



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

JOSÉ CARLOS BENICIO DO NASCIMENTO FILHO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO DESMATAMENTO
SOBRE O REGIME HIDROCLIMÁTICO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO CURUÁ-PA**

SÃO CRISTÓVÃO-SE

2022

JOSÉ CARLOS BENICIO DO NASCIMENTO FILHO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO DESMATAMENTO SOBRE O
REGIME HIDROCLIMÁTICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO CURUÁ-PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos como um dos requisitos básicos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. André Quintão de Almeida

SÃO CRISTÓVÃO-SE

2022

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

N244a Nascimento Filho, José Carlos Benicio do
Avaliação do impacto do desmatamento sobre o regime
hidroclimático da bacia hidrográfica do rio Curuá-PA / José Carlos
Benicio do Nascimento Filho ; orientador André Quintão de
Almeida. – São Cristóvão, SE, 2022.
82 f. : il.

Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade
Federal de Sergipe, 2022.

1. Recursos hídricos. 2. Monitorização florestal. 3. Biomassa
florestal. 4. Desmatamento – Avaliação. 5. Sensoriamento remoto.
6. Métodos de simulação. 7. Bacias hidrográficas – Amazônia. 8.
Curuá, Rio (PA). I. Almeida, André Quintão de, orient. II. Título.

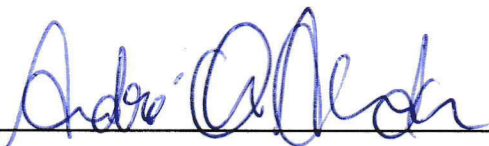
CDU 556.18:630:528.8(811.3)

JOSÉ CARLOS BENICIO DO NASCIMENTO FILHO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO DESMATAMENTO SOBRE O REGIME
HIDROCLIMÁTICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CURUÁ-PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos como um dos requisitos básicos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

APROVADO:



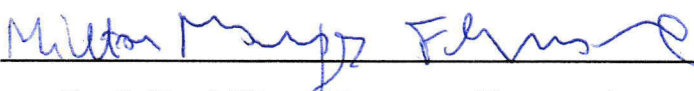
Prof. Dr. André Quintão de Almeida (Orientador- UFS)

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Prof. Dr. Inajá Francisco de Sousa

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Prof. Dr. Milton Marques Fernandes

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2022

RESUMO

Nas últimas décadas, as grandes bacias hidrográficas localizadas na região Amazônica vêm passando por um intenso processo de desmatamento e degradação florestal. Mensurar esse desmatamento e seus impactos na região é de suma importância para uma eficiente gestão ambiental local. Diante disso, o trabalho teve como objetivo principal avaliar a relação do desmatamento sobre os principais componentes hidroclimáticos da bacia hidrográfica do rio Curuá (BRC), localizada no município de Altamira-Pará, na Amazônia Legal. Diante da baixa densidade de estações de monitoramento da precipitação na região norte do País, foi avaliada a acurácia de dados de precipitação estimados pelo Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) para essa bacia entre os anos de 1981 e 2020. Esses dados, obtidos por sensoriamento remoto, apresentaram melhores resultados nas escalas de tempo mensal e anual, com valores aproximados de REQM de 45,8% (81,3 mm) e 21,2% (433,0 mm), respectivamente. Para uma análise mais precisa sobre o comportamento hídrico da bacia foi realizado um estudo de suas características morfometrias a partir do modelo digital de elevação derivado do shuttle radar topography mission, e dados georreferenciados de hidrografia da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Com esse estudo foi identificado que a bacia apresenta uma forma alongada, pouco suscetível a enchentes naturais ou provenientes de alterações antrópicas de uso e cobertura do solo. Os valores de desmatamento da BRC foram estimados por algoritmo de aprendizado de máquina random forest. A partir das séries anuais, a identificação de possíveis tendências nos dados foram analisadas. Por fim, a relação entre o desmatamento e os principais elementos hidroclimáticos da bacia foi analisada pelo coeficiente de correlação de Pearson. Não foram observadas tendências significativas nos dados hidroclimáticos analisados na bacia. No entanto, foi observada uma redução (16,8%) na área de vegetação nativa entre 1985 e 2020, com um aumento significativo do desmatamento a partir do ano 2007. Não foi observada relação significativa entre os valores anuais de área de floresta/desmatamento e as informações hidroclimáticas da bacia. Podemos concluir que, apesar da remoção da área de cobertura florestal, ainda não foi possível verificar relação entre o desmatamento e os principais componentes hidroclimáticos analisados na bacia. Isso pode ser justificado pela grande extensão territorial da bacia e pelo tamanho de sua área desmatada.

PALAVRAS CHAVES: Cobertura florestal, Amazônia, Google Earth Engine, random forest, CHIRPS.

ABSTRACT

In recent decades, the watersheds located in the Amazon region have been undergoing an intense process of deforestation and forest destruction. Measuring this deforestation and its impacts in the region is of paramount importance for efficient local environmental management. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of deforestation on the main hydroclimatic components of the hydrographic basin of the Curuá River (BRC), located in the municipality of Altamira-Pará, in the Legal Amazon. In 1981-1982, the best results by remote sensing showed results on monthly and annual time scales, with approximate values of RMSE of 45.8% (81.3 mm) and 21.2% (433.0 mm), respectively. For a more precise analysis of the water behavior of the basin, a study of its morphological characteristics was carried out from the digital model derived from the topographic mission of the shuttle radar, and basic georeferenced hydrographic data from the National Water and Sanitation Agency (ANA). With this study, a basin has a shape that is not very susceptible to natural floods or from anthropogenic changes in land use and cover. BRC deforestation values were estimated for random machine learning. From the series, the identification of possible data. Finally, the correlation between deforestation and the main hydroclimatic elements was the Pearson correlation. No significant trends were observed in the hydroclimatic data analysis in the analysis. However, a reduction (168%) was observed in the area of native vegetation between 19 and 2, with a significant increase from 2007 from the year 2007. and the hydroclimatic information of the basin. of possible protection, but of forest protection, it is still not possible to verify between forest protection and the main forest protection. This can be explained by the large territorial extension of the basin and the size of its deforested area.

Keywords: Forest cover, Amazônia, Google Earth Engine, random forest, CHIRPS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo..	18
Figura 2: Cursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Curuá.	26
Figura 3: Localização da área de estudo	34
Figura 4: (A) Dispersão de dados de precipitação diária, (B) dispersão de dados de precipitação mensal e (C) dispersão de dados de precipitação anual.	40
Figura 5: Boxplot para análise de desvio dos valores de precipitação (A) diária da ANA, (B) diária do CHIRPS, (C) mensal da ANA, (D) mensal do CHIRPS, (E) anual da ANA e (F) anual do CHIRPS.	41
Figura 6: Precipitações médias diárias por mês da ANA e CHIRPS para a bacia hidrográfica do rio Curuá para os anos de 1981 a 2020..	42
Figura 7: Precipitações médias mensais BRC para os anos de 1981 a 2020.....	43
Figura 8: Precipitações diárias, acumuladas mensais e anuais da bacia hidrográfica do rio Curuá para os anos de 1981 a 2020	44
Figura 9: Mapa de precipitação acumulada média dos anos de 1981 a 2020 da BRC.	45
Figura 10: Localização da área de estudo	57
Figura 11: Composição RGB de imagens do satélite Landsat 8 OLI / TIRS.	59
Figura 12: Estações de monitoramento fluviométrico.....	61
Figura 13: Vazões mínima, máxima e média anuais do posto fluviométrico Cajueiro dos anos de 1981 a 2020	66
Figura 14: Vazão específica e fluxo de base do posto fluviométrico Cajueiro dos anos de 1981 a 2020.	67
Figura 15: Precipitação acumulada anual média na Bacia Hidrográfica do Curuá para os anos de 1981 a 2020.....	67
Figura 16: Resposta hidrológica anual da Bacia Hidrográfica do Curuá para os anos de 1981 a 2020.	68
Figura 17: Porcentagens de cobertura florestal natural entre os anos de 1985 e 2020, na BRC.....	70
Figura 18: Cobertura florestal e áreas sem floresta natural nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2020	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índices e metodologias quanto às características do relevo	21
Tabela 2: Índices e metodologias quanto às características da rede de drenagem. .	21
Tabela 3: Classes de relevo utilizadas, conforme EMBRAPA (2013).	22
Tabela 4: Resultados da análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Curuá...	23
Tabela 5: Distribuição das classes de declividade na sub-bacia do rio Piauitinga/SE	25
Tabela 6: Código, localização, altitude e série histórica de cada estação pluviométrica da ANA utilizada.	35
Tabela 7: Estatística descritiva dos dados de precipitação pluvial da ANA e CHIRPS.	38
Tabela 8: Postos fluviométricos levantados e medições para os períodos sem dados do posto fluviométrico Cajueiro (código =18650000).	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico;

BRC – Bacia hidrográfica do rio Curuá;

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;

CHIRPS – Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data;

GEE – Google Earth Engine;

PA – Pará;

SE – Sergipe;

SIG – Sistema de informação Geográfica;

UFS – Universidade Federal de Sergipe.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	11
INTRODUÇÃO GERAL	12
CAPÍTULO 1: Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Curuá-PA.	15
RESUMO	15
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	17
2.2 BASE DE DADOS	19
2.3 ANÁLISE MORFOMÉTRICA	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4 CONCLUSÕES.....	26
REFERÊNCIAS	27
CAPÍTULO 2: Avaliação da acurácia da precipitação pluvial estimada com dados CHIRPS na região de influência da bacia hidrográfica do rio Curuá-PA	31
RESUMO	31
ABSTRACT	31
1 INTRODUÇÃO.....	32
2 METODOLOGIA.....	34
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	34
2.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBSERVADOS	35
2.3 DADOS CHIRPS	36
2.4 ANÁLISE DE ACURÁCIA	37
2.5 CARACTERIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA	37
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
3.1 ANÁLISE DE ACURÁCIA.....	38

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA	42
4 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS	46
CAPÍTULO 3: Relação entre o desmatamento e a resposta hidrológica na bacia hidrográfica do rio Curuá-PA	54
RESUMO	54
ABSTRACT	54
1 INTRODUÇÃO.....	55
2 METODOLOGIA.....	57
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	57
2.2 MAPEAMENTO DO DESMATAMENTO.....	58
2.3 DADOS HIDROCLIMÁTICOS	60
2.4 RESPOSTA HIDROLÓGICA	63
2.5 ANÁLISE DE TENDÊNCIA E RELAÇÃO ENTRE O USO E COBERTURA DO SOLO E DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS	63
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.1 DADOS FLUVIOMÉTRICOS	64
3.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	67
3.3 RESPOSTA HIDROLÓGICA	68
3.4 MAPEAMENTO DE COBERTURA FLORESTAL E ÁREA DESMATADA.....	69
3.5 ANÁLISE DE TENDÊNCIA.....	71
3.6 EFEITO DO CRESCIMENTO DA ÁREA DESMATADA.....	71
4 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	72

APRESENTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado intitulada “ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DESMATAMENTO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CURUÁ NO MUNICÍPIO DE ALTAMIRA - PARÁ, SOBRE SEU REGIME HIDROLÓGICO, ENTRE OS ANOS DE 1985 E 2020” tem como objetivos principais: (1) realizar um estudo morfométrico da bacia hidrográfica do rio Curuá, localizada no estado do Pará, na Amazônia legal; (2) avaliar a possibilidade de utilizar dados de precipitação de estimativa CHIRPS para caracterização pluviométrica dessa bacia e (3) compreender as consequências do desmatamento sobre seu regime hidrológico.

A dissertação está estruturada em três capítulos. O primeiro corresponde ao artigo intitulado: “Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Curuá-PA”. Que realiza uma caracterização da bacia e analisa a influência dessas características sobre seu comportamento hidrológico.

O segundo capítulo consiste no artigo intitulado “Avaliação da acurácia da precipitação pluvial estimada com dados CHIRPS na região de influência da bacia hidrográfica do rio Curuá-PA”. Esse artigo teve como objetivo principal avaliar a possibilidade de utilização de dados Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) para caracterização pluviométrica da bacia hidrográfica do rio Curuá e seu entorno, no estado do Pará, entre os anos de 1981 e 2020.

O terceiro capítulo é intitulado “Relação entre o desmatamento e a resposta hidrológica na bacia hidrográfica do rio Curuá-PA”. Que teve como objetivo principal avaliar o efeito do desmatamento sobre os principais componentes hidroclimáticos da bacia hidrográfica do rio Curuá.

INTRODUÇÃO GERAL

A bacia hidrográfica vem sendo utilizada como a principal unidade hidrológica de planejamento e gestão dos recursos hídricos no Brasil. O inadequado manejo do solo, da água e do uso da terra pode provocar alterações no seu regime hidrológico e na disponibilidade de água para os diversos usos em uma bacia. Estudos recentes mostram que a remoção da floresta pode alterar a qualidade e a quantidade de água disponível em uma bacia hidrográfica, independentemente do tamanho da sua área de drenagem (COSTA *et al.*, 2003; ARAGÃO, *et al.*, 2017; MENDES, CECÍLIO e ZANETTI, 2018; YONABA, *et al.*, 2021).

Nos últimos anos, a região amazônica vem passando por um acelerado processo de desmatamento e degradação florestal. De janeiro a novembro de 2021 o desmatamento na Amazônia Legal brasileira foi de aproximadamente 1300 km², ultrapassando sua taxa de crescimento (21,9%) desde 2010 (INPE, 2021). Até recentemente, avaliar a possível relação entre o desmatamento e a disponibilidade hídrica nas grandes bacias hidrográficas da região amazônica era uma tarefa difícil, principalmente pela baixa disponibilidade de dados hidroclimáticos e pela dificuldade em estimar a área removida de floresta.

O norte e o nordeste do Brasil, quando comparado com as demais regiões, apresentam uma rede de monitoramento com distribuição desigual e de baixa densidade. Além disso, muitas vezes, a obtenção desses dados é prejudicada pelos longos períodos de falhas em suas séries históricas (DE BRITO *et al.*, 2021). Essas limitações dificultam a compreensão dos padrões de precipitação em todo território nacional (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2018) e prejudicam os estudos climáticos e hidrológicos realizados na região da Amazônia.

Nos últimos tempos, o avanço dos instrumentos de sensoriamento remoto e algoritmos de estimativas de precipitação pluvial disponibilizaram uma série de produtos baseados em dados de satélites (CAVALCANTE *et al.*, 2020). Entre os produtos de sensoriamento remoto que realizam estimativas da precipitação, podemos destacar o Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS). Seu conjunto de dados é quase global e foi desenvolvido através da incorporação de imagens de satélite a dados de estação in-situ (FUNK *et al.*, 2015). Porém, modelos de estimativas de precipitação como o CHIRPS possuem incertezas

associadas ao método de previsão (WEI *et al.*, 2020). Além disso, eles podem apresentar comportamentos distintos para diferentes regiões, tornando-se importante a validação de seus produtos a partir de dados coletados *in situ* (COSTA *et al.*, 2019).

Para compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia também é de suma importância o estudo de suas características morfométricas (MAKHAMREH *et al.*, 2020). Para obtenção dessas características, os dados de sensoriamento remoto, juntamente com os sistemas de informações geográficas (SIGs), são ferramentas eficazes (ZHANG *et al.*, 2019), principalmente em regiões com carência de informações cartográficas e grandes áreas de drenagem, como as contribuintes da bacia amazônica.

Com o surgimento das plataformas de coleta e processamento de grandes bases de dados de sensoriamento remoto, como o Google Earth Engine (GEE) (FERREIRA, FERREIRA e FERREIRA, 2018; GORELICK, *et al.*, 2017), a estimativa do desmatamento vem sendo possível, principalmente em bacias com grandes áreas de drenagem, como as da região amazônica. Apesar da grande importância das bacias hidrográficas da região norte do Brasil, ainda são poucos os estudos que avaliaram a relação entre a remoção da floresta e a quantidade de água produzida nestas áreas de drenagem. Uma das poucas exceções foi o trabalho realizado por Costa, Botta e Cardille (2003), que relatou que a vazão média anual do rio Tocantins, no sudeste da Amazônia, foi 24% maior no período em que a bacia tinha a menor cobertura de floresta, comprovando o efeito da remoção da floresta em relação a resposta hidrológica da bacia.

Além das plataformas de coleta e processamento de dados de sensoriamento remoto, técnicas de aprendizado de máquinas também vêm sendo utilizadas para estimar o desmatamento. O aprendizado de máquina pode ser descrito como uma técnica de inteligência artificial que visa capacitar *softwares* a aprenderem e se desenvolverem sem a programação direta (VANAM *et al.*, 2021). Em avaliação de técnicas de mapeamento de vegetação Hamylton *et al.* (2020) conclui que o aprendizado de máquina possui alto potencial na identificação de características da superfície terrestre e monitoramento de suas evoluções no tempo.

Diante disso, o trabalho teve como objetivo principal estimar a perda de cobertura florestal na bacia hidrográfica do rio Curuá (BRC) entre os anos de 1985 e 2020 e avaliar sua possível influência sobre o regime hidroclimático da bacia. Para

análise da perda florestal foi utilizada uma classificação baseada em um algoritmo de aprendizado de máquinas a partir das imagens do satélite Landsat 8, 7 e 5. A caracterização hidroclimática foi realizada a partir de dados de precipitação pluviométrica Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) e dados fluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). O estudo morfométrico da bacia foi realizado a partir de dados derivados do Shuttle Radar Topography Mission e dados georreferenciados de hidrografia da ANA.

CAPÍTULO 1: ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CURUÁ-PA.

José Carlos Benicio do Nascimento Filho ¹; André Quintão de Almeida ²

RESUMO

A região norte do Brasil concentra 20% da água doce líquida disponível no país, além de possuir uma das maiores áreas de drenagem do planeta, a bacia hidrográfica do rio Amazonas. A bacia hidrográfica é a principal unidade territorial de atuação do sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos. Para um planejamento e gestão local eficiente, é necessário conhecer suas características morfométricas e entender como elas influenciam seu comportamento hidrológico. Por isso, o presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo de modelagem morfométrica da bacia hidrográfica do rio Curuá – Pará. Para esse estudo foram utilizados o modelo digital de elevação derivado do shuttle radar topography mission, e dados georreferenciados de hidrografia da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. A partir desses dados foram obtidas características geométricas (área, perímetro, fator de forma e etc); características de relevo (altitude, declividade e etc); e características da rede de drenagem (hierarquia do curso d'água principal e etc). A bacia do rio Curuá tem uma área aproximada de 35.600 km², com um relevo caracterizado como plano/suave, e uma altitude média de 247 m. Seu fator de forma, índice de circularidade e razão de alongação foram de 0,24; 0,11 e 0,56. O rio principal tem 398 m de comprimento e, de acordo com o método de Horton, é de sétima ordem. Seu padrão de drenagem é dendrítico e percorre uma área predominantemente de baixa declividade. Pode-se concluir que a bacia apresenta uma forma alongada, que é pouco suscetível a enchentes naturais ou provenientes de alterações antrópicas de uso e cobertura do solo.

PALAVRAS-CHAVE: MDE, Pará, SIG, SRTM, Amazônia, análise morfológica, bacia do Xingu.

ABSTRACT

The northern region of Brazil concentrates 20% of the fresh water available in the country, in addition to having one of the largest drainage systems on the planet, the Amazon River basin. The hydrographic basin is the main territorial unit of action of the national water resources management system. For an efficient local management, it is necessary to know their morphological characteristics and understand how they are their hydrological morphometric planning. Therefore, the objective of this work was to carry out a morphometric modeling study of the hydrographic basin of the Curuá River - Pará. For this study, the digital model of combination of the radar topography mission and georeferenced hydrographic data from the National Water Agency were used. and Sanitation. From these data were defined as figures, perimeters and form factor. relief features (altitude and slope); and characteristics of the drainage network (hierarchy of the main watercourse). The Curuá river basin has an approximate area of 35,600 km², with a relief characterized as flat/smooth, and an average altitude of 247 m. Its shape factor, roundness index and elongation ratio were 0.24; 0.11 and 0.56. The main river is 398 m long and, according to Horton's method, is of the seventh order.

¹ e ² Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da UFS, Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, São Cristóvão/SE CEP 49100-000.

Its drainage pattern is dendritic and it covered a predominantly low-slope area. It may happen that the basin has a shape along which it is little susceptible to natural sources or from anthropogenic changes in land use and cover.

KEYWORDS: MDE, Pará, SIG, SRTM, Amazônia, morphological analysis.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui a maior bacia hidrográfica do planeta, a do rio Amazonas, que possui aproximadamente sete milhões de km². Cerca de 45% da área total encontra-se no território brasileiro, o restante das terras da bacia é dividido por sete países da América do Sul: Equador, Bolívia, Colômbia, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela. No Brasil, a bacia Amazônica compreende em parte ou em sua totalidade os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima. A bacia amazônica é formada pelo rio Amazonas e por mais de sete mil afluentes, e concentra cerca de 20% da água doce na forma líquida disponível na terra. Por isso, sua conservação é importante.

A bacia hidrográfica é a unidade territorial de implementação da política nacional de recursos hídricos e de atuação do sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos. Seus corpos d'água podem ser utilizados para diversos usos, como irrigação, dessedentação de animais, abastecimento humano e geração de energia. A bacia hidrográfica do rio Xingu, que faz parte da região amazônica, possui um grande potencial hidrelétrico e por isso abriga o quarto maior complexo hidrelétrico do mundo (LUCAS *et al.*, 2021). Porém, desmatamentos ocorrentes na região amazônica e a diminuição do poder de órgãos ambientais como o IBAMA, incentivados pelo governo federal entre 2018 e 2022, alteram a dinâmica hídrica local e, consequentemente, apresentam riscos ao potencial hidrelétrico da área (DE JONG, 2021).

O entendimento do comportamento hidrológico dessa bacia pode auxiliar sua gestão e, consequentemente, minimiza seus impactos ambientais (GUO *et al.*, 2019). Para compreensão de seu comportamento hidrológico é de suma importância o estudo de suas características morfométricas (MAKHAMREH *et al.*, 2020). Os dados de sensoriamento remoto, juntamente com os sistemas de informações geográficas (SIGs), apresentam-se como ferramentas eficazes para esses estudos (ZHANG *et al.*, 2019), principalmente em regiões com carência de informações cartográficas e grandes áreas de drenagem, como as contribuintes da bacia amazônica.

Dentre os dados remotamente sensoriados levantados e processados para

uma análise hidrológica, podemos destacar os modelos digitais de elevação (MDEs). Os MDEs fornecem informações básicas para a maioria dos estudos de hidrologia. Eles são utilizados na delimitação de bacias hidrográficas, declividades e para modelar fluxos superficiais (HIRT, 2018). Há estudos de drenagens superficiais e de processos erosivos elaborados com dados de MDEs remotamente sensoriados em regiões distintas do planeta (BENZOUGAGH *et al.*, 2022; BAHRAMI, 2021 e SILVA, 2021). Nos estudos de modelagem morfométrica de bacias, os MDEs também fornecem informações básicas, com destaque para o modelo derivado da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Vários estudos de modelagem morfométrica foram realizados com o MDE SRTM no Brasil (DE MORISSON VALERIANO e ROSSETTI, 2020; MANTELLI *et al.*, 2009; IBANEZ, MIRANDA e RICCOMINI, 2014; JATI e SILVA, 2017). Apesar do grande número de estudos de análise morfométrica e da importância da bacia Amazônica, poucos ainda foram os estudos realizados em suas bacias contribuintes, como a bacia hidrográfica do rio Curuá.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo morfométrico da bacia hidrográfica do rio Curuá-PA. Para isso, foram levantados dados derivados do SRTM e dados georreferenciados de hidrografia da ANA. Esses dados foram processados a partir de um sistema de informações geográficas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Curuá (BRC), no estado do Pará. Ela é delimitada a partir do posto fluviométrico Cajueiro, que tem uma área de drenagem aproximada de 35.600 km² (Figura 1). A localização aproximada do posto Cajueiro está nas coordenadas 5°65' sul e 54°52' leste, no município de Altamira. O rio Curuá é afluente do rio Irirí, apresenta águas relativamente claras e um substrato formado predominantemente por areia com manchas de rocha e grandes blocos lateríticos (THOMAS e PÉREZ, 2010).

A BRC está localizada na bacia do Xingu, que abriga um dos maiores projetos do governo brasileiro em geração de energia, o Complexo Hidrelétrico de Belo Monte,

que possui a quarta maior hidrelétrica do mundo em capacidade instalada (LUCAS *et al.*, 2021). Nessa região, nas últimas décadas, percebe-se uma expansão de áreas de pastagem em detrimento da cobertura florestal nativa (LUCAS *et al.*, 2021).

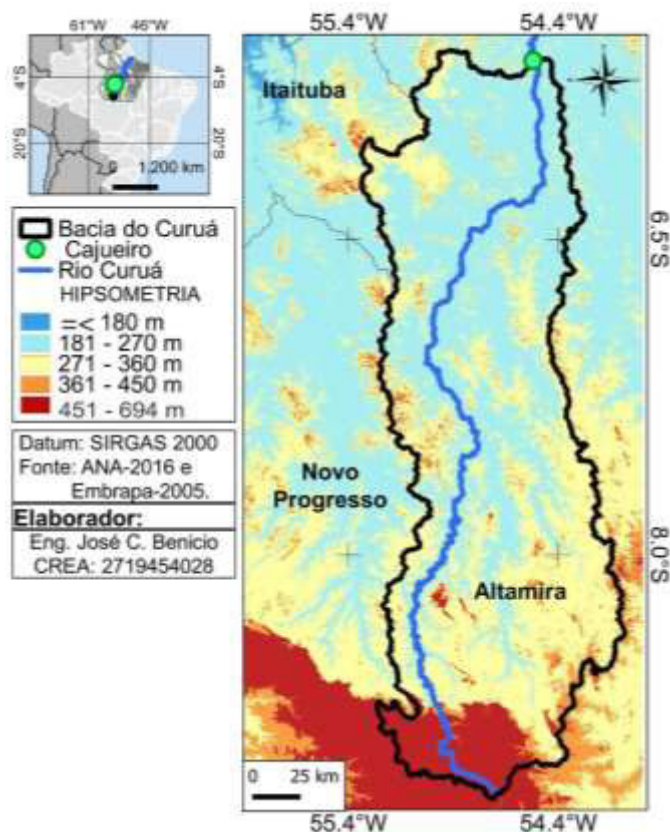


Figura 1 – Localização da área de estudo.

O clima da BRC é do tipo equatorial (IBGE, 2002), com temperatura média de 28 °C e precipitação pluviométrica de 2.100 mm ano⁻¹ (IBGE, 2021; AGRITEMPO, 2021). O relevo é predominantemente inferior a 270 metros, com maiores elevações na região sul, onde nasce o rio Curuá (MIRANDA, 2005). Suas menores elevações estão na região norte, próximo ao encontro com o rio Irirí (Figura 1).

O solo da BRC é predominantemente Argissolo, ocupando 29.542 km² (aproximadamente 82% da área). Ele está distribuído por toda a bacia, com exceção da região sul. Esse solo geralmente tem profundidade de mediana a alta, drenagem moderada e é bastante suscetível à erosão (AGRA e ANDRADE, 2021). Os Neossolos também são encontrados em uma grande área da BRC, especificamente nas regiões sul e central, em uma extensão territorial de 5.592 km² (15,5% da bacia). Esse solo apresenta poucos minerais primários e pouca resistência ao intemperismo (AGRA e ANDRADE, 2021).

2.2 BASE DE DADOS

Para realização do presente estudo, foram utilizados dados de sensoriamento remoto e informações da rede hidrográfica da bacia. As informações de cursos d'água da bacia, na escala de 1:1000.000, foram obtidas da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2020). O modelo digital de elevação (MDE) foi obtido da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 90 metros, através do site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), no link: “<https://earthexplorer.usgs.gov/>”.

2.3 ANÁLISE MORFOMÉTRICA

A análise morfométrica da bacia foi realizada por meio do Sistema de informações geográficas (SIG) QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021), na versão 3.16.10. A análise incluiu aspectos como ordem e comprimento do curso d'água principal, razão do comprimento do rio, densidade de drenagem e densidade de nascentes (RAJASEKHAR, RAJU e RAJU, 2020). Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas essas características e as metodologias utilizadas para sua obtenção. As características geométricas da bacia foram descritas por área, perímetro, comprimento principal e comprimento axial. Além dessas características, assim como Jati e Silva (2017) e Abboud e Nofal (2017), foram utilizados o coeficiente de compacidade (K_c), a razão de alongamento (R_e) e o fator de forma (K_f) para identificação de sua propensão a enchentes, além do índice de circularidade (I_c) para identificação de sua regularidade.

O K_c relaciona a forma da bacia com um círculo, o qual constitui uma relação entre seu perímetro e a área de um círculo igual à da bacia. O K_c foi determinado baseado na seguinte equação (CARDOSO *et al.*, 2006):

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Em que: P= Perímetro da bacia (km) e A = Área de drenagem da bacia (km²).

O Fator de forma (K_f) corresponde à relação entre a área de drenagem da bacia e o seu comprimento axial. Quando o fator de forma estimado apresenta valor

próximo a zero, a bacia possui forma alongada ou estendida, com pico de fluxo mais plano; quando os valores de Kf são próximos a um, eles refletem uma forma circular com maior propensão a picos de vazão (ABBOUD e NOFAL, 2017):

$$Kf = \frac{A}{L_{axial}^2} \quad (2)$$

Em que: A = Área de drenagem da bacia (km²) e L_{axial} = Comprimento axial (km).

Em bacias circulares, os afluentes atingem o curso d'água principal praticamente em um único ponto, causando intensa vazão. Em bacias alongadas, os afluentes se distribuem de forma quase regular ao longo do rio principal. O índice de circularidade tende a uma unidade na medida em que a bacia se aproxima da forma circular, e diminui na medida em que a forma se torna alongada (ABBOUD e NOFAL, 2017). Para o cálculo deste índice, utilizou-se a seguinte equação (MILLER, 1953):

$$Ic = 12,57 \times \frac{A}{P^2} \quad (3)$$

Em que: P= Perímetro da bacia (km) e A = Área de drenagem da bacia (km²).

A razão de alongação (Re) diz respeito à relação entre o diâmetro do círculo de área igual à área da bacia e o comprimento do eixo da bacia. Assim como o índice de circularidade e o coeficiente de compacidade, a Re tende para uma unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular (SCHUMM, 1956). Essa razão pode ser encontrada através da fórmula:

$$Re = \frac{1,128 \times A^{0,5}}{L_{axial}} \quad (4)$$

Em que: A = Área de drenagem da bacia (km²) e L_{axial} = Comprimento axial (km).

Tabela 1 – Índices e metodologias quanto às características do relevo.

Características do relevo		
Índices	Notações	Metodologias
Altitude média	$H_{\text{méd}}$	
Altitude máxima	$H_{\text{máx}}$	
Altitude mínima	$H_{\text{mín}}$	
Declividade média	$I_{\text{méd}}$	Santos <i>et al.</i> (2010)
Declividade máxima	$I_{\text{máx}}$	
Declividade mínima	$I_{\text{mín}}$	
Orientação predominante	Op	
Razão do relevo	$Rr = \frac{\Delta \text{ altimétrica}}{Laxial}$	Rossi & Pfeifer (1999)

Fonte – Adaptado de Ferrari *et al.* (2013).

Tabela 2 – Índices e metodologias quanto às características da rede de drenagem.

Características da rede de drenagem		
Índices	Notações	Metodologias
Coeficiente de rugosidade	$Cr = I \text{ média} * Dd$	Baracuh <i>et al.</i> (2003)
Comprimento do curso d'água principal	Lp	
Comprimento total dos cursos d'água	Lt	
Comprimento axial do rio	L_{axial}	
Comprimento inclinado	Ci	
Declividade do curso d'água principal entre a foz e a nascente	$S1 = \frac{(Cota \text{ máx} - Cota \text{ mín})}{Lp}$	Cecílio & Reis (2006)
Declividade de equivalência entre as áreas	$S2 = \frac{(Cota \text{ mín} + h)}{Lp}$	
Declividade a partir do tempo de percurso	$S3 = \left[\frac{\sum L \text{ inclinado}}{\sum \frac{L \text{ inclinado}}{\sqrt{D \text{ trecho}}}} \right]^2$	
Densidade de confluência	$Dc = \frac{A}{Lt}$	
Densidade de drenagem	$Dd = \frac{N \text{ cursos}}{A}$	
Densidade hidrográfica	$Dd = \frac{N \text{ nascentes}}{A}$	Borsato & Martoni (2004)
Densidade de nascente	$Dn = \frac{N \text{ nascentes}}{A}$	Cecílio & Reis (2006)

Extensão média do escoamento superficial	$I = \frac{A}{4 * Lt}$	
Índice de sinuosidade do curso d'água	$I_{sin} = \frac{100(Lp - Ltalvegue)}{Lp}$	Santa Catarina (1997)
Índice de rugosidade	$Hr = \Delta altimétrica * Dd$	Bertol <i>et al.</i> (2007)
Ordem dos cursos d'água	Ord	Horton (1945)
Padrão de drenagem	Pd	
Sinuosidade do curso d'água	$Sin = \frac{Lp}{Ltalvegue}$	Alves & Castro (2003)

Fonte – Adaptado de Ferrari *et al.* (2013)

Em que: Imédia = Declividade média; Laxial = Comprimento axial do curso d'água; Cotamáx. = Altitude máxima; Cotamín. = Altitude mínima; h = Altura do triângulo $h = Atx2/b$, em que At = Área do triângulo formada entre a declividade do curso com a sua abscissa b; Dtrecho = Declividade de cada trecho; Nconfluências = Número de confluências; A = Área da bacia; Nnascentes = Número de nascentes; altimétrica = Amplitude altimétrica e Ltalvegue = Comprimento do talvegue.

A hierarquização dos cursos d'água seguiu a metodologia apresentada por Horton (1945), que afirma que os canais de primeira ordem não possuem tributários, os de segunda ordem têm tributários de primeira ordem, e os canais de terceira ordem recebem canais de segunda e primeira ordem. Essa hierarquização foi definida a partir dos dados de hidrografia da ANA. A declividade de um terreno pode ser definida como a variação de altitude entre dois pontos do terreno (diferença de nível) em relação à distância que os separa (distância horizontal). Com a aplicação da ferramenta *slope* do QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021) aos dados SRTM, foi obtida a declividade do terreno. Com a ferramenta *slicer*, essa declividade foi reclassificada segundo Embrapa (2013) (Tabela 3).

Tabela 3- Classes de relevo utilizadas, conforme EMBRAPA (2013).

Relevo	Classificação
0 – 3%	Plano
3 – 8%	Suave ondulado
8 – 20%	Ondulado
20 – 45%	Forte ondulado
45 – 75%	Montanhoso
>75%	Escarpado

O cálculo da orientação do terreno ocorreu com a aplicação da ferramenta

Aspect aos dados SRTM, com reclassificação em oito camadas (norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste), de acordo com Santos (2010). Esta orientação do terreno corresponde à direção geral para qual a declividade da bacia está exposta.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, pode-se observar os principais resultados da análise morfométrica realizada na bacia do rio Curuá. A bacia pode ser classificada como uma unidade espacial de médio porte, pois compreende cerca de 35.600 km² do estado do Pará e tem um perímetro aproximado de 2.002,00 km. A bacia pode ser caracterizada como uma boa unidade espacial para o estudo do comportamento hidrológico e para a realização de planejamento dos recursos naturais e seu manejo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

Tabela 4 – Resultados da análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Curuá.

Características geométricas		
Área total (A)	36.126,69	km ²
Perímetro total (P)	2.002,00	Km
Comprimento principal (L _p)	398,05	Km
Comprimento axial (L _{axial})	383,01	Km
Coefficiente de compacidade (K _c)	2,95	
Fator de forma (K _f)	0,24	
Índice de circularidade (I _c)	0,11	
Razão de alongação (R _e)	0,56	
Características do relevo		
Altitude média (H _{méd})	247,00	M
Altitude máxima (H _{máx})	694,00	M
Altitude mínima (H _{mín})	184,00	M
Declividade média (I _{méd})	3,14%	
Declividade máxima (I _{máx})	62,99%	
Declividade mínima (I _{mín})	0,00%	
Orientação predominante (Op)	Sudeste	
Razão do relevo (R _r)	0,001	
Características da rede de drenagem		
Coefficiente de rugosidade (Cr)	0,02	
Comprimento do curso d'água principal (L _p)	608,66	Km

Comprimento total dos cursos d'água (L_t)	21.801,35	Km
Comprimento axial do rio (L_{axial})	385,58	Km
Declividade do curso d'água principal entre a foz e a nascente (S1)	1,38	$m\ m^{-1}$
Declividade de equivalência entre as áreas (S2)	1,13	$m\ m^{-1}$
Declividade a partir do tempo de percurso (S3)	0,62	$m\ m^{-1}$
Comprimento inclinado (C_i)	575,85	Km
Densidade de drenagem (D_d)	0,60	$km\ km^{-2}$
Densidade hidrográfica (D_h)	0,11	$cursos\ km^{-2}$
Densidade de nascente (D_n)	0,002	$nascentes\ km^{-2}$
Extensão média do escoamento superficial (I)	0,41	Km
Índice de rugosidade (H_r)	0,85	
Ordem dos cursos d'água (Ord)	7	
Padrão de drenagem (P_d)	Dendrítico	
Sinuosidade do curso d'água (S_{in})	1,57	

Fonte: Adaptado de Ferrari *et al.* (2013)

A relação do formato da bacia com o comportamento do escoamento superficial é um fato importante e que deve ser levado em consideração (Villela & Mattos, 1975). A BRC apresentou um coeficiente de compacidade de 2,95; fator de forma de 0,24; índice de circularidade de 0,11 e razão de alongação 0,56. Esses índices apresentam valores semelhantes aos encontrados por Jati e Silva (2017), em uma bacia do município Santarém, próximo à área de estudo. Com esses índices, é possível afirmar que a bacia possui uma forma alongada, pouco propícia às enchentes.

A BRC apresenta altitudes entre 184 e 694 metros, com uma altitude média de 247 metros. Assim como a bacia estudada por Jati e Silva (2017), suas maiores elevações são encontradas na região sul e suas menores elevações estão ao norte, onde o rio principal deságua. Semelhante ao resultado apresentado por Bahrami (2021), o padrão de drenagem observado foi do tipo dendrítico, que se configura pelo paralelismo dos canais tributários que se unem ao principal em ângulos agudos (SILVA, 2021). Esse tipo de drenagem normalmente se desenvolve em terrenos de declividade suave, como é encontrado na bacia do rio Curuá (BAHRAMI, 2021)

A análise do declive é essencial aos estudos de forma de uma bacia hidrográfica, pois afeta diretamente o desenvolvimento das suas redes de drenagem (SHAMKHI e AL-BADRY, 2021). A maior parte do relevo da BRC (54,08% da área

total) apresenta de 3% a 8% de declividade (suavemente ondulado), segundo a classificação da Embrapa (1979) (Tabela 5). A média possui valor de 3,14%, e também é interessante notar que não existem áreas de declividade que alcancem valores compatíveis com relevo fortemente montanhoso (>75%), uma vez que apenas 0,10% da área total se enquadra na classificação de montanhosa (Tabela 5).

Tabela 5 – Distribuição das classes de declividade na sub-bacia do rio Piauitinga/SE.

Relevo	Declividade (%)	Área (%)
Plano	0 – 3	22,74
Suavemente ondulado	3 – 8	54,08
Ondulado	8 – 20	17,43
Fortemente ondulado	20 – 45	5,65
Montanhoso	45 – 75	0,10
Fortemente montanhoso	>75	0,00

Fonte – Adaptado de Ferrari *et al.* (2013)

A partir dos resultados expostos na tabela 5, é possível concluir que a BRC é pouco propensa a processos erosivos. Segundo Moreira e Rodrigues (2010), eles são diretamente proporcionais ao declive, o que acontece em consequência da velocidade de escoamento superficial de infiltração das águas das chuvas, que ocorrem com maior intensidade em altas declividades.

A densidade de drenagem calculada para a bacia foi de 0,60 km km⁻², considerada pobre por Villela & Mattos (1975) (Figura 2). Segundo os referidos autores, este índice pode variar de 0,5 km km⁻² a 3,5 para classificações que variam de drenagem pobre até a classe de bacia excepcionalmente bem drenada. Valores baixos de densidade de drenagem, como encontrados na bacia hidrográfica do rio Curuá, estão geralmente associados a regiões de solos mais permeáveis, que possibilitam que a infiltração seja mais eficiente (LIMA, 2008).

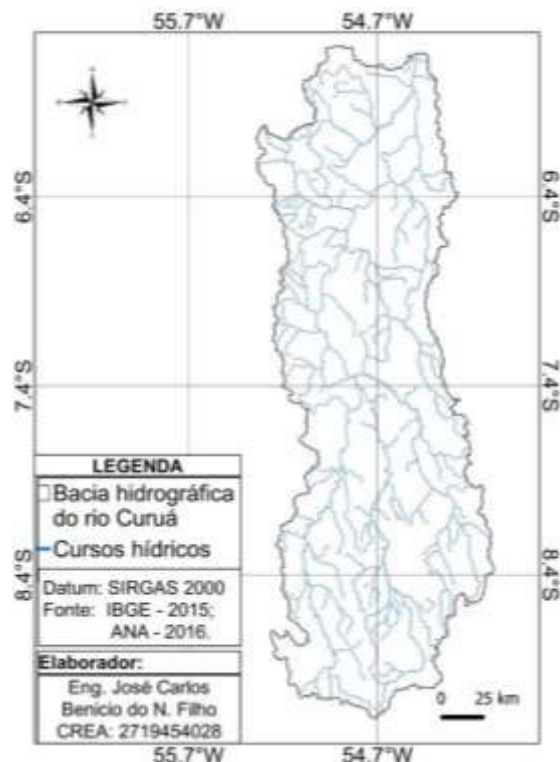


Figura 2- Cursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Curuá.

O sistema de drenagem apresentou grau 7 de ramificação, de acordo com a hierarquia de Horton (1945), que pode ser considerada a ramificação típica de uma bacia de médio porte. Quanto mais ramificada for a rede, mais eficiente será o sistema de drenagem (Strahler, 1957, Bertoni & Lombardi Neto, 2008).

Nos cálculos das declividades para o curso d'água principal (59,11 km) obteve-se como resultado os valores $1,38 \text{ m m}^{-1}$; $1,13 \text{ m m}^{-1}$ e $0,62 \text{ m m}^{-1}$ para S1, S2 e S3 (Tabela 3), respectivamente. Para Cecílio & Reis (2006), o índice que melhor representa a declividade do rio principal em relação ao ponto de vista hidráulico é a chamada declividade a partir do tempo de percurso (S3), que leva em consideração o tempo do percurso da água ao longo da extensão do perfil longitudinal, como se este perfil tivesse uma declividade constante igual a uma declividade equivalente.

4 CONCLUSÕES

A área da bacia hidrográfica do rio Curuá é característica de uma bacia de médio porte. Sua forma mais alongada do que circular reduz a probabilidade de enchentes. A sua densidade de drenagem revela um terreno com alta potencialidade de infiltração e baixo escoamento superficial. Seu padrão de drenagem é dendrítico e

percorre uma área de predominantemente baixa declividade, o que potencializa o processo de infiltração.

Com isso, pode-se concluir que a bacia não é suscetível a enchentes naturais ou provenientes de alterações antrópicas de uso e cobertura do solo. Por ser típica de um baixo escoamento superficial, o seu deflúvio apresenta baixa variação, propiciando a constante recarga do curso principal da bacia Xingú, que comporta a complexo hidrelétrico de Belo Monte.

REFERÊNCIAS

ABBOUD, L. A. ; NOFAL, R. A. Morphometric analysis of wadi Khumal basin, western coast of Saudi Arabia, using remote sensing and GIS techniques. **Journal of African Earth Sciences**, v. 126, p. 58-74, 2017.

AGRA, R. M. R. T.; ANDRADE, C. D. Análise Multicritério da Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio da Batateira, CE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 119-133, 2021.

AGRITEMPO: Sistema de Monitoramento Agro meteorológico. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária: IAC: Cepagri, Unicamp. 2021. Disponível em: . Acesso em: jan. 2022.

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v.33, n.2, p.117-127, 2003.

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO). Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas. 2017. Disponível em:< <https://metadados.snirh.gov.br>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

BAHRAMI, S. Analysis of confluence angle of drainages and its relation to morphometric properties of drainage basins in the Zagros Simply Folded Belt, Iran. **Geomorphology**, p. 108091, 2021.

BARACUHY, J. G. *et al.* Deterioração físico conservacionista da microbacia hidrográfica do riacho Paus Brancos, Campina Grande, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.1, p.159-164, 2003.

BENZOUGAGH, B. *et al.* Identification of critical watershed at risk of soil erosion using morphometric and geographic information system analysis. **Applied Water Science**, v. 12, n. 1, p. 1-20, 2022.

BERTOL, I.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁZQUEZ, E. V. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, n.1, p.103-110, 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 2008. 355p.

BORSATO, F. H.; MARTONI, A. M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no município de Maringá, estado do Paraná. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, v.26, n.2, p.273-285, 2004.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, V. M. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore*, v.30, n.2, p.241-248, 2006.

CECÍLIO, R. A.; REIS, E. F. dos. Apostila didática: Manejo de bacias hidrográficas. Alegre: Universidade Federal do Espírito Santo – UFES/CCA-UFES, 2006. 10p.

DE JONG, P. *et al.* The impact of regional climate change on hydroelectric resources in South America. *Renewable Energy*, v. 173, p. 76-91, 2021.

DE MORISSON VALERIANO, M.; ROSSETTI, F. D. Delineation of main relief subdomains of central Amazonia for regional geomorphometric mapping with SRTM data. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 104, p. 102842, 2020.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, (DF): Embrapa, 2013, 353 p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FERRARI, J. L.; SILVA, S. F.; SANTOS, A. R.; GARCIA, R. F. Análise morfométrica da sub-bacia hidrográfica do córrego horizonte, Alegre, ES. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.8, n.2, p.181-188, 2013.

GUO, A. *et al.* Uncertainty analysis of water availability assessment through the Budyko framework. *Journal of Hydrology*, v. 576, p. 396-407, 2019.

HIRT, C. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4. 1 and MERIT DEMs. *Remote Sensing of Environment*, v. 207, p. 27-41, 2018.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

IBANEZ, D. M.; DE MIRANDA, F. P.; RICCOMINI, C. Geomorphometric pattern recognition of SRTM data applied to the tectonic interpretation of the Amazonian landscape. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, v. 87, p. 192-204, 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Clima. 2021. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20644-clima.html>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de climas zonais. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais>. Acesso em: 14 nov. 2021.

JATI, D. A.; SILVA, J.T. Estudos geo-hidrológicos da bacia do rio Curuá-Una, Santarém, Pará: Aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 1296-1311, 2017.

LIMA, W. P. **Hidrologia Florestal aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. Piracicaba/SP: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, 2008, 245 p.

LUCAS, E. W. M. *et al.* Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin-Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, p. 100306, 2021.

MAKHAMREH, Z. *et al.* Assessment of Morphometric Characteristics of Wadi Al-Shumar Catchment in Jordan. **Open Journal of Geology**, v. 10, n. 02, p. 155, 2020.

MANTELLI, L. R. *et al.* Applying SRTM digital elevation model to unravel Quaternary drainage in forested areas of Northeastern Amazonia. **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 12, p. 2331-2337, 2009.

MILLER, V. C. **A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the clinch mountain area Virginia and Tennessee**. COLUMBIA UNIV NEW YORK, 1953.

MIRANDA, E. E. **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 21 Dez. 2021.

MOREIRA, L.; RODRIGUES, V. A. Análise morfométrica da microbacia da Fazenda Edgárdia - Botucatu (SP). **Eletrônica de Engenharia Florestal**. Garça, v. 16, n. 1, p. 9-21, 2010.

QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2021. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

RAJASEKHAR, M.; RAJU, G. S.; RAJU, R. S.. Morphometric analysis of the Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India, using geospatial technologies. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, p. 100434, 2020.

ROSSI, M.; PFEIFER, R. M. Remoção de material erodido dos solos de pequenas bacias hidrográficas no Parque Estadual da Serra do Mar em Cubatão (SP). **Bragantia**, v.58, n.1, p.141-156, 1999.

SANTA CATARINA. Plano de gestão e gerenciamento da bacia do rio Araranguá: zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica; Disponibilidade das águas superficiais. 1997.

SANTOS, A. R.; LOUZADAS, F. L. R. O.; EUGENIO, F. C. ArcGIS 9.3® total: Aplicações para dados espaciais. Alegre, ES: CAUFES, 2010. 184p.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological society of America bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.

SHAMKHI, M. S.; AL-BADRY, H. J. Assessment of Groundwater Recharge Potential Depending on Morphologic Analysis in East of Wasit, Southeastern Iraq. **The Iraqi Geological Journal**, p. 138-154, 2021

SILVA, A. C. Análise morfométrica na bacia hidrográfica do rio Ipojuca/PE e sua relação litoestrutural nos canais de drenagem. **Revista GeoSertões**, v. 6, n. 11, p. 108-130, 2021.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union, v.38, n.6, p.913–920, 1957.

THOMAS, M. R.; PÉREZ, M. H. S. A new species of whiptail catfish, genus *Loricaria* (Siluriformes: Loricariidae), from the Rio Curuá (Xingu Basin), Brazil. **Copeia**, v. 2010, n. 2, p. 274-283, 2010.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1975, 247p.

ZHANG, Y. *et al.* Mapping annual forest cover by fusing PALSAR/PALSAR-2 and MODIS NDVI during 2007–2016. **Remote Sensing of Environment**, v. 224, p. 74-91, 2019.

CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL ESTIMADA COM DADOS CHIRPS NA REGIÃO DE INFLUÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CURUÁ-PA

José Carlos Benicio do Nascimento Filho²; André Quintão de Almeida²

RESUMO

A precipitação pluvial é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, sendo importante o seu monitoramento no tempo e no espaço, principalmente em países com dimensões continentais, como o Brasil. No entanto, algumas regiões do país, como a região norte e nordeste, possuem uma baixa densidade de estações de monitoramento da precipitação. Nestas regiões, dados de chuva estimados por sensoriamento remoto podem ser utilizados como alternativa. Portanto, o trabalho teve como objetivo principal avaliar a acurácia de dados de precipitação estimados pelo Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) na bacia hidrográfica do rio Curuá e seu entorno, no estado do Pará, entre os anos de 1981 e 2020. As estimativas diárias, mensais e anuais foram comparadas com dados de seis postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. A acurácia das estimativas foi avaliada pelos valores do viés, da raiz do erro quadrático médio (REQM) e pelo desvio padrão das diferenças. A análise diária dos dados apresentou um baixo desempenho, com valor aproximado de REQM de 13,58 mm (233,9%), além do menor ($r = 0,33$) valor do coeficiente de correlação. Nas escalas de tempo mensal e anual, as estimativas apresentaram um melhor resultado, com valores aproximados de REQM de 45,8% (81,3 mm) e 21,2% (433,0 mm), respectivamente. Nas escalas diária e mensal, as estimativas foram subestimadas, com valores de viés de 0,16 mm (2,8%) e 4,92 mm (2,8%), respectivamente. Já na escala anual, as estimativas foram superestimadas, com viés de 45,7 mm (-2,3%). Podemos concluir que, nas escalas de tempo diária e mensal, os dados CHIRPS não devem ser utilizados na área de estudo para realização de estudos hidroclimáticos. No entanto, recomendamos a utilização dos dados na escala anual.

PALAVRAS-CHAVE: Validação de precipitação, GEE, sensoriamento remoto, Amazônia, mudanças climáticas.

ABSTRACT

Rainfall is one of the main components of the hydrological cycle, and its monitoring in time and space is important, especially in countries with continental dimensions, such as Brazil. However, some regions of the country, such as the north and northeast, have a low density of precipitation monitoring stations. In these regions, rainfall data estimated by remote sensing can be used as an alternative. Therefore, the main objective of this work was to evaluate the accuracy of precipitation data estimated by the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) in the watershed of the Curuá River and its surroundings, in the state of Pará, between 1981 and 2020. Daily, monthly and annual estimates were compared with data from six rainfall stations from the National Water and Sanitation Agency. The accuracy of the estimates was evaluated by the values of bias, the root mean square error (REQM) and the standard deviation of the differences. The daily data analysis showed a low performance,

¹ e ² Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da UFS, Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, São Cristóvão/SE CEP 49100-000.

with an approximate value of RMSE of 13.58 mm (233.9%), in addition to the lowest ($r = 0.33$) value of the correlation coefficient. In the monthly and annual time scales, the estimates presented a better result, with approximate values of RMSE of 45.8% (81.3 mm) and 21.2% (433.0 mm), respectively. On the daily and monthly scales, the estimates were underestimated, with bias values of 0.16 mm (2.8%) and 4.92 mm (2.8%), respectively. On the annual scale, estimates were overestimated, with a bias of 45.7 mm (-2.3%). We can conclude that, on daily and monthly timescales, CHIRPS data should not be used in the study area to carry out hydroclimatic studies. However, we recommend using data on an annual scale.

KEYWORDS: Precipitation validation GEE, remote sensing, Amazônia, climate changes.

1 INTRODUÇÃO

A precipitação pluvial e a radiação solar global são os principais elementos meteorológicos reguladores do clima, sendo de fundamental importância o seu monitoramento e caracterização no tempo e no espaço. A precipitação pluvial também é a principal entrada de água em uma bacia hidrográfica e, por isso, sua quantificação é essencial para o entendimento da dinâmica hídrica da bacia. O monitoramento das chuvas também é importante para os estudos de mudanças climáticas globais e na previsão de desastres naturais (LI *et al.*, 2021).

Dentre as principais bases de monitoramento de dados pluviométricos no Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) se destaca por ser responsável pela coordenação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Atualmente, a rede da ANA consta com 2.767 estações de monitoramento de chuva (ANA, 2020). Apesar do número elevado de estações da ANA e considerando também outras redes de monitoramento, algumas regiões do país possuem uma baixa densidade de pontos de mensuração da precipitação. Por exemplo, o norte e o nordeste do Brasil, quando comparado com as demais regiões, apresentam uma rede de monitoramento com distribuição desigual e de baixa densidade. Além disso, muitas vezes, a obtenção desses dados é prejudicada pelos longos períodos de falhas em suas séries históricas (DE BRITO *et al.*, 2021). Essas limitações dificultam a compreensão dos padrões de precipitação em todo território nacional (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2018) e prejudicam os estudos climáticos e hidrológicos realizados na região da Amazônia, maior região com água doce líquida disponível no planeta.

Nos últimos tempos, o avanço dos instrumentos de sensoriamento remoto e algoritmos de estimativas de precipitação pluvial disponibilizaram uma série de produtos baseados em dados de satélites (CAVALCANTE *et al.*, 2020). Essa pode ser

considerada uma alternativa para o monitoramento da precipitação pluvial nas regiões com baixa densidade de postos de monitoramento, como a região Amazônica. Esses produtos de sensoriamento remoto podem apresentar variadas resoluções espaciais e temporais. Entre os produtos de sensoriamento remoto que realizam estimativas da precipitação, podemos destacar o Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS). Seu conjunto de dados é quase global e foi desenvolvido através da incorporação de imagens de satélite a dados de estação in-situ (FUNK *et al.*, 2015). Sua resolução espacial é de cerca de 5 km e apresenta dados diários desde 1981 (COSTA *et al.*, 2019). Estes dados têm sido amplamente utilizados em diversas regiões do mundo, com estimativas acuradas (PAREDES-TREJO, BARBOSA e KUMAR, 2017; RIVERA, MARIANETTI e HINRICHS, 2018; NAWAZ, IQBAL e MAHMOOD, 2021; ZHANG *et al.*, 2022).

Porém, modelos de estimativas de precipitação como o CHIRPS possuem incertezas associadas ao método de previsão (WEI *et al.*, 2020). Além disso, eles podem apresentar comportamentos distintos para diferentes regiões, tornando-se importante a validação de seus produtos a partir de dados coletados *in situ* (COSTA *et al.*, 2019). Em validação dos dados CHIRPS para a região central da Argentina, Rivera *et al.* (2018) encontraram resultados satisfatórios na escala mensal ($r^2 = 0,86$; viés = 11% e erro médio = 15,3 mm), mas pontuaram a dificuldade de os dados estimarem precipitações em regiões de elevada altitude. Costa *et al.* (2019) avaliaram a acurácia dos dados CHIRPS em escala mensal para diferentes regiões do território brasileiro e encontraram um coeficiente de determinação médio de 95,4%. Neste estudo, a região norte apresentou um valor de coeficiente de determinação inferior à média, enquanto a região sudeste teve a melhor estimativa.

Com exceção do trabalho de Costa *et al.* (2019), reduzidos ainda são os estudos que avaliaram a qualidade das estimativas do dado CHIRPS na região norte do Brasil. Diante disso, o trabalho teve como objetivo principal avaliar a acurácia de dados de precipitação pluvial do produto CHIRPS na bacia hidrográfica do rio Curuá - PA e seu entorno, entre os anos de 1981 e 2020. Esses dados foram organizados em séries diárias, mensais e anuais, e comparados com dados de seis postos pluviométricos da ANA.

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Curuá (BRC) e seu entorno, no estado do Pará. Ela é delimitada a partir do posto fluviométrico Cajueiro, que tem uma área de drenagem aproximada de 35.600 km² (Figura 3). A localização aproximada do posto Cajueiro está nas coordenadas 5°65' sul e 54°52' oeste, no município de Altamira. O rio Curuá é afluente do rio Iriri, apresenta águas relativamente claras e um substrato formado predominantemente por areia com manchas de rocha e grandes blocos lateríticos (THOMAS e PÉREZ, 2010).

A BRC está localizada na bacia do Xingu, que abriga um dos maiores projetos do governo brasileiro em geração de energia, o Complexo Hidrelétrico de Belo Monte, que possui a quarta maior hidrelétrica do mundo em capacidade instalada (LUCAS *et al.*, 2021). Nessa região, nas últimas décadas, percebe-se uma expansão de áreas de pastagem em detrimento da cobertura florestal nativa (LUCAS *et al.*, 2021).

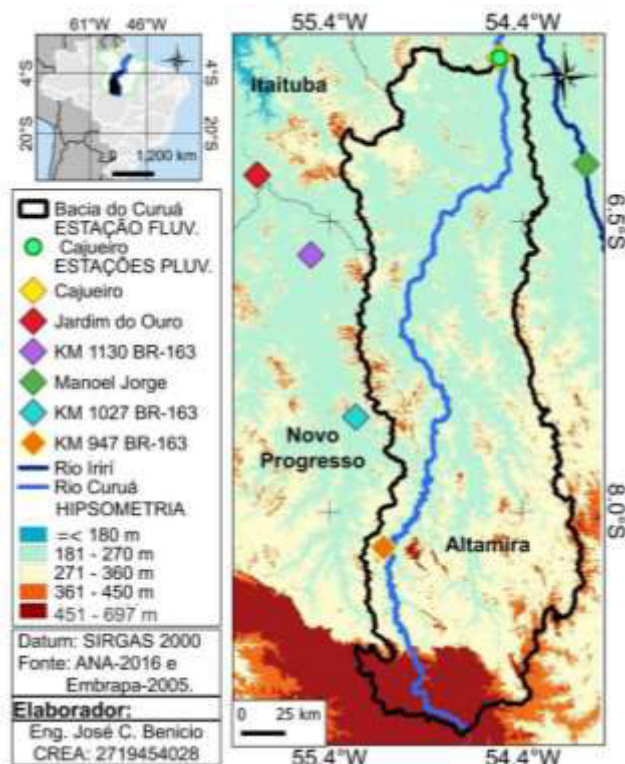


Figura 3 – Localização da área de estudo.

O clima da BRC é do tipo equatorial (IBGE, 2002), com temperatura média de 28 °C e precipitação pluviométrica de 2.100 mm ano⁻¹ (IBGE, 2021; AGRITEMPO, 2021). O relevo é predominantemente inferior a 270 metros, com maiores elevações na região sul, onde nasce o rio Curuá (MIRANDA, 2005). Suas menores elevações estão na região norte, próximo ao encontro com o rio Irirí (Figura 1).

O solo da BRC é predominantemente Argissolo, ocupando 29.542 km² (aproximadamente 82% da área). Ele está distribuído por toda a bacia, com exceção da região sul. Esse solo geralmente tem profundidade de mediana a alta, drenagem moderada e é bastante suscetível à erosão (AGRA e ANDRADE, 2021). Os Neossolos também são encontrados em uma grande área da BRC, especificamente nas regiões sul e central, em uma extensão territorial de 5.592 km² (15,5% da bacia). Esse solo apresenta poucos minerais primários e pouca resistência ao intemperismo (AGRA e ANDRADE, 2021).

2.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBSERVADOS

Foram utilizados dados de precipitação pluvial consistidos de seis postos pluviométricos da ANA (Cajueiro, Manoel Jorge, Jardim do Ouro, KM 1130 BR-163, KM 1027 DA BR-163 e KM 947 BR-163), disponíveis no seu sistema de informações hidrológicas HIDROWEB (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>). Esses postos estão localizados nos municípios de Altamira, Itaituba e Novo Progresso (Figura 3 e Tabela 6). Os dados foram obtidos no formato de texto em escala diária. Esses dados foram organizados em séries de precipitações acumuladas mensais e anuais. As falhas dos dados da ANA não foram preenchidas em nosso estudo, conforme descrito na seção de análise de acurácia.

Estação	Código	Lat	Long	Altitude	Série
Cajueiro	554000	-5.650	-54.5208	190 m	1981-2019
Jardim do Ouro	655004	-6.257	-55.7733	162 m	2000-2019
KM 1027 DA BR-163	655001	-7.510	-55.2636	246 m	1983-2019
KM 1130 BR-163	555002	-6.671	-55.4958	206 m	1987-2019
KM 947 BR-163	855000	-8.187	-55.1194	236 m	1981-2019

Manoel Jorge	654000	-6.2022	-54.0728	203 m	2000-2019
--------------	--------	---------	----------	-------	-----------

Tabela 6 - Código, localização, altitude e série histórica de cada estação pluviométrica da ANA utilizada.

2.3 DADOS CHIRPS

Os dados estimados de precipitação pluvial (em mm) foram obtidos do produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS), desenvolvido pela Agência dos EUA para o Desenvolvimento Internacional Famine Early Warning Systems Network (FUNK *et al.*, 2015). O conjunto de dados CHIRPS está disponível desde 2014, com uma série temporal de dados diários de precipitação pluvial desde 1981 em alta resolução espacial (0,05°) (FUNK *et al.*, 2014; SHUKLA *et al.*, 2015; NAWAZ, IQBAL e MAHMOOD, 2021). Seus dados foram desenvolvidos através da incorporação de imagens de satélite com dados de estação in-situ e abrangência espacial para a maior parte do globo (FUNK *et al.*, 2015).

Os dados CHIRPS foram organizados na forma de coleção pela plataforma Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com/>). O GEE é uma plataforma web que fornece imagens de diversos satélites globais (como a série Landsat completa e Moderate Resolution Imaging Spectrometer) e dados vetoriais, em um ambiente de computação em nuvem e acesso a software e algoritmos para os processamentos dos dados (GORELICK *et al.*, 2017; KUMAR e MUTANGA, 2018). Esse ambiente permite a utilização da linguagem Javascript ou Python.

No presente estudo, foi utilizada a linguagem Javascript para acessar e organizar a coleção de dados CHIRPS disponível no GEE (ANEXOS I - V). Foi utilizada a coleção de imagens “UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY” (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY) para os anos de 1981 e 2020. Essa coleção fornece dados na escala diária, em mm dia⁻¹, a partir de uma banda denominada Precipitation (FUNK *et al.*, 2015). As precipitações acumuladas mensais (mm mes⁻¹) e anuais (mm ano⁻¹) foram extraídas para a delimitação da BRC (ANEXO I e ANEXO II). As séries temporais diárias foram geradas para cada um dos pontos de grade correspondente aos seis pontos pluviométricos da ANA e integradas para a escala mensal e anual (Tabela 1 e ANEXO III).

2.4 ANÁLISE DE ACURÁCIA

A análise de acurácia dos valores de precipitação pluvial do dado CHIRPS foi realizada a partir das séries diárias, mensais e anuais das observações das seis estações pluviométricas da ANA. Cabe destacar, que no momento da comparação com o dado CHIRPS, os dias com falhas nos dados da ANA foram descartados.

Inicialmente, gráficos de dispersão foram criados entre os valores observados (ANA) e estimados (CHIRPS) de precipitação, nas três escalas de tempo analisadas. Em seguida, o coeficiente de correlação de Pearson (r) foi estimado para analisar a força da correspondência dos dados ao nível de 5% de significância. O erro total dos dados estimados foi estimado pela raiz do erro médio quadrático (REMQ - Equação 1). O desvio padrão (SD - Equação 2) entre as diferenças (ANA - CHIRPS) foram estimados para compreensão dos erros aleatórios e os Viés (Equação 3) para identificação de subestimativas ou superestimativas dos dados CHIRPS (COSTA *et al.*, 2019). A análise de acurácia e a confecção dos gráficos foi realizada no ambiente do software livre R (R CORE TEAM, 2020).

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P1_i - P2_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P1_i - P2_i - (média))^2}{n-1}}, \quad média = \frac{P1_i - P2_i}{n} \quad (2)$$

$$Vies = \frac{P1_i - P2_i}{n} \quad (3)$$

Em que: $P1_i$ = precipitação observada da ANA no tempo i ; $P2_i$ = precipitação estimada (mm) pelo CHIRPS no tempo i ; n = número de precipitações avaliadas.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA

A partir dos dados CHIRPS mensal e anual, foi realizada uma caracterização espacial e temporal da precipitação na BRC. Importante destacar, que nesta etapa, todos os valores diários de precipitação pluvial do CHIRPS foram considerados, entre os anos de 1981 a 2020. A partir dos valores das precipitações acumuladas mensais, foi possível identificar o início e final dos períodos chuvoso e seco na bacia. Com os

valores de precipitação acumulada anual foram identificados os anos de seca e de maiores precipitações. A média das precipitações pluviais acumuladas anuais forneceu a precipitação média anual da bacia. A precipitação média de cada mês durante o período de 1981 a 2020 e a precipitação média anual foram representadas em mapas através de códigos no GEE na linguagem Javascript (ANEXO IV e ANEXO V).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DE ACURÁCIA

Na Tabela 7 é apresentada as estatísticas descritivas dos dados analisados de precipitação pluvial da ANA e do CHIRPS nas três escalas de tempo, diária, mensal e anual. É possível perceber que as duas diferentes fontes de dados apresentam valores médios e medianos aproximados, no entanto, possuem maiores diferenças em termos de valores mínimos e máximos de eventos individuais (escala diária) e nos acumulados mensal e anual. Na escala diária e anual, por exemplo, foi observado uma diferença de 125,03 mm (100%) e 1521,6 mm (57%), respectivamente, entre os valores máximos de precipitação (Tabela 7).

Estatística descritiva dos dados diários						
Origem	Mínimo	1° Quartil	Mediana	Média	3° Quartil	Máximo
ANA	0,00	0,00	0,00	5,81	5,30	250,00
CHIRPS	0,00	0,00	0,00	5,97	9,45	124,97
Estatística descritiva dos dados mensais						
Origem	Mínimo	1° Quartil	Mediana	Média	3° Quartil	Máximo
ANA	0,00	52,35	151,00	177,65	268,70	2207,00
CHIRPS	0,00	59,09	174,23	182,62	280,44	2195,11
Estatística descritiva dos dados anuais						
Origem	Mínimo	1° Quartil	Mediana	Média	3° Quartil	Máximo
ANA	246,30	1726,0	2022,80	2026,30	2312,10	4197,10
CHIRPS	325,10	1790,40	2077,30	1980,60	2291,70	2672,50

Tabela 7- Estatística descritiva dos dados de precipitação pluvial da ANA e CHIRPS.

A Figura 4 mostra o gráfico de dispersão e as medidas estatísticas de acurácia dos valores de precipitação estimados pelo dado CHIRPS nas três diferentes escalas de tempo de análise. Em maior detalhe (diferentes cores e símbolos), podemos observar também a linha de tendência para cada uma das seis estações consideradas. Podemos observar uma grande dispersão dos valores em torno da reta de dispersão média (reta na cor preta), principalmente nas escalas diária e mensal (Figura 4A e 4B).

Apenas os valores das precipitações mensais e anuais do produto CHIRPS foram significativamente correlacionadas ($p\text{-value} < 0,05$) com os valores observados nas estações pluviométricas da ANA (Figuras 4). De maneira geral, as estatísticas de acurácia das estimativas foram melhorando, na medida que a escala de tempo de análise aumentou, ou seja, de diária para anual. Em relação ao erro aleatório (SD) observado, os valores foram de aproximadamente 13,7, 79,09 e 431,83 mm, nas escalas diária, mensal e anual.

Com relação à tendência nas estimativas (viés), na escala diária houve a maior subestimação dos dados (2,8%) (Figura 4A). Na escala mensal houve uma menor subestimação (2,14%) e na escala anual ocorreu uma superestimação dos dados ANA (-2,30) (Figura 4B e 4C). Na escala de tempo diária os picos de precipitação da ANA não são bem estimados pelo CHIRPS, dessa forma é encontrada a maior subestimação dos dados. Visto que os dados CHIRPS apresentam dificuldade de estimar períodos de seca, os anos com menores precipitações causam a superestimativa dos dados CHIRPS para a escala anual.

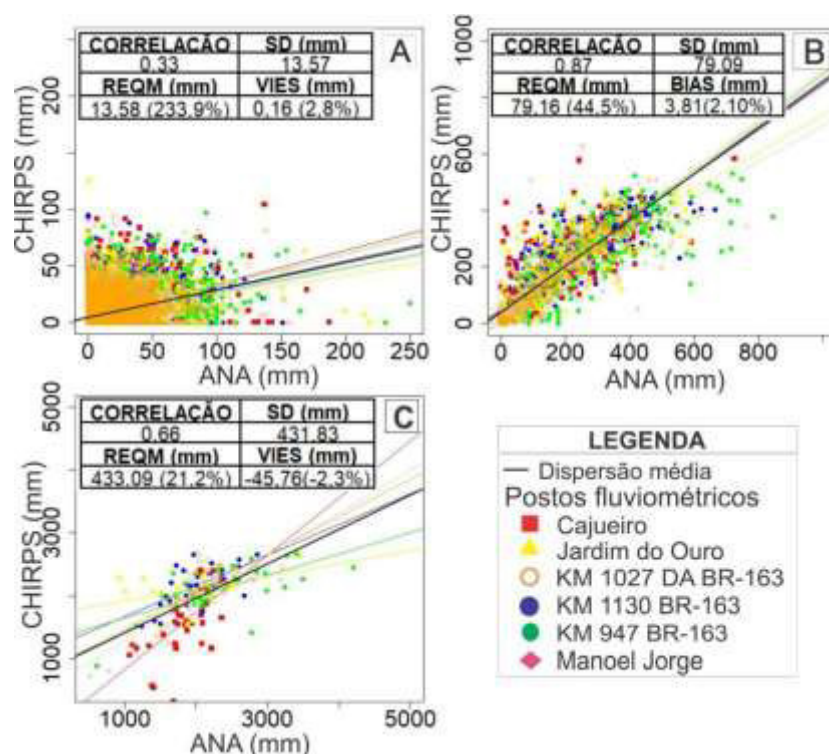


Figura 4 - (A) Dispersão de dados de precipitação diária, (B) dispersão de dados de precipitação mensal e (C) dispersão de dados de precipitação anual.

O valor do coeficiente de correlação mensal ($r = 0,87$) foi superior ao anual ($r = 0,66$) e diário ($r = 0,33$). Esses valores moderados de coeficientes já eram esperados para a área de estudo. De acordo com Costa *et al.* (2019) e Pereira *et al.* (2013), isso ocorre porque o Norte do Brasil apresenta poucas estações meteorológicas e os dados CHIRPS são estimados a partir da união de dados sensoriados remotamente com estações de monitoramento *in situ*.

Os erros totais foram de 433,09; 79,16 e 13,58; para as análises anuais, mensais e diárias, respectivamente. As porcentagens das raízes dos erros médios quadráticos foram de 21,2%, 44,5% e 233,9% para as validações anuais, mensais e diárias. Assim como no estudo realizado na região da África ocidental por Dembélé e Zwart (2016), na escala diária foi observado o maior valor de REMQ, 13,58 mm (233,92%). Através dessas porcentagens é possível compreender que os erros totais dos conjuntos de dados anuais foram menores e os erros dos conjuntos de dados diários foram os maiores. Isso acontece porque a integração das precipitações minimiza a influência de seus valores mínimos e máximos, que, de acordo com Cavalcante *et al.* (2020), normalmente são superestimados e subestimados pelo CHIRPS.

Os gráficos de boxplot (Figura 5) das precipitações ressaltam que os dados da Agência Nacional de Águas (ANA) apresentaram picos de precipitações máximas superiores aos dados Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) para intervalos de tempo diários, mensais e anuais. Essa subestimação de valores máximos também foi encontrada por Paredes-Trejo, Barbosa e Kumar (2017), Cavalcante *et al.* (2020) e Zhang *et al.* (2022).

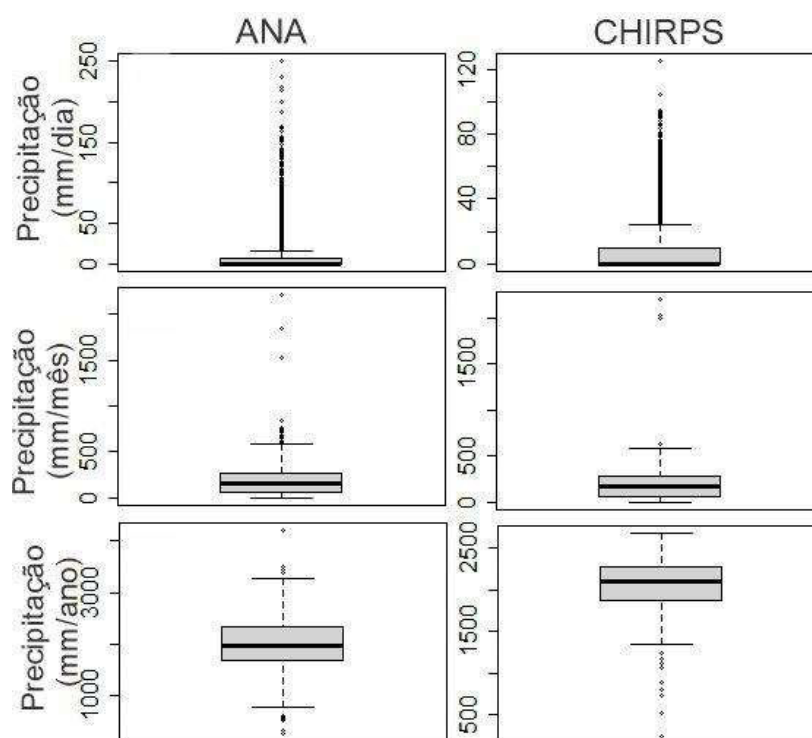


Figura 5 - Boxplot para análise de desvio dos valores de precipitação (A) diária da ANA, (B) diária do CHIRPS, (C) mensal da ANA, (D) mensal do CHIRPS, (E) anual da ANA e (F) anual do CHIRPS.

Assim como na Tabela 7, a Figura 5 mostra que o valor de precipitação acumulada mensal CHIRPS foi próximo do valor máximo da ANA, sendo 2195,11 mm e 2207,00 mm, respectivamente. Logo, esses dados mensais de precipitação CHIRPS apresentaram boas explicações dos picos de máxima dos dados ANA. Porém, os dados de anuais (ANA = 4197,10 mm e CHIRPS = 2672,49 mm) e diários (ANA = 250,00 mm e CHIRPS = 124,97 mm) apresentaram valores máximos discrepantes. A média dos dados diários (ANA = 5,84 mm e CHIRPS = 5,95 mm), mensais (ANA = 177,72 mm e CHIRPS = 182,56 mm) e anuais (ANA = 1976,04 mm e CHIRPS = 2030,88 mm) mantiveram-se próximos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA

Assim como identificado por Lucas *et al.* (2021), os meses de dezembro a março apresentaram as maiores precipitações acumuladas (Figura 6 e 7). Os dados CHIRPS médios tiveram comportamento semelhante aos dados médios das seis estações de monitoramento pluviométrico da ANA (figura 8). No gráfico de precipitações acumuladas anuais é percebido que os dados CHIRPS superestimam os mínimos de precipitação.

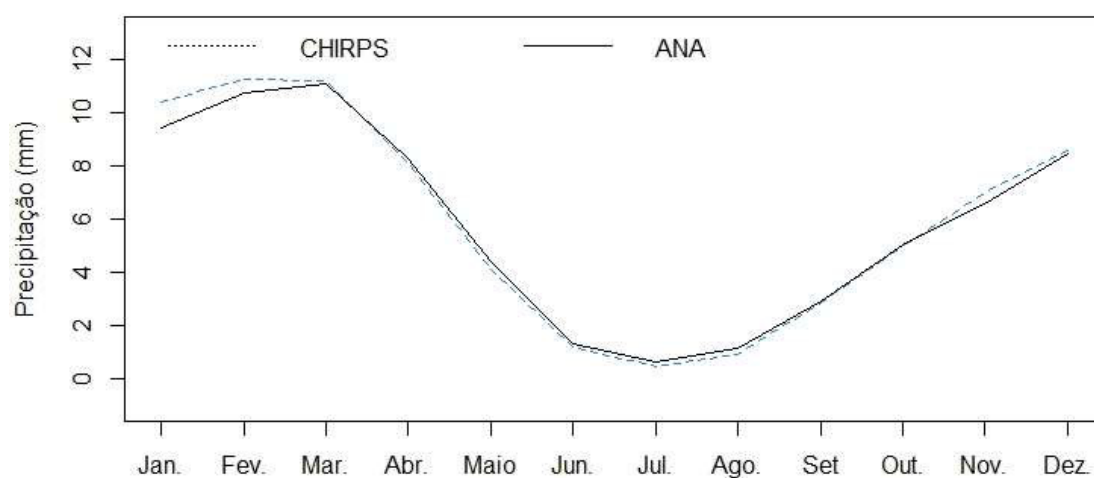


Figura 6 - Precipitações médias diárias por mês da ANA e CHIRPS para a bacia hidrográfica do rio Curuá para os anos de 1981 a 2020.

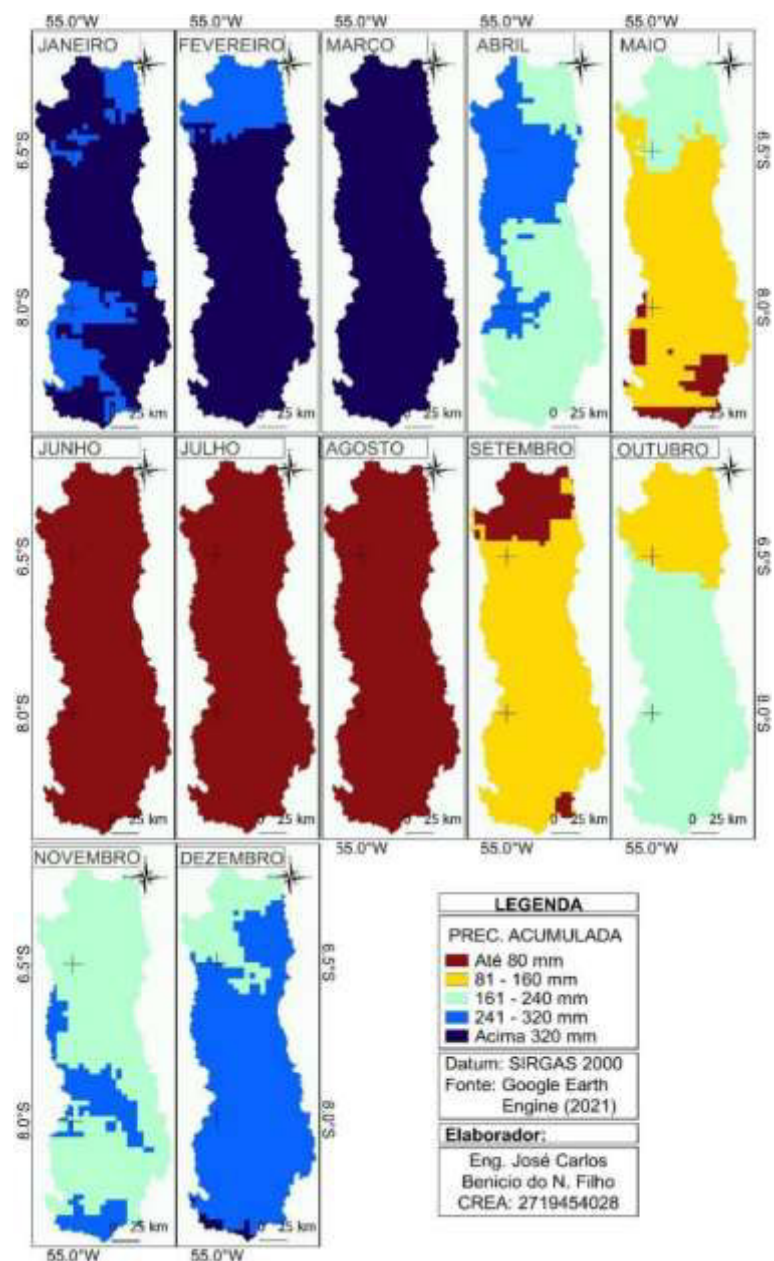


Figura 7 - Precipitações médias mensais BRC para os anos de 1981 a 2020.

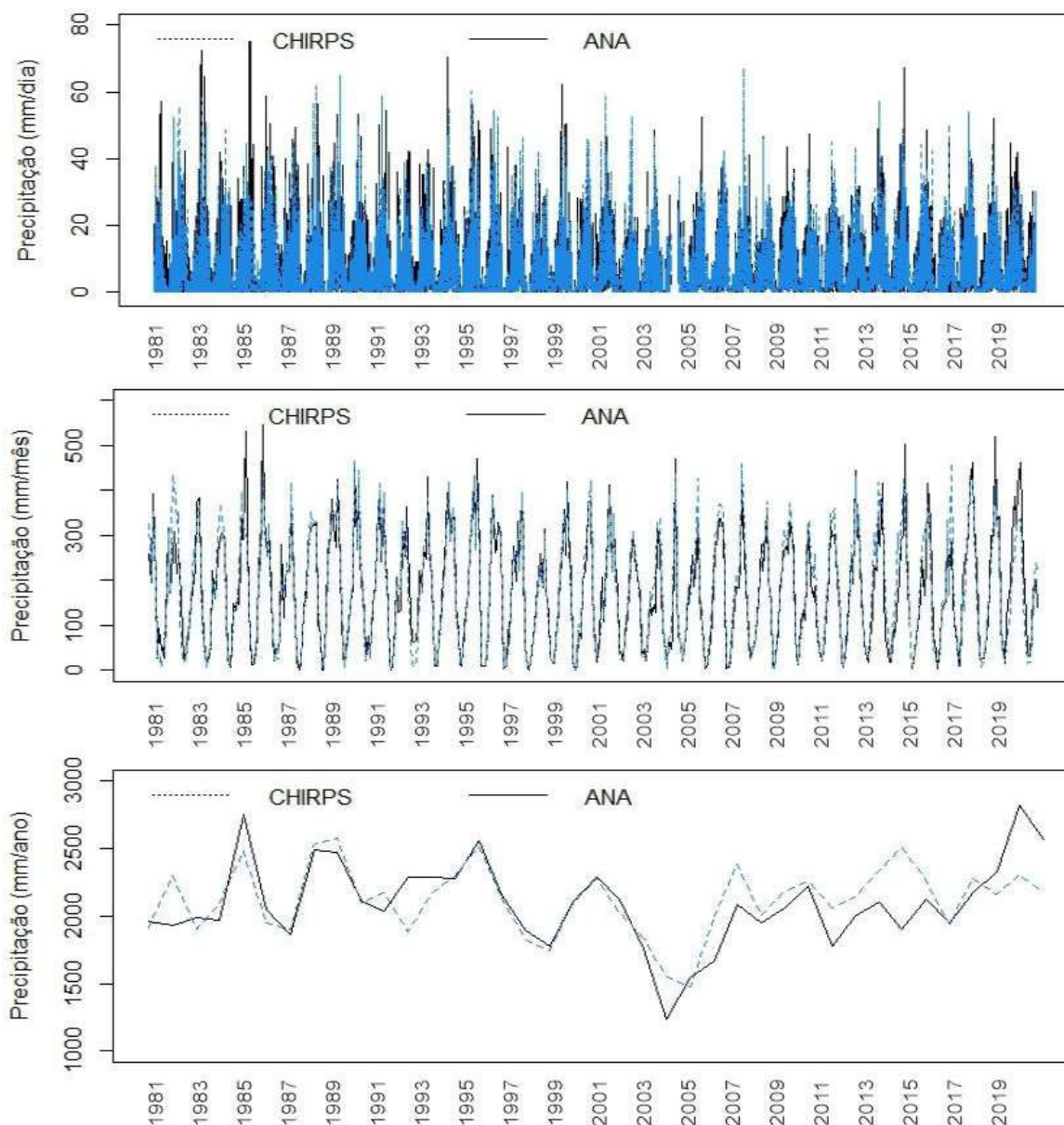


Figura 8 - Precipitações diárias, acumuladas mensais e anuais da bacia hidrográfica do rio Curuá para os anos de 1981 a 2020.

As precipitações acumuladas anuais foram entre 1.800 e 2.600 mm ano⁻¹, um resultado esperado, visto que Cavalcante *et al.* (2020) descreve que na região amazônica a precipitação acumulada anual é entre 1.400 e 3.000 mm ano⁻¹. A precipitação média anual na BRC foi de 2.197 mm ano⁻¹ (Figura 9).

A Figura 9 destaca que no período de 1981 a 2020, houveram maiores precipitações pluviais na região sudoeste e central, mas especificamente em torno dos pontos 8,8° e 6,5° ao sul. As regiões sul e central se destacam com as maiores precipitações em todas as décadas analisadas. Ao Norte é possível perceber regiões de menores precipitações médias, próximo ao encontro do rio Curuá com o rio Irirí.

Essa área apresentou menores precipitações principalmente nas décadas de 1991 a 2000 e de 2001 a 2010.

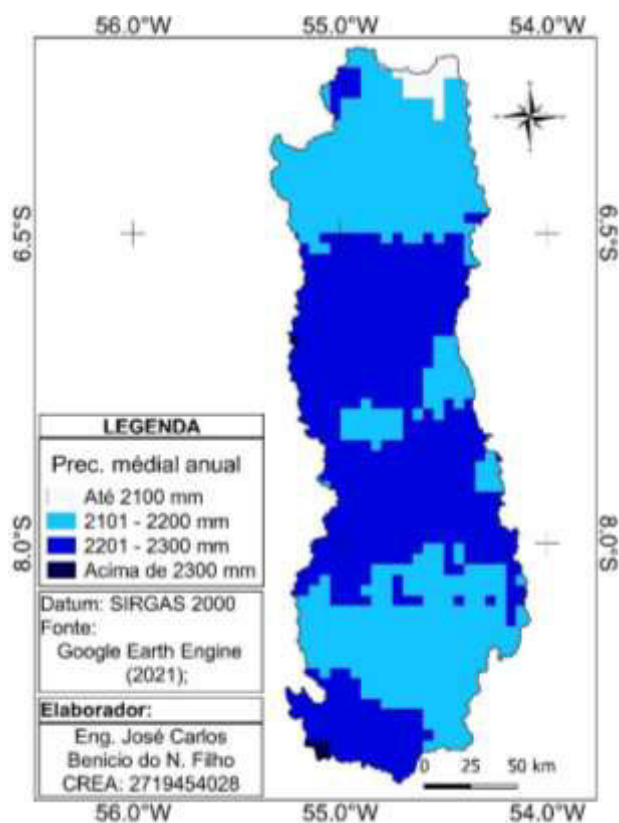


Figura 9 - Mapa de precipitação acumulada média dos anos de 1981 a 2020 da BRC.

4 CONCLUSÕES

Os dados CHIRPS mostraram-se satisfatórios para explicar o comportamento da precipitação pluvial na região da bacia hidrográfica do rio Curuá e em seu entorno. Dessa forma, podem ser utilizados para suprir a falta de dados da região e caracterizar o comportamento pluviométrico da bacia.

Os dados CHIRPS mostraram melhores acurácias nas escalas de tempo mensal e anual. A análise diária apresentou uma correlação insignificante e altos erros. Os dados mensais apresentaram coeficientes de correlação linear superiores aos dados anuais, porém, os dados anuais apresentaram menores erros totais, em relação aos demais conjuntos de dados. Os dados CHIRPS subestimaram os picos máximos e superestimaram os valores mínimos de precipitação.

A precipitação média estimada para a bacia correspondeu ao referenciado para a região. Os dados de precipitação da BRC mostraram que seu período chuvoso

se inicia em dezembro e termina em março. As regiões sul e central se destacam com as maiores precipitações e a região norte com menores precipitações médias.

REFERÊNCIAS

AGRA, R. M. R. T.; ANDRADE, C. D. Análise Multicritério da Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio da Batateira, CE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 119-133, 2021.

AGRITEMPO: Sistema de Monitoramento Agro meteorológico. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária: IAC: Cepagri, Unicamp. 2021. Disponível em: . Acesso em: jan. 2022.

ALENCAR MARQUES, N. *et al.* Análise do Perfil Hidrossedimentométrico da UHE Itumbiara com Emprego do SWAT. 2021.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Rede Hidrometeorológica Nacional. Disponível em: < <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 17 nov. 2021.

BRASIL. **Constituição Federal (1988)**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.html>. Acesso em: 18 jan. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997 – Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm. Acesso em: 11, mai., 2017.

CAVALCANTE, R. B. L. *et al.* Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104879, 2020.

COSTA, J. *et al.* Validação dos Dados de Precipitação Estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.

DEMBÉLÉ, M.; ZWART, S. J. Evaluation and comparison of satellite-based rainfall products in Burkina Faso, West Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 17, p. 3995-4014, 2016.

DE BRITO, C. S. *et al.* Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. **Atmospheric Research**, v. 250, p. 105380, 2021.

FUNK, C. *et al.* A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. **US Geological Survey data series**, v. 832, n. 4, p. 1-12, 2014.

FUNK, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Clima. 2021. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20644-clima.html>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de climas zonais. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais>. Acesso em: 14 nov. 2021.

JI, L.; DUAN, K. What is the main driving force of hydrological cycle variations in the semiarid and semi-humid Weihe River Basin, China?. **Science of The Total Environment**, v. 684, p. 254-264, 2019.

KUMAR, L.; MUTANGA, O. Google Earth Engine applications since inception: Usage, trends, and potential. **Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1509, 2018.

LI, H. *et al.* Developing an entropy and copula-based approach for precipitation monitoring network expansion. *Journal of Hydrology*, v. 598, p. 126366, 2021.

LUCAS, E. W. M. *et al.* Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin-Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, p. 100306, 2021.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 14 Nov. 2021.

NAWAZ, M.; IQBAL, M. F.; MAHMOOD, I. Validation of CHIRPS satellite-based precipitation dataset over Pakistan. **Atmospheric Research**, v. 248, p. 105289, 2021.

PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of arid environments**, v. 139, p. 26-40, 2017.

PEREIRA, G. *et al.* Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.

R CORE TEAM (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>.

RESTREPO-COUBE, N. *et al.* Understanding water and energy fluxes in the Amazonia: Lessons from an observation-model intercomparison. **Global change biology**, v. 27, n. 9, p. 1802-1819, 2021.

RIVERA, J. A.; MARIANETTI, G.; HINRICHS, S. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. **Atmospheric Research**, v. 213, p. 437-449, 2018.

SANTOS, H. G. *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 3 de jan. 2019.

SHUKLA, S. *et al.* A seasonal agricultural drought forecast system for food-insecure regions of East Africa. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 10, p. 3907-3921, 2014.

SILVA, D. T. *et al.* Precipitação estimada por sensoriamento remoto no estado de Sergipe. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 198-204, 2020.

SILVA JUNIOR, C. H.L. *et al.* Spatiotemporal rainfall trends in the Brazilian legal amazon between the years 1998 and 2015. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1220, 2018.

THOMAZ, E. L.; NUNES, D. D.; WATANABE, M. Effects of tropical forest conversion on soil and aquatic systems in southwestern Brazilian Amazonia: A synthesis. **Environmental research**, v. 183, p. 109220, 2020.

THOMAS, M. R.; PÉREZ, M. H. S. A new species of whiptail catfish, genus *Loricaria* (Siluriformes: Loricariidae), from the Rio Curuá (Xingu Basin), Brazil. **Copeia**, v. 2010, n. 2, p. 274-283, 2010.

WEI, Z. *et al.* Identification of uncertainty sources in quasi-global discharge and inundation simulations using satellite-based precipitation products. **Journal of Hydrology**, v. 589, p. 125180, 2020.

XU, W. *et al.* A comparison among spatial interpolation techniques for daily rainfall data in Sichuan Province, China. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 10, p. 2898-2907, 2015.

ZHANG, Y. *et al.* Evaluation and comparison of precipitation estimates and hydrologic utility of CHIRPS, TRMM 3B42 V7 and PERSIANN-CDR products in various climate regimes. **Atmospheric Research**, v. 265, p. 105881, 2022.

ZHANG, Y. *et al.* Mapping annual forest cover by fusing PALSAR/PALSAR-2 and MODIS NDVI during 2007–2016. **Remote Sensing of Environment**, v. 224, p. 74-91, 2019.

ANEXO I - Precipitações acumuladas mensais do CHIRPS para BRC.

```
//Importando área de estudo
CURUA = ee.FeatureCollection("../BACIA_CURUA");

//Importando dados de precipitação
var precipitation = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY').select("precipitation");

// Criando lista de anos e meses
var anos = ee.List.sequence(ano_inicio, ano_final);
var meses = ee.List.sequence(1, 12);

//Extraindo precipitações acumuladas mensal
function prec_mensal (img) {
  var meses_ano = ee.ImageCollection(
    anos.map(function(y) {
      return meses.map(function(m) {
        return img
          .filter(ee.Filter.calendarRange(y, y, 'year'))
          .filter(ee.Filter.calendarRange(m, m, 'month')).sum()
          .set('system:time_start', ee.Date.fromYMD(y,m,1).format('yyyy-MM')).clip(table) });
    }).flatten() );
  return meses_ano }

//Histograma de precipitações mensais
var chartP = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection:prec_mensal (precipitation),
  regions: table,
  reducer:ee.Reducer.mean(),
  band:"precipitation",
  scale:500,
  xProperty:"system:time_start",
  seriesProperty:"Nome"})
  .setOptions({
    title:"Precipitação acumulada mensal",
    hAxis:{title:"Intervalo de Tempo"},
    vAxis:{title:"P(mm/mês)}})
  .setChartType("ColumnChart");
print(chartP);
```

ANEXO II - Precipitações acumuladas anuais CHIRPS para a BRC.

```
//Importando área de estudo
CURUA = ee.FeatureCollection("../BACIA_CURUA");

//Importando dados de precipitação
var precipitacao = ee.ImageCollection("UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY");

//Criando lista de anos
var anos = ee.List.sequence(ano_inicio, ano_final);

//Aplicando a função map para obtenção das precipitações acumuladas anuais
var calcule_chuva_anual = function(ano){
  var inicio = ee.Date.fromYMD(ano,1,1);
  var ano_seguinte = inicio.advance(1, 'year');
  var serie_diaria = chirps.filterDate(inicio, ano_seguinte);
  var chuva_anual = serie_diaria.sum();
  return chuva_anual.set('system:time_start', serie_diaria.first().get('system:time_start'));
};
var chuvas_anuais = ee.ImageCollection(anos.map(calcule_chuva_anual));

// Criando gráfico de precipitação acumulada anual
var chartP = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection:chuvas_anuais,
  regions: table,
  reducer:ee.Reducer.mean(),
  band:"precipitation",
  scale:500,
  xProperty:"system:time_start",
  seriesProperty:"Nome"})
.setOptions({
  title:"Precipitação acumulada anual",
  hAxis:{title:"Intervalo de Tempo"},
  vAxis:{title:"P(mm/mês)}})
.setChartType("ColumnChart");
print(chartP);
```

ANEXO III - Precipitação diário para pixel de localização do posto pluviométrico da ANA na BRC.

```
//Importando posto pluviometrico
var posto_pluviom = ee.FeatureCollection("../posto_pluviom");

//Importando dados de precipitação
var precipitation = ee.ImageCollection("UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY")
    .select("precipitation");

// Importando área e centralizando o mapa
Map.centerObject(posto_pluviom, 7);

// Estabelecendo data inicial e final
var datai = ee.Date('1981-01-01');
var dataf = ee.Date('1985-01-01');
var precipitation_dia1 = precipitation.filter(ee.Filter.date(datai, dataf));

// Criando gráfico de precipitação diária
var chartP = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection: precipitation_dia1,
  regions: posto_pluviom,
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  band: 'precipitation',
  scale: 10000,
  xProperty: 'system:time_start',
  seriesProperty: 'Nome'})
    .setOptions({
      title: 'Precipitação diária',
      hAxis: {title: 'Intervalo de tempo (dia)'},
      vAxis: {title: 'Precipitação (mm)'}}
    )
    .setChartType('LineChart');
print(chartP);
```

ANEXO IV - Mapa de precipitação acumulada anual CHIRPS para a BRC.

```
//Importando área de estudo
CURUA = ee.FeatureCollection("../BACIA_CURUA");

//Importando dados de precipitação para a área e data desejados, somando e dividindo pelo
número de anos
var chirps = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY')
    .select("precipitation").filterDate('1981-01-01','2021-01-01').sum().div(40);

//Exportando imagem
Export.image.toDrive({
  image: chirps_anual_tif,
  description: 'arquivos_chirps',
  scale: 500,
  region: CURUA
});
```

ANEXO V - Mapas de médias de precipitações acumuladas por mês do ano para a BRC.

```
bacia = ee.FeatureCollection("../BACIA_CURUA");

//Importando dados de precipitação
var precipitation = ee.ImageCollection("UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY").select("precipitation")

//Criando lista de anos
var years = ee.List.sequence(1981, 2020);

//Criando função map
var clip = function (image){ return image.clip(bacia) };
var calcule_chuva_anual = function (ano){
  var data_inicio = ee.Date.fromYMD(ano,12,1); // '1981-01-01'
  var ano_seguinte = data_inicio.advance(1, 'month'); // '1982-01-01'
  var serie_diaria = chirps.filterDate(data_inicio, ano_seguinte); // ee.ImageCollection()
  var chuva_anual = serie_diaria.map(clip).sum();
  return chuva_anual.set('system:time_start', serie_diaria.first().get('system:time_start'));
};

//Precipitações máximas
var chuvas_anuais = ee.ImageCollection(years.map(calcule_chuva_anual));
print('Precipitações máximas diárias anuais:', chuvas_anuais);

//Precipitação média das precipitações máximas anuais
var media = chuvas_anuais.mean();
print('Media das precipitações máximas:', media);

//Gráfico de linhas com precipitações máximas diárias para o ponto
var Gráfico_preci = ui.Chart.image.seriesByRegion({
  imageCollection:chuvas_anuais, regions: ponto, reducer:ee.Reducer.sum(),
  band:"precipitation", scale:500, xProperty:"system:time_start", seriesProperty:"Nome"})
.setOptions({
  title:"Precipitações máximas diárias para a cidade de João Pessoa/PB ",
  hAxis:{title:"Tempo (dia)", vAxis:{title:"Chuva máximas acumulada (mm)"}})
print(Gráfico_preci);

//Exportando mapa
Export.image.toDrive({ image: media, description: 'DEZEMBRO', folder:
'PRECIPITACOES_MENSAIS', scale: 500, region: bacia});
```

CAPÍTULO 3: RELAÇÃO ENTRE O DESMATAMENTO E A RESPOSTA HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CURUÁ-PA

José Carlos Benício do Nascimento Filho³; André Quintão de Almeida²

RESUMO

A dinâmica hídrica de uma determinada bacia hidrográfica está em função, dentre outros fatores, do uso e cobertura da terra. Alterações significativas e o manejo inadequado do uso da terra, podem provocar mudanças na taxa de infiltração da água no solo, afetando assim a quantidade e a qualidade do escoamento hídrico da bacia. Nas últimas décadas, as grandes bacias hidrográficas localizadas na região Amazônica vêm passando por um intenso processo de desmatamento e degradação florestal. Diante disso, o trabalho teve como objetivo principal avaliar o efeito do desmatamento sobre os principais componentes hidroclimáticos da bacia hidrográfica do rio Curuá, localizada no município de Altamira-Pará. Considerando todo o contexto da área de drenagem da bacia, foram utilizados dados anuais de precipitação pluvial do produto de sensoriamento remoto CHIRPS, dados fluviométricos da ANA e imagens da série do satélite Landsat entre 1981 e 2020. Os dados foram processados e organizados em séries temporais anuais de precipitação, vazão, resposta hidrológica e desmatamento. Os valores anuais de resposta hidrológica da bacia foram estimados pela relação entre a vazão específica (mm) e o total de precipitação (mm) acumulados no ano. Os valores de desmatamento foram estimados por algoritmo de aprendizado de máquina random forest. A partir das séries anuais, a identificação de possíveis tendências nos dados foram analisadas. Por fim, a relação entre o desmatamento e os principais elementos hidroclimáticos da bacia foi analisada pelo coeficiente de correlação de Pearson. Não foram observadas tendências significativas nos dados hidroclimáticos analisados na bacia. No entanto, foi observada uma redução (16,8%) na área de vegetação nativa entre 1985 e 2020, com um aumento significativo do desmatamento a partir do ano 2007. Não foi observada relação significativa entre os valores anuais de área de floresta/desmatamento e as informações hidroclimáticas da bacia. Podemos concluir que, apesar da remoção da área de cobertura florestal, ainda não foi possível verificar relação entre o desmatamento e os principais componentes hidroclimáticos analisados na bacia. Isso pode ser justificado pela grande extensão territorial da bacia e pelo tamanho de sua área desmatada.

PALAVRAS-CHAVE: Floresta Amazônica, Desmatamento, resposta hidrológica, CHIRPS, GEE, Random Forest, Landsat.

ABSTRACT

The water dynamics of a given watershed is a function of, among the factors, the use and land cover. Significant changes and inadequate management of land use can cause changes in the rate of water infiltration into the soil, thus affecting the quantity and quality of water runoff from the basin. In recent decades, the watersheds located in the Amazon region have been undergoing an intense process of deforestation and forest destruction. Therefore, the main objective of the work was to evaluate the effect of deforestation on the main hydroclimatic

1 e 2 Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da UFS, Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos Av. Marechal Rondon, s/n, Jd. Rosa Elze, São Cristóvão/SE CEP 49100-000.

components of the hydrographic basin of the Curuá River, located in the municipality of Altamira-Pará. the entire drainage set of the area, the data from the implemented data series of the CHIR rainfall planning series, the fluvial data of the supply area of the, the data of the series of planned series of the planned series of the ANA remote planning were used and from the fluvio data series were used in the 19020 series. execution response, result/flow rate, hydrological response and deforestation. The accumulated values of the total response of the watershed were generated by the relationship between the flow (mm) and not by the logical response (mm). The values of acquisition of machines were calculated by values of acquisition of random forest. From the series, the identification of possible Finally, the correlation between deforestation and the main hydroclimatic elements was Pearson's correlation. No significant trends were observed in the hydroclimatic data analysis in the analysis. However, a reduction (168%) was observed in the area of native vegetation between 1985 and 2022, with a significant increase from year 2007. and the hydroclimatic information of the basin. of possible protection, but of forest protection, it is still not possible to verify between forest protection and the main forest protection. This can be justified by the large territorial extension of the basin and the size of its deforested area.

KEYWORDS: Amazon Forest, Deforestation, hydrological response, CHIRPS, GEE, Random Forest, Landsat.

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica vem sendo utilizada como a principal unidade hidrológica de planejamento e gestão dos recursos hídricos no Brasil. O inadequado manejo do solo, da água e do uso da terra podem provocar alterações na dinâmica hídrica de uma bacia e na disponibilidade para seus diversos usos. Estudos recentes mostram que a remoção da floresta pode alterar a qualidade e a quantidade de água disponível em uma bacia hidrográfica, independentemente do tamanho da sua área de drenagem (COSTA, BOTTA e CARDILLE, 2003; ARAGÃO, *et al.*, 2017; MENDES, CECÍLIO e ZANETTI, 2018; YONABA, *et al.*, 2021). Normalmente, em estudos realizados, o desmatamento provoca um aumento da vazão média anual (BOSCH e HEWLETT, 1982; ANDRÉASSIAN, 2004; DIAS *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, a região amazônica vem passando por um acelerado processo de desmatamento e degradação florestal. De janeiro a novembro de 2021 o desmatamento na Amazônia Legal brasileira foi de aproximadamente 1300 km², ultrapassando sua taxa de crescimento (21,9%) desde 2010 (INPE, 2021). Entre os principais fatores que potencializam esse desmatamento na região Amazônica, são encontradas as concessões do Código Florestal de 2012 e o baixo cumprimento dos acordos de desmatamento zero dos setores da pecuária e da soja (SOUZA *et al.*, 2018). Até recentemente, avaliar a possível relação entre o desmatamento e a disponibilidade hídrica nas grandes bacias hidrográficas da região amazônica era uma

tarefa difícil, principalmente pela baixa disponibilidade de dados hidroclimáticos e pela dificuldade em estimar a área removida de floresta.

Com o surgimento das plataformas de coleta e processamento de grandes bases de dados de sensoriamento remoto, como o Google Earth Engine (GEE) (FERREIRA, FERREIRA e FERREIRA, 2018; GORELICK, *et al.*, 2017), a estimativa do desmatamento vem sendo possível, principalmente em bacias com grandes áreas de drenagem, como as da região amazônica. Apesar da grande importância das bacias hidrográficas da região norte do Brasil, do crescente aumento do desmatamento nos últimos anos e do surgimento de plataformas de coleta e processamento de dados remotos, poucos ainda foram os estudos que avaliaram a relação entre a remoção da floresta e a quantidade de água produzida nestas áreas de drenagem. Uma das poucas exceções foi o trabalho realizado por Costa, Botta e Cardille (2003). Neste estudo, os autores verificaram que a vazão média anual do rio Tocantins, no sudeste da Amazônia, foi 24% maior no período em que a bacia tinha a menor cobertura de floresta, comprovando o efeito da remoção da floresta em relação a resposta hidrológica da bacia.

Além das plataformas de coleta e processamento de dados de sensoriamento remoto, técnicas de aprendizado de máquinas também vêm sendo utilizadas para estimar o desmatamento. O aprendizado de máquina pode ser descrito como uma técnica de inteligência artificial que visa capacitar *softwares* a aprenderem e se desenvolverem sem a programação direta (VANAM *et al.*, 2021). Dessa forma, computadores conseguem entender os padrões de uma atividade e replicá-las de forma automática, sem interferência humana. Em avaliação de técnicas de mapeamento de vegetação Hamylton *et al.* (2020) conclui que o aprendizado de máquina possui alto potencial na identificação de características da superfície terrestre e monitoramento de suas evoluções no tempo.

Diante disso, o trabalho teve como objetivo principal estimar a perda de cobertura florestal na bacia hidrográfica do rio Curuá (BRC) entre os anos de 1985 e 2020 e avaliar sua possível influência sobre o regime hidroclimático da bacia. Para análise da perda florestal foi utilizada uma classificação baseada em um algoritmo de aprendizado de máquinas a partir das imagens do satélite Landsat 8, 7 e 5. A caracterização hidroclimática foi realizada a partir de dados de precipitação pluviométrica Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) e

dados fluviométricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA).

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Curuá (BRC), no estado do Pará. Ela é delimitada a partir do posto fluviométrico Cajueiro, que tem uma área de drenagem aproximada de 35.600 km² (Figura 10). A localização aproximada do posto Cajueiro está nas coordenadas 5°52' sul e 54°52' oeste, no município de Altamira. O rio Curuá é afluente do rio Irirí, apresenta águas relativamente claras e um substrato formado predominantemente por areia com manchas de rocha e grandes blocos lateríticos (THOMAS e PÉREZ, 2010).

A BRC está localizada na bacia do Xingu, que abriga um dos maiores projetos do governo brasileiro em geração de energia, o Complexo Hidrelétrico de Belo Monte, que possui a quarta maior hidrelétrica do mundo em capacidade instalada (LUCAS *et al.*, 2021). Nessa região, nas últimas décadas, percebe-se uma expansão de áreas de pastagem em detrimento da cobertura florestal nativa (LUCAS *et al.*, 2021).

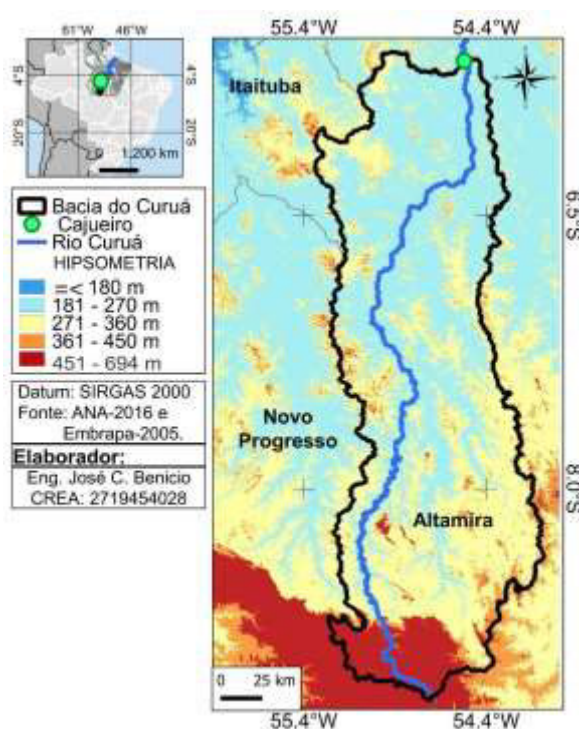


Figura 10 – Localização da área de estudo.

O clima da BRC é do tipo equatorial (IBGE, 2002), com temperatura média de 28 °C e precipitação pluviométrica de 2.100 mm.ano⁻¹ (IBGE, 2021; AGRITEMPO, 2021). O relevo é predominantemente inferior a 270 metros, com maiores elevações na região sul, onde nasce o rio Curuá (MIRANDA, 2005). Suas menores elevações estão na região norte, próximo ao encontro com o rio Irirí (Figura 1).

O solo da BRC é predominantemente Argissolo, ocupando 29.542 km² (aproximadamente 82% da área). Ele está distribuído por toda a bacia, com exceção da região sul. Esse solo geralmente tem profundidade de mediana a alta, drenagem moderada e é bastante suscetível à erosão (AGRA e ANDRADE, 2021). Os Neossolos também são encontrados em uma grande área da BRC, especificamente nas regiões sul e central, em uma extensão territorial de 5.592 km² (15,5% da bacia). Esse solo apresenta poucos minerais primários e pouca resistência ao intemperismo (AGRA e ANDRADE, 2021).

2.2 MAPEAMENTO DO DESMATAMENTO

2.2.1 Levantamento e processamento de dados Landsat

Foram utilizadas imagens das coleções de dados de refletância de superfície dos sensores Landsat 5 ETM (de 1985 a 2011), 7 ETM + (de 1999 a 2013) e 8 OLI / TIRS (a partir de 2013) para o mapeamento da área de floresta existente na bacia. As imagens foram obtidas e recortadas para a BRC com a linguagem de programação JavaScript na plataforma do Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>). Foram utilizadas as bandas espectrais B1, B2, B3, B4, B5, B6 e B7 (faixas espectrais de 0,45 a 2,3 µm) no satélite Landsat 5 e 7 e B2, B3, B4, B5, B6 e B7 (faixas espectrais de 0,45 a 2,3 µm) para o satélite Landsat 8 (Figura 11). Com exceção da banda B6 dos satélites Landsat 5 e 7 (120 e 60 m, respectivamente), todas as imagens utilizadas possuem resolução espacial de 30 m (USGS, 2021).

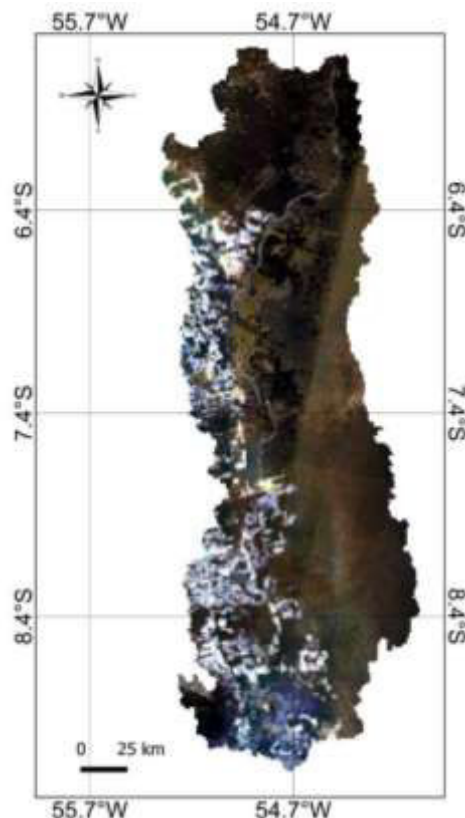


Figura 11- Composição RGB de imagens do satélite Landsat 8 OLI / TIRS.

Foram utilizados produtos de reflectância de superfícies (USGS, 2020) com porcentagem máxima de 5% de cobertura de nuvens. Assim como Souza *et al.* (2020), foram filtrados os pixels com baixa porcentagem de nuvens e sombra de nuvens, a partir da aplicação da máscara CFMask. Dessa forma, cada ano foi representado por uma imagem formada pelo cálculo de seus pixels médios de mesma coordenada encontrados em imagens no mesmo ano. Os anos que após a aplicação dos filtros não apresentaram imagens suficientes para cobrir toda a área de estudo no período seco do ano (de abril a novembro), foram excluídos da análise temporal.

2.2.2 Mapeamento da cobertura florestal

A partir das composições anuais Landsat, foi realizado o mapeamento de floresta e não floresta com a aplicação de algoritmo de aprendizado de máquina. Assim como Mateus *et al.* (2020), foi utilizado o algoritmo de floresta aleatória como forma de identificação de padrões na superfície terrestre. Essa técnica foi aplicada na plataforma do GEE a partir da função “smileRandomForest”, com a delimitação de mil

árvores de decisão para as duas classes de uso do solo escolhidas para o mapeamento (“Floresta natural” e “Área desmatada”).

A composição colorida das imagens utilizadas no mapeamento ocorreu pela utilização das bandas B1, B2 e B3 (faixas espectrais de 0,45 a 0,65 μm) no satélite Landsat 5 e 7 e bandas B2, B3 e B4 (faixas espectrais de 0,45 a 0,68 μm) para o satélite Landsat 8. Todas as imagens utilizadas possuíam resolução espacial de 30 m (USGS, 2021).

Foram delimitados vinte polígonos retangulares de cobertura florestal nativa e vinte de área sem cobertura florestal, via tela do computador a partir da composição (RGB) colorida das imagens Landsat para cada ano na BRC. Com esses polígonos foram extraídas 1000 amostras pontuais distribuídas aleatoriamente pela função de amostragem randômica. Dessas 1000 imagens, 70% (700 amostras) foram utilizadas pelo algoritmo para treinamento e 30% (300 amostras) para validação da classificação.

Semelhante a Souza *et al.* (2020), a acurácia do classificador foi avaliada. Sua avaliação ocorreu pelo método matriz de confusão, por meio das estatísticas acurácia global, acurácia do produtor e acurácia do usuário. Em seguida, foram gerados mapas de cobertura florestal com as classes de floresta natural e área desmatada e foi obtida a porcentagem das classes para cada ano. O código para classificação, estimativa das acurácias, geração de mapas e porcentagens anuais de cobertura florestal pode ser observado no Anexo I.

2.3 DADOS HIDROCLIMÁTICOS

2.3.1 Dados fluviométricos

Foram utilizados os dados de vazão diária (Q , em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) do posto fluviométrico Cajueiro (código = 18650000) de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O posto está localizado no rio Curuá, nas coordenadas 5°65' sul e 54°52' oeste, no município de Altamira – Pará.

2.3.1.1 Levantamento e pré-processamento dos dados

Os valores de Q foram obtidos no formato de texto através do sistema de informações hidrológicas da ANA HIDROWEB (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>). Esse conjunto de dados foi organizado na escala de tempo diária e sua porcentagem de falhas foi estimada. Foram utilizados os dados das estações fluviométricas Laranjeiras (código = 18600000), Pedra do ó (código = 18700000) e Manoel Jorge (código = 18590000) para preenchimento das falhas de registro de Q da estação Curuá (Figura 12). Essas estações estão localizadas no rio Iriri (rio que o Curuá é afluente), a uma distância máxima de 150 km da estação analisada Cajueiro.



Figura 12- Estações de monitoramento fluviométrico.

Para o preenchimento das falhas dos dados fluviométricos diários (m^3/s), regressões lineares foram estimadas entre a estação Cajueiro e as estações adjacentes (FERREIRA, RODRIGUES e SILVA, 2021). As falhas foram preenchidas a partir dos dados dos postos que apresentaram maiores valores de coeficientes de determinação (R^2) (JUNQUEIRA, AMORIM e OLIVEIRA, 2018).

2.3.1.2 Estimativa das vazões

Após a correção de falhas do posto fluviométrico Cajueiro, suas vazões mínimas, médias, máximas e específicas foram estimadas (MENDES, CECÍCIO e ZANETTI, 2018). Ferreira, Rodrigues e Silva (2021) realizaram metodologia semelhante à proposta, ao utilizar os fluxos anuais e mensais médios, máximos e mínimos para compreender a influência das mudanças de uso do solo e precipitação em bacias do Cerrado e Mata Atlântica. A estimativa das vazões máximas anuais ocorreu pelo histograma das vazões no ano e identificação de seus picos de máxima. As vazões mínimas foram estimadas através do cálculo do Q7 anual, que apresenta o valor da média das sete menores vazões consecutivas por ano (FERREIRA, RODRIGUES e SILVA, 2021). As vazões médias foram calculadas pela média aritmética das vazões diárias anuais.

Assim como Costa, Botta e Cardille (2003), foi verificada a influência das mudanças de uso e ocupação do solo sobre os fluxos total (F_t , em mm) e de base (F_b , em mm) do rio. Para a estimativa do fluxo base foi utilizada a função “BaseflowSeparation” associada à biblioteca “EcoHydRology”, no ambiente do software livre R (R CORE TEAM, 2020). De forma discreta, essa função utiliza um método numérico e empírico sem representação ou modelagem hidrológica, a partir de ferramentas de processamento de sinais para alterar hidrogramas de vazão (PELLETIER e ANDRÉASSIAN, 2020).

2.3.2 Dados pluviométricos

Os dados estimados de precipitação pluvial (P , em mm) foram obtidos do produto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS), desenvolvido pela Agência dos EUA para o Desenvolvimento Internacional Famine Early Warning Systems Network (FUNK *et al.*, 2015). O conjunto de dados CHIRPS está disponível desde 2014, com uma série temporal de dados diários de precipitação pluvial desde 1981 em alta resolução espacial ($0,05^\circ$) (FUNK *et al.*, 2014; SHUKLA *et al.*, 2015; NAWAZ, IQBAL e MAHMOOD, 2021). Esses dados foram desenvolvidos através da incorporação de imagens de satélite com dados de estação in-situ e abrangência espacial para a maior parte do globo (FUNK *et al.*, 2015).

Foi utilizada a coleção de imagens “UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY” entre os anos de 1981 e 2020. Essa coleção fornece dados na escala diária, em mm dia^{-1} , a

partir de uma banda denominada Precipitation (FUNK *et al.*, 2015). As precipitações acumuladas anuais (mm ano^{-1}) foram extraídas para a delimitação da BRC (ANEXO II).

2.3.2.1 Levantamento e pré-processamento de dados

Inicialmente, a bacia hidrográfica do rio Curuá (BRC) foi importada para a plataforma do Google Earth Engine (GEE) e utilizada para delimitação da área de estudo e exportação dos dados de precipitação. Na linguagem de programação JavaScript foi utilizada a função “sum” nas precipitações diárias CHIRPS para obtenção dos seus valores acumulados mensais e a função “map” para replicar essa somatória a todos os anos, obtendo-se as precipitações mensais de todos os meses de todos os anos de estudo. Através da função “sum” também foi criada uma lista de precipitações CHIRPS acumuladas anuais.

2.4 RESPOSTA HIDROLÓGICA

A resposta hidrológica da BRC foi calculada a partir da relação entre a precipitação e a vazão específica na bacia. Assim como Belihu *et al.* (2020), o uso dessa relação buscou minimizar a interferência da precipitação sobre a vazão local, para que fosse identificada a consequência da alteração de cobertura florestal sobre o regime hidrológico.

2.5 ANÁLISE DE TENDÊNCIA E RELAÇÃO ENTRE O USO E COBERTURA DO SOLO E DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Como aplicado por Cavalcante *et al.* (2020), a análise de tendência dos dados hidrometeorológicos foi estimulada pelo método de Mann – Kendall. Essa estimativa foi feita na linguagem R, com utilização do pacote “trend”. Valores negativos de coeficiente “S”, estimados por Mann – Kendall, indicam a possibilidade de uma tendência de decréscimo, enquanto valores positivos explicam uma possível tendência de crescimento (GOCIC e TRAJKOVIC, 2013). A confirmação dessas tendências ocorre pelo P-value inferior a 0,05.

A relação entre o crescimento da porcentagem de área desmatada com valores de vazão máxima, vazão média, vazão mínima, fluxo base e resposta hidrológica foram estimados pela análise de correlação de Pearson. Esse coeficiente estimou a força de correlação linear entre dois conjuntos de variáveis (CAVALCANTE *et al.*, 2020). Nessa estimativa, os valores próximos da unidade representam uma boa correção para os dados analisados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DADOS FLUVIOMÉTRICOS

3.1.1 Correção de falhas

O posto fluviométrico Cajueiro apresentou 1023 dias sem dados do período de 1981 e 2020. A partir dos postos fluviométricos próximos foi possível corrigir parte dessas falhas (Tabela 8). Os R^2 para os postos fluviométricos 18600000, 18700000 e 18590000 foram de 0.8773, 0.9199 e 0.8662, respectivamente. Dessa forma, foi identificado que o posto fluviométrico 18600000 é mais indicado para explicar os dados ausentes no período de 01/05/2012 à 01/02/2013. O posto fluviométrico 18700000 foi o único com dados no período de falha de 1989 a 1991 do posto Cajueiros e apresentou uma boa capacidade de explicar os dados ausentes.

PERÍODO	18650000	18600000	18700000	18590000
4 dias	De 01/09/2014 Até 04/09/2014	Sem medições	Sem medições	Sem medições
6 meses	De 01/08/2014 Até 01/02/2014	Sem medições	Sem medições	Sem medições
1 ano	De 01/04/2013 Até 01/05/2012	A parti de 01/02/2013	Sem medições	A parti de 01/02/2013
4 meses	De 01/02/2004 Até 01/10/2003	Sem medições	Sem medições	Sem medições
1 mês	De 01/08/1996 Até 01/07/1996	Sem medições	Sem medições	Sem medições
9 dias	De 21/07/1996	Sem medições	Sem medições	Sem medições

	Até 01/06/1996			
4 dias	De 01/10/1995	Sem medições	Sem medições	Sem medições
	Até 05/10/1995			
1 mês	De 01/09/1995	Sem medições	Sem medições	Sem medições
	Até 01/08/1995			
26 dias	De 04/08/1995	Sem medições	Sem medições	Sem medições
	Até 01/07/1995			
4 meses	De 01/10/1991	Sem medições	OK	Sem medições
	Até 01/06/1991			
15 dias	De 01/09/1990	Sem medições	OK	Sem medições
	Até 16/09/1990			
27 dias	De 04/08/1990	Sem medições	OK	Sem medições
	Até 01/07/1990			
3 meses	De 01/06/1989	Sem medições	OK	Sem medições
	Até 01/03/1989			

Tabela 8- Postos fluviométricos levantados e medições para os períodos sem dados do posto fluviométrico Cajueiro (código =18650000).

3.1.2 Caracterização fluviométrica

Após a correção de falhas, os anos de 1995, 1996, 2003, 2004, 2013 e 2014 ainda apresentaram ausências de medições maiores que 5%, então foram excluídos dessa análise (Figura 13). Os maiores valores de vazão média anual do posto Cajueiro aconteceram nos anos de 1982, 1985, 2006 e 2020 e foram superiores a 1000 m³/s. Além desses anos, foram registradas maiores vazões máximas para 1989, 1994, 1997, 2011, 2017 e 2018. As vazões máximas desses anos foram superiores a 2500 m³/s.

As menores vazões médias, aconteceram nos anos de 1998, 2002 e 2016 e foram inferiores a 500 m³/s. O período com menores valores médios destoou das menores vazões mínimas, que aconteceram nos anos de 1989, 1997 e 1999 e foram menores que 20 m³/s.

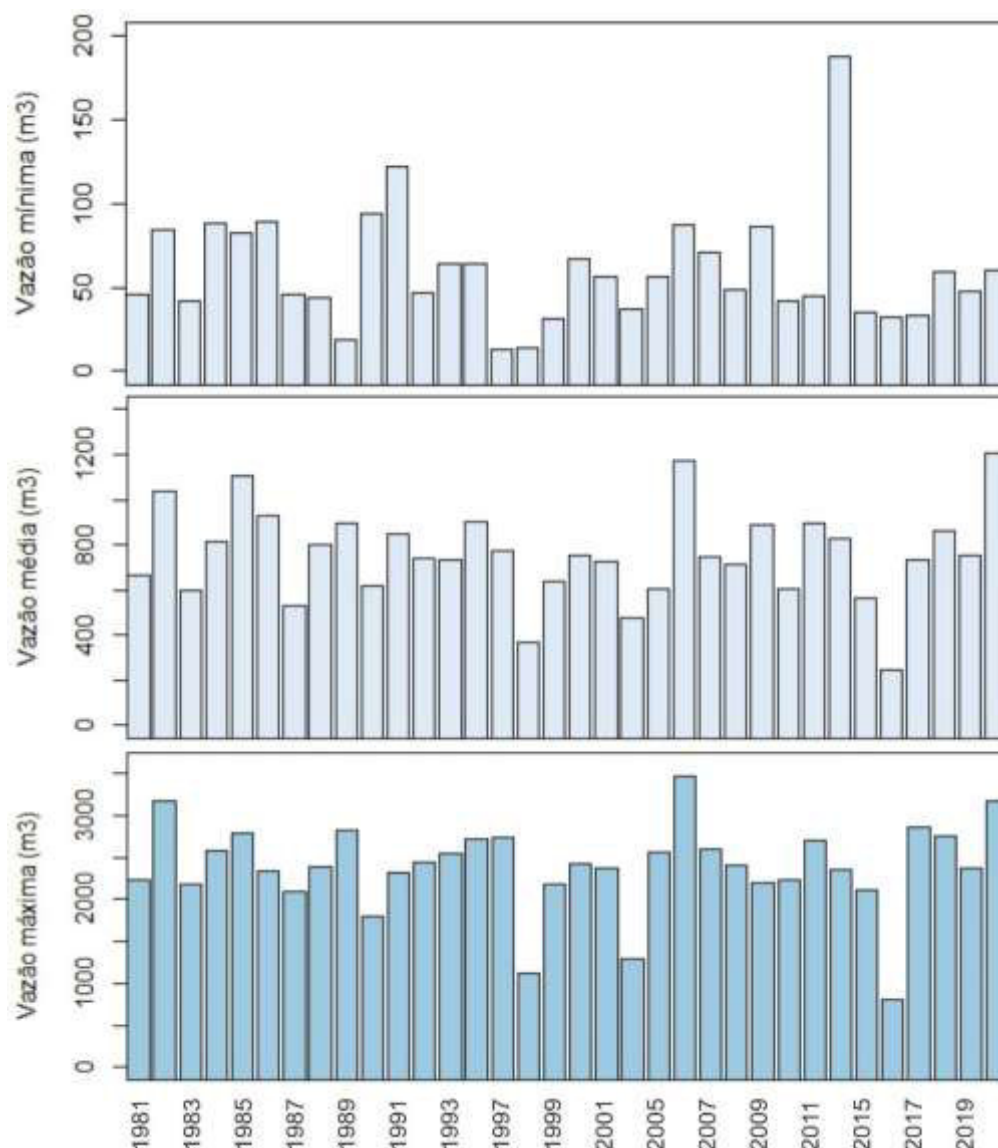


Figura 13- Vazões mínima, máxima e média anuais do posto fluviométrico Cajueiro dos anos de 1981 a 2020.

Os fluxos total e de base apresentaram comportamentos semelhantes durante o período de análise (Figura 14). Seus maiores picos aconteceram nos anos de 1982, 1986 e 2006. Seus valores mínimos foram nos anos de 1998 e 2016.

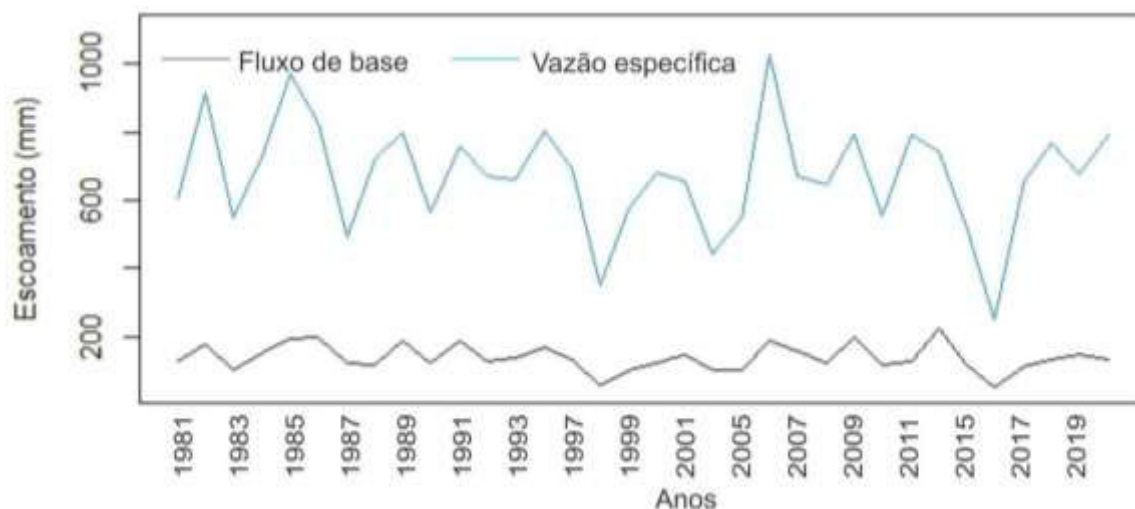


Figura 14- Vazão específica e fluxo de base do posto fluviométrico Cajueiro dos anos de 1981 a 2020.

3.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

3.2.1 Caracterização pluviométrica

O período de seca na Bacia do Rio Curuá é iniciado normalmente no mês de abril e termina no mês de outubro. Assim como identificado por Lucas *et al.* (2021), os meses de dezembro a março apresentaram as maiores precipitações acumuladas. É percebida a baixa precipitação nos anos de 1983, 1986, 1987, 1997, 1998, 2002 e 2010. Esses anos obtiveram precipitações acumuladas inferiores a 2000mm (Figura 15).

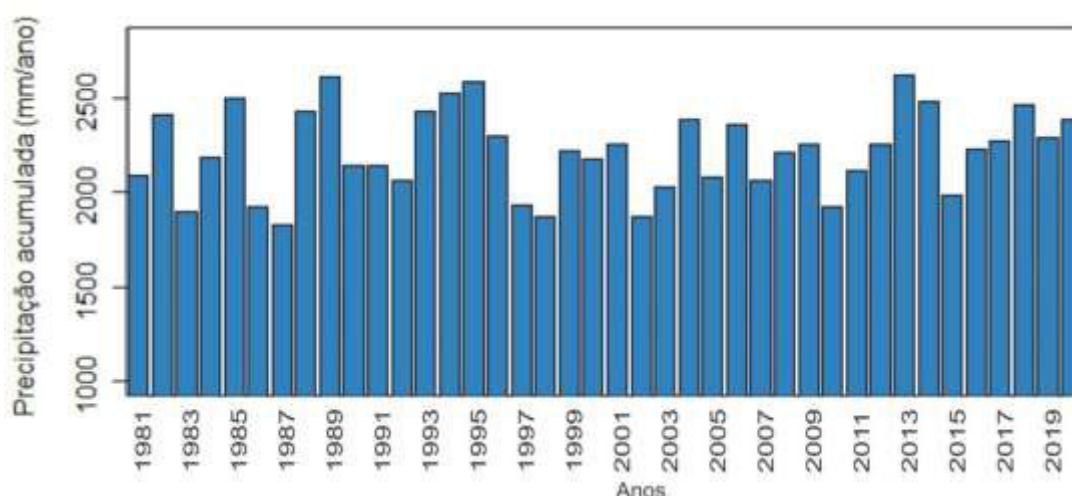


Figura 15- Precipitação acumulada anual média na Bacia Hidrográfica do Curuá para os anos de 1981 a 2020.

3.3 RESPOSTA HIDROLÓGICA

Como apresentado na Figura 16, os anos de 1982, 1986, 1997, 2006 e 2011 apresentaram as maiores respostas hidrológicas. Isso significa uma maior diferença entre as precipitações e as vazões médias na BRC. A retirada de cobertura florestal nesta bacia aumenta o seu escoamento superficial, que potencializa as vazões médias (COSTA, BOTTA e CARDILLE, 2003). Porém, de acordo com suas características morfométricas, a BRC apresenta uma alta capacidade de infiltração, que dificulta esse escoamento superficial.

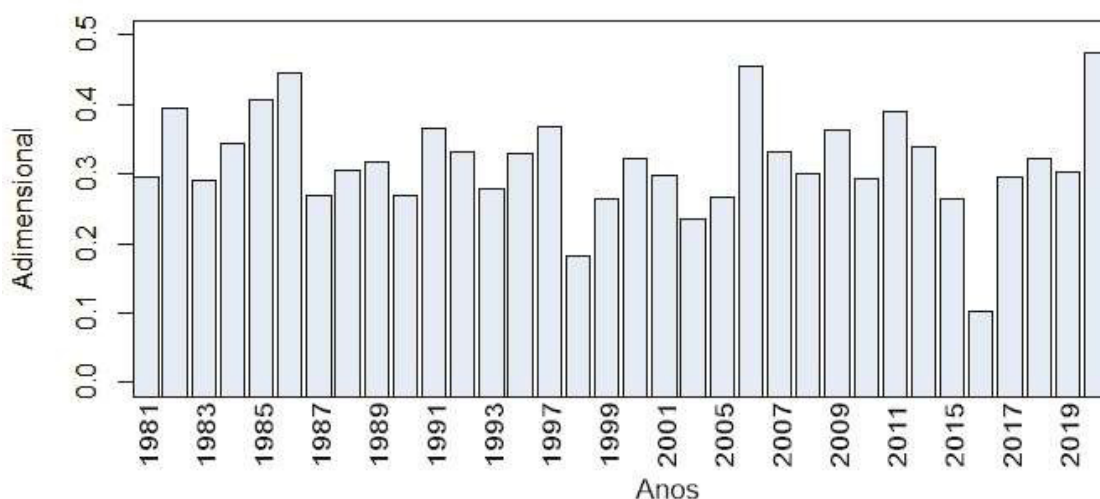


Figura 16- Resposta hidrológica anual da Bacia Hidrográfica do Curuá para os anos de 1981 a 2020.

Os valores de resposta hidrológica nos anos de 1998, 2002 e 2016 foram os menores durante o período de estudo, sendo inferiores a 0,25. Esses valores baixos mostram que nesses anos uma parcela menor da água precipitada escoou pelo curso de seu rio. Isso pode estar associado a uma maior infiltração, que torna a água temporariamente indisponível para recarga dos corpos hídricos superficiais.

A evapotranspiração (ET) também pode diminuir a parcela da precipitação que se transforma em vazão dos corpos hídricos superficiais, causando baixos valores de resposta hidrológica. Fatores como o tipo de vegetação existente, a radiação solar, a temperatura do ar e a velocidade do vento podem afetar a ET (AHMAD *et al.*, 2020; WANG, LV e ZHANG, 2021; QINGMING *et al.*, 2022). Porém, na BRC é encontrada uma diminuição da cobertura florestal, que dificulta a perda de água por ET. Como identificado por Qingming *et al.* (2022), na Bacia do Rio Haihe, na China, a quantidade

de vegetação é diretamente proporcional ao aumento da evapotranspiração em uma bacia.

3.4 MAPEAMENTO DE COBERTURA FLORESTAL E ÁREA DESMATADA

Na análise das coleções de dados de refletância de superfície atmosférica corrigida, o sensor Landsat 7 ETM + apresentou resultados incoerentes de classificação de cobertura do solo, por isso foi excluído do mapeamento. Essa incoerência é associada a falha no sensor de compensação do movimento de avanço do satélite, que em 31 de maio de 2003 parou de funcionar, causando a duplicação de imagens e a perda de 22% da área de imageamento (USGS, 2021). Visto que a coleção Landsat 5 ETM+ é operada de 1984 a 2011 e o Landsat 8 OLI / TIRS começa a operar em 2013, o ano de 2012 foi excluído desse mapeamento (CHE; ZHANG; LIU, 2021).

O ano de 2002 foi excluído da análise porque todas as imagens da coleção Landsat 5 ETM+ deste ano apresentaram porcentagens de nuvens superiores ao limite estabelecido para um mapeamento coerente (maior 5% da área da bacia). Com isso, as amostras de treinamento aplicadas ao modelo Floresta Aleatória possibilitaram a classificação de 33 anos (94,29% dos anos analisados) da BRC em áreas de floresta não desmatada e áreas desmatadas. As acurácias globais encontradas para as classificações anuais de cobertura do solo foram superiores a 0,98 (ANEXO III). Como discutido por Souza *et al.* (2020), esse valor é considerado alto e ressalta a confiabilidade do método de classificação adotado.

As classificações de cobertura do solo (Figuras 17 e 18) mostraram o crescimento da área desmatada ao longo do período. Isso já era esperado, diante do desmatamento que a região amazônica tem sofrido nos últimos anos, evidenciada por diversos estudos (DE ARAÚJO, *et al.*, 2021; MATAVELI, G. A. V. *et al.*, 2021; AMIN, A. *et al.*, 2019). Assim como em outras regiões da Amazônia, podemos perceber que o desmatamento e a urbanização se desenvolveram nas áreas de entorno do rio Curuá (SANTOS *et al.*, 2022). As maiores extensões desmatadas ocorrem nos anos de 2018 (2,6%), 2009 (1,4%), 2020 (1,3%) e 2008 (1,3%). A Figura 17 mostra que os 2006, 1999, 1995, 1993, 1990, 1989 e 1988 não apresentaram retirada de cobertura florestal significativa. Esses resultados são respaldados por BBC News (2020), que

afirma que desde o ano de 2008 o desmatamento na Amazônia tem se destacado, devido ao fomento das atividades de agricultura e mineração.

As altas taxas de desmatamento na BRC entre os anos de 2018 e 2020 podem ser justificadas pelo incentivo do governo federal ao desmatamento, com a justificativa de impulsionar o desenvolvimento econômico do País (MARTINS *et al.*, 2021). O poder de órgãos ambientais como o IBAMA, é diminuído nesses anos, dificultando a fiscalizar e minimizar a desmatamento da Amazônia Legal (DE JONG, 2021).

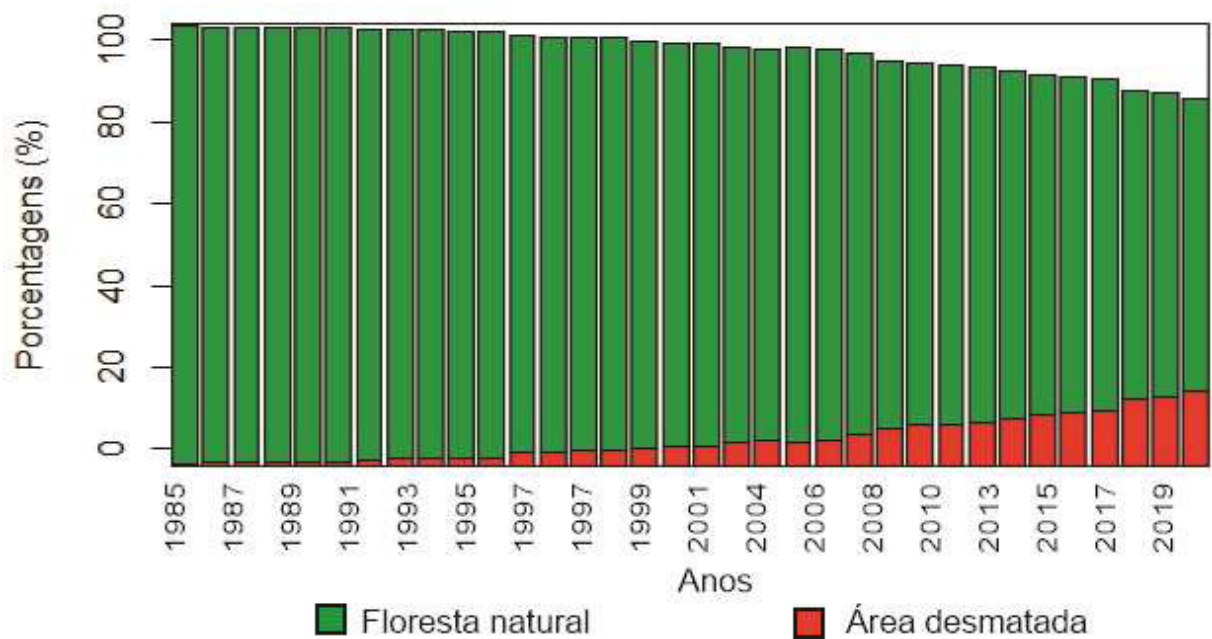


Figura 17- Porcentagens de cobertura florestal natural entre os anos de 1985 e 2020, na BRC.

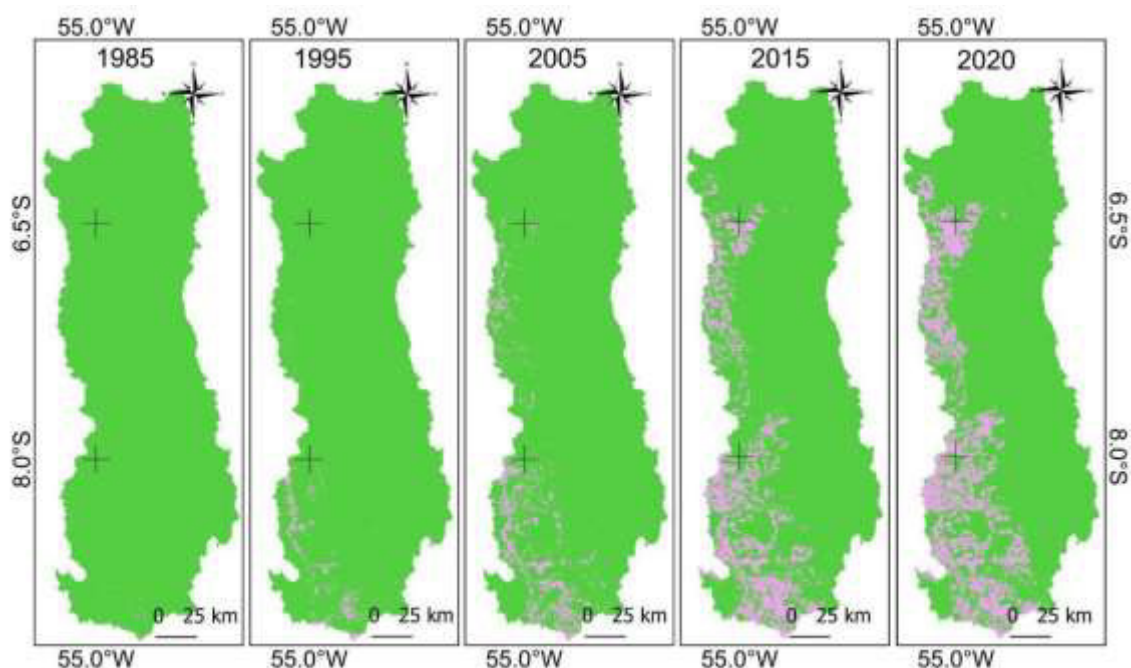


Figura 18 - Cobertura florestal e áreas sem floresta natural nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2020.

3.5 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

O teste de Mann- Kendall apresentou um valor estatístico S de 546 e uma p-value significativa (inferior a 0,05). Isso respalda a tendência positiva do desmatamento, que pode ser visualizada na Figura 8. O teste de Mann-Kendall não encontrou tendência nos valores de resposta hidrológica, vazões máximas, mínimas e médias.

3.6 EFEITO DO CRESCIMENTO DA ÁREA DESMATADA

O teste de correlação de Pearson não encontrou relação entre o aumento do desmatamento e a resposta hidrológica anual na BRC. Também não foram encontradas relações significativas das taxas de desmatamento com o fluxo base e as vazões específicas, máximas, mínimas e médias do rio Curuá. O desmatamento de 16,8% da BRC, que ocorreu entre os anos de 1985 e 2020, não foi suficientemente impactante para a descarga do seu curso hídrico principal. De acordo com Costa, Botta e Cardille (2003), a maior parte dos estudos que avaliaram os efeitos das mudanças na cobertura da terra em bacias de rios tropicais de médio e grande porte não encontraram relacionamentos entre essa variável e as vazões locais. Em estudo realizado no Cerrado e Mata Atlântica brasileiros, Ferreira, Rodrigues e Da Silva (2021), o efeito de mudanças de uso e cobertura do solo entre 1985 e 2014 não foi capaz de repercutir em regimes de máxima, mínima e média analisados.

4 CONCLUSÃO

A partir dos dados de precipitação CHIRPS, dados fluviométricos da ANA e dados Landsat da USGS, foi possível analisar a influência da alteração de cobertura florestal na BRC sobre seu comportamento hidrológico. Dados de NDVI e EVI foram utilizados para confirmar o aumento do desmatamento encontrado pelo algoritmo de aprendizado de máquinas aplicado às imagens Landsat.

Os dados anuais de resposta hidrológica, fluxo base e vazões específica, máxima, média e mínima não apresentaram tendências de crescimento ou decréscimo durante o período de análise. Esses dados também não apresentaram relação significativa com as taxas de desmatamento na bacia. Assim como outros trabalhos, não foi identificada uma relação entre as alterações de uso e cobertura do solo e o comportamento hidrológico na bacia. Isso pode ser justificado pela grande extensão territorial da bacia e pelo tamanho de sua área desmatada em relação ao total.

Caso o desmatamento da bacia continue crescendo nos anos seguintes, é proposto que haja um reestudo da influência dessa perda de cobertura florestal sobre seu comportamento hidrológico.

REFERÊNCIAS

AGRA, R. M. R. T.; ANDRADE, C. D. Análise Multicritério da Suscetibilidade à Erosão na Bacia Hidrográfica do Rio da Batateira, CE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 119-133, 2021.

AGRITEMPO: Sistema de Monitoramento Agro meteorológico. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária: IAC: Cepagri, Unicamp. 2021. Disponível em: . Acesso em: jan. 2022.

AHMAD, S. *et al.* Quantifying actual evapotranspiration in fen ecosystems: Implications of management and vegetation structure. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 20, n. 3, p. 382-396, 2020.

ALENCAR MARQUES, N. *et al.* **Análise do Perfil Hidrossedimentométrico da UHE Itumbiara com Emprego do SWAT**. 2021.

ALVES DE OLIVEIRA, B. F. *et al.* Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v. 2, n. 1, p. 207, dez. 2021.

AMIN, A. *et al.* Neighborhood effects in the Brazilian Amazônia: Protected areas and deforestation. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 93, p. 272-288, 2019.

ANDRÉASSIAN, V.. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of hydrology**, v. 291, n. 1-2, p. 1-27, 2004.

ARAGAO, R. *et al.* Impacto do uso do solo pelo aumento da densidade populacional sobre o escoamento numa área urbana do Nordeste Brasileiro via geotecnologias e

modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 02, p. 543-557, 2017.

BBC News. Brazil's Amazon: Deforestation 'surges to 12-year high', 20 nov. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-55130304>. Acesso em 02 fev. 2022.

BELIHU *et al.* Hydrologic response to land use land cover change in the Upper Gidabo Watershed, Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia. **HydroResearch**. v. 3, p. 85 – 86. 2020.

BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of hydrology**, v. 55, n. 1-4, p. 3-23, 1982.

CAVALCANTE, R. B. L. *et al.* Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104879, 2020.

CHE, X.; ZHANG, H. K.; LIU, J. Making Landsat 5, 7 and 8 reflectance consistent using MODIS nadir-BRDF adjusted reflectance as reference. **Remote Sensing of Environment**, v. 262, p. 112517, 2021.

CHU, H. *et al.* NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. **Science of the Total Environment**, v. 650, p. 2051-2062, 2019.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of hydrology**, v. 283, n. 1-4, p. 206-217, 2003.

DE JONG, P. *et al.* The impact of regional climate change on hydroelectric resources in South America. **Renewable Energy**, v. 173, p. 76-91, 2021.

DE ARAÚJO, T. L. K. *et al.* Brazilian Amazônia, deforestation and environmental degradation: Analyzing the process using game, deterrence and rational choice theories. **Environmental Science & Policy**, v. 117, p. 46-51, 2021.

DIAS, L. C. P. *et al.* Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 108-122, 2015.

FERREIRA, G. C. V.; FERREIRA NETO, J. A. Usos de geoprocessamento na avaliação de degradação de pastagens no assentamento ilha do coco, Nova Xavantina - Mato Grosso, Brasil. **Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 2, p.140-148, 2018.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 30, n. 4, p. 379-390, 2008.

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.

HAMYLTON, S. M. *et al.* Evaluating techniques for mapping island vegetation from unmanned aerial vehicle (UAV) images: Pixel classification, visual interpretation and machine learning approaches. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 89, p. 102085, 2020.

HAN J. *et al.* Characterization of elevation and land cover dependent trends of NDVI variations in the Hexi region, northwest China. **Journal of environmental management**, v. 232, p. 1037-1048, 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Clima. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20644-clima.html>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de climas zonais. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf. Acesso em: 14 nov. 2021.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Estimativa de Desmatamento por corte raso na Amazônia Legal para 2020 é de 11.088 km²**. <http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias-obt-inpe/estimativa-de-desmatamento-por-corte-raso-na-amazonia-legal-para-2020-e-de-11-088-km2> (2021).

LIAQAT, M. U. *et al.* Evaluation of MODIS and Landsat multiband vegetation indices used for wheat yield estimation in irrigated Indus Basin. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 138, p. 39-47, 2017.

LUCAS, E. W. M. *et al.* Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin-Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, p. 100306, 2021.

MARTINS, R. T. *et al.* Low forest-loss thresholds threaten Amazonian fish and macroinvertebrate assemblage integrity. *Ecological Indicators*, v. 127, p. 107773, 2021.

MATAVELI, G. A. V. *et al.* The emergence of a new deforestation hotspot in Amazonia. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 1, p. 33-36, 2021.

MATEUS, V. L. *et al.* Assessment of ambient aerosol sources in two important Atlantic Rain Forest hotspots in the surroundings of a megacity. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 56, p. 126858, 2020.

MENDES, N. G. S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Forest coverage and streamflow of watersheds in the tropical Atlantic rainforest. **Revista Árvore**, v. 42, 2018.

MENEZES, J. F. S. *et al.* Deforestation, fires, and lack of governance are displacing thousands of jaguars in Brazilian Amazon. **Conservation Science and Practice**, v. 3, n. 8, p. e477, 2021.

MODERATE RESOLUTIONS IMAGING ESPECTRORADIOMETER. **Produtos de Índice de Vegetação MODIS (NDVI e EVI)**. Disponível em: < <https://modis-gsfc-nasaov.translate.goog/data>>. Acesso em: 10 nov. 2021.

NOURELDEEN, N. *et al.* Analysis of the spatiotemporal change in land surface temperature for a long-term sequence in Africa (2003–2017). **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 488, 2020.

NGUYEN, U. *et al.* Mapping vegetation types in semi-arid riparian regions using random forest and object-based image approach: A case study of the Colorado River Ecosystem, Grand Canyon, Arizona. **Ecological Informatics**, v. 50, p. 43-50, 2019.

PELLETIER, A.; ANDRÉASSIAN, V. Hydrograph separation: an impartial parametrisation for an imperfect method. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 3, p. 1171-1187, 2020.

QINGMING, W. *et al.* Effects of vegetation restoration on evapotranspiration water consumption in mountainous areas and assessment of its remaining restoration space. *Journal of Hydrology*, v. 605, p. 127259, 2022.

R CORE TEAM (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>.

SANTOS, H. G. *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 3 de jan. 2019.

SANTOS, Y. L. F. *et al.* Amazon deforestation and urban expansion: Simulating future growth in the Manaus Metropolitan Region, Brazil. **Journal of environmental management**, v. 304, p. 114279, 2022.

SOUZA, C. *et al.* Desmatamento em Áreas Protegidas. O estado das áreas protegidas, **Imazon**, 2018.

SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.

THOMAS, M. R.; PÉREZ, M. H. S. A new species of whiptail catfish, genus *Loricaria* (Siluriformes: Loricariidae), from the Rio Curuá (Xingu Basin), Brazil. **Copeia**, v. 2010, n. 2, p. 274-283, 2010.

United States Geological Survey (USGS). **Landsat 7**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=4#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em: 10 nov. 2021.

United States Geological Survey (USGS). **What are the band designations for the Landsat satellites?**. Disponível em: < <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>>. Acesso em: 27 fev. 2021.

VANAM, M. K. *et al.* High-performance machine learning and data science-based implementation using Weka. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

WANG, H.; LV, X.; ZHANG, M. Sensitivity and attribution analysis of vegetation changes on evapotranspiration with the Budyko framework in the Baiyangdian catchment, China. **Ecological Indicators**, v. 120, p. 106963, 2021.

WANG, Zhou *et al.* Topographic patterns of forest decline as detected from tree rings and NDVI. **CATENA**, v. 198, p. 105011, 2021.

WU, M. *et al.* Validation of synthetic daily Landsat NDVI time series data generated by the improved spatial and temporal data fusion approach. **Information Fusion**, v. 40, p. 34-44, 2018.

YONABA, R. *et al.* A dynamic land use/land cover input helps in picturing the Sahelian paradox: Assessing variability and attribution of changes in surface runoff in a Sahelian watershed. **Science of the Total Environment**, v. 757, p. 143792, 2021.

ZHANG, X. *et al.* Using NDVI time series to diagnose vegetation recovery after major earthquake based on dynamic time warping and lower bound distance. **Ecological indicators**, v. 94, p. 52-61, 2018.

ZHANG, Y. *et al.* Mapping annual forest cover by fusing PALSAR/PALSAR-2 and MODIS NDVI during 2007–2016. **Remote Sensing of Environment**, v. 224, p. 74-91, 2019.

ANEXO I - Treinamento de amostras e classificação de uso e ocupação do solo anual

```
// Importação Landsat para análise da área desmatada
var lteste8 =
ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR").filterBounds(curua).filterDate('datai','data
f').filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 5).mean().clip(curua);

//Definição da área de Estudo
var area_estudo = curua;
Map.centerObject(curua,9);

//Índices de vegetação
var indices = function(image){
  var ndvi = image.normalizedDifference(['nir','red']).rename('NDVI')
  var evi = image.expression('2.5 * ((N - R) / (N + (6 * R) - (7.5 * B) + 1))', { //Huete 2002
    'N': image.select('nir'), 'R': image.select('red'), 'B': image.select('blue')}).rename('EVI')
  var ndwi = image.normalizedDifference(['green','nir']).rename('NDWI')
  var ndwi_veg = image.normalizedDifference(['nir', 'swir1']).rename ('NDWI_VEG');
  var mndwi = image.normalizedDifference(['green','swir1']).rename('NDWI')
  return image.addBands([ndvi,evi,ndwi,mndwi,ndwi_veg]).clip(area_estudo);
}

//Aplicação de máscara de confiança//
var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 5) .and(qa.bitwiseAnd(1 << 7)) .or(qa.bitwiseAnd(1 << 3))

//Remove os pixels das arestas que não ocorrem em todas as bandas
var mask2 = image.mask().reduce(ee.Reducer.min());
return image.updateMask(cloud.not()).updateMask(mask2).divide(10000)
  .copyProperties(image, ["system:time_start"]); //dividir valor DN por 10.000 }

//Máscara Landsat 8
function maskL8sr(image) {
  // Os bits 3 e 5 são sombra de nuvem e nuvem, respectivamente.
  var cloudShadowBitMask = 1 << 3; var cloudsBitMask = 1 << 5;
  //Obtenha a banda de QA do pixel.
  var qa = image.select('pixel_qa');
  // Ambos os sinalizadores devem ser definidos como zero, indicando condições claras.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
  // Retorne a imagem mascarada, sem as bandas de controle de qualidade.
  return image.updateMask(mask).divide(10000).copyProperties(image,
    ["system:time_start"]);
}

//Lista de bandas e nomes
var l5Bands = ['B1','B2','B3','B4','B5','B6','B7','pixel_qa'];
var l5names = ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'temp', 'swir2','pixel_qa'];
var l8Bands = ['B2','B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B10', 'B7','pixel_qa'];
var l8names = ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'temp', 'swir2','pixel_qa'];

//Datas inicial e final
var inicio = "Ano_classificação"; var final = "Ano_classificação";
var data_inicial = ee.Date.fromYMD(inicio, 4, 1);
var data_final = ee.Date.fromYMD(final,11, 1);
var years = ee.List.sequence(inicio, final);
```

```

var months = ee.List.sequence(1,12);

//Coleções Landsat 5 e 8
var ls5 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C01/T1_SR")
    .select(l5Bands, l5names).filterDate(data_inicial, data_final)
    .filterBounds(area).filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',25)
    .map(cloudMaskL457).map(indices);

var ls8 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR")
    .select(l8Bands, l8names).filterDate(data_inicial, data_final)
    .filterBounds(area).filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than',25)
    .map(maskL8sr).map(indices);

//União de coleções
var colecao = ls5.merge(ls8);

//Filtro de média das imagens
var image = ee.Image(colecao.filterDate(data_inicial, data_final).mean())
var bands = image.bandNames();
print('Bandas que constam na coleção',bands);
var range = colecao.reduceColumns(ee.Reducer.minMax(), ["system:time_start"]);
print('Intervalo de datas: ', ee.Date(range.get('min')), ee.Date(range.get('max')));

//Criação de amostras de treinamento
var amostrasVegetacao = image.sampleRegions({
  collection: vegetacao1985, scale: 90, geometries: true
}).randomColumn('rand').limit(500, 'rand', false);

var amostrasUrban = image.sampleRegions({
  collection: urbana1985, scale: 90, geometries: true
}).randomColumn('rand').limit(500, 'rand', false);

// Juntando as amostras em uma única feature
var mergeAmostras = amostrasVegetacao.merge(amostrasUrban);
mergeAmostras = mergeAmostras.randomColumn('random');

//Layers das amostras
print('Amotras',mergeAmostras);
//Map.addLayer(mergeAmostras,{}, 'Amostras');

//Classificação de Imagens Supervisionada
var datasetTreinamento = mergeAmostras.filter(ee.Filter.lt('random',0.7));
var datasetTeste = mergeAmostras.filter(ee.Filter.gte('random',0.7));
var classificador =
ee.Classifier.smileRandomForest(10).train(datasetTreinamento,'classe',bands);
var landsatClassificada = image.classify(classificador);

//Layer Classificação
Map.addLayer(landsatClassificada,{palette:['green','blue'], min:0, max:3},'Classificação');
Map.setOptions('HYBRID');

//Gráfico de áreas
var nomes = ['vegetacao','area urbana'];
var renomeado = landsatClassificada.eq([0,1]).rename(nomes);

```

```

print('classes', renomeado);

//Conversão de hectares (ha);
var area = renomeado.multiply(ee.Image.pixelArea()).divide(1000000);

var area_por_classe = area.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(), //quero somar a área total
  geometry: area_estudo, scale:90, bestEffort: true, maxPixels:1e13 });

var area_total = ee.Number(area_por_classe);
print('area total por classe',area_total);

//Criando listas de usos do solo
var a = ee.Array(area_por_classe.get('vegetacao'));
var b = ee.Array(area_por_classe.get('area urbana'));
var Areas = ee.Array.cat([a, b], 0);

var lista = ee.List([a,b]);
var Nomes = ee.List(nomes);

var grafico_area = ui.Chart.array.values(lista,0, Nomes)
.setChartType('PieChart')
.setOptions(
  {width: 250, height: 350, title: 'Area por classe (km²)', hAxis: {title: 'Classes'},
  vAxis: {title: 'Area Km²'}, is3D: true, colors: ['green','red'], bestEffort:'true'});
print(grafico_area);

//Gráfico de áreas
var arealImage = ee.Image.pixelArea().divide(1e6).addBands(landsatClassificada);

// Cálculo de área por classe
var areas = arealImage.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum().group(groupField: 1, groupName: 'classification' ),
  geometry: area_estudo, scale: 30, maxPixels: 1e13, bestEffort : true });

var classAreas = ee.List(areas.get('groups'));
print('áreas classificadas em km²',classAreas);

//Gráfico por classe
var areaChart = ui.Chart.image.byClass({
  image: arealImage, classBand: 'classification', region: area_estudo,
  scale: 30, reducer: ee.Reducer.sum(), classLabels: ['vegetacao','area urbana'],
}).setOptions({hAxis: {title: 'Classes'}, vAxis: {title: 'Area km²'}, title: 'Area por classe',
  series: { 0: { color: 'green'},//vegetação
            1: { color: 'yellow'}}//urbana}); print(areaChart);

//Acurácia do Classificador
var acuraciaClassificador = datasetTeste.classify(classificador);
var matrizConfucao = acuraciaClassificador.errorMatrix('classe','classification');
print('Matriz Confusao',matrizConfucao);
print('Acuracia Geral',matrizConfucao.accuracy());
print('Acuracia Consumidor',matrizConfucao.consumersAccuracy());
print('Acuracia Produtor',matrizConfucao.producersAccuracy());

```

```
//Exportando Imagens  
Export.image.toDrive({ image:landsatClassificada, description:'SECA_1984',  
  folder: 'IMAGENS_CLASSIFICADAS', scale:30, region:curua, maxPixels:1e13 });
```

ANEXO II - Precipitações acumuladas anuais CHIRPS para a BRC.

```
//Importando área de estudo
CURUA = ee.FeatureCollection("../BACIA_CURUA");

//Importando dados de precipitação para a área e data desejados, somando e dividindo pelo
número de anos
var chirps = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY')
    .select("precipitation").filterDate('1981-01-01','2021-01-01').sum().div(40);

//Importando dados de precipitação
var precipitacao = ee.ImageCollection("UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY");

//Criando lista de anos
var anos = ee.List.sequence(1981, 2020);

//Aplicando a função map para obtenção das precipitações acumuladas anuais
var calcule_chuva_anual = function (ano){
    var inicio = ee.Date.fromYMD(ano,1,1); // '1981-01-01'
    var ano_seguinte = inicio.advance(1, 'year'); // '1982-01-01'
    var serie_diaria = chirps.filterDate(inicio, ano_seguinte);
    var chuva_anual = serie_diaria.sum(); // ee.Image()
    return chuva_anual.set('system:time_start',
        serie_diaria.first().get('system:time_start'));
}
var chuvas_anuais = ee.ImageCollection(anos.map(calcule_chuva_anual));

// Criando gráfico de precipitação acumulada anual
var chartP = ui.Chart.image.seriesByRegion({
    imageCollection:chuvas_anuais,
    regions: table,
    reducer:ee.Reducer.mean(),
    band:"precipitation",
    scale:500,
    xProperty:"system:time_start",
    seriesProperty:"Nome"})
    .setOptions({
        title:"Precipitação acumulada anual",
        hAxis:{title:"Intervalo de Tempo"},
        vAxis:{title:"P(mm/mês)}})
    .setChartType("ColumnChart");
print(chartP);
```

ANEXO III- Acurácias gerais, do produtor e consumidor da classificação anual de uso do solo na BRC.

ANO	ACURÁCIA GERAL	ACURÁCIA PRODUTOR	ACURÁCIA CONSUMIDOR
2020	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2019	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2018	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2017	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2016	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2015	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2014	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2013	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2011	0,997	[[0,988], [1,000]]	[1,000; 0,987]
2010	0,986	[[1,000], [1,000]]	[0,987; 1,000]
2009	0,997	[[0,994], [1,000]]	[1,000; 0,993]
2008	0,987	[[0,981], [0,994]]	[0,994; 0,981]
2007	0,975	[[1,000], [0,986]]	[0,984; 1,000]
2006	0,993	[[0,988], [1,000]]	[1,000; 0,986]
2005	0,989	[[0,993], [0,984]]	[0,986; 0,992]
2004	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2003	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
2001	0,993	[[0,993]; [0,994]]	[0,993; 0,994]
2000	0,997	[[1,000]; [0,993]]	[0,994; 1,000]
1999	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
1998	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
1997	0,997	[[1,000], [0,993]]	[0,993; 1,000]
1996	0,997	[[1,000], [0,993]]	[0,993; 1,000]
1995	0,990	[[0,994], [0,986]]	[0,987; 0,993]
1994	0,971	[[1,000], [0,945]]	[0,942; 1,000]
1993	0,990	[[0,994], [0,986]]	[0,988; 0,993]
1992	0,993	[[1,000], [0,986]]	[0,987; 1,000]
1991	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
1990	0,994	[[0,988], [1,000]]	[1,000; 0,986]
1989	0,988	[[0,985], [0,992]]	[0,992; 0,984]
1988	0,969	[[0,993], [0,945]]	[0,949; 0,993]
1987	0,991	[[0,982], [1,000]]	[1,000; 0,980]
1986	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]
1985	1,000	[[1,000], [1,000]]	[1,000; 1,000]