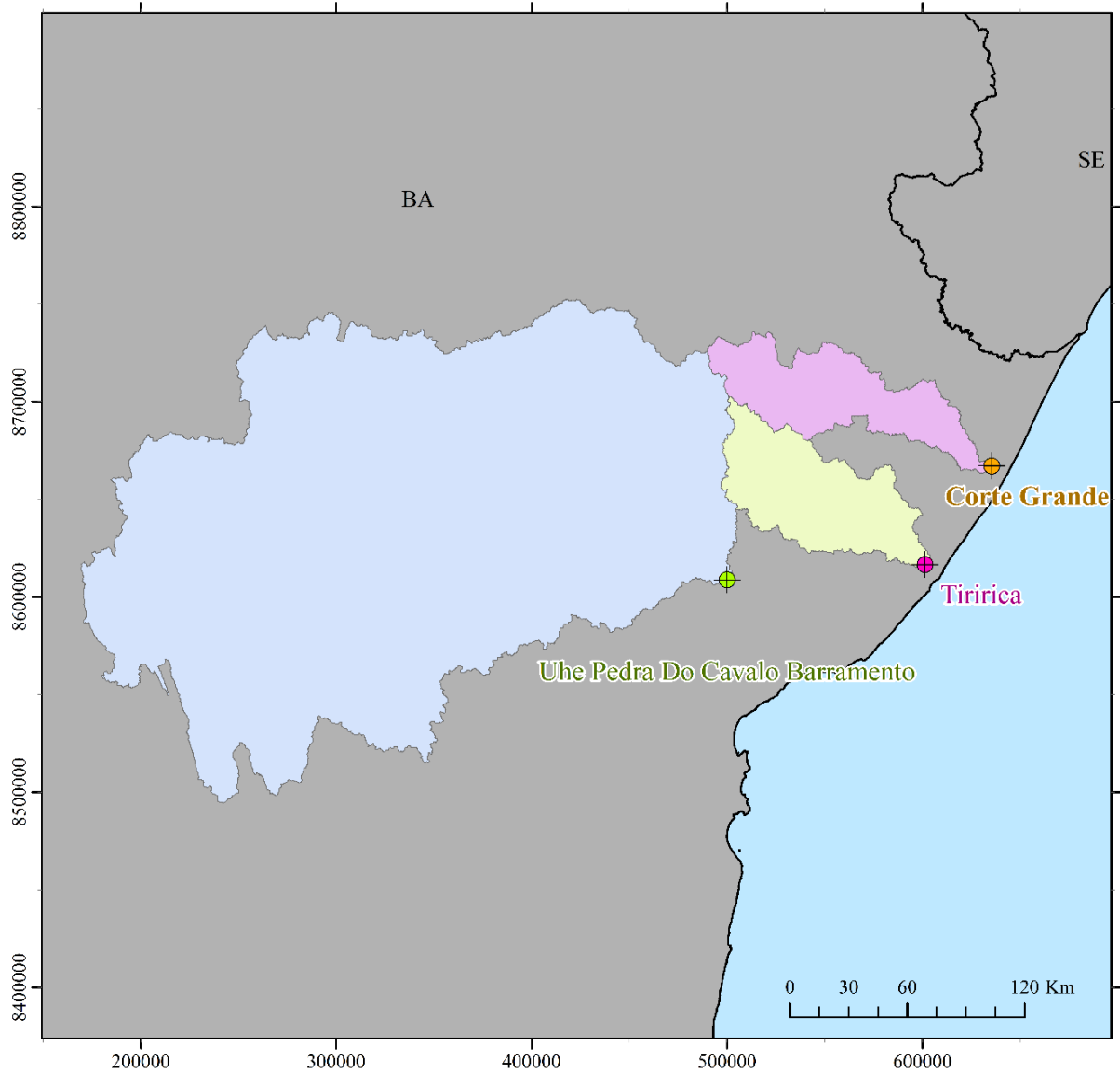
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Áreas das sub-bacias do estudo

A sub-bacia cujo do Rio Paraguaçu foi delimitada a partir da estação fluviométrica de código 51490080 obtida no Portal Hidroweb e possui cadastrada uma área de drenagem de 53.620 km² (53966,765 km² pela delimitação no ArcGIS). A sub-bacia do Rio Pojuca foi delimitada a partir da estação fluviométrica de código 50795000 e possui cadastrada uma área de drenagem de 4.700 km² (4694,928 km² pela delimitação no ArcGIS). Já a sub-bacia do Rio Inhambupe foi delimitada a partir da estação fluviométrica de código 50660000, também obtida no Portal Hidroweb, possui cadastrada uma área de drenagem de 4.380 km² (delimitação no ArcGIS resultou em 4378,664 km²).

A Figura 13 mostra o resultado da delimitação dos polígonos das áreas das sub-bacias de estudo a partir das estações fluviométricas selecionadas e do Modelo Digital de Elevação do SRTM disponibilizados pela Embrapa. Esses polígonos apresentados foram utilizados como limites geográficos dos dados desse estudo.

Figura 13 – Bacias hidrográficas delimitadas para as três estações fluviométricas.



LEGENDA

- Estação Fluviométrica UHE Pedra do Cavallo
- Estação Fluviométrica Tiririca
- Estação Fluviométrica Corte Grande
- Sub Bacia do Paraguaçu
- Sub Bacia do Rio Inhambupe
- Sub Bacia do Rio Pojuca
- Unidade Federativa



Projeção: Universal Transversa de Mercator (UTM)

Datum: SIRGAS 2000 Zona 24S

Fonte: IBGE (2021);

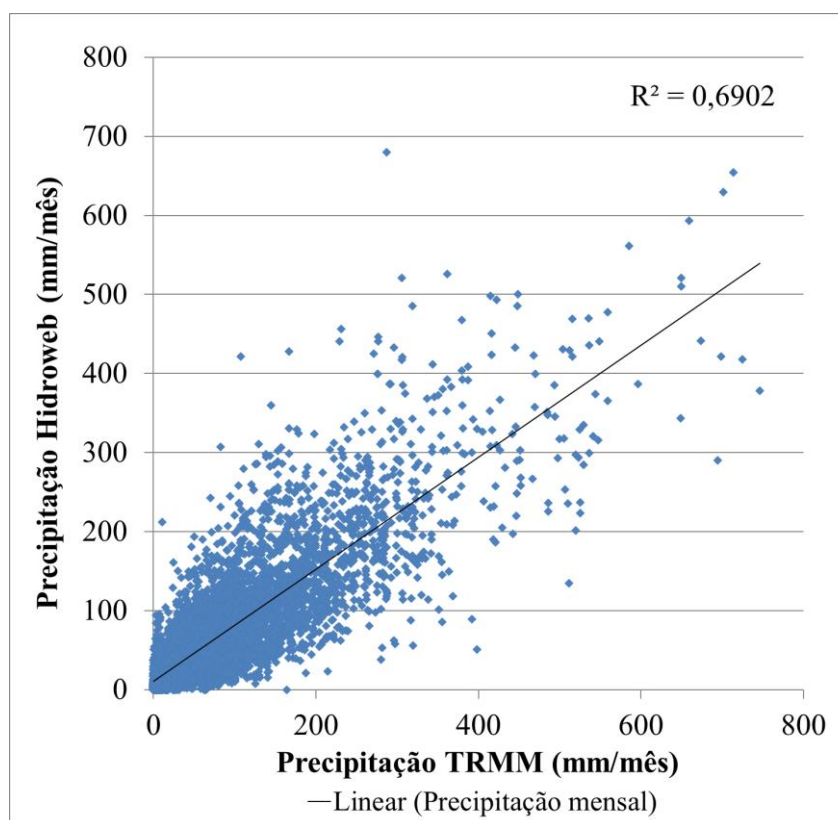
Elaboração: Mikaella Cardoso Uemura

Fonte: Autoria própria (2022).

6.2 Validação dos dados de precipitação do TRMM

Os dados de precipitação diretos e indiretos extraídos do Portal Hidroweb (ANA) e do Portal Giovanni (NASA ESDS), respectivamente, abrangeram o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2018. Dentro do período de 19 anos, 5.107 dados mensais de precipitação de 23 estações pluviométricas foram correlacionados com os valores extraídos do produto TRMM 3B43 para obtenção do índice R^2 , como demonstra a Figura 14. Pontua-se que alguns meses da série histórica disponibilizada pelo Portal Hidroweb não continham informações de precipitação mensal e consequentemente não foram consideradas no processo de validação.

Figura 14 – Resultado gráfico e numérico R^2 de dados de precipitação mensal (Hidroweb) para validação de dados indiretos (produto TRMM 3B43).



Fonte: Autoria própria (2022).

O R^2 varia entre 0 e 1 e expressa a quantidade da variância dos dados que é explicada pelo modelo linear. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo linear, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. O valor R^2 obtido foi de 0,6902. De modo simplificado, o modelo linear explica 69,02% dos valores de precipitação mensal indiretos do produto 3B43 TRMM a partir dos valores precipitação mensal diretos obtidos no Portal Hidroweb.

6.3 Balanço hídrico das sub-bacias

Após validação, os dados indiretos de precipitação mensal obtidos do produto 3B43 do TRMM foram adotados como componente de entrada do balanço hídrico, denominado nesta seção como “Precipitação mensal” (P). Os componentes de saída do balanço hídrico adotados foram os dados de vazão mensal das estações fluviométricas e os dados de evapotranspiração real mensal do produto MOD16A2, denominados respectivamente como “Vazão mensal” (Q) e “Evapotranspiração mensal” (E). Como demonstra a Equação 5.5.4 do balanço hídrico, o resultado utilizado para a análise será a Variação do Armazenamento (ΔARM).

Para a sub-bacia do Rio Paraguaçu são utilizados dados do período de março de 2005 a junho de 2013 (100 meses). Para a sub-bacia do Rio Pojuca, que possui um intervalo maior de dados ininterruptos de vazão, foram utilizados dados do período de janeiro de 2000 a dezembro de 2014 (180 meses) na elaboração do balanço hídrico, conforme o Capítulo 5 deste trabalho. O mesmo período foi utilizado para a sub-bacia do Rio Inhambupe. A Tabela 3 apresenta, nos respectivos períodos, os valores acumulados de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento.

Tabela 3 – Saldo acumulado dos componentes de balanço hídrico das sub-bacias dos rios Paraguaçu, Pojuca e Inhambupe.

Sub-Bacia	Período analisado	Nº meses	P Acumulada (mm)	E Acumulada (mm)	Q Acumulada (mm)	ΔARM Acumulada (mm)
Rio Paraguaçu	Mar-2005 a Jun-2013	100	6.875,26	6.553,27	190,73	131,26
Rio Pojuca	Jan-2000 a Dez-2014	180	20.034,06	15.290,91	2.238,14	2.505,01
Rio Inhambupe	Jan-2000 a Dez-2014	180	15.343,16	13.190,86	928,74	1.223,56

Notas:

- P Precipitação mensal
- E Evapotranspiração mensal
- Q Vazão mensal
- V Variação do armazenamento mensal
- Acum. Acumulada

Fonte: Autoria própria (2022).

A sub-bacia do Rio Paraguaçu obteve um ganho mensal de 1,31 mm sobre seu armazenamento, decorrentes das relações de entrada ($P = 68,75$ mm/mês) e saída ($E = 65,53$ mm/mês e $Q = 1,91$ mm/mês). A precipitação anual média no período é de 825,03mm/ano, uma média anual que coincide com o intervalo de precipitação previsto para o clima do semiárido (200mm à 1.000mm) predominante na área desta bacia.

A sub-bacia do Rio Pojuca obteve um ganho mensal de 13,92 mm sobre seu armazenamento, decorrentes das relações de entrada ($P = 111,30$ mm/mês) e saída ($E = 84,95$ mm/mês e $Q = 12,43$ mm/mês). A precipitação anual média no período é de 1.335,60 mm/ano, uma média anual coerente com a precipitação média prevista para o clima tropical quente úmido (1.600 mm) predominante na área desta bacia.

A sub-bacia do Rio Inhambupe obteve um ganho mensal de 6,80 mm sobre seu armazenamento, decorrentes das relações de entrada ($P = 85,24$ mm/mês) e saída ($E = 73,28$ mm/mês e $Q = 5,16$ mm/mês). A precipitação anual média no período é de 1.022,88 mm/ano, uma média anual que representar bem o cenário da bacia por possuir mais da metade da sua área inserida no semiárido e a outra parte um clima tropical quente úmido. A Tabela 4 apresenta as médias mensais descritas.

Tabela 4 – Médias dos componentes do balanço hídrico das sub-bacias dos rios Paraguaçu, Pojuca e Inhambupe.

Sub-bacia	Período analisado	Nº meses	P Média (mm/mês)	E Média (mm/mês)	Q Média (mm/mês)	ΔARM Média (mm/mês)
Rio Paraguaçu	Mar-2005 à Jun-2013	100	68,75	65,53	1,91	1,31
Rio Pojuca	Jan-2000 à Dez-2014	180	111,30	84,95	12,43	13,92
Rio Inhambupe	Jan-2000 à Dez-2014	180	85,24	73,28	5,16	6,80

Notas:

P Precipitação mensal

E Evapotranspiração mensal

Q Vazão mensal

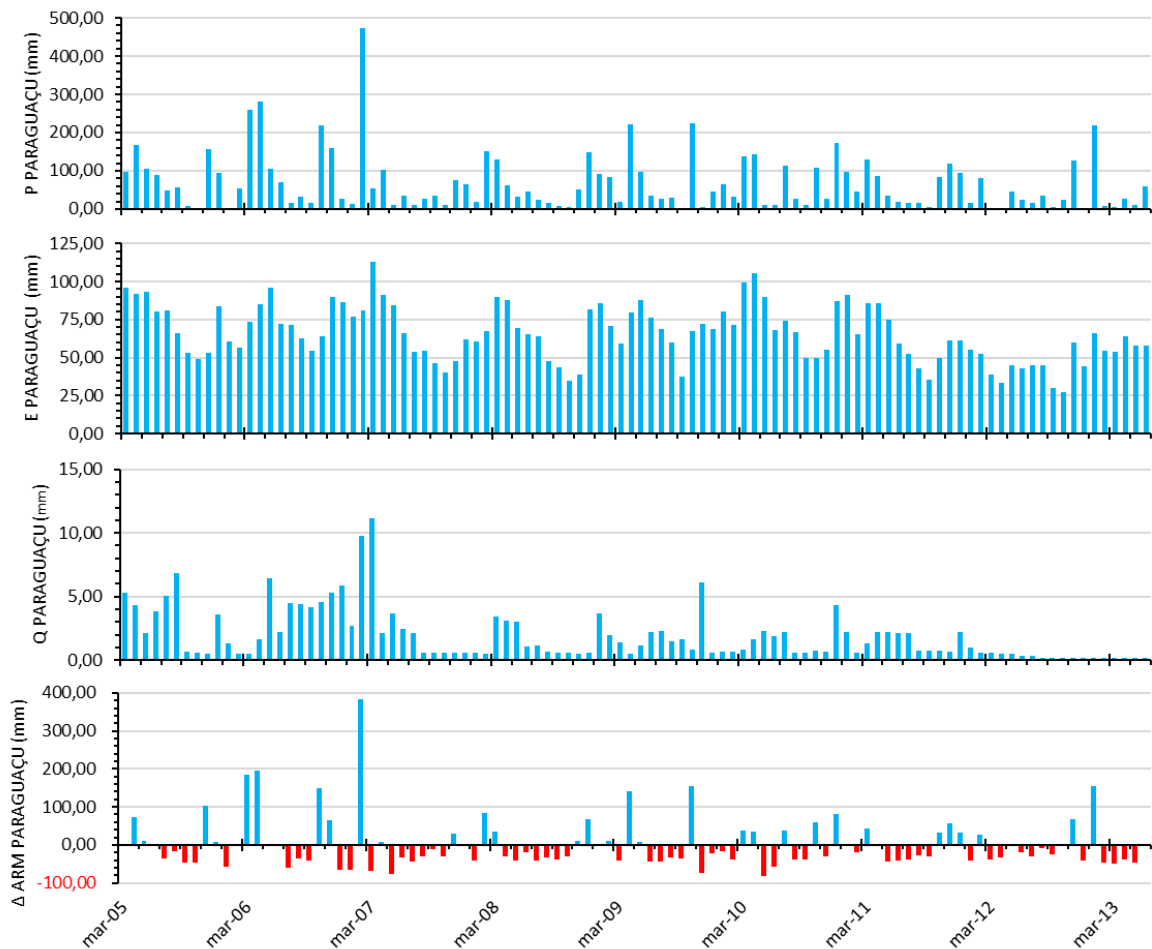
ΔARM Variação do armazenamento mensal

Acum. Acumulada

Fonte: Autoria própria (2022).

A sub-bacia do Rio Paraguaçu, entre março 2005 e junho de 2013, obteve uma precipitação mensal máxima de 473,23 mm em fevereiro de 2007. A evapotranspiração mensal apresentou uma máxima de 113,04 mm em março de 2007 e uma mínima de 27,19 mm em outubro de 2012. A vazão mensal da sub-bacia do Rio Paraguaçu no apresentou uma máxima de 11,16 mm (223,484 m³/s no exutório) em março de 2007 e uma mínima de 0,14 mm (3,001 m³/s no exutório) em fevereiro de 2013. A variação mensal do armazenamento da sub-bacia do Rio Paraguaçu apresentou uma máxima de ganho de 382,81 mm de ganho em fevereiro de 2007 e uma mínima de -81,60 mm (perda máxima) em maio de 2010. A Figura 15 apresenta os gráficos para visualização dos dados descritos. O gráfico de variação do armazenamento apresenta menor frequência e amplitude dos valores positivos ao longo da série em reflexo à precipitação, mas não apresenta um aumento expressivo na frequência de valores negativos, o que pode ser justificado pela diminuição da vazão e evapotranspiração.

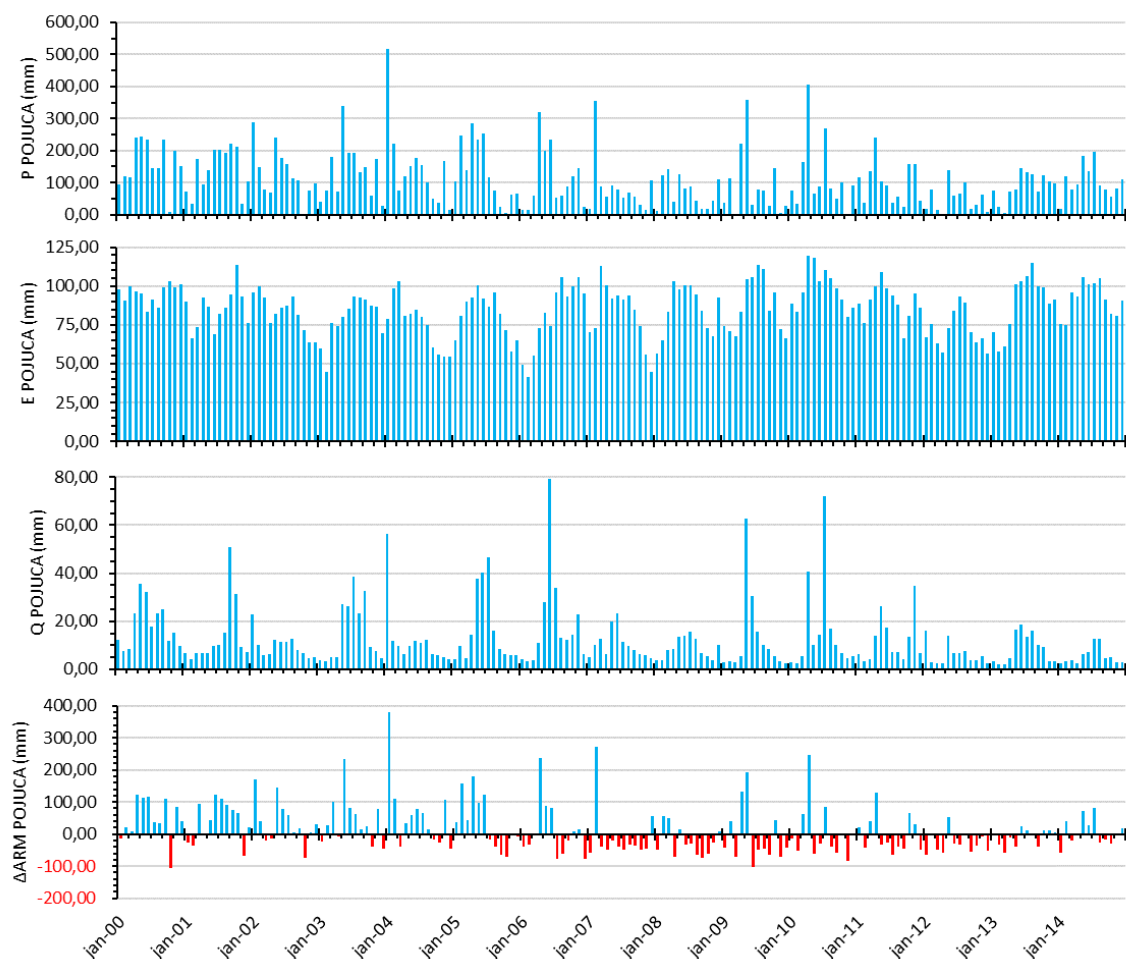
Figura 15 – Gráficos de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação de armazenamento da sub-bacia do Rio Paraguaçu entre março de 2005 e junho de 2013.



Fonte: Autoria própria (2022).

A sub-bacia do Rio Pojuca, no período de janeiro de 2000 e dezembro de 2014, obteve uma precipitação mensal máxima de 516,10 mm em janeiro de 2004. A evapotranspiração mensal apresentou uma máxima de 119,34 mm em abril de 2010 e uma mínima de 41,12 mm em fevereiro de 2006. A vazão mensal da sub-bacia do Rio Pojuca apresentou uma máxima de 79,13 mm (143,486 m³/s no exutório) em junho de 2006 e uma mínima de 1,9489 mm (3,42 m³/s no exutório) em março de 2013. A variação mensal do armazenamento apresentou uma máxima de 380,65 mm de ganho em janeiro de 2004 e uma mínima de -105,44 mm/mês (perda máxima) em outubro de 2000. A variação do armazenamento possui um comportamento de decrescente semelhante ao de precipitação. Porém, existe um aumento considerável da frequência dos valores negativos de variação do armazenamento a partir de junho de 2006 devido a um comportamento constante da evapotranspiração ao longo da série. A Figura 16 apresenta os gráficos como forma de visualização dos dados descritos.

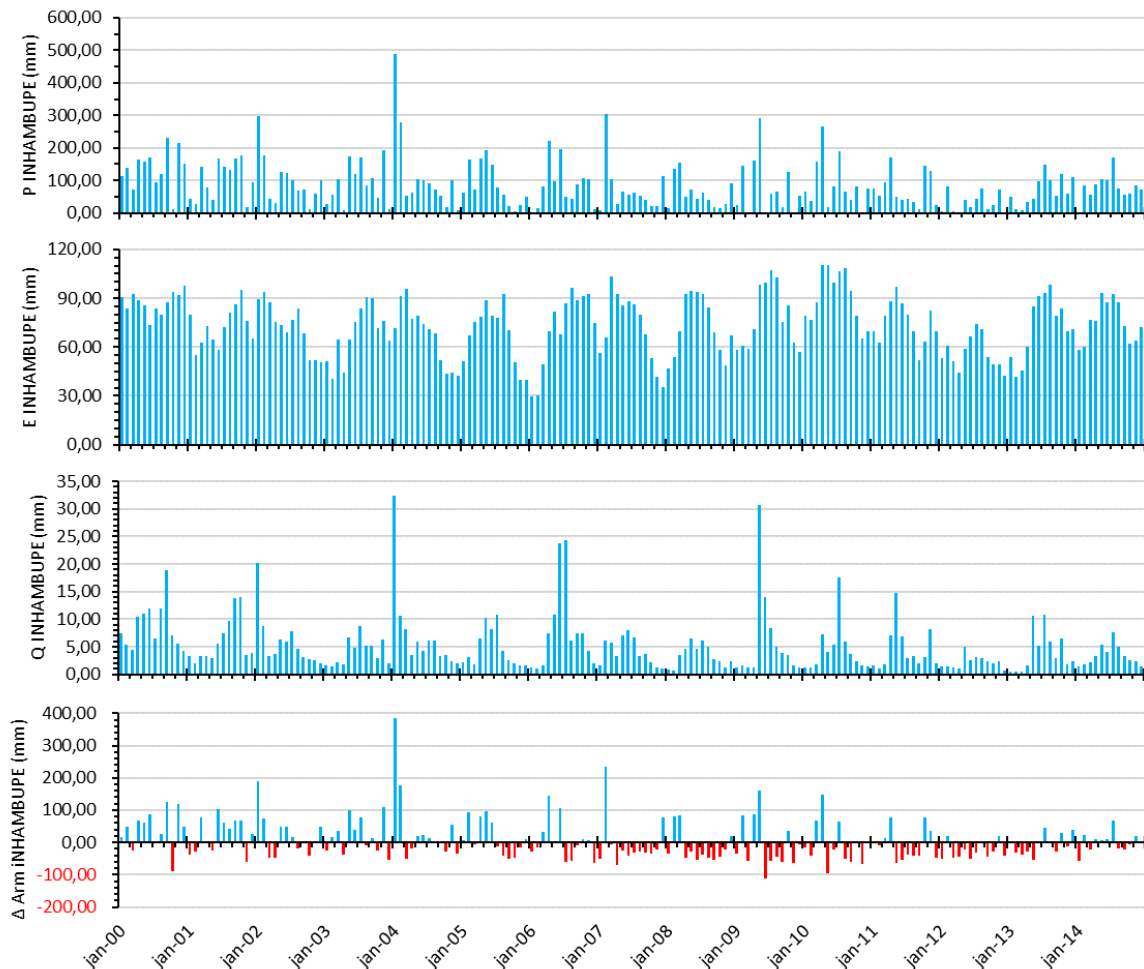
Figura 16 – Gráficos de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação de armazenamento da sub-bacia do Rio Pojuca entre dezembro de 2000 e dezembro de 2014.



Fonte: Autoria própria (2022).

A sub-bacia do Rio Inhambupe, no período de janeiro de 2000 e dezembro de 2014, obteve uma precipitação mensal máxima de 487,92 mm em janeiro de 2004. A evapotranspiração real mensal da sub-bacia do Rio Inhambupe apresentou uma máxima de 110,67 mm em abril de 2010 e uma mínima de 29,31 mm/mês em janeiro de 2006. A vazão mensal da sub-bacia do Rio Inhambupe apresentou uma máxima de 32,41 mm/mês (53,00 m³/s no exutório) em janeiro de 2004 e uma mínima de 0,45 mm/mês (0,74 m³/s no exutório) em março de 2013. A variação mensal do armazenamento da sub-bacia do Rio Inhambupe apresentou uma máxima de 384,02 mm/mês de ganho em janeiro de 2004 e uma mínima de -112,60 mm/mês (perda máxima) em junho de 2009. Apesar do comportamento constante de evapotranspiração e de decrescimento da vazão, o gráfico de variação do armazenamento apresenta um comportamento de decrescimento em reflexo à precipitação, que também apresenta um comportamento de decrescimento (Figura 17).

Figura 17 – Gráficos de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação de armazenamento da sub-bacia do Rio Inhambupe entre dezembro de 2000 e dezembro de 2014.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para uma análise sobre crescimento ou decrescimento das tendências das séries históricas foi realizada uma avaliação estatística com determinado grau de confiança, conforme descreve o Item 6.4.

6.4 Teste de tendência de Mann-Kendall

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio da análise de tendência dos dados de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento nas três sub-bacias estudadas. Foram utilizados dados com frequências mensais das áreas de estudo entre os meses março de 2005 a junho de 2014 para a sub-bacia do Rio Paraguaçu, e entre os meses janeiro de 2000 a dezembro de 2014 para as sub-bacias do Rio Pojuca e Inhambupe para a aplicação do teste de Mann-Kendall e determinação das respectivas tendências.

Para os componentes de entrada (precipitação), de saída (evapotranspiração e vazão) e variação do armazenamento a estatística S indica se a tendência está diminuindo (S negativo) ou aumentando (S positivo) ao longo do período analisado. A variância da estatística S é indicada por $VAR(S)$, a partir do qual a estatística S é então padronizada (Z). Sua significância é estimada a partir função de distribuição normal cumulativa para o teste bicaudal (ρ -value). O nível de significância α igual à 0,01 adotado quando comparado com ρ -value indica o grau de confiança de 99% no resultado da tendência (positivo ou negativo). Se ρ -value $< \alpha$, a tendência é estatisticamente significativa, seja ela decrescente ($S < 0$) ou crescente ($S > 0$). Se ρ -value $> \alpha$, a tendência não é estatisticamente significativa.

Para a sub-bacia do Rio Paraguaçu, analisada entre março de 2005 e junho de 2013, S apresenta decrescimento estatístico para precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento. A precipitação não apresenta uma tendência decrescente estatisticamente significativa (Tabela 5). Por outro lado, se observa uma tendência decrescente estatisticamente significativa de evapotranspiração e vazão, ou seja, os componentes de saída estão decrescendo ao longo da série. A combinação desses fatores leva à uma variação de armazenamento com tendência decrescente, embora não suficiente para ser considerada estatisticamente significativa.

Tabela 5 – Resultados estatístico de parâmetros e de tendência de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento da sub-bacia do Rio Paraguaçu.

Sub-bacia do Rio Paraguaçu					
Parâmetro	<i>S</i>	<i>VAR(S)</i>	<i>Z</i>	<i>p-value</i>	Tendência para $\alpha = 0,01$
Precipitação	-794	112750,00	-2,3616	0,0181939762	Não há tendência estatisticamente significativa
Evapotranspiração	-1330	112748,00	-3,958	0,0000755950	Tendência decrescente estatisticamente significativa
Vazão	-1962	112690,67	-5,8416	0,0000000052	Tendência decrescente estatisticamente significativa
Variação do Armazenamento	-160	112750,00	-0,4735	0,6358418296	Não há tendência estatisticamente significativa

Fonte: Autoria própria (2022).

Para a sub-bacia do Rio Pojuca (Tabela 6), analisada entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014, a evapotranspiração (que costuma ser o componente de saída mais relevante conforme demonstrado nos resultados do Item 6.2) apresenta tendência de crescimento ($S > 0$), porém estatisticamente não significativa ($p\text{-value} > 0,01$). Quanto a vazão, esta apresenta tendência decrescente estatisticamente significativa, mas apresenta um impacto razoavelmente baixo quanto à saída da bacia em termos de fluxo quando comparada à precipitação. Dessa forma, a tendência da variação do armazenamento pode ser explicada principalmente pelo resultado de tendência significativa de queda da precipitação.

Para a sub-bacia do Rio Inhambupe (Tabela 7), também compreendida entre janeiro de 2000 e dezembro de 2014, *S* apresenta decrescimento estatístico para todos os parâmetros. Dentre eles, a evapotranspiração é o único que não apresenta tendência estatisticamente significativa ($p\text{-value} > 0,01$). Para este caso, a tendência do componente de entrada (precipitação) é o fator dominante sobre o resultado da variação do armazenamento, que apresenta uma tendência decrescente estatisticamente significativa. A vazão, apesar de possuir uma tendência decrescente estatisticamente significativa, não influencia tanto quanto a precipitação sobre o resultado de tendência da variação do armazenamento (Item 6.2) desta sub-bacia. A sub-bacia do Rio Inhambupe, apesar de possuir mais da metade de sua área no

polígono do semiárido, demonstrou comportamento de tendência semelhante à sub-bacia do Rio Pojuca, majoritariamente inserido no bioma de mata atlântica.

Tabela 6 – Resultados estatístico de parâmetros e de tendência de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento da sub-bacia do Rio Pojuca.

Sub-bacia do Rio Pojuca					
Parâmetro	S	VAR(S)	Z	ρ -value	Tendência para $\alpha = 0,01$
Precipitação	-2956	653350,00	-3,6558	0,0002563634	Tendência decrescente estatisticamente significativa
Evapotranspiração	581	653347,00	0,71756	1,5269691516	Não há tendência estatisticamente significativa
Vazão	-3470	653343,33	-4,2942	0,0000175312	Tendência decrescente estatisticamente significativa
Varição do Armazenamento	-3202	653350,00	-3,9602	0,0000748996	Tendência decrescente estatisticamente significativa

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 7 – Resultados estatístico de parâmetros e de tendência de precipitação, evapotranspiração, vazão e variação do armazenamento da sub-bacia do Rio Inhambupe.

Sub-bacia Inhambupe					
Parâmetro	S	VAR(S)	Z	ρ -value	Tendência para $\alpha = 0,01$
Precipitação	-2829	653349,00	-3,4987	0,0004675311	Tendência decrescente estatisticamente significativa
Evapotranspiração	-673	653345,00	-0,8314	0,4057607080	Não há tendência estatisticamente significativa
Vazão	-3661	653323,67	-4,5281	0,0000059514	Tendência decrescente estatisticamente significativa
Varição do Armazenamento	-2687	653349,00	-3,323	0,0008904746	Tendência decrescente estatisticamente significativa

Fonte: Autoria própria (2022).

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos do balanço hídrico correspondem coerentemente com os respectivos climas e biomas demonstram que as sub-bacias dos rios Paraguaçu, Pojuca e Inhambupe tiveram saldo positivo no armazenamento hídrico ao final do período analisado (131,26 mm, 2.505,01 mm e 1.223,56 mm, respectivamente).

O método de teste de tendência de Mann-Kendall apresentou tendências decrescentes como estatisticamente significativas em relação aos fluxos hídricos analisados, enquanto as demais tendências crescentes e decrescentes não se apresentaram como estatisticamente significativas. A tendência da variação do armazenamento pode ser explicada pela tendência dos demais componentes de entrada e saída, coerência esperada para um balanço fechado e confirmada nos resultados. A sub-bacia do Rio Paraguaçu, que possui maior área dominada pelo clima semiárido e bioma caatinga, apesar de apresentar um relativo decréscimo dos componentes de saída (evapotranspiração e vazão), não possui uma tendência significativa em relação a variação do armazenamento de 2005 a 2013. A sub-bacia do Rio Pojuca, apesar de grandes ganhos acumulados de armazenamento de 2000 a 2014, apresenta uma tendência de decréscimo significativo do armazenamento devido à queda significativa da precipitação nesse período. As mesmas tendências de queda são vistas na sub-bacia do Rio Inhambupe, entretanto com cerca de metade do ganho de armazenamento em relação a sub-bacia do Rio Pojuca.

Uma vez que a disponibilidade hídrica é afetada pela variação do armazenamento na bacia, mesmo que a bacia apresente ganho hídrico ao longo dos anos, é imprescindível analisar suas tendências (positivas ou negativas) como princípio em um plano de contingências e gestão hídrica. O decréscimo do armazenamento hídrico afeta significativamente os processos do ciclo hidrológico e as regiões mais sensíveis no que diz respeito à disponibilidade e utilização da água, já previsto em lei federal desde 1997 (BRASIL, 1997).

Os sistemas de informações, como os utilizados nesse trabalho, representam importantes ferramentas para a sociedade e para instituições públicas ou privadas, e se tornaram hoje em dia imprescindíveis para a gestão de recursos. Assim como Tucci (2000) salienta que a regionalização não pode ser vista como um método de extrapolação, devido à variabilidade dos processos hidrológicos. Por isso nenhum estudo poderá substituir uma rede adequada de monitoramento e esse trabalho reforça tal importância. Mas para um país de

extensão tão grande e com diversos estudos hidrometeorológicos por sensoriamento remoto que reflete o cenário, é imprescindível incentivar a aplicação contínua dos métodos de análise disponíveis e tornar cada vez mais acessíveis as ferramentas para o desenvolvimento científico e tecnológico. Santos (2000) aplica em séries históricas hidrológicas seja estimada a taxa de variação das séries com Sen's Slope e utilização de filtros com o intuito de diminuir a autocorrelação existente em dados hidrológicos, como *trend free pre-whitening* (TFPW). Para aprimorar as análises, propõe-se para futuros estudos a aplicação de Sen's Slope e TFPW em conjunto com o teste de Mann Kendall.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, John T. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 1-12, 2018.

Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual. **Agência Nacional de Águas**. Brasília: ANA, 2019.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Brasília: ANA, 2022.

ArcGIS Desktop. Con. Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/con-.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. Fill (Spatial Analyst). Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/fill.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. Flow Accumulation. Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-accumulation.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. Flow Direction (Spatial Analyst). Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-direction.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. How Flow Accumulation Works. Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. How Flow Direction works. Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-direction-works.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. How Stream to Feature Works. Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-stream-to-feature-works.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. Stream to Feature. Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/stream-to-feature.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

ArcGIS Desktop. Watershed. Disponível em:

<<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/watershed.htm>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

BRASIL. 1997. Lei 9.433, de 08 de janeiro de 1997. **Lex: Diário Oficial da União**. Seção 1, p. 470. Brasília, 09 de janeiro 1997.

- BLAIN, Gabriel Constantino. The modified Mann-Kendall test: on the performance of three variance correction approaches. *Bragantia*, v. 72, p. 416-425, 2013.
- CARVALHO, Ana Paula Vilela; BRUMATTI, Dayane Valentina; DIAS, Herly Carlos Teixeira. Importância do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. **Revista brasileira de agropecuária sustentável**, 2012.
- CASIMIRO, WALDO SVEN LAVADO et al. TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon-Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model. In: **New Approaches to Hydrological Prediction in Datasparse Regions, Proceedings of Symposium HS**. 2009. p. 207-216.
- CHEVALLIER, Pierre. Aquisição e processamento de dados. TUCCI, CEM **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre, Ed. UFRGS/EDUSP/ABRH, p. 485-525, 1993.
- COHEN, Jacob. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Routledge, 2013.
- CORREA, MS. Probabilidade e estatística. 2ª ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.
- DOS SANTOS, Thais Vieira et al. Teste de Mann-Kendall aplicado à dados hidrológicos– Desempenho dos filtros TFPW e CV2 na análise de tendências. **Ciência e Natura**, v. 42, p. e87-e87, 2020.
- DOURADO-NETO, Durval et al. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v. 67, p. 87-95, 2010.
- ELNASHAR, Abdelrazek et al. Synthesis of global actual evapotranspiration from 1982 to 2019. **Earth System Science Data**, v. 13, n. 2, p. 447-480, 2021.
- ESDS. Giovanni The Bridge Between Data and Science. Version 4.37. Disponível em: <<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.
- FARHAT, JA Connor SK; VANDERFORD, M. **GSI Mann-Kendall Toolkit**. 2012.
- FARR, Tom G. et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.
- GILBERT, Richard O. **Statistical methods for environmental pollution monitoring**. John Wiley & Sons, 1987.
- GOCIC, Milan; TRAJKOVIC, Slavisa. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 172-182, 2013.
- GONÇALVES, Roger Dias; ENGELBRECHT, Bruno Zanon; CHANG, Hung Kiang. Análise hidrológica de séries históricas da bacia do Rio Grande (BA): Contribuição do sistema aquífero Urucuia. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 2, p. 190-208, 2016.
- GONÇALVES, Roger Dias; ENGELBRECHT, Bruno Zanon; CHANG, Hung Kiang. Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o Rio São Francisco, Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2018.
- HAMED, Khaled H. Trend detection in hydrologic data: the Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. **Journal of hydrology**, v. 349, n. 3-4, p. 350-363, 2008.

- HIDROWEB. Séries Históricas de Estações. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.
- IBGE. Downloads. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em 1 de fevereiro de 2020.
- JENSON, Susan K.; DOMINGUE, Julia O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- KENDALL, M. G. Kendall. Rank Correlation Methods; **Griffin, C.**, Ed. 1975.
- KHAMBHAMMETTU, Prashanth. Mann-Kendall analysis for the Fort Ord site. **USACE, HydroGeoLogic, Inc.**, 2005.
- MACRITCHIE, K. README: Document for the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) Version 007. **Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)**, 2015.
- MANN, Henry B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 245-259, 1945.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>>. Acesso em: 10 de novembro de 2022.
- MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L.; ROBERTI, D. R.; SOUZA, V. A.; ROCHA, H. R.; PAIVA, R. C. D. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America, **Journal of Hydrology**, Volume 575, 2019, Páginas 131-147.
- MU, Qiaozhen et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, 2007.
- MU, Qiaozhen et al. Satellite assessment of land surface evapotranspiration for the pan-Arctic domain. **Water Resources Research**, v. 45, n. 9, 2009.
- MU, Qiaozhen; ZHAO, Maosheng; RUNNING, Steven W. Brief introduction to MODIS evapotranspiration data set (MOD16). **Water Resources Research**, v. 45, p. 1-4, 2005.
- MU, Qiaozhen et al. Satellite assessment of land surface evapotranspiration for the pan-Arctic domain. **Water Resources Research**, v. 45, n. 9, 2009.
- MU, Qiaozhen; ZHAO, Maosheng; RUNNING, Steven W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, 2011.
- MU, Qiaozhen; ZHAO, Maosheng; RUNNING, Steven W. MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (NASA MOD16A2/A3) collection 5. **NASA Headquarters**. 2013.

MU, Qiaozhen; ZHAO, Maosheng; RUNNING, Steven W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, 2011.

NASA Goddard Earth Sciences (GES) Data and Information Services Center (DISC). TRMM 3B43. Disponível em: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B43_7/summary?keywords=TRMM_3B43>. Acesso em: 4 de novembro de 2022.

NTSG. MODIS. Disponível em: <<https://www.ntsug.umd.edu/project/modis/>>. Acesso em 4 de novembro de 2022.

NTSG Data Repository. University of Montana. Disponível em: <http://files.ntsug.umd.edu/data/NTSG_Products/MOD16/MOD16A2_MONTHLY.MERRA_GMAO_1kmALB/>. Acesso em 4 de novembro de 2022.

OLIVEIRA, Paulo Tarso S. et al. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7100-7114, 2014.

RUDORFF, BERNARDO FT RUDORFF. Sensor Modis e Suas Aplicações Ambientas no Brasil. Editora Parêntese, 2007.

SILVEIRA, André LL da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. **Hidrologia: ciência e aplicação**, v. 4, p. 35-51, 2001.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, Jr. **The Water Balance. Laboratory of Climatology**. Centerton, NJ, USA, 1955.

TUCCI, Carlos EM. Regionalização de vazões. **Editora da Universidade/UFRGS**, 2002.

TUCCI, Carlos EM; BELTRAME, Lawson FS. Evaporação e evapotranspiração. **Hidrologia: ciência e aplicação**, v. 4, p. 253-287, 1993.

YUE, Sheng; WANG, ChunYuan. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. **Water resources management**, v. 18, n. 3, p. 201-218, 2004.

ZHOU, Yan. Time Series Analysis of groundwater hydrograph of a Cainozoic aquifer. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), 2015.