



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

MARCIO SOUSA DA SILVA

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL E O IMPACTO NA
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO ITACAIÚNAS (BHRI) – PROVÍNCIA MINERAL DE
CARAJÁS, SUDESTE DA AMAZÔNIA**

Belém – Pará
2022

MARCIO SOUSA DA SILVA

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL E O IMPACTO NA PRODUÇÃO
DE SEDIMENTOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACAIÚNAS
(BHRI) – PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, SUDESTE DA
AMAZÔNIA**

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

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Walfir M. Souza Filho

Belém - Pará
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586v Silva, Marcio Sousa da.

Vulnerabilidade ambiental e impacto na produção de sedimentos da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI) - : Província Mineral de Carajás, Sudeste da Amazônia / Marcio Sousa da Silva. — 2022.

132 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha

Coorientador(a): Prof. Dr. Pedro Walfir Martins E Souza Filho

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2022.

1. Produção de sedimentos. 2. Vulnerabilidade ambiental.
3. Curva-chave de sedimentos. 4. Descarga líquida e sólida. 5.
Bacia do Rio Itacaiúnas. I. Título.

CDD 551.304098115

MARCIO SOUSA DA SILVA

**VULNERABILIDADE AMBIENTAL E O IMPACTO NA PRODUÇÃO
DE SEDIMENTOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACAIÚNAS
(BHRI) – PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, SUDESTE DA
AMAZÔNIA**

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

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Data de Aprovação: 30 de junho de 2022.

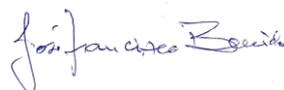
Banca Examinadora:



Prof. Edson José Paulino da Rocha – Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof.^a Aline M. Meiguins de Lima – Avaliador Interno
Doutora em Desenvolvimento Socioambiental
Universidade Federal do Pará



Prof. José Francisco Berredo Reis da Silva – Avaliador Interno
Doutor em Geologia e Geoquímica
Museu Paraense Emílio Goeldi



Prof. Everaldo Barreiros de Souza – Avaliador Interno
Doutor em Meteorologia
Universidade de São Paulo



Prof. Renato Oliveira da Silva Jr. – Avaliador Externo
Doutor em Ciências Ambientais
Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável – ITV
DS

Aos meus pais, Altamirando (Papai) e Hilda (Mainha), que são minha base, minha referência, minha riqueza e grandes parceiros na vida, que caminharam comigo ao longo desse processo até a conquista desse sonho, além de serem os meus ídolos e inspirações de vida.

À minha família Ana Claudia e Marcio Filho.

Aos meus filhos Marcus, Elisa, Gabriel e Marcio Filho, que sirva de inspiração.

Aos meus irmãos (Maurício e Marcelo) e toda minha família Peixoto e Pereira.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (PPGCA-IG-UFPa) pela oportunidade de aprendizado, desenvolvimento e crescimento profissional.

Ao Prof. Dr. Roberto Dall'Agnol que me proporcionou a oportunidade de ingressar no Instituto Tecnológico Vale (ITV), por apoiar e incentivar minha candidatura ao processo seletivo para o Doutorado no PPGCA, permitir ausentar-me do ITV para cumprir os créditos curriculares exigidos pelo PPGCA-IG-UFPa e por todo o suporte pessoal, científico e profissional.

Ao Professor Doutor José Oswaldo Siqueira, ex-Diretor Científico do ITV, por apoiar minha candidatura ao processo seletivo ao Doutorado.

Ao ITV pelo apoio financeiro e oportunidade de realizar esta tese em paralelo as atividades de pesquisa do projeto Itacaiúnas e outros fundamentais para essa pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha pela oportunidade, apoio e disponibilidade em ajudar nessa empreitada.

Ao meu co-orientador e amigo Pedro Walfir Martins e Souza-Filho por desde sempre me acompanhar nas jornadas pessoal, acadêmica e profissional, por sua sabedoria e discernimento adquiridos e compartilhados através de orientações não só acadêmicas, mas de vida.

Ao meu amigo Renato O. da Silva Jr, que foi um incentivador, apoiar e orientador em todas as fases dessa pesquisa.

Ao meu amigo Wilson Nascimento, em sua inestimável ajuda no processamento e construção dos mapas e figuras;

Ao atual Coordenador de Conhecimento Científico do ITV Dr. Guilherme Oliveira, pelo apoio e incentivo ao cumprimento dessa etapa necessária à minha carreira como pesquisador.

Aos amigos conquistados no ITV com os quais compartilho as alegrias e aflições, busco orientações e ajuda e aos quais também procuro sempre retribuir, meus mais sinceros agradecimentos a vocês: Renato Silva Jr, Tasso Guimarães, Wilson Nascimento Jr., Alessandro Leite, Alexandra Tavares, Adayana Melo, Clovis Maurity, Prafulla Sahoo, Silvio Ramos, Cecílio Caldeira, Gabriel Salomão, Luciano Costa, Paulo Rógenes, Rosane Cavalcante, Diogo Santos, Manoel Lopes, Cíntia Bandeira, Douglas Ferreira, Claudia Costa, Jorge Santos, Nelson Carvalho, Ronnie Alves, Rosa Paes, Valente Matlaba, Juliana, Markus, Santelmo e Rafael.

Ao pessoal do setor administrativo do ITV, com os quais tenho aprendido muito sobre todos os trâmites necessários a nossas atividades e todo o suporte sempre que solicito ajuda: Eline Veras,

Keyla Silva, Marcos Vilaça, Nisa Gonçalves, Claudia Matos, Bruno Victorasso, Samara Cruz, Ana Cristina, Carla Clemente, Rogerio Lara e Alene Cativo. E claro a D. Eunice, a Jaqueline, Fátima, Nei e Remilson e o pessoal da portaria que faz nossa segurança.

E claro a toda minha família pai, mãe, filhos, esposa, irmãos, minhas tias, primos e primas e sobrinhos (as), cunhadas, por acreditarem sempre em mim, me darem a força, perseverança e resiliência necessária para realizar esse que é um sonho não só meu, mas de toda a família.

Por fim, meus sinceros agradecimentos todas as pessoas que de alguma forma contribuíram na realização desse trabalho de pesquisa.

“As mesmas regiões não permanecem sempre mar ou sempre terra,
todas mudam sua condição no curso do tempo.”
Aristóteles (384 – 322 A.C.)

RESUMO

O desenvolvimento de estudos na área de vulnerabilidade ambiental em um contexto regional e em particular na Amazônia requer um esforço humano, logístico e econômico grandioso, que quando incorporadas a tecnologias atuais de aquisição e processamento de dados (remotos e in situ) e parcerias público-privado, torna possível tais pesquisas. Esse quadro foi o que possibilitou o desenvolvimento dessa tese na Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), que possui em torno de 42.000 km² e está localizada na área denominada “arco do desmatamento da Amazônia”. Área de muitos conflitos sócio-econômico-ambientais relacionados ao desenvolvimento da região e diferentes usos e ocupações do território. Dentro desse contexto desenvolvemos essa pesquisa que teve como principal objetivo avaliar de que forma a vulnerabilidade ambiental se relaciona com a atual produção de sedimentos em suspensão na BHRI. Primeiramente, foram definidas e identificadas as áreas de maior ou menor vulnerabilidade, tendo como marco temporal o ano de 2019, através de metodologias reconhecidas e desenvolvidas para esse tipo de estudo na região amazônica. Usando rotinas de geoprocessamento no software ArcGIS 10.8.1, foram construídos cinco mapas temáticos e de vulnerabilidade ambiental (geologia, geomorfologia, solos, uso e ocupação e clima) e por fim usando a álgebra de mapas o mapa de vulnerabilidade ambiental da BHRI foi produzido. Os resultados mostraram que a BHRI está medianamente estável/vulnerável em uma área de 28.058 km² de extensão (68% da bacia), moderadamente estável em 8.961 km² de extensão (com de 22% da bacia) e moderadamente vulnerável em 4.314 km² (10% da bacia). Em paralelo, foi realizado o estudo da produção de sedimentos na BHRI, a partir dos dados adquiridos pelo projeto de monitoramento hidrometeorológico realizado pelo Instituto Tecnológico Vale – ITV. O monitoramento foi realizado em 16 seções hidrossedimentológicas de controle distribuídas nas seis principais sub-bacias que compõem a BHRI, com quatro campanhas anuais (enchente, cheia, vazante e seca) ocorridas entre 2015 e 2019, e objetivou a construção e comparação das curvas-chave de sedimentos e produção de sedimentos entre essas diferentes sub-bacias, dados esses já publicados na Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH) em 2021. Por fim, buscando responder a hipótese desse estudo, realizamos análises comparativas da relação das vulnerabilidades ambientais encontradas com a produção de sedimentos identificando e demonstrando quais áreas, quais fatores ambientais e quanto de sedimentos é produzido nas diferentes sub-bacias da BHRI. Os resultados obtidos permitiram obter uma visão integrada e compartimentada da vulnerabilidade e produção de sedimentos da BHRI e sim, confirmar que

as atividades minerais legais em curso dentro de áreas protegidas de florestas, não geram impactos significativos em sua vulnerabilidade e nem na sua produção de sedimentos. Por sua vez, as atividades relacionadas ao uso e ocupação do território em áreas não protegidas, promoveram uma intensa substituição da floresta por pastagens, gerando as áreas de maior vulnerabilidade ambiental e estão diretamente associadas aos maiores “*inputs*” de sedimentos na BHRI.

Palavras-chave: produção de sedimentos; vulnerabilidade ambiental; curva-chave de sedimentos; descarga líquida e sólida; Bacia do Rio Itacaiúnas.

ABSTRACT

The development of environmental vulnerability studies in a regional context and in particular in the Amazon requires a huge human, logistical and economic effort, which when incorporated into current technologies for data acquisition and processing (remote and in situ) and public-private partnerships, makes such research possible. This framework was what enabled the development of this thesis in the Itacaiúnas River Watershed (IRW), which has around 42.000 km² and is located in the area called “arc of deforestation in the Amazon”. Area of many socio-economic-environmental conflicts related to the development of the region and its different types of use and occupation of the territory. Within this context, we developed this research whose main objective was to assess how environmental vulnerability relates to the current production of suspended sediments at the IRW. First, the areas of greater or lesser vulnerability were defined and identified, having the year 2019 as a timeframe, through recognized methodologies developed for this type of study in the Amazon region. Using geoprocessing routines in ArcGIS 10.8.1 software, five thematic maps and environmental vulnerability were built (geology, geomorphology, soils, use and occupation and climate) and finally using map algebra the map of BHRI's environmental vulnerability was generated. The results showed that the BHRI is moderately stable/vulnerable in an area of 28,058 km² of extension (68% of the basin), moderately stable in 8,961 km² of extension (with 22% of the basin) and moderately vulnerable in 4,314 km² (10% of the basin). of the basin). In parallel, the study on the production of sediments at the BHRI, was based on data acquired by the hydrometeorological monitoring project by the Instituto Tecnológico Vale – ITV. Monitoring takes place in 16 hydro-sedimentological control sections distributed in the six main sub-basins that make up the BHRI, with four annual campaigns (high water levels, rising water levels, falling water levels, low water levels) that took place between 2015 and 2019, and aimed at building and comparing the curves- sediment key and sediment production between these different sub-basins, data already published in the Brazilian Journal of Water Resources (RBRH) in 2021. Finally, seeking to respond to hypothesis of this study, we carried out comparative analyzes of the relationship between the environmental vulnerabilities observed and the production of sediments, identifying and demonstrating which areas, which environmental factors and how much sediment is produced in the different sub-basins of the IRW. The results obtained allowed to

get an integrated and compartmentalized view of the vulnerability and production of sediments at the BHRI that confirm that the ongoing legal mineral activities within protected areas of forests do not generate significant impacts on their vulnerability or on their production of sediments. In turn, the activities related to the use and occupation of the territory in non-protected areas, promoted an intense replacement of the forest by pastures, generating the areas of greater environmental vulnerability and are directly associated with the greater “inputs” of sediments in the IRW.

Keywords: sediment production; environmental vulnerability; key sediment curve; liquid and solid discharge; Itacaiúnas River Watershed.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1- Composição político administrativa da área da BHRI	16
Figura 1.2- Área da BHRI e o arranjo de suas sub-bacias e as seções hidrossedimentológicas	21
Figura 2.1- Área da Bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas e arranjo de suas sub-bacias	35
Figura 2.2- Geologia simplificada da bacia do rio Itacaiúnas	39
Figura 2.3- Mapa das Unidades Geomorfológicas da BHRI	40
Figura 2.4- Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do rio Itacaiúnas	44
Figura 2.5- A Bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), seu uso e cobertura vegetal atual	45
Figura 2.6- Mapa de precipitação média anual da BHRI	47
Figura 2.7- Mapa Hipsométrico da BRHI	50
Figura 2.8- Mapa de Vulnerabilidade Geológica da BHRI	51
Figura 2.9- Mapa de Vulnerabilidade a Amplitude Interfluvial (Intensidade da Dissecção).	53
Figura 2.10 - Mapa de Vulnerabilidade à Amplitude Altimétrica	54
Figura 2.11 - Mapa de Vulnerabilidade à declividade do relevo	55
Figura 2.12 - Mapa de Vulnerabilidade Geomorfológica	55
Figura 2.13 - Mapa de Vulnerabilidade Pedológica	57
Figura 2.14 - Mapa de Vulnerabilidade ao Uso e Cobertura Vegetal	59
Figura 2.15 - Mapa de Vulnerabilidade ao Clima	61
Figura 2.16 - Mapa de Vulnerabilidade Ambiental da BHRI	62
Figure 1- Itacaiúnas River Watershed and its main tributaries and the locations of the hydrosedimentological monitoring sections	75
Figure 2- Itacaiúnas River Watershed land use and land cover map (Modified from Nunes et al., 2019)	76
Figure 3- Flowchart of the methods	78
Figure 4- Monthly streamflow (Fazenda Alegria, ANA) and rainfall (Marabá, INMET) data from January 2015 to December 2019 in the Itacaiúnas River Watershed and the time periods of the campaigns shown by the red boxes	78
Figure 5- Equipment and vessels used in flow measurements in the rivers within the Itacaiúnas River basin	79
Figure 6- Photos of flow measurement with FlowTracker	80

Figure 7- Stages of laboratory analysis. (A) Drying the filters; (B) Weighing the dry filters; (C) Filtering the samples; (D) Identification; (E) Drying the samples; (F) Weighing the dry samples (Adapted from Pina Neto et al., 2020)	81
Figure 8- Boxplot of suspended sediment concentration - SSC, (A), streamflow - Q (B), suspended sediment discharge - SSQ (C), and specific sediment yield - SSY (D) in different seasons in the monitoring sections of the Cateté River	85
Figure 9- Suspended sediment rating curves for the Cateté River: dry and rainy season curves are shown together in (A), and the curves with all the data and their respective regression equations and coefficients of determination are shown in (B)	88
Figure 10- Boxplots of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the Tapirapé River monitoring sections	89
Figure 11- Suspended sediment rating curves of the dry (D) and rainy (R) seasons and the integrated curve of the Tapirapé River for both the dry and rainy seasons (DR)	90
Figure 12- Boxplot of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the monitoring sections of the Parauapebas River subbasin	91
Figure 13- Sediment rating curves of the Parauapebas River	93
Figure 14- Boxplot of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the monitoring sections of the Vermelho River subbasin	94
Figure 15- Suspended sediment rating curves as a function of streamflow in the Vermelho River for both monitoring sections (Eldorado dos Carajás and Foz) and their respective regression equations	94
Figure 16- Boxplot of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the monitoring sections of the Sororó River subbasin	94
Figure 17- Sediment rating curves of the Sororó River in the rainy (R) and dry (D) seasons	95
Figure 18- Boxplots of suspended sediment concentration, seasonal streamflow variation, suspended sediment discharge, and specific suspended sediment yield of the hydrosedimentological stations of the Itacaiúnas River (from upstream to downstream) from 2015 to 2019	97

Figure 19- Suspended sediment rating curves for the Itacaiúnas River for the dry season (A), rainy season (B), and all seasons (C)	98
Figure 20- One-line diagram of the monitoring sections and respective mean values of the main hydrosedimentological parameters of the Itacaiúnas River Watershed	101
Figura 4.1 - Área da BHRI e o arranjo de suas sub-bacias e as seções hidrossedimentológicas	111
Figura 4.2 - Mapa de Vulnerabilidade Ambiental da BHRI, suas respectivas sub-bacias de drenagem, e os pontos de controle e monitoramento hidrossedimentológicos	111
Figura 4.3 - Mapa de Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) por área Drenada	119
Figura 4.4 - Mapa de Produção de Sedimentos em Suspensão (CSS) por área Drenada	119
Figura 4.5 - Mapa de Descarga Sólida de Sedimentos em Suspensão (CSS) em cada seção de controle	120
Figura 4.6 - Mapa de Classificação da Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS)	122
Figura 4.7 - Mapa de Classificação da Produção de Sedimentos em Suspensão (PSS)	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Escala de Vulnerabilidade	34
Tabela 2.2 - Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas	41
Tabela 2.3 - Valores de vulnerabilidade para a intensidade de Dissecação do Relevo, a Amplitude Altimétrica, para a Declividade das Encostas	42
Tabela 2.4 - Valores da Vulnerabilidade Geomorfológica	43
Tabela 2.5 - Características texturais, classificação dos solos, seus índices de vulnerabilidade e áreas correspondentes	44
Tabela 2.6 - Unidades de Uso e Cobertura Vegetal	46
Tabela 2.7 - Parâmetros Climatológicos e de vulnerabilidade ao Clima da BHRI	47
Tabela 2.8 - Escala de Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas .	49
Table 1 - Location, drainage area, and seasonal average (SSC - suspended sediment concentration, Q - Liquid discharge, SSQ - suspended sediment discharge and SSY - specific sediment yield) of various locations along the Itacaiúnas River and its tributaries, as well as the determination coefficients R ² and the constants and exponents (a and b) of the power function	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1	Contextualização da pesquisa	15
1.2	Descrição da área de estudo e metodologia integradora	21
1.3	Interdisciplinaridade da pesquisa	24
1.4	Problema e hipótese	25
1.4.1	Problema	25
1.4.2	Hipótese.....	25
1.5	Objetivos	25
1.5.1	Objetivo Geral.....	25
1.5.2	Objetivos Específicos.....	26
1.6	Estrutura da tese	26
2	VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACAIÚNAS	28
2.1	Introdução	31
2.2	Materiais e métodos	33
2.2.1	Área de estudo.....	34
2.2.2	Base de dados ambientais.....	35
2.2.3	Índices da Vulnerabilidade Geológica	36
2.2.4	Índices da Vulnerabilidade à Geomorfologia	37
2.2.5	Índices da Vulnerabilidade Pedológica da BHRI.....	43
2.2.6	Índices da Vulnerabilidade ao Uso e Cobertura Vegetal da BHRI.....	45
2.2.7	Índices da Vulnerabilidade ao Clima da BHRI.....	46
2.2.8	Índices da vulnerabilidade ambiental.....	48
2.3	Resultados e discussões	49
2.3.1	Vulnerabilidade Geológica.....	50
2.3.2	Vulnerabilidade Geomorfológica.....	52
2.3.3	Vulnerabilidade Pedológica	56
2.3.4	Vulnerabilidade ao Uso e Cobertura Vegetal.....	57
2.3.5	Vulnerabilidade ao Clima	60

2.3.6 Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas.....	61
2.4 Conclusões	64
3 COMPARISON OF SEDIMENT RATING CURVES AND SEDIMENT YIELD IN SUBBASINS OF THE ITACAIÚNAS RIVER WATERSHED, EASTERN AMAZON.	71
4 CONCLUSÕES GERAIS	109
4.1 Resultados Chave: Impactos e Implicações	110
4.1.1 Relação vulnerabilidade ambiental x produção de sedimentos na BHRI	110
4.2 Conclusões Integradas	120
4.3 Principais contribuições da pesquisa	121
REFERÊNCIAS.....	124

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Contextualização da pesquisa

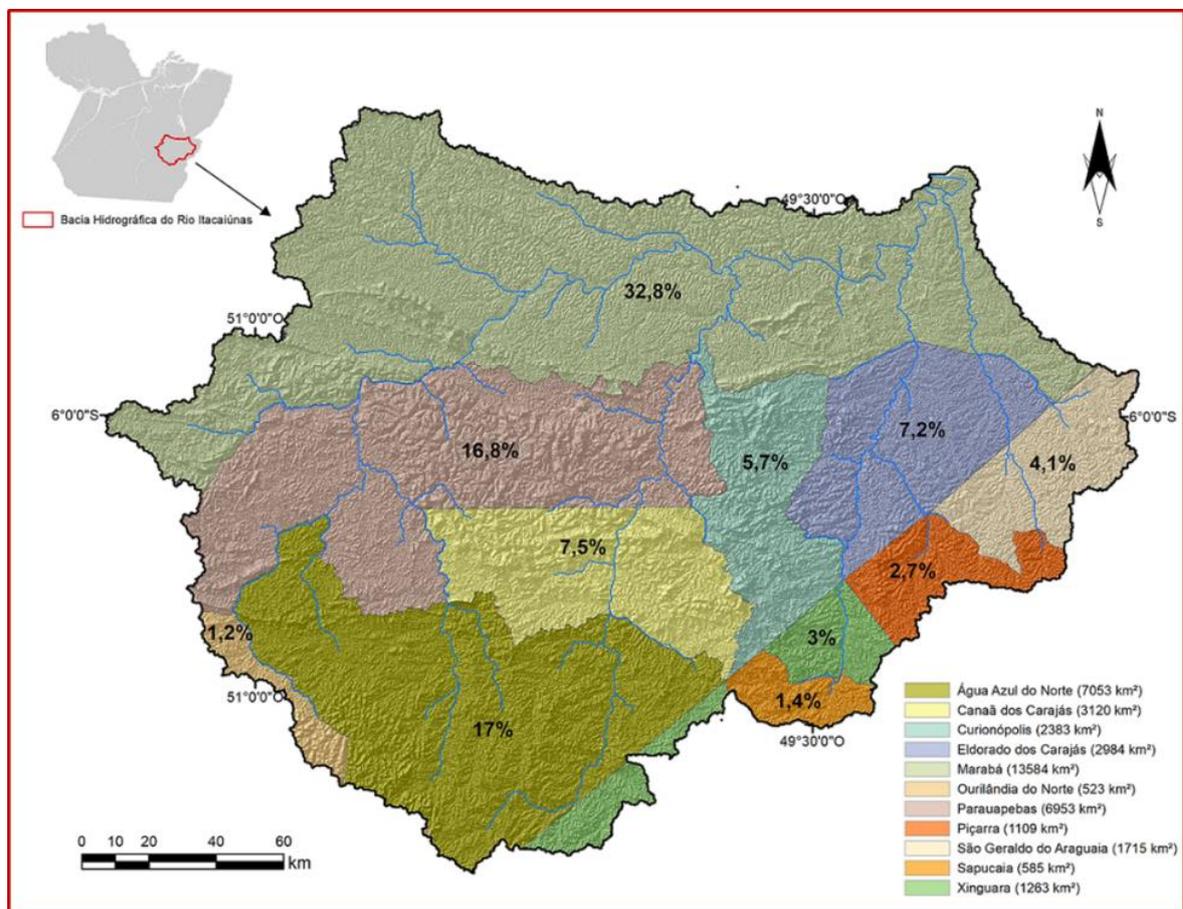
A Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), área de estudo desta tese, está inserida na Província Mineral de Carajás, sudeste da Amazônia, no Estado do Pará. Caracteriza-se por ser a mais importante do Estado sob o ponto de vista sócio-econômico-ambiental, pois abriga diversas atividades socioeconômicas, e cujas atividades de mineração (exploração de minérios de ferro, manganês, cobre e níquel) ocorrem no interior de unidades de conservação, além de uma pecuária extensiva que representa aproximadamente 35% do rebanho bovino do estado (IBGE, 2017) e a agricultura (SOUZA-FILHO et al., 2015, 2016, 2018; NUNES et al., 2019). Geopoliticamente, abrange áreas de onze municípios (Figura 1.1) e nove sedes municipais. De acordo com os resultados obtidos por Silva Junior (2017), os ativos produzidos na BHRI correspondem a 25% do PIB do estado do Pará.

A BHRI tem experimentado intensas alterações quanto às formas de uso e ocupação do solo nas últimas 4 décadas, gerando com isso alterações nas características ambientais (clima, hidrologia, geologia, solos, vegetação, etc.) da região (SOUZA FILHO et al, 2016; SILVA JÚNIOR et al., 2021), as quais, tem influenciado diretamente na sua vulnerabilidade ambiental e dinâmica hidrossedimentológica. Portanto, às mudanças no clima e uso do solo tem chamado a atenção para o risco de agravamento da disponibilidade de água e o impacto sobre os aspectos hidrológicos, econômicos e sociais.

As províncias minerais são geologicamente definidas por uma abundância de recursos minerais economicamente viáveis e, como resultado, frequentemente passam por mudanças abruptas e extensas no uso da terra (SONTER et al., 2014, 2017; SOUZA-FILHO et al., 2015, 2016, 2018). A mudança no uso da terra nas províncias minerais pode ser causada por uma combinação de atividades de mineração e não-mineração (LAMBIN et al., 2003; MORAN et al., 2013; SOUZA-FILHO et al., 2015, 2016, 2018; NUNES et al., 2019), ambas com impactos ambientais e sociais. Embora esses impactos sejam frequentemente negativos, incluindo

degradação da terra e perda de biodiversidade (COLLARES 2000; LAMBIN et al., 2003; TOWNSEND et al., 2009); impactos positivos também podem ocorrer, tais como aumento das atividades de conservação, gestão da qualidade da água, aumentos contínuos na produção de alimentos e fibras, eficiência no uso de recursos, riqueza e bem-estar (COLLARES 2000; LAMBIN et al., 2003; SONTER et al., 2014; SONTER et al., 2013). O desenvolvimento de infraestrutura, especialmente a construção de estradas, é outro importante fator de desmatamento na floresta amazônica (AGUIAR et al., 2007; SOARES-FILHO et al., 2004). Embora a mineração seja um uso intensivo da terra, ela cobre apenas 1% do total da área total da bacia (BRIDGE, 2004).

Figura 2.1 Composição político administrativa da área da BHRI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os impactos provenientes das atividades agropecuárias provocam grave degradação da qualidade da água e do solo por conta do desmatamento, uso de técnicas agrícolas inadequadas, emprego descontrolado de agroquímicos (PHILIPPI Jr. et al., 2019). Convém também ressaltar que os problemas ambientais causam repercussões em toda a sociedade e tornam-se cada vez mais

comuns nas áreas de entorno do Arco do Desmatamento da Amazônia. Na BHRI são comuns problemas ligados ao uso do solo, erosão, escassez hídrica, enchentes, assoreamento, contaminação e poluição das águas superficiais (SILVA JÚNIOR et al., (2017a, b); PALHETA e LIMA, 2017; LENSE et al., 2020).

As pesquisas semelhantes a esta, que buscam realizar diagnóstico e análise da paisagem de forma holística vêm, cada vez mais, adotando as bacias hidrográficas como unidade de estudo. De acordo com Chavez e Alipaz (2007) diversas questões afetam a sustentabilidade da água de uma bacia hidrográfica. Entre eles estão às questões sociais, econômicas e ambientais. No entanto, eles são frequentemente tratados separadamente, e não como um processo dinâmico e integrado.

Conforme posto por Freitas (2021), o conceito de vulnerabilidade ambiental tem se tornado cada vez mais utilizado no meio científico, sobretudo em trabalhos que destacam as questões ambientais face às alterações ambientais naturais ou artificialmente introduzidas sem, contudo, haver qualquer grande indagação ou reflexão acerca do seu real significado e aplicabilidade. De acordo com Grigio (2003) diversos trabalhos apresentam esses parâmetros em índices e, principalmente, com representações espaciais, por meio do uso de mapas de sensibilidade, de vulnerabilidade, ou ainda fragilidade. Porém, os termos *sensibilidade* e *vulnerabilidade*, assim como, *fragilidade* e *suscetibilidade*, são abordados, muitas vezes, como sinônimos.

O conceito de vulnerabilidade, conforme Acselrad (2006), e citado por Freitas (2021), “[...] é uma noção relativa – está normalmente associada à exposição aos riscos e designa a maior ou menor susceptibilidade de pessoas, lugares, infraestruturas ou ecossistemas sofrerem algum tipo particular de agravo”. Complementarmente, Zanella et. al. (2013) entendem que o conceito de vulnerabilidade, no âmbito das ciências ambientais, tem sido bastante utilizado para expressar o grau de instabilidade dos ambientes face às perturbações sofridas.

O termo vulnerabilidade ambiental e/ou natural tem sido usado sob outras nomenclaturas (fragilidade ambiental ou potencial, suscetibilidade ambiental, análise multicritério, análise da energia do relevo, entre outras), mas suas abordagens metodológicas possuem a mesma origem, ou seja, vem da metodologia de análise morfodinâmica da paisagem a partir dos princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977), que estabelece diferentes categorias morfodinâmicas resultantes dos processos de morfogênese ou pedogênese, a qual foi inicialmente abordada por Ross (1996), em seguida modificada por Crepani et al. (2001) e adotada nesse estudo, e, até hoje, amplamente utilizadas total ou parcialmente sendo adaptadas

e/ou modificadas conforme a necessidade de análise do estudo por vários autores em diferentes regiões (MOTA; VALADARES, 2011; ZANELLA et al., 2013; CECONI et al., 2018; RIBEIRO; ALBUQUERQUE, 2021; GOMES et al., 2021; LEITE et al., 2021; FREITAS, 2021; COSTA et al., 2021; RODRIGUES; LEITE, 2021; SILVA et al., 2021 entre outros). Corroborando com Costa et al. (2021), em comum, observou-se que estes trabalhos obtiveram êxitos na execução, tendo como resultado mapas de vulnerabilidade natural à erosão do solo e a vulnerabilidade ambiental, servindo, principalmente, como fonte de dados para a execução de planejamentos ambientais, em diferentes recortes espaciais, entre eles, as bacias hidrográficas.

Assim como Grigio (2003), Zanella et al. (2013), Freitas (2021) e Costa et al. (2021) neste trabalho, para fins de nivelamento conceitual, utiliza-se o conceito de **Vulnerabilidade Ambiental** sintetizado por Freitas (2021), a saber: *é a capacidade de resposta do meio aos efeitos adversos decorrentes das ações humanas, variando conforme suas características naturais e humanas, afetando diretamente a estabilidade do meio e, conseqüentemente, sua qualidade ambiental, englobando, além das potencialidades/limitações do meio, os graus e formas de intervenções de origem antropogênicas e seus respectivos impactos e comportamentos dos espaços naturais às pressões recebidas.*

Costa et al. (2021) destacam que o mapeamento das unidades de paisagens, sob a perspectiva da vulnerabilidade ambiental, torna-se um importante material para gestão/ordenamento territorial. Assim, para a análise da vulnerabilidade ambiental, é necessário que os conhecimentos relativos às potencialidades do meio físico e antrópico (solos, relevos, rochas, hidrografia, clima, uso e cobertura da terra) sejam avaliados de forma integrada, pois esses elementos funcionam de maneira intrínseca, constituindo a continuidade dos fluxos de matéria e energia.

A bacia hidrográfica é a unidade geomorfológica indispensável a ser considerada no planejamento do uso da terra como um sistema de organização espacial (CHRISTOFOLETTI, 1979) e corresponde, conforme Espíndola et al. (2000) a um sistema biofísico e socioeconômico, integrado e interdependente, contemplando diversas atividades antrópicas, todos os habitats e unidades da paisagem. [...] Uma bacia pode ser abordada como uma unidade morfo-fisiográfica [...] uma unidade funcional, com processos e interações ecológicas passíveis de serem estruturalmente caracterizados, quantificados e matematicamente modelados (LEITE et al., 2021).

Nesse contexto, os elementos que a constituem influenciam diretamente nas respostas aos eventos de precipitação, destacando-se, segundo Goldenfum (1991) e Righetto (1998), as

suas unidades pedológicas, cobertura vegetal, características geomorfológicas (declividade, formato, área e rede de drenagem) e características geológicas (RESENDE et al., 2007). Ambientalmente, pode-se dizer que a bacia hidrográfica é a unidade ecossistêmica e morfológica que melhor reflete os impactos das interferências antrópicas (JENKINS et al., 1994), tais como ocupação de terras com atividades agrícolas e florestais (RANZINI; LIMA, 2002).

Embora existam índices ambientais e de escassez de água disponíveis na literatura (CONEJO et al., 2009; MARANHÃO, 2007), eles não são específicos do território da bacia, e não visam o acesso à sustentabilidade da bacia no que diz respeito à gestão integrada dos recursos hídricos, nem abrangem as diferentes variáveis do problema.

Conforme Salomão e Iwasa (1995) e Collares (2000), a ocupação humana, iniciada pelo desmatamento e seguida pela construção de estradas, cultivo da terra e pecuária, criação e expansão de vilas e cidades e mineração, é o fator decisivo da origem e aceleração dos processos erosivos, que alteram a dinâmica hidrossedimentológica de uma região. De acordo com Lambin et al. (2003), a mudança no uso da terra é impulsionada por combinações de fatores sinérgicos de escassez de recursos, levando a um aumento na pressão de produção de recursos, mudanças nas oportunidades criadas pelos mercados, intervenção política externa, perda de capacidade adaptativa e mudanças na organização e atitudes sociais.

No Brasil, os cenários de substituição da floresta por pasto são amplos, abrangendo bacias hidrográficas de grandes escalas, e ainda existem poucos estudos envolvendo os impactos das mudanças de uso da terra nessas bacias, não existindo também uma metodologia usual para isto (BAYER, 2014; LUCAS-BORJA et al., 2020). Com relação à Amazônia, sendo esta uma das mais importantes bacias hidrográficas do mundo e tendo em vista que desde 1990 quase 370.000 km² já foram desmatados (PAILLER, 2018), o incentivo ao planejamento territorial e à gestão hídrica são cruciais (SILVA JÚNIOR et al., 2021).

Mudanças no clima e no uso do solo vêm sendo relacionadas com alterações no regime hidrológico e taxas de erosão de uma bacia hidrográfica por vários autores, como Lubini e Adamowski (2013), Santos et al. (2015), Souza-Filho et al. (2015, 2016), Buarque (2015), Silva Júnior et al. (2017a, b), Marques et al. (2019), Pontes et al. (2019) e Silva Júnior et al. (2021).

Conforme citado por Syvitski et al. (2000), prever a carga sólida de um rio tem sido uma meta de engenheiros, hidrólogos, sedimentologistas e muitos outros cientistas da terra. O sedimento é levado a jusante como carga de leito (movido ao longo do leito do rio rolando, pulando ou deslizando) e carga suspensa (totalmente suportado pelo fluxo de fluido e mantido

pela turbulência do fluido). A carga do leito é dependente do fluxo, difícil de medir, mas relativamente fácil de prever, já a carga suspensa é dependente da fonte, comparativamente fácil de medir, mas difícil de prever bem. Aditem ainda que a carga suspensa parece ser uma integração das características da bacia hidrográfica acima do local de medição. A carga suspensa mais volumetricamente importante é um dos focos deste trabalho.

A carga suspensa de um rio depende dos ambientes de origem e das condições de fornecimento, as quais estão diretamente relacionadas a quão vulneráveis ou suscetíveis a erosão estão suas áreas fontes. A cobertura vegetal, a geologia da bacia de drenagem, a intensidade da chuva, as tendências climáticas, o relevo topográfico e o impacto do homem são todos conhecidos por influenciar a taxa de produção e transporte de sedimentos (MILLIMAN; MEADE, 1983).

O transporte de sedimentos nos rios é importante no que diz respeito à poluição, navegabilidade do canal, enchimento de reservatórios, longevidade de equipamentos hidrelétricos, habitat de peixes, estética dos rios e interesses científicos. Uma relação básica para lidar com todos esses tópicos é aquela entre a concentração de sedimentos em suspensão e a descarga de água (WILLIAMS, 1989).

De acordo com Asselman (2000), uma curva-chave de sedimentos só pode ser considerada representativa para um determinado local na atual faixa de condições ambientais e climáticas, quando a relação entre a descarga e a concentração de sedimento em suspensão é consistente ao longo de todo o período de medição.

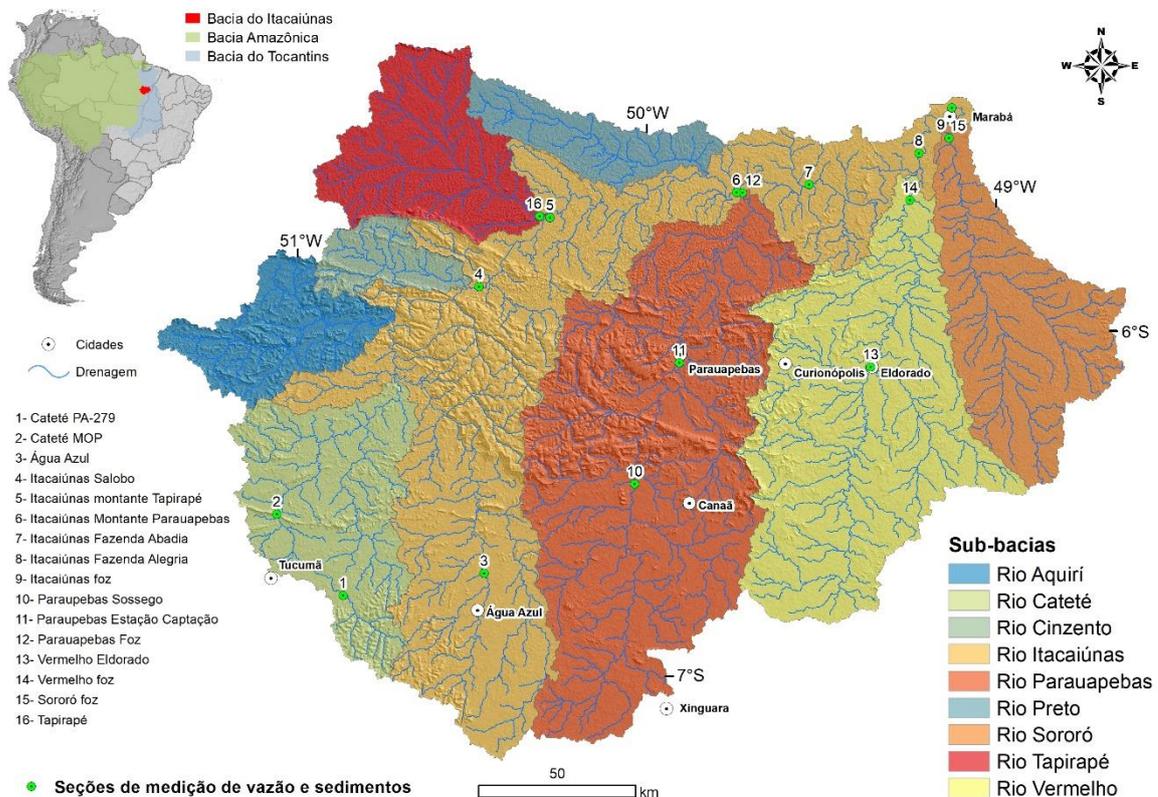
Os estudos de desenvolvimento e aplicação de metodologias para o cálculo de taxas de erosão, estimativas de transporte e produção de sedimentos em bacias hidrográficas, compõem estudos prioritários em bacias hidrográficas em todo o mundo e no Brasil (COLBY, 1963; GLYSSON, 1987; WILLIAMS, 1989; PHILLIPS et al., 1999; ASSELMAN, 2000; SYVITSKI et al., 2000; MILLIMAN, 2001; HOROWITZ, 2003; PAIVA, 2012; BANIYA et al., 2019), nessa perspectiva que parte desta pesquisa foi desenvolvida.

Finalmente, foi realizada uma análise integrada avaliando como o grau de vulnerabilidade ambiental da BHRI, analisado a partir da aplicação da metodologia de Crepani et al. (2001), sob a ótica de um diagnóstico temático individual e integrado para toda a BHRI, se correlaciona com os dados de produção de sedimentos para cada área fonte monitorada (Figura 1.2).

1.2 Descrição da área de estudo e metodologia integradora

O presente estudo está sendo realizado no território da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), localizada na região sudeste do Estado do Pará, compreendendo uma área de aproximadamente 41.700 Km². A área encontra-se confinada pelas latitudes 05°10,3' a 7°11,6'S E e longitudes 48°37,7' a 51°21,9' O e é composta pelas sub-bacias dos rios Itacaiúnas, Parauapebas, Vermelho, Sororó, Cateté, Aquiri, Cinzento, Tapirapé e Preto (Figura 1.2). A região da BRHI expõe cinco principais tipos de cobertura terrestre e uso da terra (SOUZA FILHO et al., 2015, 2016; ZAPPI, 2017, NUNES et al., 2019): floresta tropical (do tipo ombrófila densa) e savana metalófila dominam a paisagem intocada. Pastagens atualmente ocupam grande parte da paisagem (> 50%), enquanto áreas urbanas e regiões de mina a céu aberto ocupam áreas restritas (SOUZA FILHO et al., 2016).

Figura 1.2 Área da BHRI e o arranjo de suas sub-bacias e as seções hidrossedimentológicas.



Fonte: Silva et al. (2021).

O clima da região foi definido como típico de monção (Am) (ALVARES et al., 2013). O clima é dividido em duas estações principais: a chuvosa - de novembro a maio com média de precipitação anual acumulada de aproximadamente 1.550 mm, e a estação seca - de junho a outubro com média da ordem de 350 mm (MORAES et al., 2005; ALVARES et al., 2013). Conforme INMET (2021), a temperatura do ar apresenta médias acima de 26°C, cujo valor médio registrado para a região da bacia é de 27,2 °C, com umidade relativa do ar em torno de 80%.

Geomorfologicamente, a área da bacia está inserida em duas Unidades Morfoestruturais e Morfoclimáticas: o Planalto Dissecado do Sul do Pará e a Depressão Periférica do Sul do Pará (BOAVENTURA 1974), representadas pelas unidades: Depressão do Médio e Baixo Araguaia; Depressão do Médio Xingu; Depressão Bacajá; Patamar dissecado do Capim-Moju; Planícies e Terraços Fluviais; Planaltos Residuais do Sul do Pará; Serra dos Carajás e serras de São Félix, Antonhão e Seringa. Valentim e Olivito (2011) descrevem a primeira como uma unidade formada por maciços residuais com morfologia de topo variada e conjunto de cristas e pico em meio a terrenos rebaixados (~250-300m), enquanto que as porções mais elevadas podem atingir 600 a 800m e são sustentadas por rochas mais resistentes como jaspilitos e canga ferruginosa. A Depressão Periférica do Sul do Pará, por sua vez, circunda a primeira unidade e apresenta um relevo rebaixado modelado por terreno granito-gnáissico e sequências metavulcanosedimentares (VALENTIM; OLIVITO, 2011).

A geologia da BHRI, apresenta ao norte o domínio Bacajá formado por unidades neoarqueanas a paleoproterozóicas compostas basicamente por rochas metamórficas de alto grau e rochas metavulcânicas e metassedimentares. A Província de Carajás, e a parte sul da bacia, são ocupadas pelos domínios arqueanos Rio Maria, Sapucaia e Canaã dos Carajás, predominantemente constituídos por rochas granitóides mesoarqueanas de composição diversificada e cinturões greenstone metamáficos-ultramáficos subordinados (DALL'AGNOL et al., 2017; FEIO et al., 2013; MONTEIRO et al., 2008; SOUSA et al., 2015). Neste segmento da bacia estão localizados a mina de cobre de Sossego e vários outros depósitos de cobre. O centro da BHRI corresponde à Bacia de Carajás, constituída principalmente de sequências metavulcanosedimentares neoarqueanas com dominância de rochas máficas e intermediárias metavulcânicas e formações ferríferas bandadas, responsáveis pelos grandes depósitos de Fe de Carajás. Granitos neoarqueanos atravessam as unidades metavulcanosedimentares e as unidades arqueanas são parcialmente cobertas por unidades sedimentares paleoproterozóicas.

A porção leste da BHRI é representada pelo Cinturão Araguaia de rochas sedimentares, metassedimentares, máficas-ultramáficas e depósitos quaternários e coberturas lateríticas.

As metodologias utilizadas na composição dessa pesquisa partiram da necessidade de se ter uma visão sinótica e holística da BHRI, que se iniciou, a partir de uma análise da vulnerabilidade ambiental natural seguindo a proposta metodológica de Crepani et al. (2001) que foi desenvolvida com base no conceito de Ecodinâmica de Tricard (1977), onde a vulnerabilidade das unidades de paisagem é estabelecida por meio de uma escala de valores relativos e empíricos de acordo com a relação morfogênese/pedogênese analisando-se individualmente cada um dos temas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso da terra e clima. Essa metodologia foi concebida com o objetivo de subsidiar os estudos na Amazônia Legal necessários para elaboração do Zoneamento Ecológico-Econômico desta região. Para aplicação da metodologia deve-se ter uma boa base cartográfica temática (mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, de cobertura vegetal e uso da terra) disponível e atual e dados climatológicos (pluviometria) consistentes. E dentro de um Ambiente SIG, para cada temática são atribuídos de valores de fragilidade ou vulnerabilidade (de 1 a 3, num total de 21 valores). Os valores próximos de 1 sugerem a estabilidade e os valores próximos de 3 indicam as áreas que apresentam instabilidade. Após a valoração de cada temática, é realizada uma álgebra de mapas culminando com um mapa do grau de vulnerabilidade ambiental natural de cada unidade territorial baseada nos processos de morfogênese e pedogênese. No capítulo 2 dessa tese tem-se um melhor detalhamento e entendimento dessa metodologia e os produtos gerados para a BHRI.

Em um segundo momento dessa pesquisa, a partir de dados hidrossedimentológicos (medições de vazão e coleta de sedimentos em suspensão) obtidos através de 4 campanhas anuais sazonais (períodos de enchente, cheia, vazante e estiagem), totalizando 19 campanhas, no período de março de 2015 a outubro de 2019, realizadas em 16 estações/seções de controle, distribuídas ao longo das principais sub-bacias (rios Cateté, Parauapebas, Vermelho, Sororó, Tapirapé e Itacaiúnas) (Figura 2) que integram a BHRI. Esses possibilitaram o cálculo das descargas líquidas (Q =vazão), das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS), das descargas sólidas em suspensão (Q_{ss}), das taxas de produção de sedimentos e a construção das curvas-chave de sedimentos por área drenada para cada uma das 16 estações/seções de controle, através da aplicação da fórmula da potência ($Q_{ss}=aQ^b$) utilizada mundialmente nesse tipo de estudo e foi a que melhor se adaptou aos dados obtidos durante os 5 anos de monitoramento

hidrossedimentológicos. O Capítulo 3 (artigo já publicado na RBRH) mostra em detalhe a aplicação dessas metodologias e seus resultados.

Por fim, temos um Capítulo 4 onde usamos como metodologias para análises integrada dos dados e resultados obtidos nessa tese, a sobreposição do mapa de vulnerabilidade ambiental com a delimitação de cada área drenada das 16 diferentes estações de controle hidrossedimentológico, o que permitiu análises integradas e detalhadas da vulnerabilidade ambiental de cada porção monitorada da BHRI das 6 sub-bacias que compõem a BHRI. E com base nos dados da área drenada por cada estação de monitoramento hidrossedimentológica, da produção de sedimentos em suspensão, da concentração de sedimentos em suspensão e da descarga sólida, além da classificação de Carvalho et al. (1996) para concentração de sedimentos em suspensão e produção de sedimentos em suspensão, possibilitaram a construção de seus respectivos mapas de distribuição e com isso uma análise profunda das inter-relações da vulnerabilidade ambiental obtida com a produção de sedimentos na BHRI.

1.3 Interdisciplinaridade da pesquisa

A pesquisa ora apresentada está aderente as linhas de pesquisa do PPGCA-UFGA, na área de concentração “Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia”, mais especificamente na linha de pesquisa “Interação Clima, Sociedade e Ambiente”.

Considera-se que essa pesquisa por ter como foco de seu estudo uma importante bacia hidrográfica da Amazônia Oriental: a Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas, localizada no denominado “Arco do Desmatamento da Amazônia”, onde, buscou-se compreender melhor os impactos ambientais nas vulnerabilidade e estabilidade em função das mudanças: no uso e ocupação do solo, no clima (comportamento hidrológico) e no escoamento superficial e seus processos erosivos, visando produzir resultados que possam auxiliar em uma melhor gestão do território e de seus recursos naturais.

1.4 Problema e hipótese

1.4.1 Problema

As intensas alterações quanto às formas de uso e ocupação do solo que a BHRI tem experimentado, as quais somadas às mudanças no comportamento hidrológico, influenciam na manutenção de suas características de vulnerabilidade e estabilidade ambiental e em sua dinâmica hidrossedimentológica?

1.4.2 Hipótese

As áreas ambientalmente mais vulneráveis da BHRI representam as principais fontes de sedimentos da bacia. Enquanto as áreas menos vulneráveis são áreas de passagem-transporte (“by-pass”) de sedimentos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo Geral

Avaliar a relação entre a vulnerabilidade ambiental e seus impactos na produção de sedimentos na BHRI.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Diagnóstico da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas, indicando a estabilidade e vulnerabilidade ambiental do terreno a erosão a partir da aplicação da metodologia proposta por Crepani et al. (2001);
- Quantificação sazonal da produção de sedimentos em suspensão e construir as curvas-chave de sedimentos para as principais sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas;
- Comparar as áreas de maior e menor vulnerabilidade ambiental com as áreas de maior e menor produção de sedimentos na BHRI.

1.6 Estrutura da tese

A Tese está estruturada no formato de artigo e para alcançar os objetivos descritos acima, testar a hipótese de pesquisa e apresentar os resultados obtidos, este documento foi dividido da seguinte forma:

O capítulo 1 apresenta uma introdução geral, abordando de forma sucinta os conceitos, metodologia integradora e estudos realizados sobre a vulnerabilidade ambiental e produção de sedimentos em bacias hidrográficas por vários autores no Brasil, a interdisciplinaridade, a hipótese de pesquisa e seus objetivos.

O capítulo 2 apresenta a análise da vulnerabilidade ambiental da BHRI, tendo como referência a metodologia analítica desenvolvida por Crepani et al. (2001). A metodologia foi aplicada em conjunto com as ferramentas de geoprocessamento, em especial a álgebra de mapas para geração dos diferentes índices e mapas de vulnerabilidade geológica, geomorfológica, solos, uso e cobertura vegetal e clima. Por fim, foi gerado um mapa síntese de vulnerabilidade ambiental da BHRI.

O capítulo 3 apresenta os dados e análises sobre as descargas líquidas e sólidas medidas entre os anos de 2015 e 2019. Foram realizadas análises quantitativas e qualitativas para a construção das curvas-chave de sedimentos e o consequente cálculo da produção de sedimentos

por área drenada por cada seção de controle hidrossedimentológica instalada e monitorada na BHRI.

O capítulo 4 apresenta as conclusões integradoras, por meio de uma análise integrada da vulnerabilidade ambiental e da produção de sedimentos, onde é confirmada a hipótese de pesquisa ao concluir-se que *as áreas ambientalmente mais vulneráveis da BHRI representam as principais fontes de sedimentos da bacia, enquanto as áreas menos vulneráveis são áreas de passagem-transporte (“by-pass”) de sedimentos.*

2 VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACAIÚNAS

RESUMO

A Amazônia, por sua dimensão, ainda carece de muitos estudos nas mais diversas áreas do conhecimento, que possam de alguma forma melhor retratar as diferentes interações entre a natureza e o homem que ali habitam e usam seus diferentes recursos (madeira, minérios, água, solos, rios, peixes, frutos e outros mais). O presente estudo teve como objetivo realizar uma análise da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), buscando obter uma visão integrada das modificações ocorridas em suas características físicas e ambientais associadas ao uso da terra. Para obter os resultados esperados foram obtidos dados cartográficos temáticos atualizados (geologia, geomorfologia, uso e cobertura vegetal e solos) disponíveis em plataformas digitais da CPRM, EMBRAPA e IBGE, além de dados climatológicos do satélite NOAA/NASA da área da BHRI. Com esses dados e utilizando rotinas de geoprocessamento na aplicação de metodologia específica definida para esse estudo, foram elaborados no software ArcGIS 10.8.1 os mapas de vulnerabilidade ambiental para cada tema e por fim o mapa de vulnerabilidade ambiental da BHRI. Os resultados mostraram que a vulnerabilidade ambiental apresentou como grau dominante a classe medianamente estável/vulnerável, ocupando 28.058 km² de extensão (68% da bacia), seguida da classe moderadamente estável que ocupou 8.961 km² de extensão (com de 22% da bacia) e, por fim, a classe moderadamente vulnerável com 4.314 km², ocupando 10%. O uso e cobertura vegetal foi o fator de maior impacto nos resultados, pois apresentou dois graus diferenciados de vulnerabilidade, o estável com 49% (das florestas que compõem o Mosaico de conservação de Carajás e áreas isoladas dispersas) e a vulnerável com 51% (das pastagens/agropecuária, mineração e áreas urbanas do Arco do desmatamento da Amazônia). Em seguida, a geologia com 28.200 km² (70 %) de áreas estáveis associadas as regiões de embasamento de rochas cristalinas, e os outros 30% (13.144 km²) a porção leste da BHRI com as áreas medianamente estáveis a moderadamente vulneráveis de rochas sedimentares do Cinturão Araguaia, sendo desse 1% representados pelas planícies fluviais quaternárias vulneráveis. Os fatores geomorfológicos (relevo), pedológicos e climáticos apresentaram influência secundária dentro

do atual contexto ambiental da BHRI. A metodologia aplicada, mostrou-se eficaz e de fácil replicação, permitindo a elaboração de um mapa síntese, que evidencia a importância da integração dos diferentes fatores no resultado final da vulnerabilidade ambiental da área estudada. Além disso, os mapas de vulnerabilidades são um instrumento efetivo que podem auxiliar no ordenamento territorial, pois têm a capacidade de apontar os conflitos de uso e direcionar técnicas para a contenção das perdas de solo e, conseqüentemente, reduzir a produção de sedimentos e seus impactos ambientais.

Palavras-chave: vulnerabilidade ambiental; fatores ambientais; geoprocessamento; Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas.

ABSTRACT

The Amazon, due to its size, still lacks many studies in the most diverse areas of knowledge, which can somehow better portray the different interactions between nature and man who live there and use its different resources (wood, minerals, water, soils, rivers, fish, fruits and more). This study aimed to take out an analysis of the environmental vulnerability of the Itacaiúnas river basin (BHRI), seeking to obtain an integrated view of the changes that have occurred in its physical and environmental characteristics associated with its land use. To obtain the expected results, updated thematic cartographic data were obtained (geology, geomorphology, use and vegetation cover and soils) available on CPRM, EMBRAPA and IBGE digital platforms, in addition to climatological data from the NOAA/NASA satellite in the BHRI area. With these data and using geoprocessing routines in the application of the specific methodology defined for this study, the environmental vulnerability maps for each theme were elaborated in ArcGIS 10.8.1 software and finally the BHRI environmental. The results showed that environmental vulnerability presented as the dominant degree the moderately stable/vulnerable class, occupying 28,058 km² extension (68% of the basin), followed by the moderately stable class that occupied 8,961 km² extension (with 22% of the basin) and the moderately vulnerable class with 4,314 km² (10% of the basin). The land use and vegetation cover was the factor with the greatest impact in the results, as it presented two vulnerability degrees: the stable with 49% (forests that compose the Carajás Conservation Mosaic and forest remnants); and the vulnerable

with 51% (of the pastures/agriculture, mining and urban areas of the Amazon Arc of deforestation). Subsequently, the geology with 28,200 km² (70%) of stable areas associated with crystalline basement rocks. The other 13,144 km² (30%) in the eastern portion of the IRW with the moderately stable to moderately vulnerable areas of sedimentary rocks of the Belt Araguaia, of which 1% are represented by the vulnerable Quaternary river plains. The geomorphologic (relief), pedologic and climatic factors have secondary influence within the current environmental context of the IRW. The methodology applied in this work is effective and easy to apply, allowing the elaboration of the environmental vulnerability map, which allows understanding the influence of different factors that influence the vulnerability levels of the IRW. In addition, vulnerability maps are an effective instrument that can assist in territorial planning, as it has the ability to point out the use conflicts and propose techniques to contain soil losses and, consequently, reduce sediment production and its environmental impacts.

Keywords: environmental vulnerability; environmental factors; geoprocessing; Itacaiúnas River watershed.

2.1 Introdução

A bacia hidrográfica representa uma unidade de análise fundamental em estudos ambientais e sua utilização como recorte espacial básico para esses estudos tem sido a proposta de muitos autores, tendo em vista que as alterações decorrentes das interferências humanas sobre o ambiente refletem-se na bacia hidrográfica como um todo (BRASIL, 2009; RIBEIRO; ALBUQUERQUE, 2021).

Na busca pelo desenvolvimento sustentável de uma determinada região, faz-se necessário o envolvimento de uma grande diversidade de agentes e segmentos sociais. Com isso, torna-se imprescindível a necessidade de estudos sobre o meio físico, visando a identificação das vulnerabilidades/fragilidades e das potencialidades dos recursos naturais perante diversos empreendimentos e/ou atividades de uso do solo, conciliando as demandas econômicas à preservação ambiental e bem-estar das pessoas que ali residem.

Ribeiro e Albuquerque (2021) salientam que os estudos dos ambientes naturais envolvem um conjunto de informações e a proposição de diferentes modelos que perpassam, obrigatoriamente, pelo inventário do quadro natural. Nesta abordagem, a vulnerabilidade ou fragilidade potencial considera os aspectos naturais, caracterizando o equilíbrio dinâmico do ambiente sem considerar as influências da sociedade (socioeconômicas), se restringindo apenas a uma avaliação espacial e temporal da vulnerabilidade ao uso e cobertura do solo.

Lense et al. (2020) ressaltam que na região amazônica brasileira, o desmatamento intensifica a erosão hídrica, principalmente durante a conversão de áreas desmatadas em áreas agrícolas e de pastagens. Embora o desmatamento na floresta amazônica seja um tema relevante e recorrente na agenda ambiental nacional e internacional (TACCONI et al., 2019), pouco se discute sobre a influência desse desmatamento nas taxas de erosão e degradação do solo. Assim, a avaliação da dinâmica do processo de erosão devido ao desmatamento e as consequentes mudanças no uso e ocupação do solo na região é essencial para destacar a importância da conservação do solo e auxiliar na proposição de estratégias efetivas de redução da erosão (EFTHIMIOU et al., 2017).

A erosão dos solos é um problema ambiental importante, pois altera a carga sedimentar nos rios e os principais fatores que a influenciam são a erosividade da chuva, as propriedades físicas do solo, a cobertura vegetal e as características das encostas (GUERRA, 1998). A erosão, além de reduzir a capacidade produtiva dos solos, causa sérios danos ambientais, como

assoreamento e poluição das fontes de água (SANTOS et al., 2012; BARBOSA et al., 2015). De acordo com Rosa (2016), a associação da degradação de bacias hidrográficas, principalmente com a alteração do uso do solo, aos fenômenos climáticos naturais resulta na produção de sedimentos em quantidades muito superiores às ocorridas ao longo de centenas de anos de equilíbrio natural.

Diversos são os fatores que agem sobre aos processos de vulnerabilidade erosiva. Conforme Ramalho Filho e Beek (1995), entre estes, é possível citar as condições climáticas, em especial o regime pluviométrico, as características dos solos tais como textura, estrutura, permeabilidade, pedregosidade, retenção de água e compactação. Também é preciso considerar os fatores de relevo, como grau de entalhamento, substrato, declividade, comprimento das vertentes, e ainda, a cobertura vegetal associada e o tipo de uso mais frequente.

Mourão e Santos (2014) salientam ainda que o estudo sobre a vulnerabilidade ambiental se apresenta com grande relevância para o planejamento ambiental e territorial, já que o aumento da vulnerabilidade dos ambientes naturais é intensificado pela ação antrópica, e segundo Ross (1994), os ambientes naturais normalmente estão em equilíbrio dinâmico, mas com a evolução da sociedade há um aumento das necessidades de recursos naturais e, conseqüentemente, uma degradação do ambiente. Tricart (1977) afirma ser importante estudar a organização do espaço para determinar a ação nas dinâmicas naturais para corrigir aspectos desfavoráveis e facilitar a exploração dos recursos ecológicos que o meio ambiente oferece.

Conforme destacado por Ceconi et al. (2018), os indicadores ambientais, são usados como instrumentos para o planejamento, são números que representam, empiricamente, um parâmetro para determinado fenômeno. Devido à fácil aplicação e à dinâmica de inserção de fatores, índices são notáveis ferramentas para auxílio à gestão e à informação, podendo ser usados, inclusive, em detrimento a alguns modelos ambientais, que geralmente requerem grande, complexo e oneroso banco de dados (GOMES; MALHEIROS, 2012). Nesse contexto, o índice de vulnerabilidade à erosão, proposto por Crepani et al. (2001), é uma prática metodológica para a gestão territorial, pois é uma ferramenta que possibilita, por meio de uma base de dados acessível, delinear espacialmente o grau de vulnerabilidade à erosão do solo.

O método de Crepani et al. (2001), utilizado inicialmente com objetivo de subsidiar o Zoneamento Ecológico e Econômico da Amazônia, é uma ferramenta que tem sido aplicada em diversos estudos mais recentes (RIBEIRO; ALBUQUERQUE, 2021, CARDOSO et al., 2021; CECONI et al., 2018; MOURÃO; SANTOS, 2014; MENEZES et al., 2007; MOTA; VALLADARES, 2011; ARNESEN; MAIA, 2011;). Crepani et al. (2001) desenvolveram uma

metodologia para elaborar mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo, tendo em vista a interação do solo com a ambiência ecológica. A metodologia foi fundamentada na proposta de Ross (1996), a partir do conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977), que, através de uma análise dos sistemas ecológicos, permite estudar as relações entre os diversos componentes do meio ambiente a fim de analisá-los multilateralmente, proporcionando uma visão sinótica, repetitiva e holística da paisagem, fortalecendo assim a ideia do equilíbrio natural do meio. Sua aplicação consiste em um rearranjo dos dados sendo vinculado aos fatores de cada temática a uma escala de valores empíricos, ou seja, índices.

A metodologia analisa individualmente cada um dos componentes temáticos: geologia, geomorfologia, pedologia, uso e cobertura da terra e clima (intensidade pluviométrica), tendo como produto final o Mapa de Vulnerabilidade Ambiental.

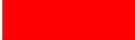
Portanto, neste estudo, tem como objetivo realizar um diagnóstico da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BRHI), indicando a estabilidade e vulnerabilidade ambiental do terreno a erosão por meio da aplicação da metodologia proposta por Crepani et al. (2001).

2.2 Materiais e métodos

A metodologia de análise Ambiental adotada neste estudo tem como base a proposta de Crepani et al. (2001), que expressa a suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão mediante uma escala de valores distribuídos entre as situações de predomínio dos processos pedogenéticos (valores próximos de 1,0), passando por situações intermediárias (valores ao redor de 2,0) e situações de predomínio dos processos de morfogênese (valores próximos de 3,0) e recebe atribuições de valores conforme a Tabela 2.1.

Para a determinação da vulnerabilidade ambiental da BHRI, foram atribuídos valores aos processos de perda de solos para cada uma das variáveis temáticas (Tabela 2.1): Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Uso e Cobertura da terra e que auxiliados pelo Clima, interagem e levam ao estabelecimento das unidades de paisagem natural, sendo então obtidos os mapas de vulnerabilidade referentes a cada variável.

Tabela 2.1 - Escala de Vulnerabilidade

Escala de Vulnerabilidade	Grau de Vulnerabilidade	Cor
1,0 - 1,3	Estável	
1,4 - 1,7	Moderadamente Estável	
1,8 - 2,2	Medianamente Estável/Vulnerável	
2,3 - 2,6	Moderadamente Vulnerável	
2,7 - 3,0	Vulnerável	

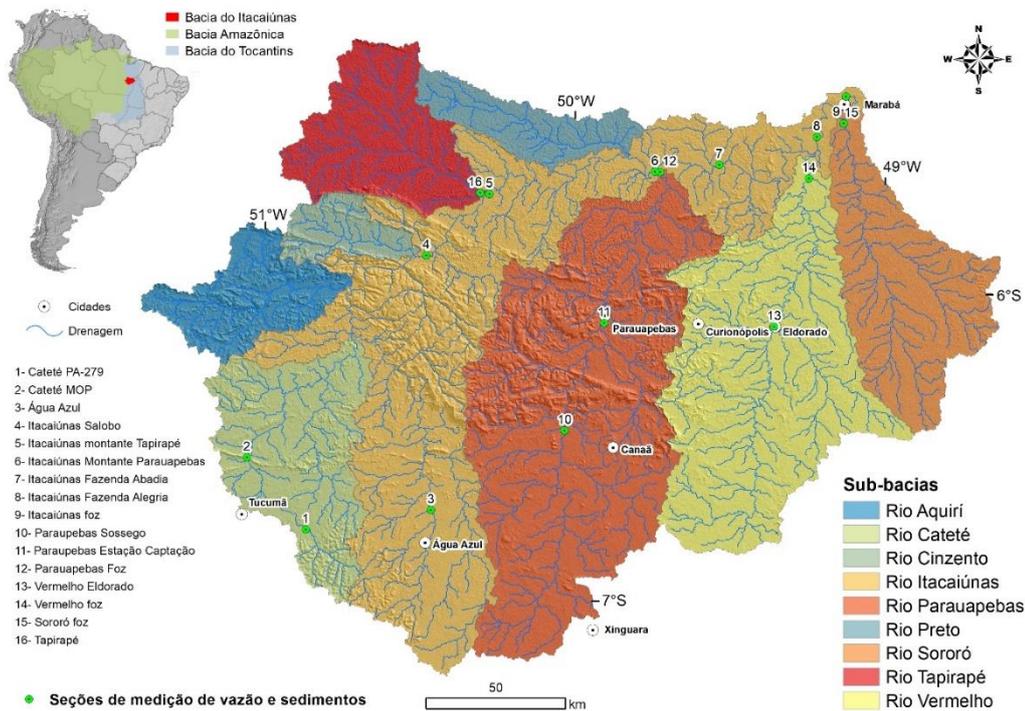
Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

2.2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), localizada na região sudeste do Estado do Pará, com área de drenagem de aproximadamente 41.700 Km², encontra-se confinada pelas latitudes 05°10,3' a 7°11,6'S E e longitudes 48°37,7' a 51°21,9' O e é constituída pelas sub-bacias dos rios Itacaiúnas, Parauapebas, Vermelho, Sororó, Cateté, Aquiri, Cinzento, Tapirapé e Preto (Figura 2.1).

A BHRI está inserida no âmbito da Província Mineral de Carajás, no sudeste da Amazônia, no Estado do Pará. Caracteriza-se por ser a mais importante do Estado sob o ponto de vista sócio-econômico-ambiental, pois abriga diversas atividades socioeconômicas, e cujas atividades de mineração industrial (exploração de minérios de ferro, manganês, cobre e níquel) ocorrem em sua grande maioria no interior de unidades de conservação, além de uma pecuária extensiva com aproximadamente 35% do rebanho bovino do estado (IBGE, 2017) e a agricultura (SOUZA-FILHO et al., 2015, 2016, 2018; NUNES et al., 2019). Geopoliticamente, abrange áreas de onze municípios e nove sedes municipais. De acordo com Silva Junior (2017), os ativos produzidos na BHRI correspondem a aproximadamente 25% do PIB do estado do Pará.

Figura 2.1 - Área da Bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas e arranjo de suas sub-bacias.



Fonte: Autor.

2.2.2 Base de dados ambientais

Inicialmente foi realizada a pesquisa bibliográfica sobre os aspectos teóricos e metodológicos referentes ao objeto de estudo desta pesquisa em paralelo aos aspectos dos meios físico e socioeconômico da região. Nessa mesma etapa, foi executado o levantamento cartográfico, buscando a aquisição de mapas e cartas temáticas e básicas existentes, além de imagens de satélite disponíveis, a saber:

- Modelo Digital de Elevação (MDE), a partir de imagens de radar Alos Palsar, banda L, com resolução espacial de 12,7 metros, de 2010, adquirida da base de dados ASF Data Search e elipsóide de referência WGS84;
- Mapa Geológico da BHRI, a partir da base cartográfica CPRM (2006);
- Mapas de Solos da base cartográfica do IBGE (2021);
- Mapa de Geomorfologia da base cartográfica do IBGE (2021);
- Mapa de Uso e Cobertura do Solo, base de dados do Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITV DS - Grupo de Pesquisa em Tecnologia Ambiental);

- Dados Pluviométricos da base de dados do CHIRPS: *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations* (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>);

O procedimento metodológico de obtenção dos índices para a suscetibilidade à erosão de cada fator foi desenvolvido no Sistema de Informação Geográfico (SIG) Arcgis/Arcmap 10.8 licenciado pelo ITV DS. Toda a cartografia utilizada foi georeferenciada ao DATUM WGS-84, UTM Zona 22S (EPSG:32722) e analisados na escala 1:250.000.

As atividades necessárias à transformação dos dados obtidos e a respectiva inclusão no banco de dados construído incluiu: a análise e correção dos mapas digitalizados; conversão do sistema de georeferenciamento; uniformização entre projeções cartográficas; padronização dos dados na base raster para 30 m de tamanho do pixel; delimitação da área da BHRI; definição dos diversos temas e suas unidades básicas; definição de pesos para cada unidade básica para cada tema; e, por fim, aplicação da álgebra de mapas para integração e diagnóstico da vulnerabilidade ambiental da BHRI.

2.2.3 Índices da Vulnerabilidade Geológica

Na abordagem adotada no diagnóstico da vulnerabilidade ambiental da BHRI, a geologia é considerada uma das mais importantes, pois é a partir do arcabouço geológico (tipos de rochas) que compõem a região que outros fatores irão agir e/ou interagir e com isso determinar as áreas com maior ou menor vulnerabilidade.

De acordo com Crepani et al. (2001), a contribuição da geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural compreende as informações relativas à evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra e as informações relativas ao grau de coesão das rochas que a compõem. Assim, pela metodologia, são atribuídos valores empíricos a cada tipo de rocha as quais definem as características do processo erosivo, para rochas pouco coesas prevalecem os processos erosivos (morfogênese), aos quais atribuem-se valores próximo a 3,0, enquanto para rochas bastantes coesas prevalecem os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese), aos quais são atribuídos valores próximo a 1,0.

A geologia da BHRI com suas principais unidades geológicas é apresentada no mapa de vulnerabilidade geológica, elaborado a partir do mapa geológico integrado do estado do Pará da CPRM (2006), atualizado pelo IBGE (2021) (Figura 2.2).

A geologia da BHRI, apresenta ao norte o domínio Bacajá formado por unidades neoarqueanas a paleoproterozóicas compostas basicamente por rochas metamórficas de alto grau e rochas metavulcânicas e metassedimentares. A Província de Carajás, e a parte sul da bacia, são ocupadas pelos domínios arqueanos Rio Maria, Sapucaia e Canaã dos Carajás, predominantemente constituídos por rochas granitóides mesoarqueanas de composição diversificada e cinturões greenstone metamáficos-ultramáficos subordinados (DALL'AGNOL et al., 2017; FEIO et al., 2013; MONTEIRO et al., 2008; SOUSA et al., 2015). Neste segmento da bacia estão localizados a mina de cobre de Sossego e vários outros depósitos de cobre. O centro da BHRI corresponde à Bacia de Carajás, constituída principalmente de sequências metavulcanosedimentares neoarqueanas com dominância de rochas máficas e intermediárias metavulcânicas e formações ferríferas bandadas, responsáveis pelos grandes depósitos de Fe de Carajás. Granitos neoarqueanos atravessam as unidades metavulcanosedimentares e as unidades arqueanas são parcialmente cobertas por unidades sedimentares paleoproterozóicas. A porção leste da BHRI é representada pelo Cinturão Araguaia de rochas sedimentares, metassedimentares, máficas-ultramáficas e depósitos quaternários e coberturas lateríticas.

A vulnerabilidade geológica foi estabelecida a partir dos valores imputados para cada conjunto de unidades litológicas das principais rochas existentes nas diferentes unidades geológicas (Tabela 2.2), com isso, foi elaborado o Mapa de Vulnerabilidade Geológica.

A Tabela 2.2 apresenta as litologias que compõem cada unidade e em qual domínio geotectônico estão inseridas, os índices de vulnerabilidade atribuídos para cada grupo de rochas conforme os valores propostos por Crepani et al. (2001), além da representatividade das áreas (em km² e percentual) para cada grau de vulnerabilidade estabelecido às diferentes unidades geológicas que compõem a BHRI.

2.2.4 Índices da Vulnerabilidade à Geomorfologia

Para um melhor entendimento da temática geomorfológica da BHRI, elaborou-se o mapa geomorfológico (Figura 2.3) a partir da compilação dos dados disponibilizados pelo

IBGE (2021). Esse mapa proporciona uma melhor visão e entendimento da configuração geomorfológica da BHRI e considera-se este seja um dos temas de maior influência na avaliação da vulnerabilidade a erosão dos solos.

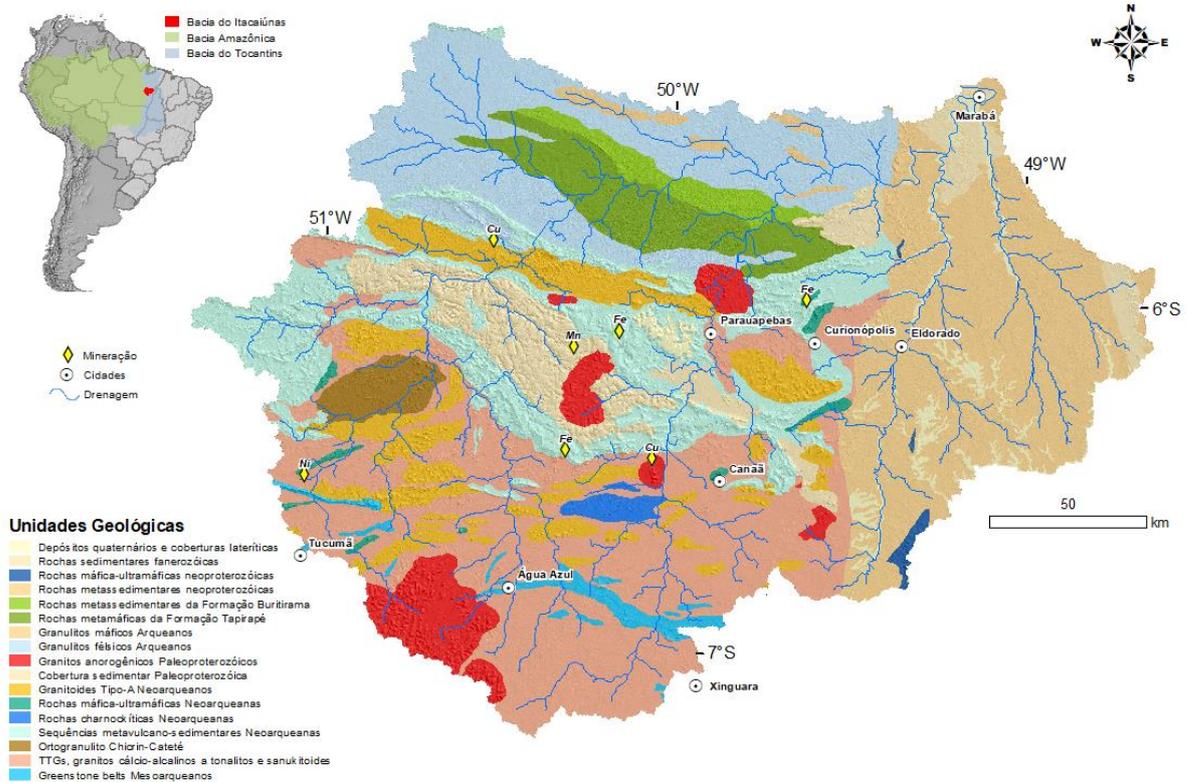
Os dados geomorfológicos apresentados neste item basearam-se em estudos regionais anteriores (BOAVENTURA, 1974, MAMEDE et al., 1981, VALENTIM; OLIVITO, 2011; IBGE, 2021).

Na BHRI, segundo o IBGE (2021), são encontrados quatro domínios Morfoestruturais: Crátons Neoproterozóicos (com as unidades geomorfológicas da Serra dos Carajás, Serras de São Félix, Antonhão e Seringa, Depressão do Bacajá e Depressão do Médio Xingu); Cinturões Móveis Neoproterozóicos (com a Depressão Médio e Baixo Araguaia); Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas (com o Patamar Dissecado Capim – Moju); e, os Depósitos Sedimentares Quaternários (com as Planícies e Terraços Fluviais) (Figura 2.3).

O Mapa Geomorfológico da BHRI (Figura 2.3), apresenta as principais unidades que compõem o seu relevo:

- **A Depressão do Médio e Baixo Araguaia**, que compõe a região geomorfológica da Depressão do Rio Araguaia, está representada na BHRI por uma extensa superfície na porção leste de 8.564 Km² (21% da BHRI), onde estão inseridas as sub-bacias dos rios Sororó e Vermelho, que se estende a longo da margem esquerda do rio Araguaia e corresponde à superfície baixa (230 a 280m) suavemente dissecada em feições de topos tabulares com eventuais trechos convexos, esculpidas nas rochas metassedimentares da Faixa Araguaia na bacia. Sua principal característica é o domínio quase que total das concreções ferruginosas em seus solos;
- **Planaltos Residuais do Sul do Pará**, são partes da região dos Planaltos Residuais da Amazônia Meridional, são representados por relevos residuais que configuram morros e cristas com encostas íngremes e vales profundos, ocorrentes principalmente na porção sudoeste e uma porção menor central da BHRI, com altitudes de 50 a 350 metros;

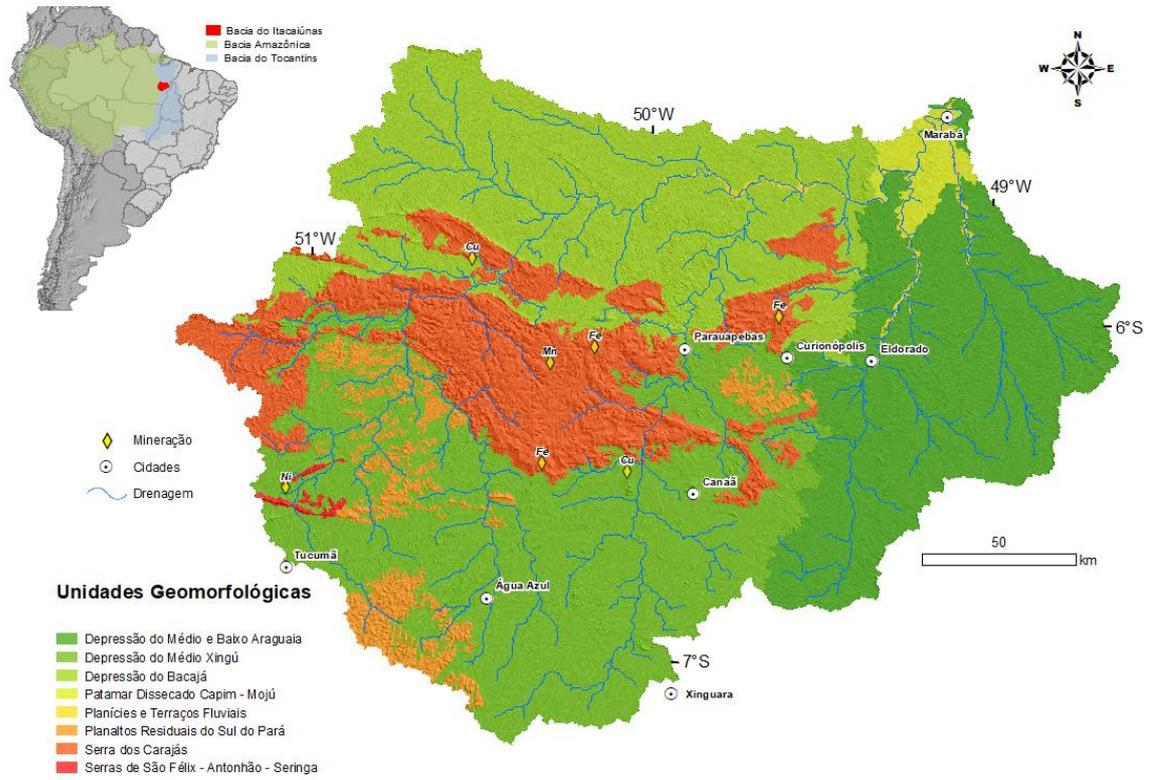
Figura 2.2 Geologia simplificada da bacia do rio Itacaiúnas



Fonte: Adaptado pelo autor de CPRM (2006) e IBGE (2021).

- **Serra dos Carajás**, também inserida na região dos Planaltos Residuais da Amazônia Meridional, é caracterizada por um relevo fortemente controlado pela estrutura, cujos processos de dissecação foram orientados por fraturas e falhas. Os contatos são abruptos e bem marcados por escarpas ou ressaltos íngremes, com desnível de até 300 m, com tálus ravinados. A unidade compreende a serra de Carajás propriamente dita e diversos blocos serranos isolados alinhados no sentido W-E na BHRI. Em seus topos nivelados tem-se uma antiga pediplanação sobre cobertura sedimentar mantida por um nível de couraça ferruginosa, onde estão instaladas as principais minas de ferro da região;
- **Serras de São Félix – Antonhão – Seringa**, com topos nivelados por pediplanação, foram desmantelados por processos erosivos resultando em conjunto de formas residuais, interpenetrados pela superfície de piso da Depressão do Médio Xingu. Na BHRI são representadas pelas Serras Arqueada, Onça e Puma, na porção sudoeste.

Figura 2.3 – Mapa das Unidades Geomorfológicas da BHRI.



Fonte: Autor.

Tabela 2.2 - Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas

Litologia	Unidades Geológicas	Domínio Geotectônico	Escala de Vulnerabilidade	Grau de Vulnerabilidade	Área (Km²)	Área (%)
Formação ferrífera bandada, Rocha metassedimentar clástica, Metabasalto, Metadiorito, Metapiroclástica, Metavulcânica félsica, Mármore, Rocha metassedimentar química, Rocha metassedimentar clástica, Quartzo-mica xisto, Quartzito ferruginoso	Rochas metassedimentares da Formação Buritirama, Sequências metavulcano-sedimentares Neoarqueanas	Domínio Bacajá e Província Carajás	1	Estável	21403,93	51,77
Granito, Sienogranito, Granodiorito, Monzogranito, Aplito	Granitoides Tipo-A Neoarqueanos	Província Carajás	1,1			
Diorito, Granito, Álcali-feldspato granito pórfirítico, Sienogranito, Granito pórfiro, Anfibólio-biotita monzogranito, Biotita monzogranito, Sienogranito, Monzogranito, Microgranito, Álcali-feldspato granito	Granitos anorogênicos Paleoproterozóicos	Província Carajás	1,1			
Tonalito, Sienogranito, Granodiorito, Monzogranito, Ortogranulito, Granulito enderbítico	Rochas charnockíticas Neoarqueanas, Ortogranulito Chicrin-Cateté, Granulitos félsicos e máficos Arqueanos, Granitoides Tipo-A Neoarqueanos	Província Carajás e Domínio Bacajá	1,2			
Charnockito, Diorito, Gnaiss, Granito, Granitóide, Granulito, Metamáfica, Serpentinó	TTGs, granitos cálcio-alcálicos a tonalitos e sanukitoides, Rochas máfica-ultramáficas neoproterozóicas	Província Carajás e Cinturão Araguaia	1,2	Moderadamente estável	6795,31	16,43
Xisto, Clorita xisto, Metamáfica, Metassilito, Metaultramafito, Actinolita xisto, Formação ferrífera bandada, Metagrauvaca, Metapelito, Metabasalto, Metadacito, Metarriolito, Xisto pelítico, Metamáfica, Rocha metaultramáfica, Xisto ultramáfico, Chert	Sequências metavulcano-sedimentares Neoarqueanas, Rochas metamáficas da Formação Tapirapé, Greenstone belts Mesoarqueanos, Granulitos máficos Arqueanos	Província Carajás e Domínio Bacajá	1,5			
Gabro	Rochas máfica-ultramáficas Neoarqueanas	Província Carajás	1,6			
Diabásio, Dunito, Gabro, Serpentinó, Piroxenito, Peridotito, Norito, Dunito, Formação ferrífera bandada, Serpentinó, Talco xisto, Metabasalto, Metagabro, Metaperidotito, Metapiroxenito, Metachert, Anortosito, Cromitito, Dunito, Gabro, Harzburgito, Peridotito, Norito	Rochas máfica-ultramáficas Neoarqueanas, Greenstone belts Mesoarqueanos	Província Carajás	1,8	Medianamente estável/vulnerável	8219,38	18,88
Clorita xisto, Quartzo xisto, Metamáfica, Metassilito, Metaultramafito	Greenstone belts Mesoarqueanos, Rochas metassedimentares neoproterozóicas	Província Carajás e Cinturão Araguaia	1,9			
Coberturas Lateríticas Imaturas	Depósitos quaternários e coberturas lateríticas	Cinturão Araguaia e Província Carajás	2			
Filito	Rochas metassedimentares neoproterozóicas	Cinturão Araguaia	2,1			
Arenito, Conglomerado, Silito, Pelito, Arcóseo, folhelho, Silito arenoso, Conglomerado suportado por matriz, Arenito arcoseano	Cobertura sedimentar Paleoproterozóica, Rochas sedimentares fanerozóicas, Sequências metavulcano-sedimentares Neoarqueanas	Província Carajás, Cinturão Araguaia e Domínio Bacajá	2,4	Moderadamente vulnerável	4520,88	10,94
Areia, Argila, Cascalho, Silte	Depósitos quaternários e coberturas lateríticas	Cinturão Araguaia	3	Vulnerável	403,67	0,99

Fonte: autor.

Para a definição dos diferentes índices de vulnerabilidade para o tema geomorfologia, a ferramenta básica é a topografia da área estudada, que foi obtida por meio de processamento dos dados do Satélite Sentinel 2, que gerou uma Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 12 metros e possibilitou a construção do mapa hipsométrico de maior detalhe da BHRI no software ArcGis 10.8 (Figura 2.7).

No estabelecimento dos valores da escala de vulnerabilidade para as unidades de paisagem natural com relação à geomorfologia, foram analisados os seguintes índices morfométricos do terreno: dissecação do relevo pela drenagem, amplitude altimétrica e declividade.

Os procedimentos adotados para a determinação dos índices de vulnerabilidade geomorfológica da BHRI levaram em consideração as metodologias preconizadas por Crepani et al. (2001), a partir de Ross (2006), e que foram gerados pela aplicação da metodologia (rotina) de geoprocessamento proposta Guimarães et al. (2017) e Lima (2018), que se resume aos seguintes passos: o tratamento e preparação do modelo digital de elevação, com o preenchimento das depressões espúrias e recorte da matriz; o mapeamento do grau de entalhamento dos vales (amplitude altimétrica/dissecação vertical); o mapeamento da dimensão interfluvial média (dissecação horizontal) para cada bacia; o cálculo da declividade; e por fim, o cruzamento matricial (calculadora raster) para definição da vulnerabilidade do relevo. Os índices utilizados nos procedimentos adotadas constam na Tabela 2.3 e os mapas resultantes do geoprocessamento estão nas Figuras 2.9, 2.10 e 2.11.

Tabela 2.3 - Valores de vulnerabilidade para a intensidade de Dissecação do Relevo, a Amplitude Altimétrica, para a Declividade das Encostas

Valores da Amplitude do Interflúvio (m)	Área (Km²)	Área (%)	Valores da Amplitude Altimétrica (m)	Área (Km²)	Área (%)	Valores da Declividade (%)	Área (Km²)	Área (%)	Escala de Vulnerabilidade	Grau de Vulnerabilidade
>5000 - 4250	-	-	<20 - 48,5	28798,0	69,7	<3,5 - 10,3	23900,1	57,8	1 - 1,3	Estável
4250 - 3250	-	-	48,5 - 84,5	4167,4	10,1	10,3 - 19,8	10293,4	24,9	1,4 - 1,7	Moderadamente Estável
3250 - 2000	-	-	84,5 - 132	2295,4	5,5	19,8 - 32,1	5122,5	12,4	1,8 - 2,2	Medianamente Estável/Vulnerável
2000 - 1000	-	-	132 - 170	1356,7	3,3	32,1 - 42,4	1761,2	4,6	2,3 - 2,6	Moderadamente Vulnerável
1000 - <250	41.342	100	170 - >200	4724,2	11,4	42,4 - >50	264,6	0,6	2,7 - 3,0	Vulnerável

Fonte: Autor (adaptado de Crepani et al., 2001).

Após estabelecer os valores de vulnerabilidade para cada índice morfométrico (dissecação do relevo, amplitude altimétrica e declividade), foi realizada uma operação matemática de somatória e uma divisão algébrica (Equação 1) para gerar o mapa da Vulnerabilidade Geomorfológica:

$$R = (G + A + D)/3 \quad (1)$$

onde:

R = Vulnerabilidade Geomorfológica.

G = Vulnerabilidade atribuída ao Grau de Dissecação.

A = Vulnerabilidade atribuída à Amplitude Altimétrica.

D = Vulnerabilidade atribuída à Declividade.

Em seguida, o resultado dessa álgebra de mapas foi novamente valorado pelos intervalos de classes de Crepani et al. (2001), conforme Tabela 2.4, obtendo-se assim o grau de vulnerabilidade geomorfológica da BHRI.

Tabela 2.4 - Valores da Vulnerabilidade Geomorfológica

Grau de Vulnerabilidade	Escala de Vulnerabilidade	Área (Km ²)	Área (%)
Estável	1 - 1,3	0	0
Moderadamente Estável	1,4 - 1,7	14090,4	34,1
Medianamente Estável/Vulnerável	1,8 - 2,2	20251,6	49,0
Moderadamente Vulnerável	2,3 - 2,6	3812,7	9,2
Vulnerável	2,7 - 3,0	3187,0	7,7

Fonte: Autor (Adaptado de Crepani et al., 2001).

2.2.5 Índices da Vulnerabilidade Pedológica da BHRI

A construção do mapa de vulnerabilidade referente à solos e sua valoração foi realizada com base nos dados digitais publicados pela CPRM (2021) e IBGE (2021), seguindo as diretrizes propostas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013).

Com base nos dados adquiridos, elaborou-se o mapa com as classes (tipos) de solos presentes e dominantes na BHRI (Figura 2.4), as quais aplicou-se as definições propostas por Crepani et al. (2001) com o intuito de estimar a vulnerabilidade ambiental. A Tabela 2.5 sintetiza as informações mais relevantes relacionadas aos solos da BHRI, onde destaca-se que: Os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos predominam com mais de 60% da área e estão distribuídos por toda a bacia, seguidos dos Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos com

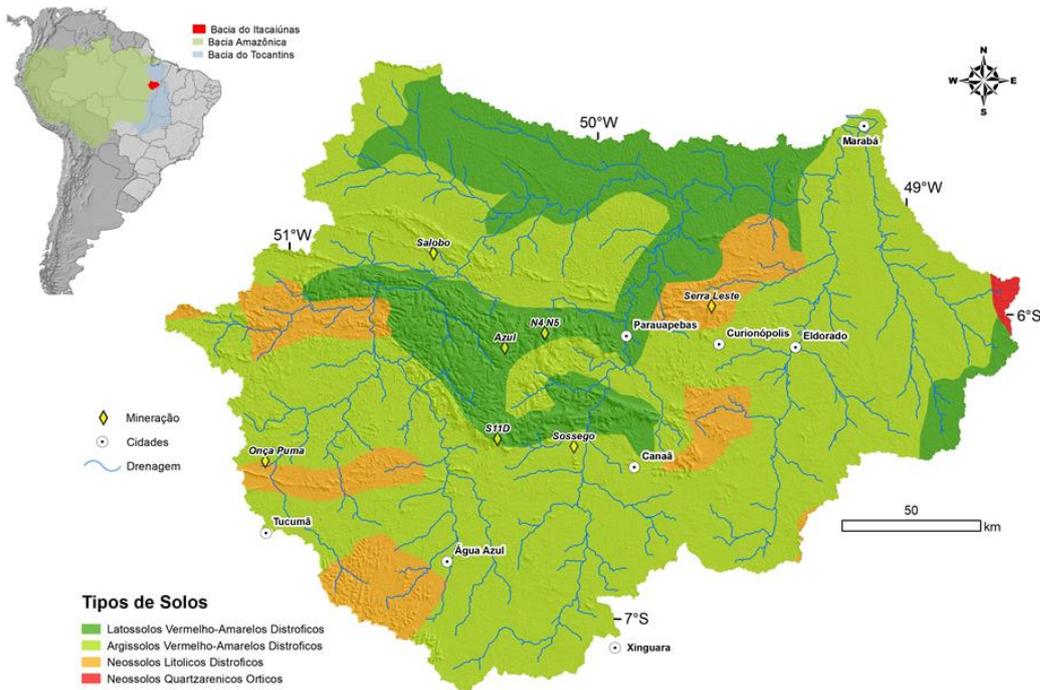
23%, e estão distribuídos na região da Bacia de Carajás na porção central da BRHI e ao norte na cobrindo as rochas do Domínio Bacajá e por fim os Neossolos (Litólicos Distróficos e Quartzarênicos Órticos) com aproximadamente 11%, dispersos em manchas menores. Possuem de modo geral texturas que variam de arenosa a muito argilosa.

Tabela 2.5 - Características texturais, classificação dos solos, seus índices de vulnerabilidade e áreas correspondentes.

TEXTURA	ORDEM1	SUBORDEM1	ORDEM2	Escala de Vulnerabilidade	Grau de Vulnerabilidade	Área (km²)	Área (%)
arenosa, média, argilosa, muito argilosa, indiscriminada	LATOSSOLOS	VERMELHO-AMARELOS	ARGISSOLOS, GLEISSOLOS, PLINTOSSOLOS	1	Estável	9448,04	22,85
arenosa, média, argilosa, muito argilosa, indiscriminada	ARGISSOLOS	VERMELHO-AMARELOS	CAMBISSOLOS, ARGISSOLOS, NEOSSOLOS, LATOSSOLOS	2	Medianamente Estável/Vulnerável	27276,00	65,98
arenosa, média, argilosa, muito argilosa, indiscriminada	NEOSSOLOS	QUARTZARENICOS, LITOLICOS	PLINTOSSOLOS, ARGISSOLOS	3	Vulnerável	4614,17	11,1641

Fonte: Autor (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Figura 2.4 – Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do rio Itacaiúnas.

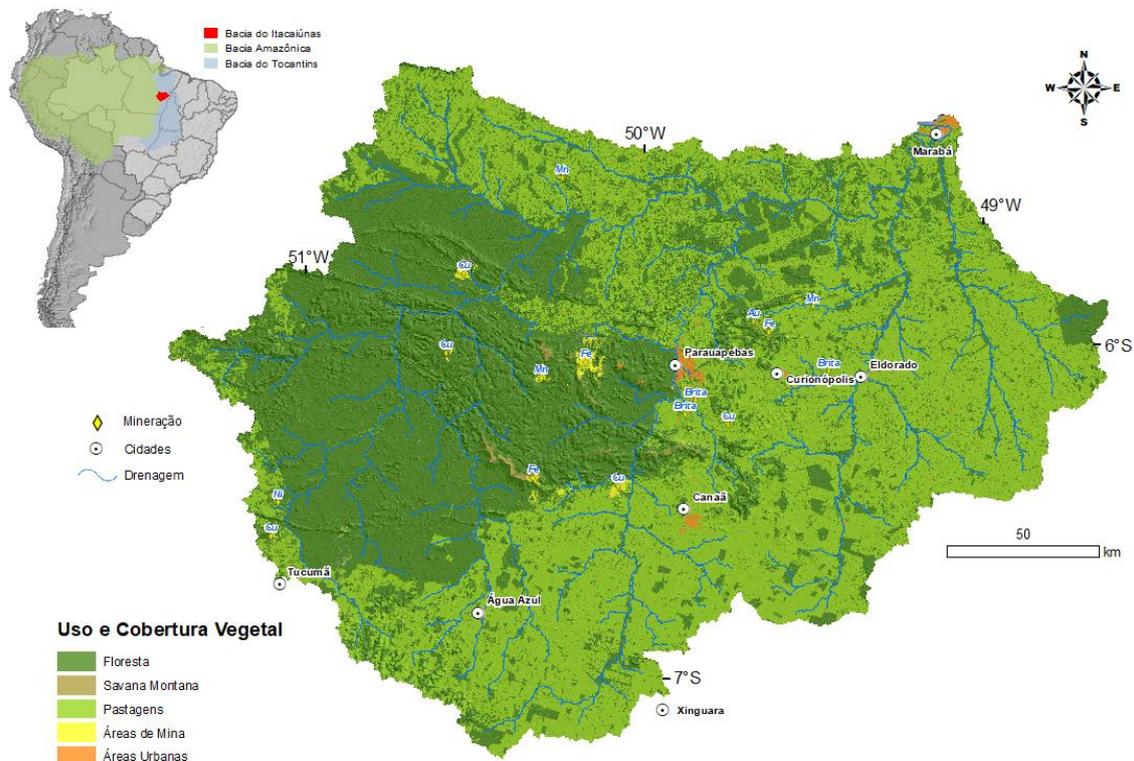


Fonte: Autor (adaptado de EMBRAPA, 2013; CPRM, 2021; IBGE, 2021)

2.2.6 Índices da Vulnerabilidade ao Uso e Cobertura Vegetal da BHRI

Os dados referentes às mudanças no uso e cobertura da vegetação da BHRI, utilizados na avaliação da vulnerabilidade ao uso e cobertura vegetal, são oriundos dos trabalhos realizados por Souza-Filho et al. (2015, 2018), que mostraram a evolução dessas mudanças para as últimas 4 décadas e Nunes et al. (2019) que detalham os atuais usos e cobertura vegetal primária e secundária presentes. Estes foram espacializados e atualizados a partir do mapa de uso e cobertura solo da BHRI (NUNES et al., 2019) e representados aqui pelo mapa de uso e cobertura vegetal (Figura 2.5). Conforme a metodologia adotada (Crepani, et al., 2001), a densidade de cobertura vegetal é o parâmetro a ser obtido do mapa de uso e cobertura vegetal, ou seja, é o fator de proteção contra os processos erosivos. Para as altas densidades na escala de vulnerabilidade atribui-se valores da estabilidade (1,0), para as intermediárias (2,0) e para as baixas densidades valores próximos da vulnerabilidade (3,0). A Tabela 2.6 apresenta as unidades de uso e cobertura vegetal e os índices de vulnerabilidade adotados e suas respectivas áreas de ocupação.

Figura 2.5 – A Bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), seu uso e cobertura vegetal atual.



Fonte: Autor (adaptado e atualizado de Nunes et al., 2019).

Tabela 2.6 – Unidades de Uso e Cobertura Vegetal

DESCRICAÇÃO	Escala de Vulnerabilidade	Grau de Vulnerabilidade	Área (Km ²)	Área (%)
Floresta Ombrófila	1	Estável	20075,92	48,56
Corpos d'água	1		110,83	0,27
Pastagem	2,8	Vulnerável	20800,18	50,3
Savana Montana/Canga Metalófila	3		79,11	0,2
Áreas de Mineração	3		130,44	0,32
Áreas Urbanas	3		145,8	0,35

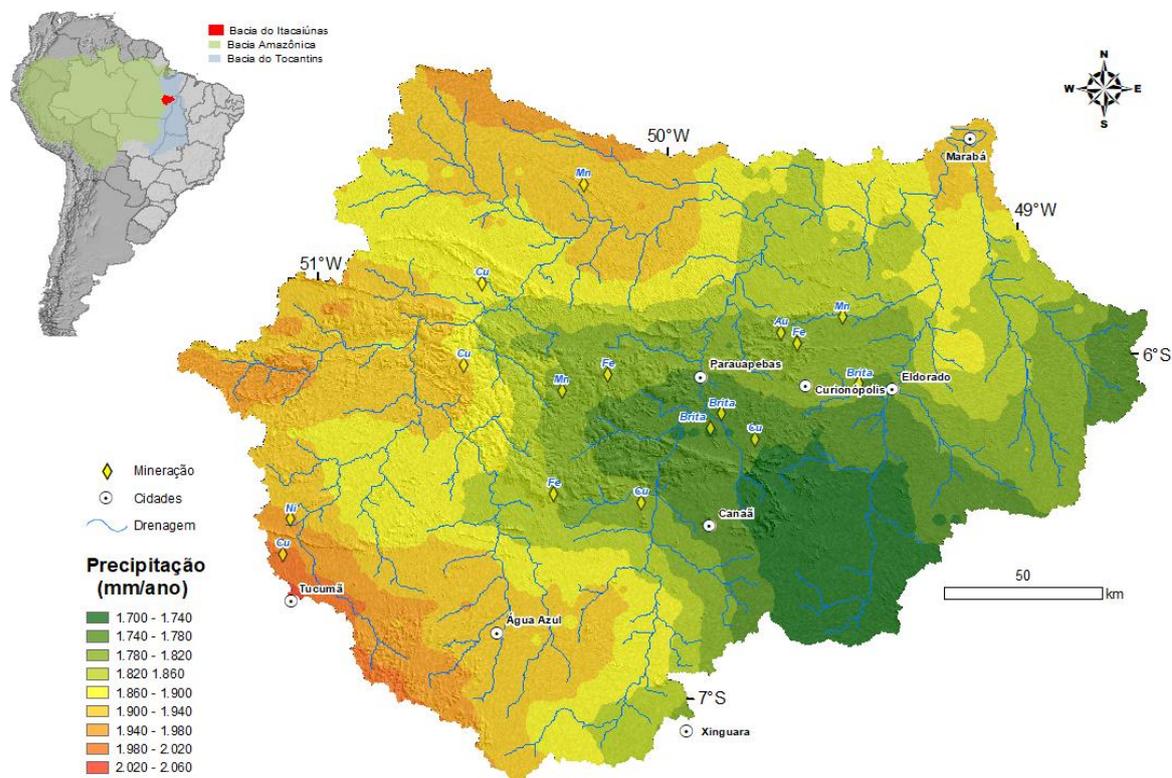
Fonte: Autor (Adaptado de Crepani et al., 2001).

2.2.7 Índices da Vulnerabilidade ao Clima da BHRI

Os dados relacionados ao clima, baseado na pluviosidade média (mensal e anual), foram adquiridos da base de dados do CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations), onde foram obtidas as informações pluviométricas que cobriram uma escala temporal de 41 anos (período de 1981 a 2021) e distribuídas ao longo da bacia em uma resolução espacial de 0,05° (aproximadamente a cada 5,55 km). Para cada ponto de referência (2977 pontos), foi calculada a média da precipitação média anual para o período temporal obtido, e por fim, a partir desses valores, foi possível realizar a espacialização pelo método Inverse Distance Weighted – IDW (Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Interpolation – IDW) e elaborar o Mapa de Precipitação com a distribuição da média anual (Isoietas de 40 em 40 mm) ao longo da BHRI no software ArcGis 10.8 (Figura 2.6).

O passo seguinte para elaboração do mapa de vulnerabilidade do clima (Figura 2.15), seguindo a metodologia de Crepani et al. (2001), é realizar o cálculo dos valores das intensidades pluviométricas ao longo da BHRI, que foi obtido dividindo-se o valor da pluviosidade média anual (em mm) pela duração do período chuvoso (em meses), que de acordo com Moraes et al., (2005) são 7 meses, ocorrendo de novembro a maio com uma precipitação média anual de aproximadamente 1.500 mm, para em seguida atribuir o valor correspondente da escala de vulnerabilidade erosiva a chuva, constantes na Tabela 2.7.

Figura 2.6 – Mapa de precipitação média anual da BHRI



Fonte: Autor.

Tabela 2.7 – Parâmetros Climatológicos e de vulnerabilidade ao Clima da BHRI

Varição da Precipitação Média Anual (mm/ano)	Duração do Período Chuvoso (meses)	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Escala de Vulnerabilidade	Classe de Vulnerabilidade
1700 - 1750	7	243 - 250	1,8	Mediamente Estável/Vulnerável
1750 - 1925		250 - 275	1,9	Mediamente Estável/Vulnerável
1925 - 2060		275 - 294	2,0	Mediamente Estável/Vulnerável

Fonte: Autor (Adaptado de Crepani *et al.*, 2001).

2.2.8 Índices da vulnerabilidade ambiental

Na construção do índice de vulnerabilidade ambiental da BHRI, em ambiente SIG, foi utilizada a metodologia de Ribeiro e Albuquerque (2021) que representa a combinação das variáveis com uso do método booleano de combinação de mapas, onde os planos de informação de formato vetorial foram convertidos para o formato raster (matricial). Esse processo se deu por meio do uso da caixa de ferramentas Arctoolbox – Conversion Tools – To raster – Feature to raster. Após converter todos os Shapefiles em arquivo raster, foi necessário reclassificar os valores/informações da coluna da tabela de atributos selecionada (Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Reclassify).

O modelo foi aplicado individualmente a cada temática que compõem cada unidade territorial básica (de paisagem natural), que recebe um valor final, resultante da média aritmética dos valores individuais segundo a equação empírica (Equação 2) desenvolvida por Crepani et al. (2001):

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5} \quad (2)$$

onde: V = Vulnerabilidade Ambiental; G = vulnerabilidade Geológica; R = vulnerabilidade Geomorfológica; S = vulnerabilidade Pedológica; Vg = vulnerabilidade ao Uso e cobertura do solo ; C = vulnerabilidade ao Clima.

Para combinar as variáveis e criar o mapa de vulnerabilidade ambiental por meio da caixa de ferramentas (Arctoolbox – Spatial Analyst Tools – Raster Calculator), na opção Layers aparecem todas as variáveis disponíveis. Nesta etapa, cada uma das variáveis possuem os graus de vulnerabilidade acompanhados de seus valores numéricos de 1 a 3 (1,0 -1,3 - Estável; 1,4 – 1,7- Moderadamente Estável; 1,8 – 2,2 – Medianamente Estável/Vulnerável; 2,3 – 2,6 - Moderadamente Vulnerável; 2,7 – 3,0 -Vulnerável). Por meio da sobreposição ponderada (Weighted Overlay) dos atributos, com o cruzamento dos arquivos em formato raster, atribuiu-se, além das informações da fragilidade, os valores em porcentagem e km² (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Escala de Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas

Escala de Vulnerabilidade	Grau de Vulnerabilidade	Área (Km²)	Área (%)
1,4 - 1,6	Moderadamente Estável	8961	22
1,7 - 2,1	Medianamente Estável/Vulnerável	28058	68
2,2 - 2,6	Moderadamente Vulnerável	4314	10

Fonte: Autor (Adaptado de Crepani et al., 2001).

Na definição dos critérios para atribuição de valores na escala de vulnerabilidade para cada um dos temas, são considerados os parâmetros capazes de influir decisivamente no desenvolvimento dos processos morfodinâmicos, como o grau de coesão das rochas, a densidade de cobertura vegetal, os índices morfométricos do terreno e a intensidade pluviométrica.

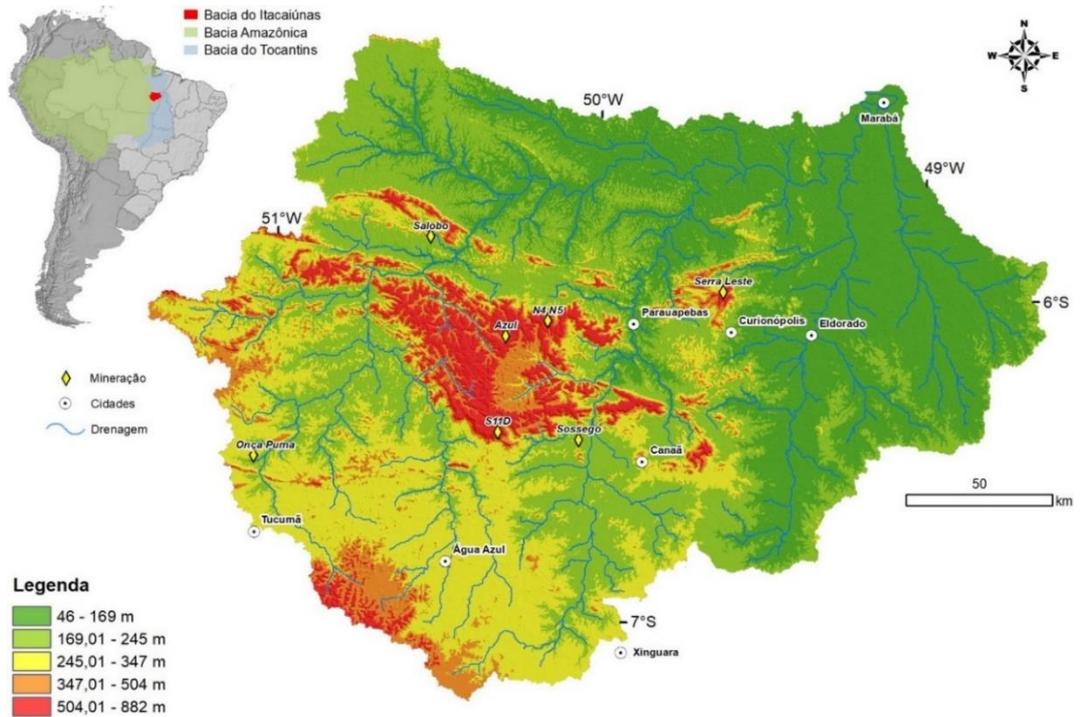
2.3 Resultados e discussões

A BHRI, com uma rede de drenagem do tipo dendrítica, se destaca no contexto ambiental amazônico por apresentar um relevo distinto e único, com altitudes variando de 46 a 882 metros e uma amplitude altimétrica total de 836 metros (Figura 2.7). As maiores altitudes são representadas pelas Serras de Carajás e de São Felix estruturadas em rochas ígneas e metamórficas arqueanas e as menores na região dominada pelo Cinturão Araguaia de rochas metassedimentares. A nascente dos rios Itacaiúnas, Parauapebas e Cateté estão localizadas na porção sudoeste em altitudes acima dos 350 metros. Já as nascentes dos rios Vermelho e Sororó em altitudes inferiores, por volta dos 170 metros. Essas e outras características naturais, deram a mesma uma configuração única, quanto aos aspectos fisiográficos que influenciam de forma incisiva em seus graus de vulnerabilidade ambiental.

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão sintetizados nos mapas de vulnerabilidade elaborados para cada temática abordada, as quais a partir de sua integração por meio da álgebra de mapas, geraram o mapa síntese da vulnerabilidade ambiental da BHRI. Seguindo a proposta de Crepani et al. (2001), buscou-se valorar as características naturais das **unidades de**

paisagem natural - geologia, geomorfologia, solos e clima- e dos **polígonos de intervenção antrópica** - uso e cobertura vegetal, para o ano de 2019, possibilitando assim, uma visão ampla e integrada da vulnerabilidade ambiental da BHRI.

Figura 2.7 - Mapa Hipsométrico da BHRI



Fonte: Autor.

2.3.1 Vulnerabilidade Geológica

A BHRI por possuir aproximadamente 70% da sua área constituída por rochas ígneas plutônicas (granitos, granodioritos, etc.) e rochas vulcânicas e metavulcano-sedimentares das províncias Bacajá e Carajás, rochas essas muito coesas (resistentes), onde geologicamente predomina o processo de formação de solos (pedogênese) e com isso uma maior estabilidade aos processos erosivos (morfogênese), evidenciados pelas áreas mais estáveis no diagnóstico da vulnerabilidade realizado.

No mapa de vulnerabilidade geológica, estas áreas (Figura 2.8), cobrem toda a porção centro-norte-noroeste e sul-sudoeste da BHRI, com grau de vulnerabilidade de **estável** (escala de 1 a 1,2), dominadas pelos Granitos e Granitóides, Rochas metassedimentares e Ortogranulitos e granulitos félsicos e máficos diversos a **moderadamente estável** (na escala de

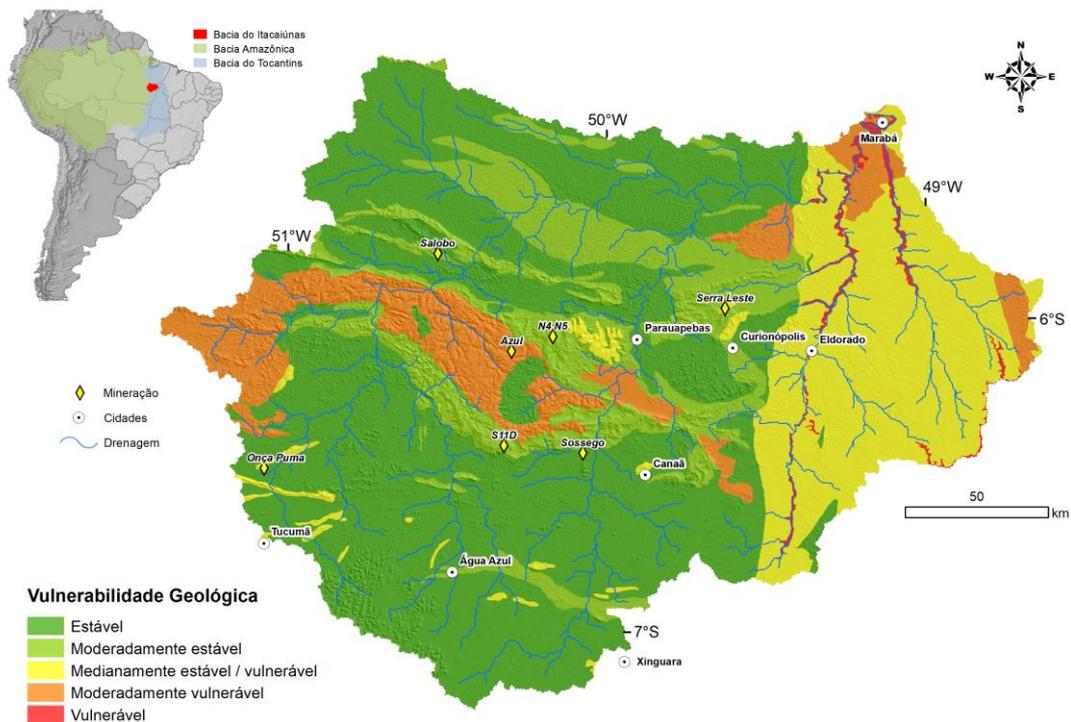
1,5 e 1,6), onde predominam as seqüências metavulcano-sedimentares, rochas metamórficas da Formação Tapirapé, Greenstone Belts e granulitos máficos.

Tem-se por volta de 20% da área onde o grau de vulnerabilidade que domina é o **medianamente estável/vulnerável** (porção leste da BHRI), representados principalmente pelas rochas do Cinturão Araguaia são constituídos de rochas máficas-ultramáficas (diabásios, dunitos, gabro, metabasaltos, etc.), Greenstone Belts (formação ferrífera bandadas – BIFs) e metassedimentares (Clorita xisto, Quartzo xisto, Metasiltito).

As áreas com grau de vulnerabilidade **moderada** se estendem pela porção central da BHRI representada pela Província de Carajás e em porções a leste e nordeste do Cinturão Araguaia, onde dominam rochas sedimentares (arenitos, conglomerados e siltitos) mais friáveis e com maior vulnerabilidade a erosão.

As áreas geologicamente **vulneráveis** da BHRI se restringem as áreas de depósitos sedimentares inconsolidados representados pelos aluviões e planícies de inundação das principais drenagens e correspondem a menos de 1% da área da bacia.

Figura 2.8 – Mapa de Vulnerabilidade Geológica da BHRI



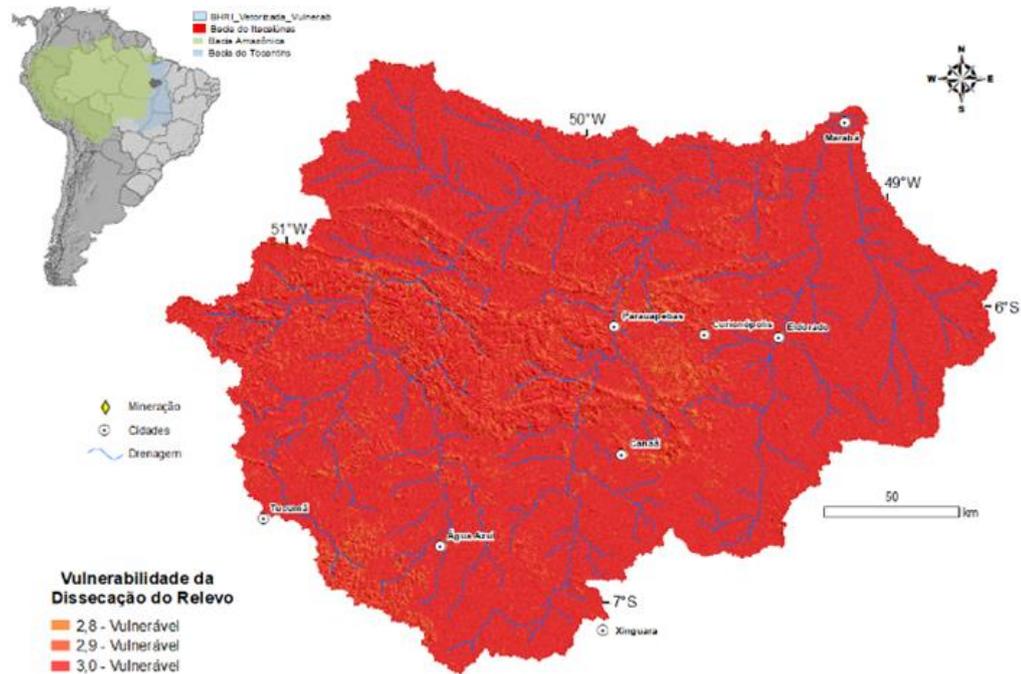
Fonte: Autor.

2.3.2 Vulnerabilidade Geomorfológica

O resultado da avaliação da **vulnerabilidade a Amplitude Interfluvial** (dissecação do relevo /dissecação horizontal) apresentada na Figura 2.9, mostrou que a BHRI, possui um alto grau de vulnerabilidade, com amplitudes de interflúvios pequenos cujos valores variam de 500 – 750 m (menos de 1%) , 250 – 500 m (9%) e menores que 250 m (representando 90% da área), ou seja, a bacia, de uma forma geral, é altamente dissecada, reflexo da evolução do relevo e de uma geologia que favorece o escoamento superficial, os processos erosivos e a morfogênese.

No mapa de **vulnerabilidade a amplitude altimétrica** (Figura 2.10) ou dissecação vertical, se torna nítida a influência da amplitude altimétrica e com isso a identificação das áreas onde o grau de vulnerabilidade é maior ou menor. Apesar de uma grande amplitude altimétrica total com 836 metros (Figura 2.6), a bacia possui 70% de sua área com amplitudes inferiores a 48,5 metros onde o relevo se apresenta de modo geral plano a suavemente ondulado e é caracterizado pelas unidades geomorfológicas da Depressão do médio e baixo Araguaia, Patamar Dissecado do Capim-Moju, Depressão Bacajá, Depressão do médio Xingu e as Planícies e Terraços Fluviais, com grau de vulnerabilidade **estável** e somando-se a essas áreas à aproximadamente 10%, onde as amplitudes variam de 48,5 a 84,5 metros com grau **moderadamente estável**. Por sua vez, as áreas com grau **medianamente estável/vulnerável**, estão disseminadas por toda a bacia, e representam aproximadamente 5,5% com amplitude entre 84,5 a 132 metros, com relevo ondulado ligados principalmente as unidades dos Planaltos Residuais do Sul do Pará e as Serras do Carajás e São Félix. As áreas com amplitude altimétrica entre 132 a 170 metros correspondem as áreas **moderadamente vulneráveis** e tem pouca representatividade com 3,3% de área, com isso à uma área restante de 11,4% onde as maiores vulnerabilidades da bacia, são retratadas pelo relevo montanhoso a fortemente montanhoso da BHRI, constituídas pelas encostas e topos das unidades das Serras dos Carajás e Serras de São Félix-Antonhão-Seringa.

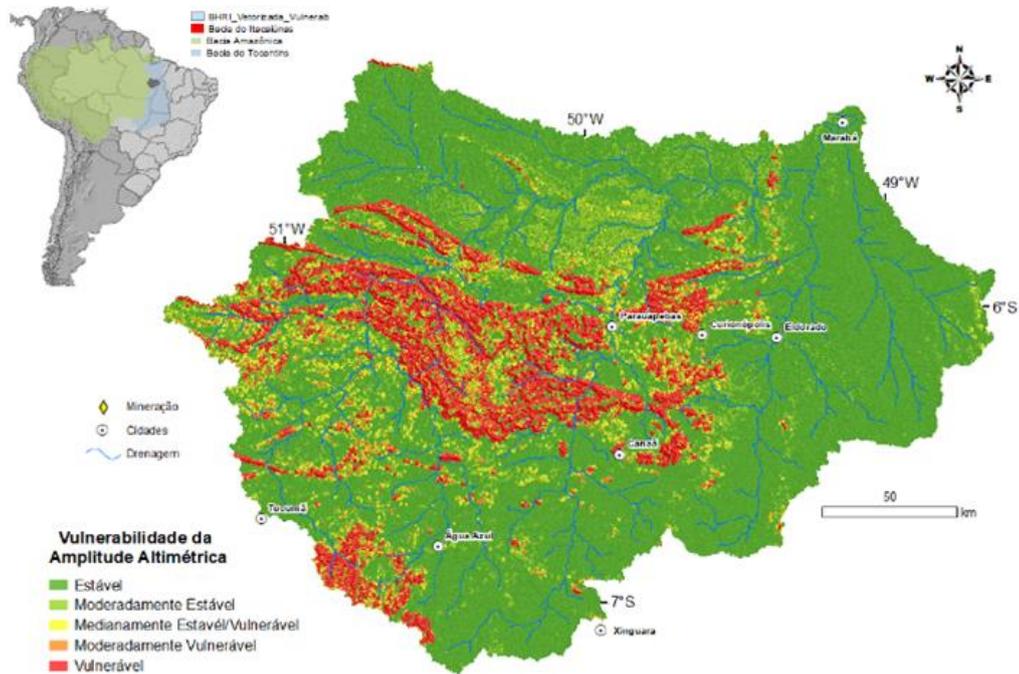
Figura 2.9 – Mapa de Vulnerabilidade a Amplitude Interfluvial (Intensidade da Dissecação).



Fonte: Autor.

O mapa de **vulnerabilidade à declividade** (Figura 2.11), expressa o comportamento do relevo quanto aos valores dos índices adotados pela metodologia utilizada. As áreas **estáveis** de certa forma dominam a paisagem da bacia e cobrem uma área de aproximadamente 24.000 km² (58% da bacia), com declividade variando de 0 a 10,3% (0 a 5,9°), onde tem-se o predomínio de um relevo plano a suavemente ondulado, distribuídos ao longo das planícies fluviais e por quase todas as unidades geomorfológicas, incluindo os topos das Serras dos Carajás. As áreas **moderadamente estáveis**, cuja declividade está entre 10,3 a 19,8% (6 – 11,2°), representam 25% da área da bacia, formados por relevos ondulados contíguos as áreas mais planas. As áreas **medianamente estável/vulnerável** onde o relevo torna-se fortemente ondulado e declividade média entre 20 a 32% (11 a 18°), cobrem aproximadamente 12% da bacia. Já as áreas **moderadamente** (4,6% da área) e **vulneráveis** (menor que 1%), são representadas pelas áreas de topos em crista e encostas das Serras dos Carajás, Serras de São Félix-Antonhão-Seringa e dos Planaltos Residuais do sul do Pará, com declividade de relevo alta 32 a 42% (18 – 23°) a muito alta (>50°), identificadas como relevo montanhoso a fortemente montanhoso.

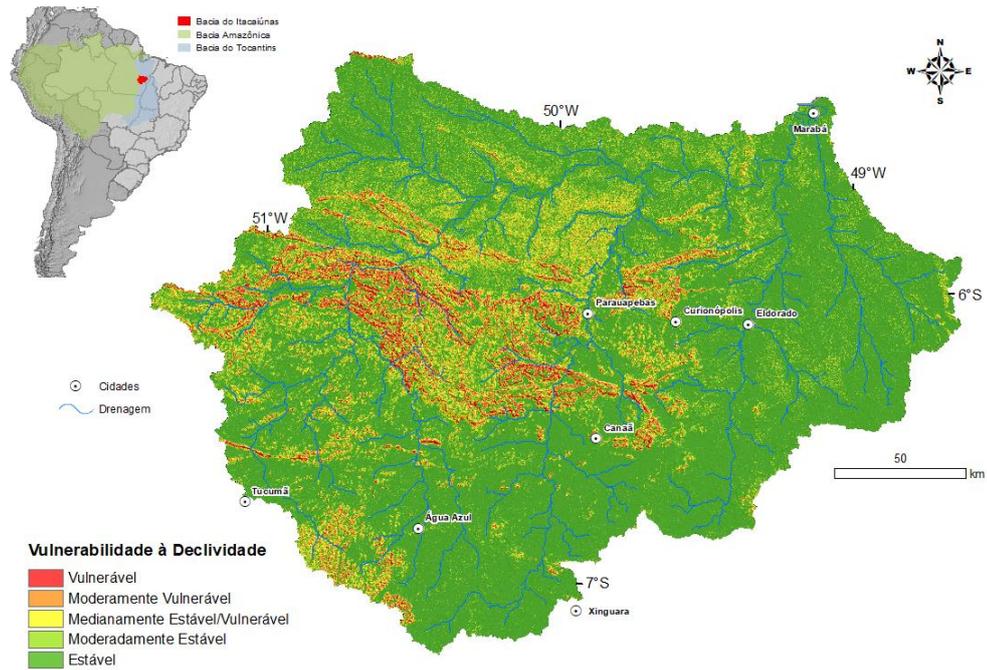
Figura 2.10 – Mapa de Vulnerabilidade à Amplitude Altimétrica.



Fonte: Autor.

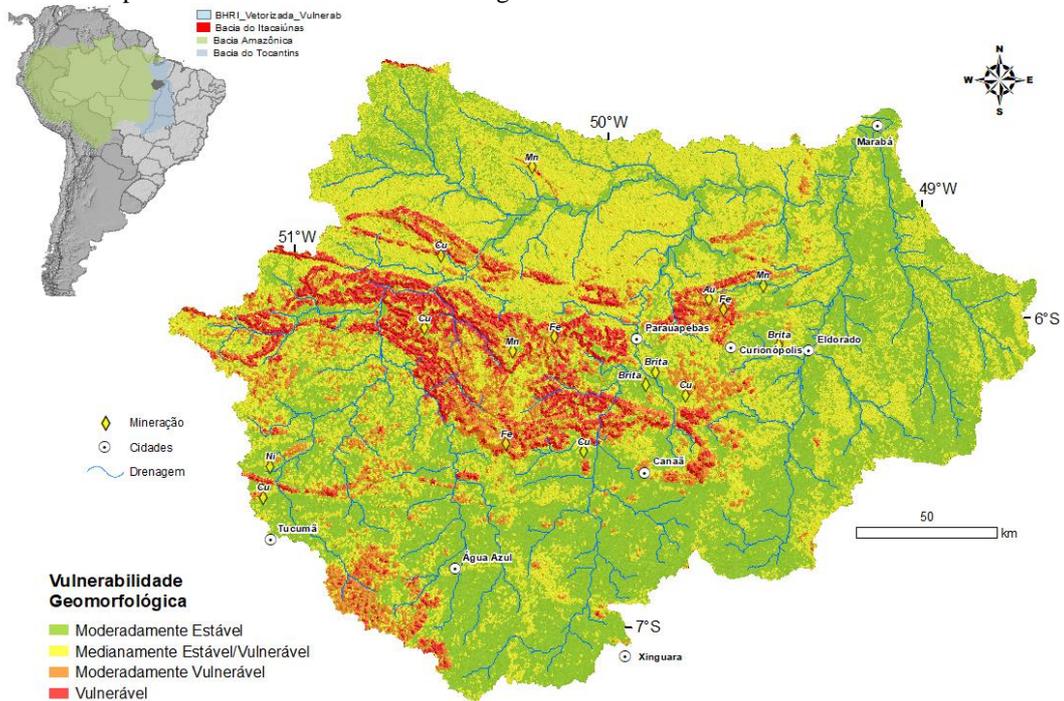
A vulnerabilidade geomorfológica da BHRI (Figura 2.12) reflete a interação média dos três índices morfométricos discutidos anteriormente, evidenciando que a influência da alta vulnerabilidade a dissecação se sobressaiu e com isso a análise não identificou nenhuma área estável. Áreas com grau **moderadamente estáveis**, ocupam 34% da área da bacia, dominando as áreas mais planas a suavemente onduladas, de muito baixa a baixa declividade, abrangendo as mesmas unidades geomorfológicas estáveis quanto a amplitude altimétrica e a declividade. As áreas **medianamente estáveis** do relevo, representam aproximadamente 50% da bacia, dominam a porção norte caracterizada pela Depressão do Bacajá e de forma mais dispersa, nas porções mais a leste dominada pela Depressão do Médio a Baixo Araguaia e a porção centro-sul da bacia. As áreas **moderadamente vulneráveis** (9,2% de área) a **vulneráveis** (7,7%) estão concentradas nas áreas das Serras dos Carajás, de São Félix e dos Planaltos Residuais.

Figura 2.11 – Mapa de Vulnerabilidade à declividade do relevo.



Fonte: Autor.

Figura 2.12 - Mapa de Vulnerabilidade Geomorfológica



Fonte: Autor.

Dessa forma, os resultados obtidos permitem dizer que as características geomorfológicas da BHRI contribuem consideravelmente para a atividade pecuária – fator

determinante na região sudeste do estado do Pará – principalmente pelas baixas declividades (0-6%) e baixas distâncias entre os canais fluviais que apresentam água disponível para dessedentação animal (em 90% da área), de Amplitude Interfluvial inferior à 250 metros, além de amplitudes altimétricas inferiores a 58 metros. De acordo com Rodrigues e Leite (2021) estas são distâncias pequenas quando consideradas a prevalência de grandes e médias propriedades rurais. São características que garantem baixa demanda por investimentos em técnicas de manejo, tais como, curvas de nível e maquinário agrícola.

2.3.3 Vulnerabilidade Pedológica

A Figura 2.13 apresenta o mapa de vulnerabilidade pedológica da BHRI resultante da valoração atribuída aos tipos de solos dominantes na área de estudo. As três classes de solos presentes na área são: Latossolos Vermelhos-Amarelos Distróficos, os Argissolos Vermelhos-Amarelos Distróficos e os Neossolos Litólicos Distróficos e Neossolos Quartzarênicos Órticos.

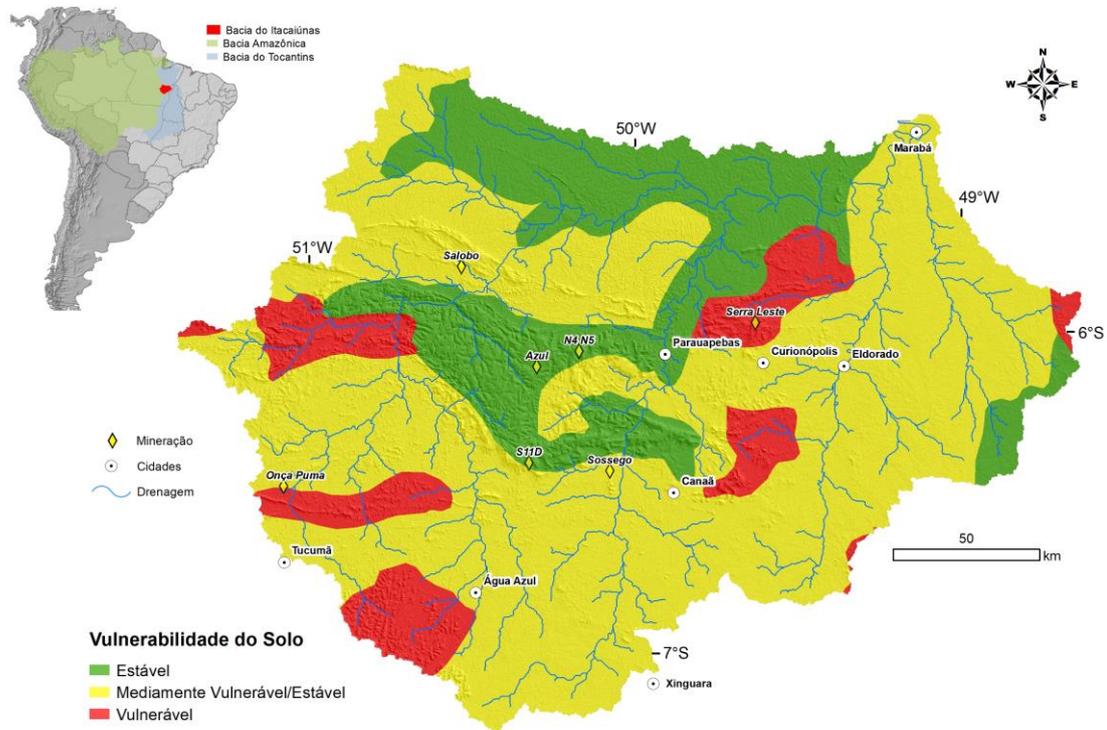
Os **solos estáveis** que ocorrem na BHRI, abrangem uma área de aproximadamente 9500 km² (cerca de 23% da bacia), dominam a porção norte, ocorrem sobre as rochas do Domínio Bacajá onde desenvolveram solos de textura muito argilosa a argilosa e o relevo da Depressão do Bacajá. Seguindo o interflúvio do rio Parauapebas com solos também muito argilosos a argilosos e cobrindo grande parte das Serras dos Carajás onde desenvolveram um solo de textura média. São considerados solos estáveis aos processos de perda de solo, pois são bem desenvolvidos, com grande profundidade, elevada porosidade e avançado grau de intemperismo (KER, 1997; MATIAS et al., 2009).

Os **medianamente estáveis**, são representados pelos argissolos que predominam na área em estudo, estendendo-se por toda a bacia, com uma área de 23.300 km² (66%), são solos de textura muito argilosa a argilosa, presentes em todos os domínios geológicos e desenvolvidos em grande parte nos relevos planos a ondulados, dominam nas sub-bacias dos rios Vermelho e Sororó.

Os **solos vulneráveis**, ocorrem dispersos na BHRI compondo uma área de aproximadamente 4600 km² (11%) formados por neossolos litólicos e quartzarênicos, solos de texturas indiscriminadas (onde são observados muitos afloramentos rochosos) a arenosas, cobrindo as áreas das Serras de São Félix (Greenstone Belts Mesoarqueanos) e grande parte

dos Planaltos Residuais do Sul do Pará (embasados em granitos anorogênicos paleoproterozóicos).

Figura 2.13 - Mapa de Vulnerabilidade Pedológica



Fonte: Autor.

2.3.4 Vulnerabilidade ao Uso e Cobertura Vegetal

A análise da perda de solo está baseada na cobertura que a vegetação e a atividade antrópica proporcionam ao solo (MOTA; VALADARES, 2011). A avaliação da vulnerabilidade quanto ao Uso e Cobertura Vegetal pode ser influenciada por diversos fatores econômicos, sociais, culturais e ambientais, dessa forma, ao analisar a dinâmica de ocupação do espaço na BHRI, destaca-se a relevância do desenvolvimento da atividade pecuária, minerária e de infraestrutura urbana. Conforme já abordado por Souza-Filho et al. (2015, 2016, 2018), Nunes et al. (2019) e Santos et al. (2020), para o estabelecimento dessas atividades, ocorreu um intenso processo de conversão da vegetação nativa de floresta em pastagens plantadas com capins tropicais, alterando a dinâmica espacial. A EMBRAPA (2016) em seu

trabalho Mapas de Solos e Aptidão Agrícola das Áreas Alteradas do Estado do Pará definiram como áreas boas para a prática da pecuária. As formas de uso e cobertura vegetal da BHRI, identificados em imagens de satélite e reconhecidas em campo em 2019 (NUNES et al., 2019), podem ser observadas na Figura 2.5 e Tabela 2.6 com cinco classes. Essas classes, após a aplicação da metodologia de valoração da vulnerabilidade, foram reduzidas a duas com grau de vulnerabilidade distintas como pode ser observado na Figura 2.14.

As áreas vulneráveis identificadas e espacializadas (pastagens, savana montana/canga metalófila, áreas de mineração e urbanas), correspondem a 51,2% da extensão da BHRI. As pastagens com 20.800 km² (50,3%), estão espacialmente distribuídas por todas as regiões da bacia, ocupando as áreas de revelo plano a ondulado moderadamente estáveis, onde afloram as unidades geomorfológicas das Depressões do Médio e Baixo Araguaia na porção leste, do Médio Xingu a sul, e a do Bacajá no norte, grande parte das áreas do Planaltos Residuais do Sul do Pará no extremo sul da área, destaca-se que são nessas áreas que as nascentes das principais drenagens da região estão instaladas, além do Patamar Dissecado do Capim-Moju no baixo curso dos rios Itacaiúnas, Vermelho e Sororó. As demais áreas vulneráveis com menos de 1% da bacia, são os platôs das Serras de Carajás constituídos pela Savana Montana (também descrita como Refúgio vegetacional Montano e mais recentemente classificado por Zappi et al. (2017) como Canga metalófila) e as áreas de mineração industrial que ocupam partes dessa unidade, além das áreas urbanas dos municípios de Parauapebas, Marabá, Curionópolis, Eldorado dos Carajás, Água Azul do Norte e Tucumã.

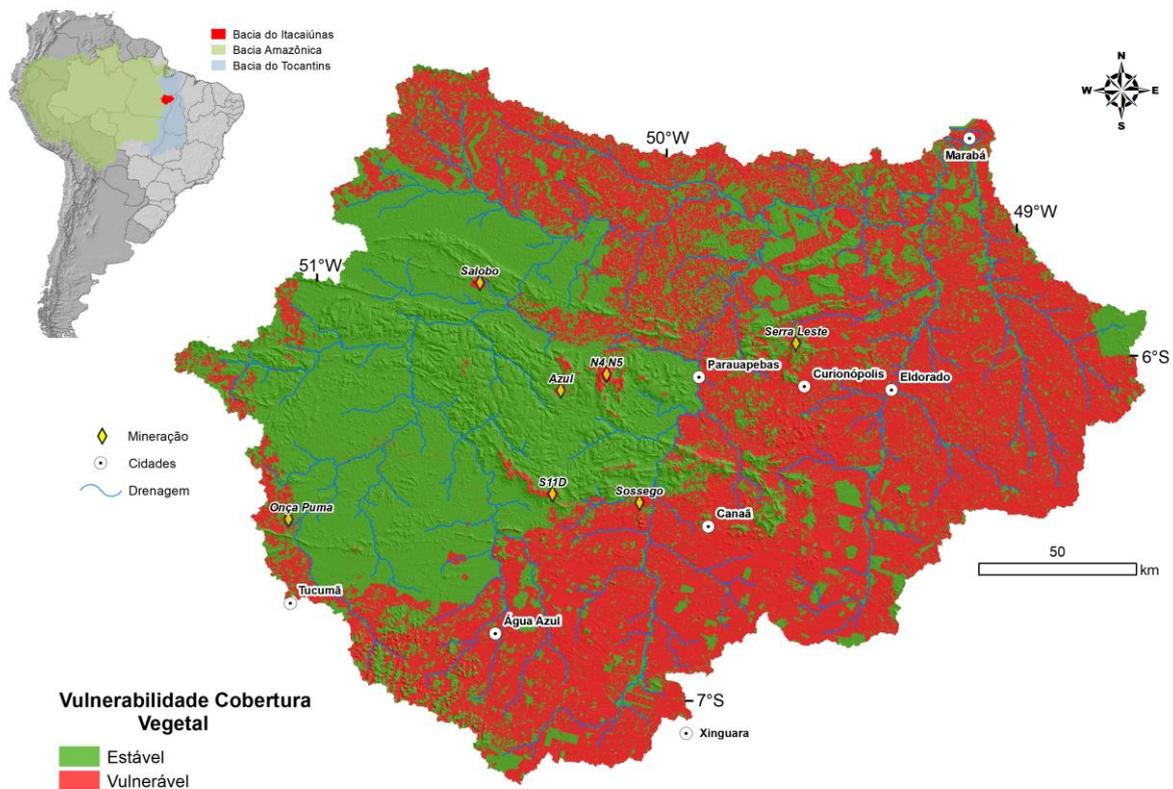
As áreas estáveis, são as Florestas Ombrófilas Densas Submontana, as quais foram reduzidas para 48,6% (20.076 km²), estão ocupando áreas de revelo vulneráveis, mas de geologia e solos mais estáveis. As áreas de florestas ainda preservadas de forma contínua, se restringem as áreas representadas pelo denominado Mosaico de Carajás, composto por diversas unidades de conservação e terras indígenas, contidas nas unidades das Serras de Carajás, Planaltos Residuais do Sul do Pará e em partes da Depressão do Bacajá e Médio Xingu. O restante está disperso ao longo da bacia como ilhas de florestas, envoltas por extensas áreas de pastagens (Figura 2.5).

De acordo com Gomes et al. (2021), a preservação das florestas é crucial em decorrência da produção e depósito de material orgânico que promove vantagens ao solo como maior resistência aos processos erosivos, proteção dos impactos das gotas que geram o desprendimento sedimentar e atuam como uma barreira física diminuindo a velocidade do

escoamento superficial da água, principalmente em declives acentuados, inibindo a ocorrência de enxurradas, retardando o transporte de partículas de sedimentos.

Assim como ocorrem em outras áreas contidas no Arco de Desmatamento da Amazônia, as classes de uso mapeadas em 2019, por Nunes et al. (2019) permaneceram as mesmas, indicando não ter havido mudanças nas atividades produtivas, mantendo-se a pecuária bovina extensiva e a mineração como atividades econômicas principais e moduladores socioeconômicos da paisagem da BHRI.

Figura 2.14 - Mapa de Vulnerabilidade ao Uso e Cobertura Vegetal



Fonte: Autor.

2.3.5 Vulnerabilidade ao Clima

De acordo com Ribeiro e Albuquerque (2021), a variável climática, baseada no comportamento pluviométrico, é considerada fundamental para compreender as análises que envolvem a vulnerabilidade do ambiente. Nesse sentido, o comportamento pluviométrico da BHRI foi incluído como variável para alcançar a vulnerabilidade ao clima, pois segundo Bigarella (2003), a água atua nos processos de intemperismo, na erosão, no transporte e na deposição de sedimentos, sendo a pluviosidade um importante agente externo que ocasiona mudanças morfológicas na paisagem.

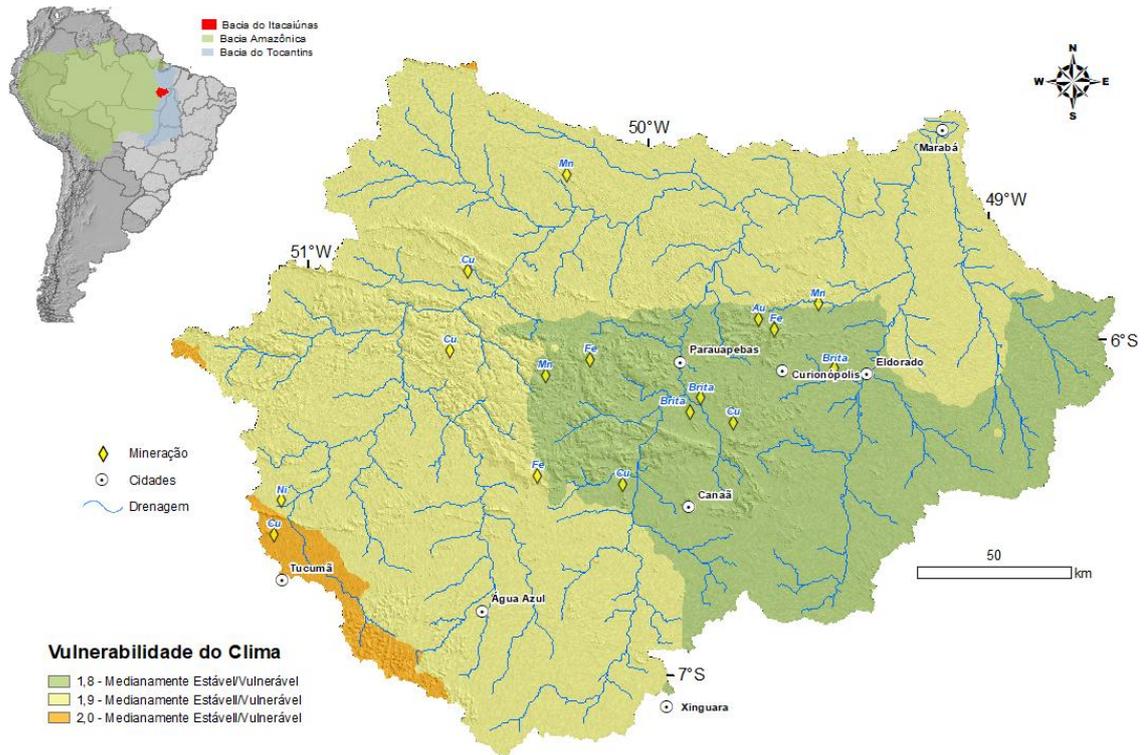
O clima controla o intemperismo diretamente, por meio da precipitação pluviométrica e da temperatura de uma região, e também indiretamente pelos tipos de vegetação que poderão cobrir a paisagem (Crepani et al., 2001).

Considerando que a chuva é o principal agente ativo que intervém na erosão, buscou-se selecionar informações do CHIRPS disponíveis por um período que possibilitou uma melhor avaliação pluviométrica da bacia com dados médios anuais dos últimos 40 anos.

Conforme observado na Figura 2.6 e Tabela 2.7 a distribuição da precipitação média anual varia de 1700 a 2060 mm na BHRI, de leste para oeste. Com menores precipitações médias na região sudeste e leste (1700 – 1750mm) e maiores na porção sudoeste e oeste (1925 – 2060mm) da bacia.

A intensidade pluviométrica que é o parâmetro utilizado na análise da vulnerabilidade ao clima, mostra em seu mapa de vulnerabilidade (Figura 2.15) que a BHRI apresenta em sua totalidade um grau de **vulnerabilidade mediano**, com variações de 1,8, 1,9 a 2,0 na escala de vulnerabilidade adotada nesse estudo. A variação observada corrobora com a distribuição da precipitação média anual. Onde na porção centro-sudeste são observadas as menores intensidades (243-250mm), seguida de intensidades um pouco maiores (250-275mm) em uma grande porção da bacia e em uma pequena área na região sudoeste as maiores intensidades (275-294mm).

Figura 2.15 - Mapa de Vulnerabilidade ao Clima

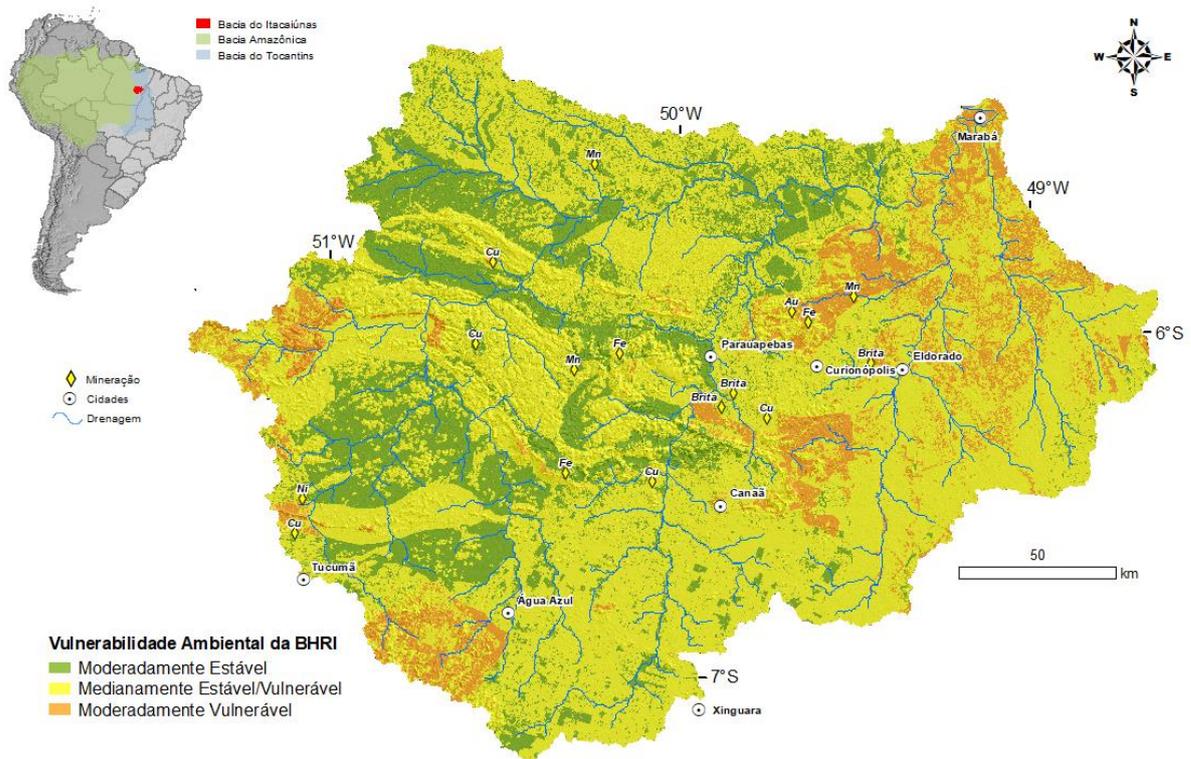


Fonte: Autor.

2.3.6 Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas

O mapa de Vulnerabilidade Ambiental da BHRI (Figura 2.16) e a Tabela 2.8, sintetizam os resultados obtidos por esse estudo para cada índice (variáveis) de maneira inter-relacionada, quantificadas a partir do cruzamento de informações referentes a geologia, geomorfologia, solos, uso e cobertura vegetal e clima. O resultado da álgebra de mapas derivou em três graus de vulnerabilidade ambiental para BHRI: Moderadamente estável, Medianamente Estável/Vulnerável e Moderadamente Vulnerável.

Figura 2.16 - Mapa de Vulnerabilidade Ambiental da BHRI



Fonte: Autor.

As áreas com grau **moderadamente estável** incluem valores do grau de vulnerabilidade entre 1,4 até 1,6 cobrindo uma área de 8961 km² (22%) da BHRI. Nestas, destacam-se áreas onde a geologia e a vegetação são estáveis, e os índices para solos, geomorfologia e clima apresentaram graus medianamente estáveis/vulneráveis. Os índices destacados correspondem àquelas áreas onde a geologia é constituída por rochas cristalinas do Domínio Bacajá e da Província Carajás, a vegetação pelas áreas de florestas preservadas da FLONA e REBIO do Tapirapé e pela terra indígena Chicrin-Cateté, confirmando a importância dessas unidades na preservação e manutenção do ambiente. As demais ocorrências ao longo da bacia, estão restritas aos setores onde a vegetação ainda é estável (fragmentos florestais). Esse resultado, evidencia o papel das áreas vegetadas no ciclo hidrológico, atuando como barreiras naturais que provocam o retardamento da movimentação da água da chuva em direção aos rios, por meio do processo de interceptação, infiltração, absorção, transpiração e percolação, minimizando, desta forma, os efeitos erosivos, a lixiviação de nutrientes do solo e o assoreamento dos corpos d'água (LORENZON, et al., 2012).

As áreas com grau **medianamente estável/vulnerável** incluem valores do grau de vulnerabilidade entre 1,7 até 2,1, são os mais representativos cobrindo uma área de 28.058 Km² (68%) da BHRI. Estão disseminados por toda a bacia, tanto em áreas onde a geologia, os solos e a vegetação apresentam áreas estáveis ou não. O fator importante a ser considerado é a geomorfologia, pois nas áreas onde a geologia e a vegetação são mais vulneráveis, mas o relevo é plano a suavemente ondulado (sub-bacias dos rios Vermelho e Sororó) e mais estável aos processos erosivos. Outra área que merece ser destacada como de vulnerabilidade mediana é a Serra dos Carajás e suas encostas, onde apesar do relevo montanhoso e de alta declividade e alta energia, é coberta por uma vegetação de floresta pristina que proporciona uma proteção que se sobressai dando essa estabilidade. Assim como evidenciado por Freitas (2021), na BHRI a declividade, apesar de sua importância como fator atuante no condicionamento do fluxo, não teve influência significativa na vulnerabilidade, mostrando sim, uma correlação negativa fraca com a vulnerabilidade. Isso deve-se, principalmente, ao fato de que, as áreas de declives mais acentuados, estarem menos sujeitas às interferências antrópicas, possuindo, em decorrência disto, melhores índices de cobertura vegetal que atuam na proteção dos solos.

As áreas com grau **moderadamente vulnerável** incluem valores do grau de vulnerabilidade entre 2,2 até 2,6, são os menos representativos cobrindo uma área de 4314 km² (10%) da BHRI. Esta se destaca por suas ocorrências estarem associadas as áreas que apresentaram maiores vulnerabilidades quanto aos fatores solos e uso e cobertura vegetal e geomorfologia, mas também as vulnerabilidades moderadas a medianas da geologia e clima. Essas áreas possuem forte influência do uso e cobertura vegetal, dos solos e da geomorfologia, destacando as áreas de ocorrência dos solos vulneráveis (Neossolos Litólicos e quartzarênicos), relacionados aos Planaltos Residuais do Sul do Pará e das Serras de Carajás, como também as áreas dominadas pela geologia do Cinturão Araguaia (rochas sedimentares e depósitos quaternários e coberturas lateríticas), drenadas pelos rios Vermelho e Sororó, onde o relevo predominante é plano a levemente ondulado, desenvolvido sobre argissolos e dominado por pastagens.

De acordo com Sá et. al. (2010) Os impactos resultantes da retirada da cobertura vegetal são variados, causando desde o aumento da enxurrada, a diminuição da disponibilidade de água para a produção de biomassa, o aumento do albedo da área e a temperatura do solo, o que propicia a oxidação da sua matéria orgânica e provoca a elevação da temperatura atmosférica, alterando os microclimas locais, além da retirada da proteção natural dos solos às ações dos

processos erosivos que arrastam as pequenas partículas (argila, silte e grânulos orgânicos), tornando-o menos fértil e com menor capacidade de armazenamento de água.

2.4 Conclusões

Os estudos das unidades de paisagem natural deveriam anteceder qualquer uso e ocupação do solo, permitindo, assim, orientar as melhores atividades a serem desenvolvidas na área, e dessa forma evitar ações danosas e maior produtividade, bem como antever possíveis ações corretivas ao uso inadequado do solo.

Os resultados obtidos a partir do mapa síntese da Vulnerabilidade Ambiental da BHRI, indicaram somente três das cinco categorias de graus de vulnerabilidade proposta pela metodologia de Crepani et al. (2001), ou seja, as classes: moderadamente estável representando 22%; a medianamente estável/vulnerável dominando com 68%; e as áreas moderadamente vulneráveis com apenas 10%, não ocorrendo áreas nem totalmente estáveis e nem vulneráveis.

A BHRI apresentou índice mediano de vulnerabilidade dominante, o que representa, pela escala de Tricart um grau intermediário de propensão à erosão. Embora o índice tenha identificado um grau de equilíbrio morfodinâmico no âmbito da bacia como um todo, existem setores em que os processos de morfogênese são intensificados. A análise também revelou que os índices mapeados em grande parte da bacia são considerados favorecedores de processos pedogenéticos. Assim, as características naturais de estabilidade facilitaram a ocupação da bacia, e a dinâmica de ocupação do espaço estabelecida pelo uso antrópico levou em consideração as características do meio natural.

O uso e cobertura vegetal foi o fator de maior impacto nos resultados, pois apresentou duas classes opostas e distintas, a estável com 49% e a vulnerável com 51%. Esses percentuais de áreas vulneráveis estão diretamente relacionados a posição geográfica que a BHRI ocupa na região amazônica, margeada pelo denominado Arco do desmatamento, no qual é intenso o processo de substituição da floresta nativa pela pastagem cuja atividade dominante é agropecuária extensiva. Já as áreas estáveis, vem de uma relação inicialmente improvável (mineração industrial e preservação), mas que proporcionou a BHRI grandes áreas estáveis com a criação e manutenção de várias unidades de conservação que juntas com as terras indígenas do Chicrin-Cateté compõem o mosaico de conservação de Carajás onde as florestas e outras

unidades de vegetação estão preservadas, a soma desses fatores se torna visível nos resultados apresentados.

Em segundo plano tem-se a vulnerabilidade da geologia que apresenta basicamente duas áreas distintas, uma a leste com o Cinturão Araguaia de rochas sedimentares e menos estáveis e no restante da bacia o predomínio de um embasamento de rochas cristalinas e estáveis, representando mais de 51% da área da bacia. Além das áreas localmente vulneráveis associadas província mineral de Carajás, onde estão assentadas as minas industriais legalizadas de extração em minérios de ferro, cobre, manganês, ouro, níquel, entre outras. Que por estarem envolvidas por áreas de florestas e terem um rígido controle ambiental através dos órgãos fiscalizadores, não foram identificadas externamente vulnerabilidades associadas a essas atividades.

As altas declividades associadas a Serra dos Carajás, deveriam ser importantes elementos no processo erosivo do fator geomorfologia da BHRI, contudo, por representarem preferencialmente áreas de floresta preservadas e não exibirem influências de atividades antrópicas, seus prováveis impactos são atenuados e até anulados em muitos casos.

A partir da análise dos dados conclui-se que os resultados obtidos na bacia do rio Itacaiúnas foram grandemente influenciados sequencialmente pelo uso e cobertura vegetal, a geologia, os solos, a geomorfologia e por fim o clima.

Portanto a metodologia aplicada no diagnóstico da vulnerabilidade ambiental da BHRI, mostrou-se eficaz e de fácil aplicação, possibilitando que se possa realizar uma análise integrada dos aspectos físicos e o mapeamento temático, por meio de ferramentas de geoprocessamento, permitindo a elaboração de um produto com caráter de síntese, evidenciando, assim, os níveis de maior ou menor vulnerabilidade ambiental na área estudada. Esta análise adquire considerável relevância, pois sua compreensão propicia o estabelecimento de ações de cunho conservacionista voltada ao desenvolvimento regional, que considere de um lado as potencialidades dos recursos naturais e de outro as vulnerabilidades ambientais dos mesmos.

Além disso, os mapas de vulnerabilidades são um instrumento efetivo para o ordenamento territorial, pois têm a capacidade de indicar os conflitos de uso e direcionar técnicas para a contenção das perdas de solo e, conseqüentemente, reduzir a produção de sedimentos.

REFERÊNCIAS

BOAVENTURA, R. S. Geomorfologia *In*: BRASIL Departamento Nacional da Produção Mineral. **Projeto RADAM Folha SB 2 2 Araguaia e parte da Folha SC 2 2 Tocantins**. Rio de Janeiro, 1974 (Levantamento de Recursos Naturais, 4).

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais. **BDIA - Banco de Informações Ambientais**. Acesso em: 03 de fevereiro de 2022.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

CAVALCANTE, R. B. L.; FERREIRA, D. B. da S.; PONTES, P. R. M.; TEDESCHI, R. G.; COSTA, C. P. W. da; SOUZA, E. B. de. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104879, 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999, 186p.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. Morfologia de bacias de drenagem. **Not. Geomorfológica**, Campinas, 18 (36): 130 – 132, dez. 1978.

COLLARES, E. G. **Avaliação de alterações em rede de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari-SP**. 2000. 2v. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

COLLISCHON, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. Porto Alegre: IPAH. URGRS. 2008.

CREPANI, E. *et al.* Zoneamento ecológico-econômico. *In*: FLORENZANO, T. G. (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 285-318.

CREPANI, E. *et.al.* **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. São José dos Campos: INPE, 2001. 25p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. São José dos Campos: INPE, 1996, 20 p.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001, 103 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

FREITAS, E. G. Análise da vulnerabilidade ambiental do município de feira nova/se através da utilização de produtos de sensoriamento remoto. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM GEOGRAFIA*. 14, 2021, Salvador, **Anais[...]**. ISSN: 2175-8875. Disponível em: [Link://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://editorarealize.com.br/editora/anais/enanpege/2021/61e6c43e16147_18012022104430.pdf](https://editorarealize.com.br/editora/anais/enanpege/2021/61e6c43e16147_18012022104430.pdf). Acesso em 17.05.2022.

GASTALDINI, M. C. C.; MENDONÇA, A. S. F. Conceitos para a avaliação da qualidade da água. *In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Hidrologia aplicada à gestão de bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001, p. 428-451.

GOMES, D. C. *et al.* Impactos climáticos na erosão hídrica do solo para a amazônia ocidental. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 28, abr. 2021. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/73853/43225>>. Acesso em: 13 maio 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.73853>.

GOMES, P. R.; MALHEIROS, T. F. Proposta de análise de indicadores ambientais para apoio na discussão da sustentabilidade. **Revista Brasileira De Gestão E Desenvolvimento Regional**, v. 8 n.2.. <https://doi.org/10.54399/rbgdr.v8i2.671>. 2012.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. *In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (org). Erosão e conservação de solos: conceitos temas e aplicações*. 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. *In: GUERRA, A. J. T; CUNHA, S.B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, (1998). p. 149-210.

LAMBIN, E.F., GEIST, H.J., LEPERS, E. Dynamics of land use and land cover change in tropical regions. **Annu. Rev. Environ. Resour.** 28, 2003. p. 205–241.

LANNA, A. E. L. **Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília, DF: IBAMA. 1995.

LEITE, E. F.; BEREZUK, A. G.; SILVA, C. A.; CARVALHO, E. A. O relevo e o uso da terra da bacia hidrográfica do rio Miranda, MS. *In: LIMA, T. N.; FARIA, R. Q. Ecótono cerrado pantanal [livro eletrônico]: meio ambiente e história natural*. Campina Grande: Editora Amplla, Capítulo 1, p. 12-30, 2021. DOI: [10.51859/amplla.ecp.672.1121-1](https://doi.org/10.51859/amplla.ecp.672.1121-1).

LIMA, H. *et al.* Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. *Rem: Rev. Esc. Minas [online]*. 2007, vol.60, n.3, pp.525-536. ISSN 1807-0353. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672007000300014>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CARVALHO, N. O.; SILVA, E. M. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Brasília, DF: ANEEL: ANA, 2004.

LOBO, F.D.L.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; NOVO, E.; CARLOS, F.M.; BARBOSA, C.C.F., Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI / Sentinel-2 Imagery (2017). **Remote Sens.** 2018, 10, 1178; doi:10.3390/rs10081178.

LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; LEITE, H. G. Precipitação efetiva e interceptação da chuva em um fragmento florestal com diferentes estágios de regeneração. **Revista Árvore**, v.37, n.4, 2013. p.619-627.

MAMEDE, L.; ROSS, J. L. S.; SANTOS, L. M. *In*: BRASIL. Ministério das Minas e Energia Secretaria-Geral **Projeto RADAMBRASIL Folha SC.22 Tocantins**; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1981.

MATULE, E. D.; MACARRINGUE, L. S. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solo no distrito de Boane em Moçambique. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 32, p. 225–235, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-46916.

MENEZES, J. B. de; ARAÚJO, M. do S. B. de; GALVÍNCIO, J. D.; SAMPAIO, E. V. de S. B.; CORRÊA, A. C. DE B. Índice de vulnerabilidade à erosão para uma bacia na mesorregião do São Francisco Pernambucano, a partir das relações entre morfogênese e pedogênese. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v.8, n.2, 2007. <https://doi.org/10.20502/rbg.v8i2.93>

MORAES. B. C. de; COSTA. J. M. N. da; COSTA. A. C. L. da; COSTA. M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônia**. v. 35. n.2. p. 207 – 214. 2005.

MOTA, S.O.; VALLADARES, G.S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. *In*: **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.1, p.39-50, jan./mar. 2011.

NASCIMENTO, W. M.; VILAÇA, M. G. **Bacia hidrográfica**: planejamento e gerenciamento. Três Lagoas: [s.n.], 2008. 20p.

PONTES, P. R. M.; CAVALCANTE, R. B. L.; SAHOO, P. K.; SILVA, R., JR.; SILVA, M. S.; DALL'AGNOL, R.. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. **Journal of Environmental Mangament**, v. 235, 489–499. 2019.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, p. 43-60, 2008.

RAMALHO FILHO, A; BEEK, K. J. K. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 1º Edição. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1995.

RIBEIRO, K. V.; ALBUQUERQUE, E. L.S. Mapeamento da Fragilidade Potencial na Bacia Hidrográfica do Rio Mulato, no Médio Parnaíba Piauiense. **Revista de Geografia**, (Recife) v. 38, n. 3, 2021. DOI: 10.51359/2238-6211.2021.250431.

ROSS, J.L.S. **Geomorfologia ambiente e planejamento**. São Paulo, Contexto. 1996.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. *In: Revista do Departamento de Geografia*, São Paulo, n.8, p.3-74, 1994.

SÁ, I. B.; CUNHA, T. J. F.; TEIXEIRA, A. H. de C.; ANGELOTTI, F.; DRUMOND, M. A. Processos de desertificação no Semiárido brasileiro. *In: SA, Iêdo Bezerra; SILVA, Pedro Carlos Gama da. (ed.). Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 127-158

SALOMÃO, G. N.; DALL'AGNOL, R.; SAHOO, P. K.; FERREIRA JÚNIOR, J. DA S.; SILVA, M. S. da; SOUZA-FILHO, P. W. M. e; BERRÊDO, J. F.; NASCIMENTO JUNIOR, W. da R.; COSTA, M. F. da. Geochemical distribution and threshold values determination of heavy metals in stream water in the sub-basins of Vermelho and Sororó rivers, Itacaiúnas River watershed, Eastern Amazon, Brazil. **Geochim. Bras.** 32, 180–198. 2018. <https://doi.org/10.21715/gb2358-2812.2018322180>.

SANTOS, J. F.; MATLABA, V. J.; SILVA, R. N. P.; SOUZA, A. A. L.; VILARINHO, C. C. V.; ALMEIDA, E. G.; MACHADO, F. F.; BORJA, O. R. P.; DIAS, R. P.; CRUZ, T. L.; PIRES, V. A.; SILVA, Y. Y. F. **Avaliação do potencial para diversificação socioeconômica dos territórios em Canaã dos Carajás, Parauapebas, Curionópolis, Ourilândia do Norte e Tucumã, com vista a prospecção de novos negócios e identificação de potenciais empreendedores**. Belém: ITV, 2020. 211. p.

SANTOS, J. Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil)**. Recife, 205f., il., gráfs, tabs. 2015.

SANTOS, J. Y. G.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M. Perdas de água e solo utilizando chuva simulada em diferentes coberturas superficiais e condições de umidade no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p.217-228. 2012.

SANTOS, J. Y. G.; SILVA, R. M.; CARVALHO NETO, J. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, A. M. Land cover and climate change effects on streamflow and sediment yield: a case study of Tapacurá River basin, Brazil. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 371, p. 189–193. 2015.

SANTOS, J. Y. G.; SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Aplicação do modelo SWAT para a estimativa da produção de sedimentos na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS*, 11., 2014, João Pessoa. **Anais[...]** João Pessoa: ABRH, 2014. p. 1-19.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Projeto Geobank**. 2021. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>. Acesso em: 15 jan. 2021.

SOARES-FILHO, B.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DEL CARMEN VERA DIAZ, M.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L., Voll, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarém-Cuiabá corridor. **Glob. Chang. Biol.** v. 10, p. 745–764. 2004.

SONTER, L. J.; BARRETT, D. J.; MORAN, C. J.; SOARES-FILHO, B. S.; A Land System Science meta-analysis suggests we underestimate intensive land uses in land use change dynamics. **J. Land Use Sci.** 10, p. 191–204. 2013.

SONTER, L. J.; MORAN, C. J.; BARRETT, D. J.; SOARES-FILHO, B. S. Processes of land use change in mining regions. **J. Clean. Prod.**, 84, p. 494–501, 2014.

SOUZA-FILHO, P.; NASCIMENTO, W.; SANTOS, D.; WEBER, E.; SILVA, R.; SIQUEIRA, J.; A GEOBIA Approach for Multitemporal Land-Cover and Land-Use Change Analysis in a Tropical Watershed in the Southeastern Amazon. **Remote Sens.** v. 10, e1683. 2018.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; SOUZA, E. B.; SILVA JÚNIOR, R. O.; NASCIMENTO JR., W. R.; MENDONÇA, B. R. V.; GUIMARÃES, J.T.F.; DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J.O. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **J. Environ. Manage.** v. 167, p. 175–184. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.039>.

TEODORO, V. I. T; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. C.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11 n.1, p. 137-156, 2007.

TOWNSEND, P. A.; HELMERS, D. P.; KINGDON, C. C.; MCNEIL, B. E.; BEURS, K. M. de; ESHLEMAN, K. N., Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976-2006 Landsat time series. **Remote Sens. Environ.** v. 113, p. 62–72. 2009.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977. 91p . (Recursos Naturais e Meio Ambiente).

VESTENA, L.R. Análise da dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 21, n. 3, p. 413-424, dez. 2009.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Rev. Adm. Púb.**, v.27, n.2, p.5-18, 1993.

3 COMPARISON OF SEDIMENT RATING CURVES AND SEDIMENT YIELD IN SUBBASINS OF THE ITACAIÚNAS RIVER WATERSHED, EASTERN AMAZON

ABSTRACT

Understanding the hydrosedimentological dynamics of tropical rivers is a challenge in the Amazon due to its remote and difficult-to-access areas. This study was based on data collected from 16 hydrosedimentological control sections in the 6 subbasins that make up the Itacaiúnas River Watershed (IRW), with 4 annual campaigns (high water levels, rising water levels, falling water levels, low water levels) between 2015 and 2019, with the aim of constructing and comparing sediment rating curves and sediment yield. The data at the mouth of the IRW revealed that the rainy season is responsible for 93% of liquid discharges (Q) with an average of 1460.88 m³/s and for 98% of suspended sediment discharges (SSQ) with an average of 5864.15 tons/day. Suspended sediment concentrations (SSCs) are low to moderate (50 to 150 mg/l). The curves encompassing all the data showed R² values (0.92 to 0.99) greater than the curves with only the values of the rainy or dry season, indicating a good fit of the power equation to the SSQ and Q data for all sections studied. Higher values of coefficients a and b show areas of greater sediment production and deforestation, as well as areas with new sources of sediment and preserved forest.

Keywords: Streamflow; Sediments; Specific sediment yield; Sediment rating curve; Itacaiúnas. River.

RESUMO

Compreender a dinâmica hidrossedimentológica dos rios tropicais é um desafio, principalmente na Amazônia, devido às suas áreas remotas e de difícil acesso. Este estudo foi baseado em dados coletados em 16 seções hidrossedimentológicas de controle distribuídas nas 6 sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas (BHRI), com 4 campanhas anuais (enchente, cheia, vazante e seca) entre 2015 e 2019, objetivando a construção e comparação da curva-chave de sedimentos e produção de sedimentos. Os dados na foz da bacia revelaram que o período chuvoso é responsável por 93% das descargas líquidas com médias de 1460,88 m³/s e por 98% das descargas de sedimentos em suspensão com média de 5864,15 ton/dia. As Concentrações de sedimentos em suspensão (CSSs) são baixas a moderadas (50 a 150 mg/l). As análises das curvas obtidas com todos os dados apresentaram R² (0,92 a 0,99) maiores do que utilizando apenas os valores da estação chuvosa ou seca, mostrando um bom ajuste da equação de potência aos dados QSS e Q para todas as seções estudadas. Os maiores valores do coeficiente a e b indicam áreas de maior produção de sedimentos e desmatamento e áreas com novas fontes de sedimentos e floresta preservada.

Palavras-chave: Vazão; Sedimentos; Produção específica de sedimentos; Curva-chave de sedimentos; Rio Itacaiúnas.

INTRODUCTION

Understanding the dynamics of hydrosedimentological processes in watersheds is critical for decision-making and supports management planning for the rational use of natural resources (Vestena, 2009). Knowing the behaviors and amounts of water (liquid discharge) and transported sediments (solid load) in different sectors of a watershed is important for the installation of hydraulic, environmental, and water resource projects, including the implementation of soil conservation and management techniques (Carvalho, 2008; Lohani et al., 2007). The sediment yield of a watershed depends on its natural characteristics, such as topography, soil type, land use and cover, and rainfall amount and intensity (Santos, 2015), as well as anthropogenic factors. These factors affect the amount of sediments generated by bank and channel erosion, the distances traveled by the sediments, the storage/mobilization of available sediments, and the sedimentation rate (Williams, 1989; Reid et al., 1997; Vestena, 2009).

Monitoring sediment flows in a given location in the watershed enables us to diagnose possible impacts on its drainage area over time, which can become an important environmental indicator. In river courses, approximately 80% of all sediment transport occurs during strong rainfall (Carvalho, 1994). Suspended sediment discharge, on average, may account for 70 to 95% of the total solid discharge, depending on the position of the watercourse cross-section and other factors (Carvalho et al., 2000).

One of the most comprehensive ways to qualify and quantify the intensity of the impacts of soil erosion on a watershed is by hydrosedimentological data collection and/or monitoring. The values of suspended solid discharge, suspended sediment concentration (SSC), and other parameters derived from hydrosedimentological studies (e.g., sediment yield, land use, and riverbed degradation) are applicable to many fields of study (Oliveira & Cabral, 2011; Garrido et al., 2018).

Comparing different cross-sections along rivers under specific flow conditions, or flow frequency analysis, is highly important for understanding fluvial dynamics and equilibrium conditions (Aguar, 2009). Accordingly, streamflow is the most significant parameter for any discussion regarding fluvial dynamics. The transport of sediments and soluble materials, which corresponds to the watershed's fluvial mass transport, is generally the dominant factor in the watershed mass balance, in which the greatest sediment load is derived from weathering (Allen, 1997 *apud* Aguar, 2009). The total material transported by the river can be satisfactorily determined by measuring the concentration of sediments, either deposited in the

channel bed or suspended, depending on the turbulent water flow.

Traditionally, solid discharge is determined using sediment rating curves, which relate suspended solid discharge to liquid discharge (Carvalho, 1994; Glysson, 1987). According to Colby (1957), although sediment discharge sampling is performed seasonally, constructing a continuous curve for these discharges is justified because discharge occurs over the typical current flow range. Accordingly, sediment discharge or concentration can be plotted as a function of current flow at various sampling times to define an average sediment discharge or sediment concentration curve for a cross-section.

Hydro-sedimentological data collected in the field are required to validate empirical and mathematical models that estimate soil erosion at the river basin scale, such as the Universal Soil Loss Equation (USLE; USLE and variations thereof - Benavidez et al., 2018; Alewell et al., 2019) and hydrological models coupled with soil loss equations. The USLE and its variations (the Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE; the Revised Universal Soil Loss Equation 2 - RUSLE2; and the Modified Universal Soil Loss Equation - MUSLE) are empirical models widely used to estimate annual soil erosion rates as a function of rainfall erosivity, soil erodibility, slope, land cover, management practices and soil conservation or prevention practices.

Additionally, hydrological models coupled with soil erosion equations are widely used because they allow estimating both soil loss production and transport through the use of flow routing methods. Some hydrological models are coupled with soil erosion equations, including SWAT (Arnold et al., 1998), MGB-SED (Buarque, 2015; Fagundes et al., 2020a, b), SWIM (Krysanova et al., 1996), and LASCAM (Viney & Sivapalan, 1999). Sediment data are also used to calibrate statistical models related to the suspended sediment concentration and surface spectral reflectance (Fassoni-Andrade & Paiva, 2019) obtained by multispectral instruments aboard satellites (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 2021).

In this context, the present study evaluates the hydro-sedimentological dynamics of the Itacaiúnas River Watershed (IRW) in 16 control sections. The watershed has a land use typical of the Amazon arc of deforestation, in which protected areas and deforested areas are used predominantly for extensive grazing. Additionally, the region has great economic importance due to mineral activities. Liquid discharge and SSC monitoring data are used to determine seasonal sediment discharges and construct sediment rating curves.

METHODS AND ANALYSES

STUDY SITE DESCRIPTION

The IRW encompasses an area of approximately 42,000 km² in Carajás Mineral Province in the Eastern Amazon (Figure 1). The watershed has the largest multiminerals deposits in the Amazon, as well as industrial exploitation of iron, manganese, copper and nickel ores in conservation units and artisanal mining (gold, precious stones, etc.) in areas outside the UCs (Souza Filho et al., 2021). Approximately one-third of the basin is within protected areas (conservation units and indigenous land), which indicates the environmental importance of the region for biodiversity protection. The deforested areas (approximately half of the watershed area) are mostly used for pastures, and the IRB region is responsible for approximately 35% of the cattle herding in the state of Pará (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017). According to Silva Júnior et al. (2017), the assets produced in the BHRI correspond to 25% of the GDP of the state of Pará. The Itacaiúnas River is approximately 520 km long, with an altimetric range of 370 m and a low gradient of 0.7% (Figure 1). In general, the drainage patterns are dendritic, meandering, and entrenched; the river exhibits marked geological control and many rapids and has a predominantly rocky bottom with pebble and gravel midchannel alluvial deposits, as well as sandy point bars.

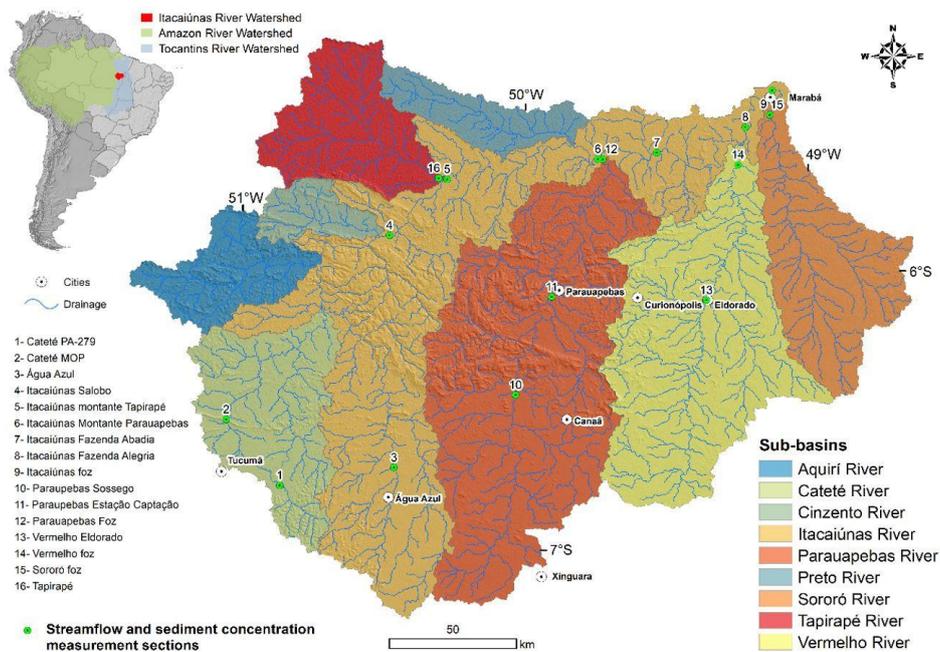


Figure 1. Itacaiúnas River Watershed and its main tributaries and the locations of the hydrosedimentological monitoring sections.

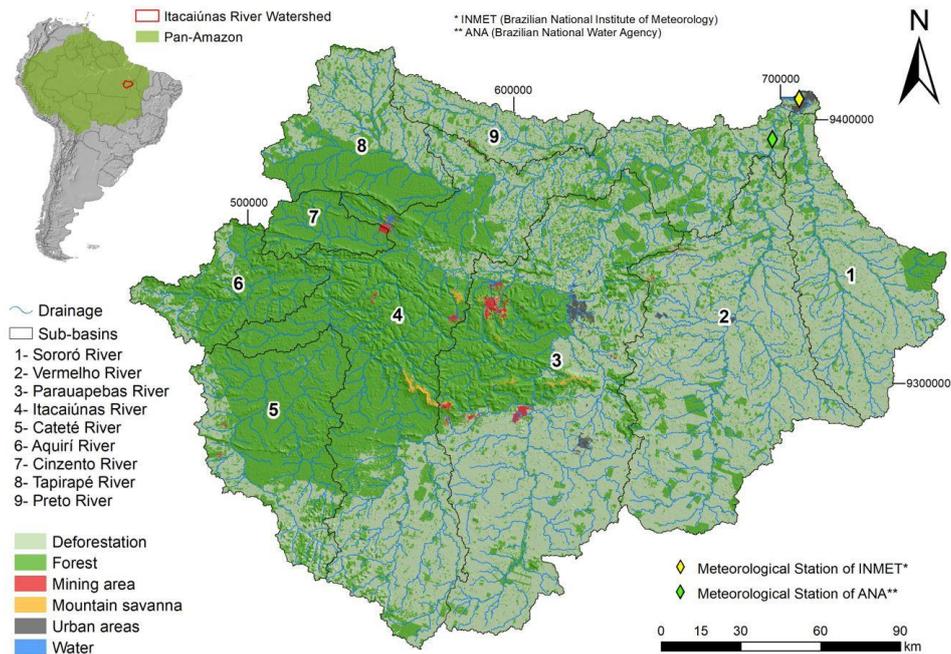


Figure 2. Itacaiúnas River Watershed land use and land cover map (Modified from Nunes et al., 2019).

Recent studies conducted in the region defined five main types of land use and land cover (Souza Filho et al. 2015, 2016, 2018; Zappi, 2017; Nunes et al., 2019): tropical forest (dense rainforest) and metallophile savanna dominate the untouched landscape and account for ~48% of the area, which is primarily concentrated in conservation units and indigenous lands; vast grasslands for cattle raising (deforested areas) currently occupy much of the landscape (~51%), whereas urban areas and open pit mining regions occupy restricted areas (Figure 2).

The Carajás Mountains are located in the central-west region of the IRW, with elevations ranging from 350 to 900 m. In the region adjacent to the plateau, the elevation of the terrain ranges from 80 to 300 m.

The climate of the region is defined as a tropical monsoon (Am) climate with two main seasons, a rainy season (November to May), which has a mean rainfall of 1,550 mm, and a dry season (June to October), which has a mean rainfall of 350 mm. The recorded mean air temperature is 27.2 °C, and the relative air humidity is approximately 80% (Moraes et al., 2005; Alvares et al., 2013).

The soils in the watershed, according to the Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006) classification, are predominantly red-yellow Argisol (66%), Red-Yellow Latosol (22%), Lithic Neosol (11%), and Quartzarenic Neosol (1%).

In the north, the geology of the IRW includes the Bacajá domain, which is composed of high-grade metamorphic rocks and metavolcanic and metasedimentary rocks. The province of Carajás and the southern part of the basin are occupied by the Archean Rio Maria, Sapucaia and Canaã dos Carajás domains, which consist of granitoid rocks with diverse compositions and subordinate metamorphic-ultramafic greenstone belts. The eastern portion of the BHRI is represented by the Araguaia Belt, which contains sedimentary, metasedimentary, and mafic-ultramafic rocks and quaternary deposits and lateritic coverings (Dall'Agnol et al., 2017; Feio et al., 2013; Monteiro et al., 2008; Sousa et al., 2015, Sahoo et al., 2019).

HYDROSEDIMENTOLOGICAL MONITORING

Figure 3 shows the flowchart of the activities performed during this work. The data necessary for performing this study were collected in field campaigns of seasonal hydrosedimentological monitoring conducted as part of the Itacaiúnas Project of the Vale Institute of Technology (Instituto Tecnológico Vale – ITV). The monitoring included four annual campaigns from March 2015 to October 2019, totaling 19 campaigns. During each campaign, water level and liquid discharge (streamflow) measurements were taken, and the waters were sampled to calculate the suspended sediments at each station.

The annual number of campaigns was determined by the seasonal variation in streamflow and the cost of the campaigns. The time period of each streamflow measurement campaign was planned and defined based on historical streamflow data from the Fazenda Alegria station of the National Water Agency (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021) and rainfall data from the Marabá station of the National Meteorological Institute (Instituto Nacional de Meteorologia, 2021) (Figure 2). The monthly values for the analyzed period are presented in Figure 4. From July to November, the long-term mean streamflow is below 20 mm.month⁻¹, while the average monthly peak is approximately 100 mm.month⁻¹ in March (Cavalcante et al., 2019). To represent the seasonal behavior of the IRW, the campaigns were preferably undertaken in the months of maximum (March/April), minimum (September), and intermediate streamflows (falling streamflow in June and rising water in January).

The 16 control sections for hydrosedimentological monitoring in the IRW were chosen based on access to these sections and on their distinct environmental features (altitude, slope, geology, soils, land cover, and intensity of anthropogenic influence) so that the fluvial dynamics of the watershed could be fully represented. The 16 hydrosedimentological monitoring sections were distributed as follows: seven were allocated along the Itacaiúnas River, three along the

Parauapebas River, two along the Vermelho River, two along the Cateté River, one along the Sororó River, and one along the Tapirapé River (Figure 1).

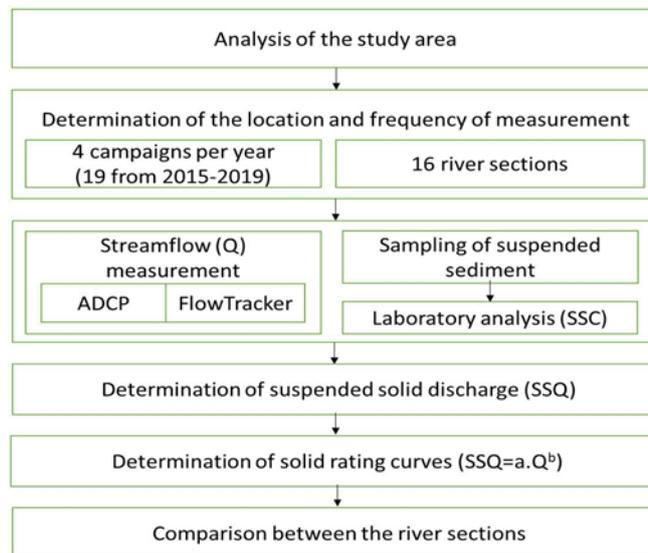


Figure 3. Flowchart of the methods.

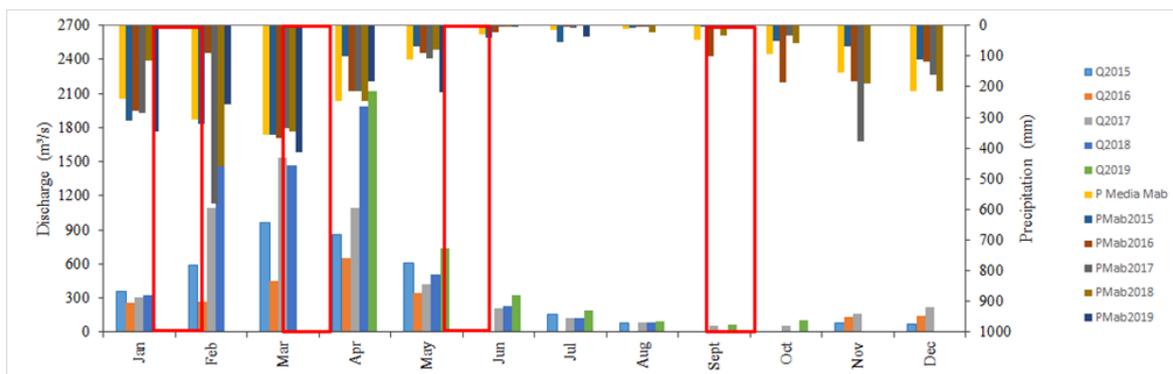


Figure 4. Monthly streamflow (Fazenda Alegria, ANA) and rainfall (Marabá, INMET) data from January 2015 to December 2019 in the Itacaiúnas River Watershed and the time periods of the campaigns shown by the red boxes.

LIQUID DISCHARGE (STREAMFLOW) MEASUREMENTS

The methods adopted in the field campaigns for streamflow measurement followed the international standards and regulations recommended in the ANA and CPRM manual of best practices for the use of acoustic Doppler current profilers (ADCPs).

Two acoustic methods were used to measure streamflow depending on the seasonal variation in the river water levels.



Figure 5. Equipment and vessels used in flow measurements in the rivers within the Itacaiúnas River basin.

In the first method, streamflow was measured from a moving boat (Figure 5) using the Teledyne 600 and 1200 MHz and SonTek M9 ADCPs, whose data were acquired and processed using the WinRiver II and RiverSurveyor software programs, respectively (RD Instruments, 2013; Sontek, 2018). In this method, the calculation of the effective streamflow of each fluvial measurement section requires taking at least two pairs of measurements (two outbound and two inbound) to calculate a mean, which is the streamflow value of each measurement section. In addition to streamflow measurements of the sections, moving-bed tests were also performed using two methods: anchored boat and looping. These tests are important to assess whether this parameter has any effect on the calculated streamflow value.

The second method used the acoustic Doppler velocimeters SonTek FlowTracker I and II, which are designed to take measurements in narrow channels with water depths of less than 120 cm, as occurs during the dry seasons (Figure 6). This method uses the “mid-section” measurement, in which the velocity is measured in each vertical direction at 60% or at 20-80% depth in each subsection (Santos et al., 2001). Last, the measurements were integrated automatically, and the total streamflow was calculated for the section, generating a report with all the data from the section using SonTek FlowTracker software v.2.3.

SAMPLE COLLECTION AND CALCULATION OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION

In conjunction with the streamflow measurements, suspended sediment samples were collected using the direct method (instantaneous spot sampling) to determine the SSC. A single sampling was performed near the water surface in the main river channel (~100 cm depth), and 2-3 L of water was collected using a Van Dorn bottle, of which 1000 mL was split evenly into two 500-mL plastic bottles; these bottles were stored in a plastic box for transport and were sent for processing at the Laboratory of the Environmental Geology and Water Resources Group of ITV.

The laboratory tests (Figure 7) consisted of determining the SSC according to the method described by Wetzel & Likens (1991) and Carvalho et al. (2000). The collected water samples were filtered using a water suction pump with a 0.45- μm cellulose membrane filter that was 47 mm in diameter. The filters were dried and weighed before and after filtration, and the difference in weight was divided by the filtered volume to calculate the SSC.



Figure 6. Photos of flow measurement with FlowTracker.

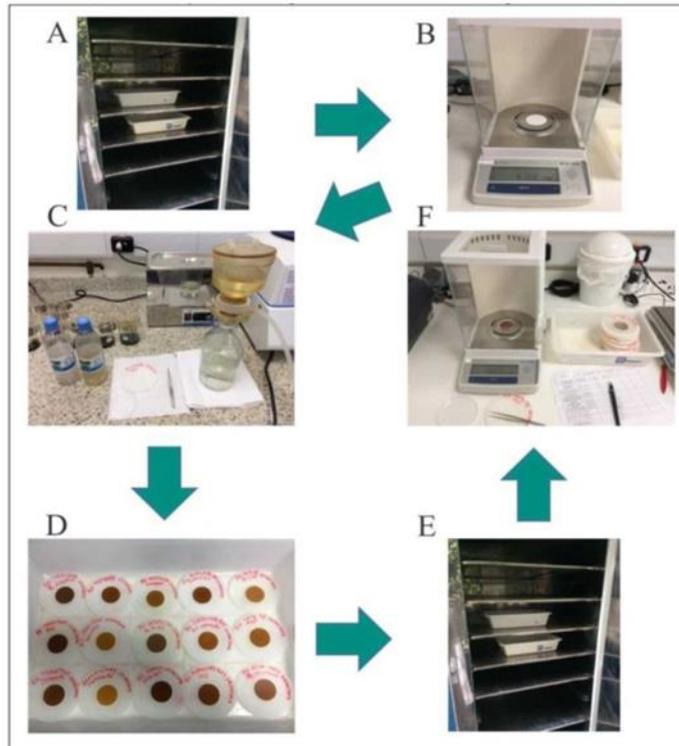


Figure 7. Stages of laboratory analysis. (A) Drying the filters; (B) Weighing the dry filters; (C) Filtering the samples; (D) Identification; (E) Drying the samples; (F) Weighing the dry samples (Adapted from Pina Neto et al., 2020).

SOLID DISCHARGE AND SPECIFIC SEDIMENT YIELD

To calculate the suspended sediment discharge, we assumed that suspended sediments would flow at the same velocity as the current throughout the cross-section; thus, their discharge would equal the product of the streamflow and the mean concentration.

Thus,

$$\mathbf{SSQ} = \mathbf{0.0864} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{SSC} \quad (1)$$

where:

SSQ is the solid discharge or estimated suspended sediment flow (tons/day);

Q is the measured instantaneous streamflow (m³/s);

SSC is the estimated instantaneous solids or suspended sediment concentration (mg/L).

The specific suspended sediment yield (SSY) per unit area was determined by:

$$\mathbf{SSY} = \left(\frac{\mathbf{SSQ}}{\mathbf{A}} \right) * 1000 \quad (2)$$

where

SSY = specific sediment yield (kg/day/km²);

SSQ = suspended sediment discharge (tons/day);

A = contributing watershed area (km²).

SEDIMENT RATING CURVES

The sediment rating curve of each monitoring section was defined using the power function:

$$SSQ = aQ^b \quad (3)$$

where SSQ is the estimated suspended sediment discharge (tons/day); Q is the measured streamflow (m³/s) associated with the SSC; and a and b are the constant and exponent, respectively, of the estimation ratio between specific suspended sediments for each period and the monitoring cross-section.

The power equation was used for the construction of sediment estimation curves, as it is the first and most commonly used equation in most studies (e.g., Phillips et al., 1999; Glysson, 1987; Asselman, 2000).

According to Asselman (2000), the power equation covers both the effect of increasing the current power at a higher discharge and the extent to which new sources of sediment become available in climatic conditions that cause high discharge.

The sediment rating curves were plotted in log-normal space to analyze changes in the curves and their trends. For each season, in each measurement section, the coefficient of determination (R²) was calculated for streamflow and suspended sediment discharge data. The coefficient of determination indicates the degree of correlation between sediment concentration/suspended sediment discharge and streamflow. R² ranges from 0 to 1, and the higher the R² is, the higher the correlation between the sample data is (Mendonça et al., 2019).

The curves were constructed and analyzed in two ways: with data from the rainy season (November to April) and dry season (June to September) plotted in different curves and with one curve integrating the data from both seasons.

RESULTS

The results of streamflow, suspended sediment concentration and discharge and the sediment rating curves are first presented by subbasins (main tributaries of the Itacaiúnas River) and discussed considering the land use and other characteristics of each area. Then, the results are compared to provide an analysis of the entire IRW. Table 1 summarizes the average values measured during the 5 years of hydrosedimentological monitoring in the 16 control sections, the percentages of deforested areas and forests, as well as the determination coefficients R^2 and the constants and exponents (a and b) obtained in the power equation, which is discussed below. We used the modified nonparametric Mann–Kendall test (Mann, 1945; Kendall, 1975; Hamed & Rao, 1998) to investigate the statistical significance (with the confidence threshold set at the 0.05 level) for the five-year (2015-2019) time series of Q and the SSC of all hydrosedimentological stations. The null hypothesis in the Mann-Kendall test is that the data are independent and randomly ordered. The only statistically significant trend was that of the Q time series for the Cateté River.

CATETÉ RIVER

The Cateté River, which has a basin of 3600 km² located in the southwestern sector of the IRW (Figure 1), is an important tributary of the left bank and of the most upstream section of the Itacaiúnas River. This subbasin crosses the municipalities of Tucumã and Ourilândia do Norte and the Xikrin indigenous land; it is 142 km long and has a 292 m difference in elevation.

This subbasin has two monitoring sections, the Cateté River/PA-279 and the Cateté River/MOP sections, which drain areas of 376.29 and 897.87 km², respectively, accounting for 25% of the total area (Table 1). The analyzed sections of the Cateté River basin represent its most upstream areas.

The boxplot in Figure 8A shows the variation in sediment concentrations in different seasons and monitored sections. The outliers (SSC > 60 mg/L), which were observed in both sections, increased the mean sediment concentration of the rainy season from 22.06 to 25.14 mg/L in the PA-279 section and from 26.65 to 30.62 mg/L in the MOP section. The sediment concentration increased from upstream to downstream.

In Figure 8B, the mean streamflow values of 3.2 and 3.8 m³/s were similar between the dry seasons, highlighting that no significant reload occurred between sections. In the rainy season, the mean input to the MOP section, at 25.1 m³/s, was 35% greater than that to the PA-

279 section, at 17.1 m³/s. The streamflow values of approximately 15 m³/s in section PA-279 and 21 m³/s in section MOP, which had high sediment discharge values (>100 mg/L) in January 2019, may reflect the intense rainfall that occurred during that season in the watershed.

Table 1. Location, drainage area, and seasonal average (SSC - suspended sediment concentration, Q - Liquid discharge, SSQ - suspended sediment discharge and SSY - specific sediment yield) of various locations along the Itacaiúnas River and its tributaries, as well as the determination coefficients R^2 and the constants and exponents (a and b) of the power function.

River/Section	Lat	Long	Specific Area (km ²)	% Specific Area (km ²)	% Deforestation	% Forest	Average SSC (mg/L)	Average Q (m ³ /s)	Average SSQ (tons/day)	Average SSY (kg/day/km ²)	R ²	a	b
Cateté PA-279	-6.763	50.871	376.29	0.91	6.99	5.51	19.17	9.79	21.62	57.47	0.94	0.75	1.36
Cateté MOP	-6.529	51.059	897.87	2.17	6.29	6.31	30.62	13.89	37.02	41.23	0.94	1.47	1.14
Tapirapé Foz	-5.669	50.307	2644.52	6.38	4.43	8.5	21.8	50.09	82.5	31.2	0.95	2.23	0.92
Paraúpebas Sossego	-6.441	50.035	3804.81	9.19	9.56	2.36	12.02	50.79	60.36	15.86	0.96	1.3	1
Paraúpebas Est. Captação	-6.092	49.907	6879.06	16.16	6.88	5.33	16.73	92.06	171.73	24.96	0.96	0.59	1.22
Paraúpebas Foz	-5.600	49.729	9671.44	23.35	6.53	5.71	24.83	149.15	366.89	37.93	0.96	1.28	1.11
Vermelho Eldorado	-6.104	49.360	3708.3	8.95	8.86	3.21	69.31	59.46	463.1	124.88	0.95	2.85	1.2
Vermelho Foz	-5.623	49.247	6831.69	16.74	8.97	3.05	82.31	127.09	1091.66	157.49	0.96	4.34	1.11
Sororó Foz	-5.444	40.135	3466.85	8.61	8.97	3.09	71.58	70.42	660.95	185.3	0.97	2.4	1.25
Itacaiúnas Água Azul	-6.700	50.466	957.58	2.31	8.04	4.25	31.67	18.73	64.55	67.4	0.95	1.86	1.15
Itacaiúnas Salobo	-5.873	50.481	12317.2	29.74	2.68	10.43	18.98	172.99	462.63	37.56	0.96	0.14	1.5
Itacaiúnas Montante Tapirapé	-5.673	50.277	13358.2	32.25	2.56	10.56	19.16	178.17	437.49	32.75	0.92	0.27	1.36
Itacaiúnas Montante Paraúpebas	-5.597	49.731	19183.5	46.32	3.5	9.48	21.28	323.19	717.49	37.4	0.95	0.53	1.22
Itacaiúnas Faz. Abadia	-5.578	40.536	29500.5	71.23	4.55	8.22	23.32	492.04	1224.2	41.5	0.95	0.42	1.26
Itacaiúnas Faz. Alegria	-5.487	49.221	37610.4	80.81	5.48	7.16	26.32	636.38	2088.09	55.51	0.95	0.26	1.35
Itacaiúnas Foz	-5.357	49.130	41418.3	100.00	5.71	6.82	31.37	750.2	2691.53	64.98	0.95	0.29	1.35

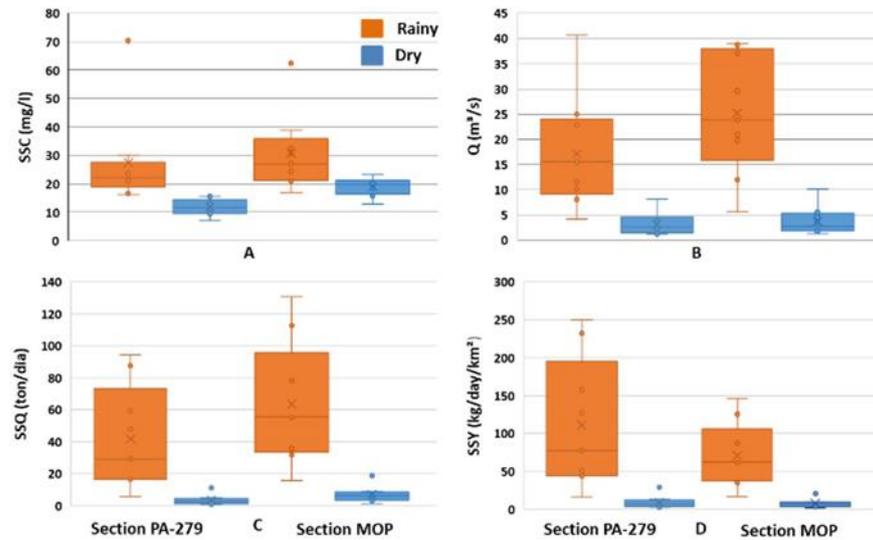


Figure 8. Boxplot of suspended sediment concentration - SSC, (A), streamflow - Q (B), suspended sediment discharge - SSQ (C), and specific sediment yield - SSY (D) in different seasons in the monitoring sections of the Cateté River.

Figure 8C shows the estimated suspended sediment discharges for both sections, highlighting that during the dry season, sediment transport was low, averaging 3.47 tons/day at PA-279 and 7.14 tons/day at MOP. The rainy season showed higher values, reflecting increases in streamflows and concentrations that averaged 41.79 tons/day at PA-279 and 63.38 tons/day at MOP.

The mean specific sediment yield was 111.06 and 70.81 kg/day/km² in the rainy season and 9.23 and 7.95 kg/day/km² in the dry season in the PA-279 and MOP sections, respectively (Figure 8D).

The separation between the dry and rainy seasons did not improve the accuracy of the sediment rating curve for this subbasin. For the dry season, the fitted curves presented R² values > 0.91, while for the rainy season, they presented R² values > 0.67, indicating lower data dispersion in the dry season (Figure 9A). The suspended sediment rating curves with the data of both seasons had coefficients of determination of 0.94 for both river sections (Figure 9B). The curves show that sediment discharges tended to stabilize with increased streamflow, probably due to the depletion of sediment availability.

TAPIRAPÉ RIVER

The Tapirapé River drains the northwestern sector of the IRW; it has an area of approximately 2700 km², is 81.3 km in length, has a 142 m difference in elevation, and 62%

of its area is preserved within the conservation unit known as the Tapirapé- Aquiri Biological Reserve. The river section is situated near the mouth of the river.

The streamflow averaged 100.89 m³/s in the rainy season and 9.44 m³/s in the dry season, clearly indicating seasonality (Figure 10B, Table 1). A low value corresponding to February 2016 was noted in the rainy season. Despite the large difference in streamflow, the average SSC was similar between the two periods (Figure 10A). The mean SSQ was 163.95 tons/day in the rainy season and 17.34 tons/day in the dry season (Figure 10C), and the mean values of SSY were 62 and 6.36 kg/day/km² (Figure 10D), respectively. A very high value of 362 tons/day was observed in February 2017 (Figure 10C).

The seasonal sediment rating curves of the Tapirapé River show a behavior compatible with its relatively small drainage area and a unique environmental context because it drains, on its right bank, a preserved area with untouched forest cover, whereas its left bank is an area covered by pasture. The sediment rating curve presented the following values: R²=0.96 for the dry season, R²=0.59 for the rainy season, and R²=0.95 for all seasons (Figure 11). These results reflect variations in suspended sediment discharges for streamflows greater than 90 m³/s, which may be due to a variation in the rainfall intensities and variable sediment inputs or the low accuracy of streamflow and suspended sediment concentration estimation measurements for higher streamflows.

PARAUPEBAS RIVER

The Parauapebas River subbasin is located in the central region of the IRW and spans an area of 9,600 km². The Parauapebas River is approximately 270 km long and primarily drains in the south-north direction; it has three hydrosedimentological monitoring sections (Figure 1). The Sossego section covers the upper Parauapebas River sector and is characterized by an intermittent water regime. The city of Canaã dos Carajás and the Sossego Copper Mine, which are supplied and drained by its waters, are in this sector. The Estação de Captação section encompasses the middle stretch of the subbasin, where the river partly intersects the Carajás Mountains, with altitudes of approximately 700 meters and with a preserved area along its left bank. The iron mines of the Northern Carajás Mountains are nearby in the highest sectors and are surrounded by a preserved forest (Souza Filho et al., 2021), as is one of the largest cities of the southeastern region of Pará, Parauapebas. The third section (Foz) is located at the mouth of the subbasin and thus incorporates additional effects of the lower sector of the basin, which is dominated by extensive pastures, into its hydrosedimentological data (Figure 2).

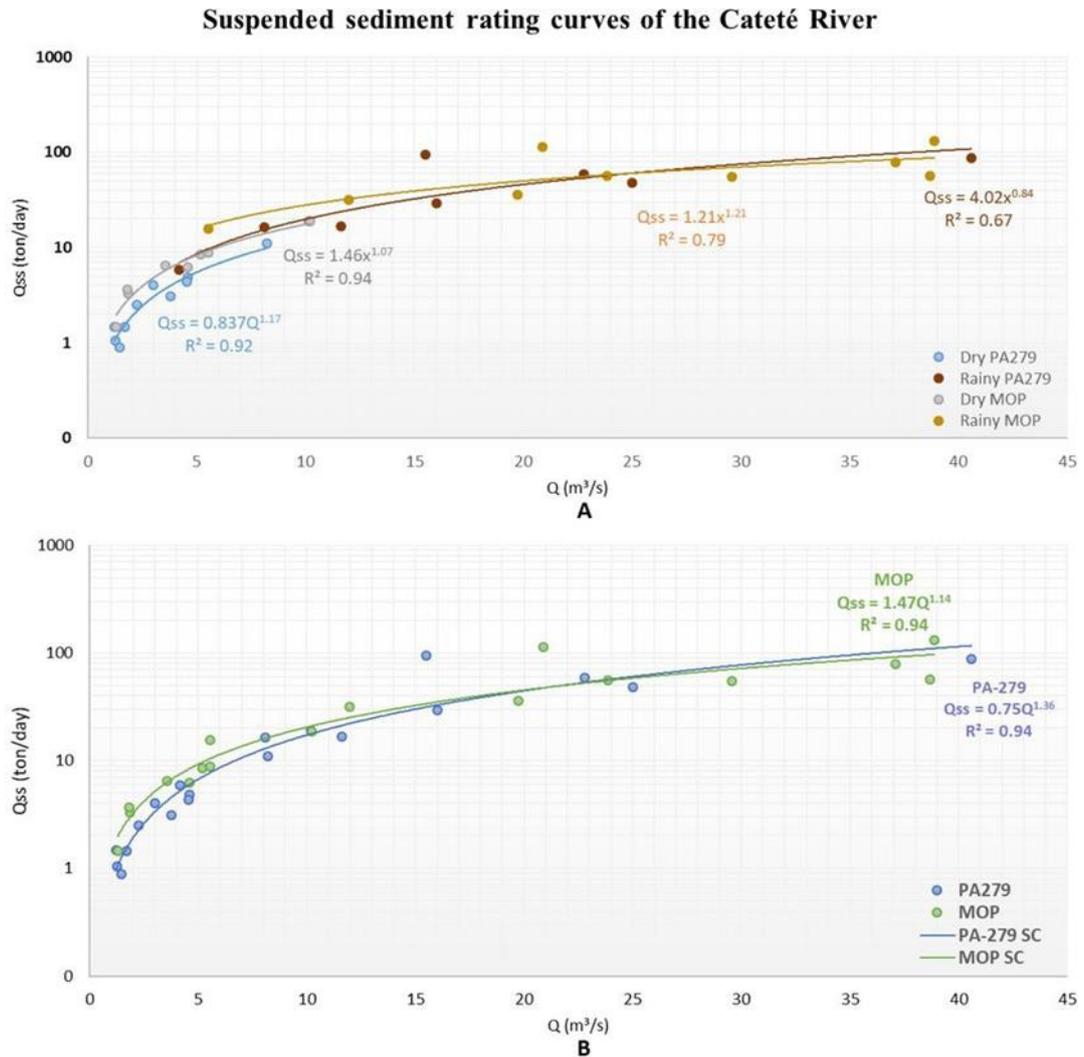


Figure 9. Suspended sediment rating curves for the Cateté River: dry and rainy season curves are shown together in (A), and the curves with all the data and their respective regression equations and coefficients of determination are shown in (B).

Figure 12A shows a large variation in sediment concentration values in the Sossego section because the river was intermittent in four of the five monitoring years; the section lacked streamflow in the dry season and therefore sediment transport. By considering only periods with sediment transport in the dry season, the seasonal (dry and rainy) means were almost equal, with a difference of less than 2%. This indicates that after surface runoff, the mean sediment transport in the Sossego section remained virtually unchanged throughout the year, in contrast to the streamflows. The mean SSC and Q and, consequently, the mean SSQ, increased from upstream to downstream (Figure 12A, B and C) (Table 1). The mean SSY also increased with increasing catchment area. The SSY ranged from 31.94 and 1.4 kg/day/km² in the Sossego

section to 79.07 and 5.03 kg/day/km² in its mouth (Foz) in different seasons, which was an increase in suspended sediment yield of approximately 60% during the rainy season and of 70% during the dry season between the upper and lower Parauapebas River.

Figure 13 illustrates the sediment rating curves of the dry (A) and rainy (B) seasons and integrated periods (C) for each monitoring section. When constructing the sediment rating curve of the Sossego section for the dry season, the periods when the river was completely dry were disregarded because 0 values are not accepted in the regression equation that was used. The sediment rating curve of this section had a high coefficient of determination ($R^2=0.99$) and the lowest discharge values among the sections. The lowest R^2 value was obtained for the Parauapebas River mouth (Foz) section using only the values for the rainy season ($R^2 = 0.77$).

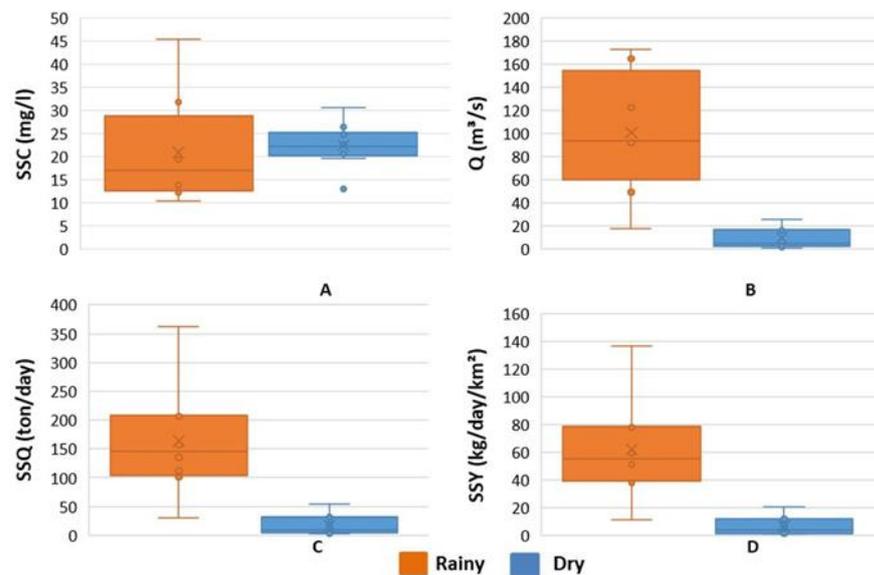


Figure 10. Boxplots of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the Tapirapé River monitoring sections.

VERMELHO RIVER

The Vermelho River subbasin, which runs through the central- eastern sector of the IRW, has an area of approximately 7,000 km², is 160 km in length and is monitored by two hydrosedimentological sections: one in the city of Eldorado dos Carajás, which drains an area of 3,700 km², and the other in its mouth. More than 75% of the areas of both sections are deforested land that has been replaced by pasture. According to Salomão et al. (2018), throughout the Vermelho River valleys, the topographical relief is flat, with altitudes ranging mainly from 80 to 400 m. The relief becomes rougher in the western sector, where mountainous terrains are associated with highly dissected plateaus, with altitudes ranging from 400 to 780

m. In addition, the local elevations are related to mafic-ultramafic intrusions in the central lowlands and the sedimentary units of the Parnaíba sedimentary basin. These geological and geomorphological features of the Vermelho River subbasin directly affect its hydrosedimentological characteristics, as shown by its high suspended sediment discharges.

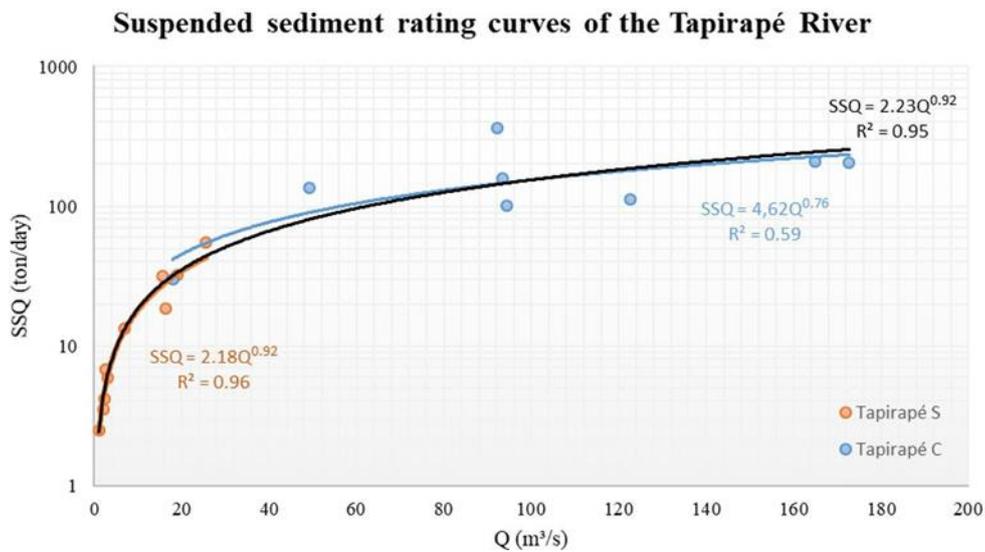


Figure 11. Suspended sediment rating curves of the dry (D) and rainy (R) seasons and the integrated curve of the Tapirapé River for both the dry and rainy seasons (DR).

This subbasin had the second highest SSC in both seasons (Table 1), with similar means in the upstream and downstream sections during the rainy season (101.5 and 105.6 mg/L) (Figure 14A). The outlier observed in the dry season in the Foz section resulted from the atypical rainfall recorded in September 2018. The Q and SSQ at the mouth of the river were approximately double those in the Eldorado section (Figure 14B and C). The SSY was the second highest of the entire basin (Figure 14D) (Table 1).

Figure 15 shows the seasonal and integrated sediment rating curves for the two monitoring sections. The dry season curves had high coefficients of determination for both the Eldorado section ($R^2=0.92$) and the Foz section ($R^2=0.89$). The rainy season curves, despite clearly showing a good fit, had lower coefficients of determination, with values of $R^2=0.77$ at Eldorado and $R^2=0.87$ at Foz. Figure 15B shows the curves with combined data from both seasons, with coefficients of determination of 0.95 and 0.96 for the Eldorado and Foz sections, respectively. Once again, the integrated data showed better regression coefficients.

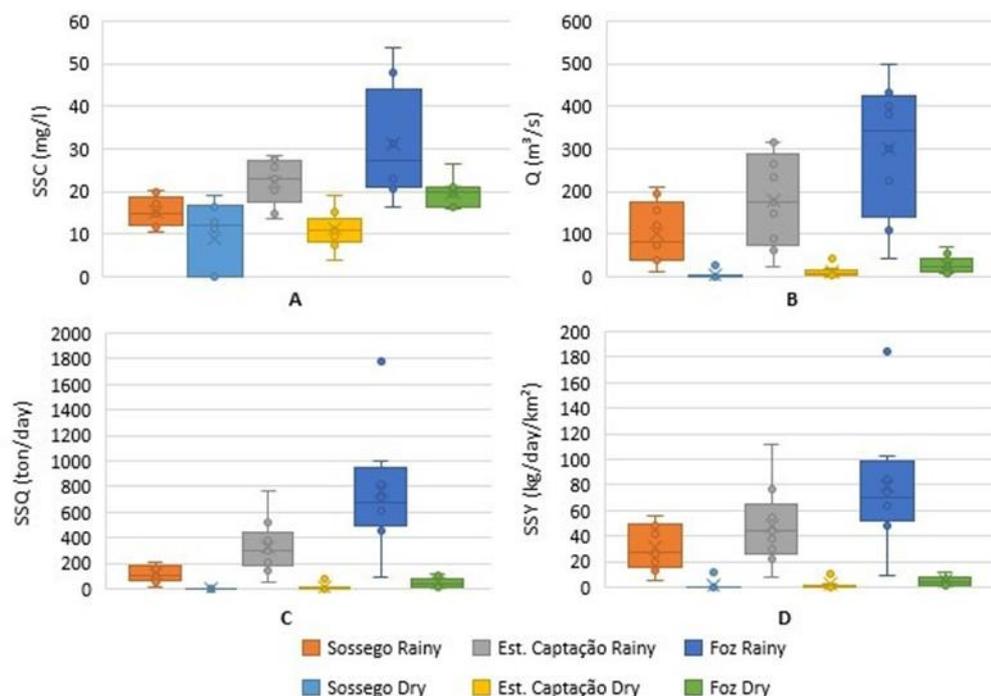


Figure 12. Boxplot of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the monitoring sections of the Parauapebas River subbasin.

SORORÓ RIVER HYDROSEDIMENTOLOGY

The Sororó River subbasin, with an area of approximately 3,600 km² and a length of 137 km, drains the easternmost sector of the IRW, and its hydrosedimentological control section is located in its mouth (Foz). It has two small indigenous lands whose forests are still preserved (Figure 2), although 77% of the basin area has been replaced by pasture and urban areas. It is dominated by sedimentary and metasedimentary rocks (phyllites, slates, and sandy and clayey sediments), which form the Araguaia Belt (Salomão et al., 2018); it has a relatively flat terrain with altitudes ranging from 80 to 400 m and a land cover dominated by pasture.

This station had the highest mean SSC and SSY for the rainy season observed in the IRW, with values of 110.36 mg/L and 383.85 kg/day/km², respectively (Figure 16).

The sediment rating curve of this subbasin (Figure 17) had a coefficient of determination of 0.98 for the dry season. The sediment rating curve of the rainy season was affected by two extreme values, one of low sediment discharge (20 tons/day) and a streamflow of 11 m³/s (recorded on February 22, 2016) and another of extreme streamflow (252 m³/s on April 10, 2019) and a lower sediment discharge (880.55 tons/day) than those associated with lower streamflows in the same season. This indicates that this event had a lower sediment concentration than events with lower streamflows, which may have resulted from a depletion

of sediment sources. These values affected the fitting of the sediment rating curves, which was $R^2=0.84$. The sediment rating curve with all sampled data had a better fit ($R^2=0.97$) to the data and a more coherent curve.

ITACAIÚNAS RIVER

The Itacaiúnas River is the main river of the basin because of its length of ~520 km. It was monitored by seven control sections, Água Azul (950 km²), Salobo (12,320 km²), Montante Tapirapé (13,360 km²), Montante Parauapebas (19,180 km²), Fazenda Abadia (29,500 km²), Fazenda Alegria (37,610 km²), and Foz (41,420 km²) (Table 1), which made it possible to better characterize and understand its hydrosedimentological dynamics.

The most upstream section (Água Azul) showed a high SSC for a small drainage area (960 km²), followed by the Salobo section, which, despite the inputs from the Cateté, Cinzento, and Aquiri Rivers, had a lower concentration in both the rainy and dry seasons for a much larger drained area and remained unchanged up to the Fazenda Abadia (Fz Abadia) section; at which point, the SSC markedly increased with the contribution of sediment from the Vermelho and Sororó Rivers, reaching the mouth with mean concentrations of 53.08 mg/L in the rainy season and 14.01 mg/L in the dry season (Figure 18A).

The seasonal mean streamflows in the mouth of the Itacaiúnas River (Itacaiúnas Foz section) in the 5 years of measurement were 1,460.88 m³/s and 110.58 m³/s in the rainy and dry seasons, respectively, which represented a streamflow decrease of over 92% in the dry season (Figure 18B). The seasonal data collected in the Fazenda Alegria section showed a mean for the study period (5 years) of 636 m³/s, which was close to the historical mean of 600 m³/s (Silva Júnior et al., 2017).

Sediment discharges remained lower than 2,000 tons/day until the Montante Parauapebas section, and their means for the rainy season were similar in the stretch between the Salobo and Montante Tapirapé sections, highlighting an almost constant discharge (Figure 18C). After input from the Parauapebas River, the downstream sections showed a considerable increase in sediment discharges, reaching the mouth with 10,419 tons/day in the rainy season and 153 tons/day in the dry season. A low outlier, which was associated with low streamflows and concentrations, was identified at the beginning of the rainy season in 2016.

The boxplots of Figure 18D show the specific suspended sediment yield, indicating high yield in the upper Itacaiúnas River (Água Azul section). In April 2019, the Tapirapé Montante

section showed the highest SSC in this area, as well as outliers of streamflow, suspended sediment discharge, and specific sediment yield, which reached 151.4 kg/day/km².

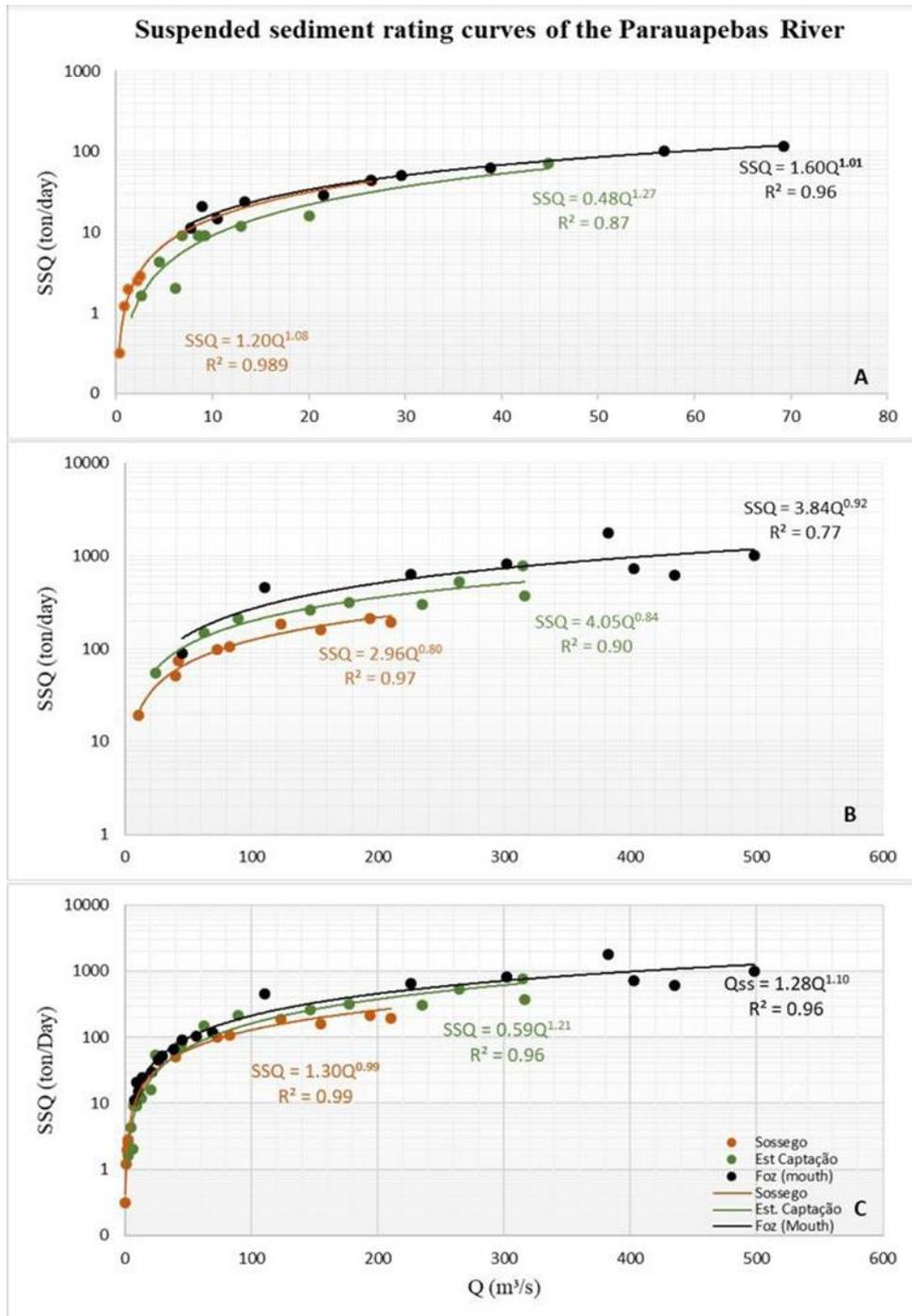


Figure 13. Sediment rating curves of the Parauapebas River.

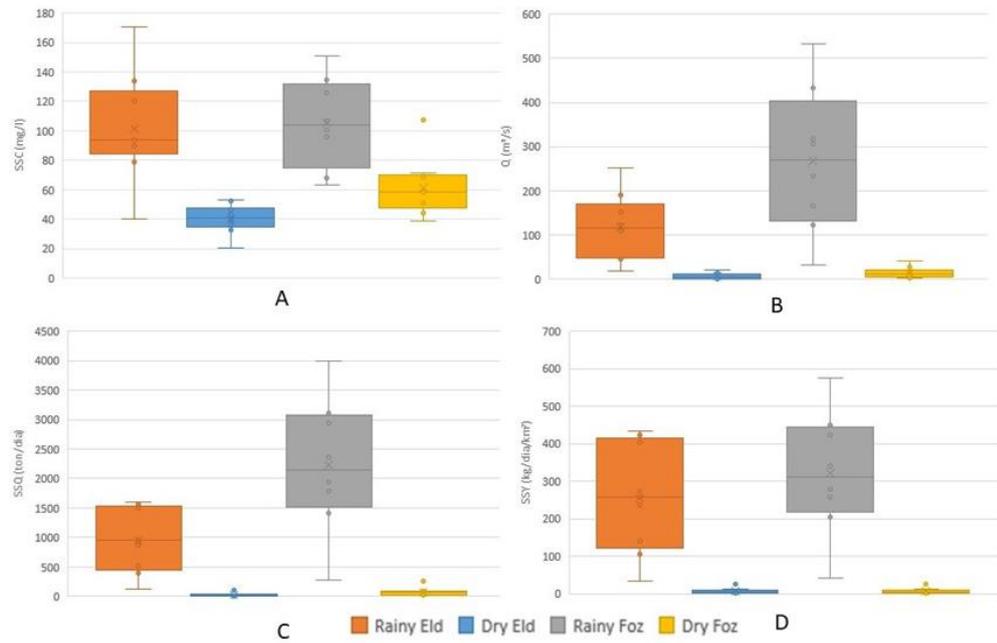


Figure 14. Boxplot of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the monitoring sections of the Vermelho River subbasin.

Suspended sediment rating curves of the Vermelho River

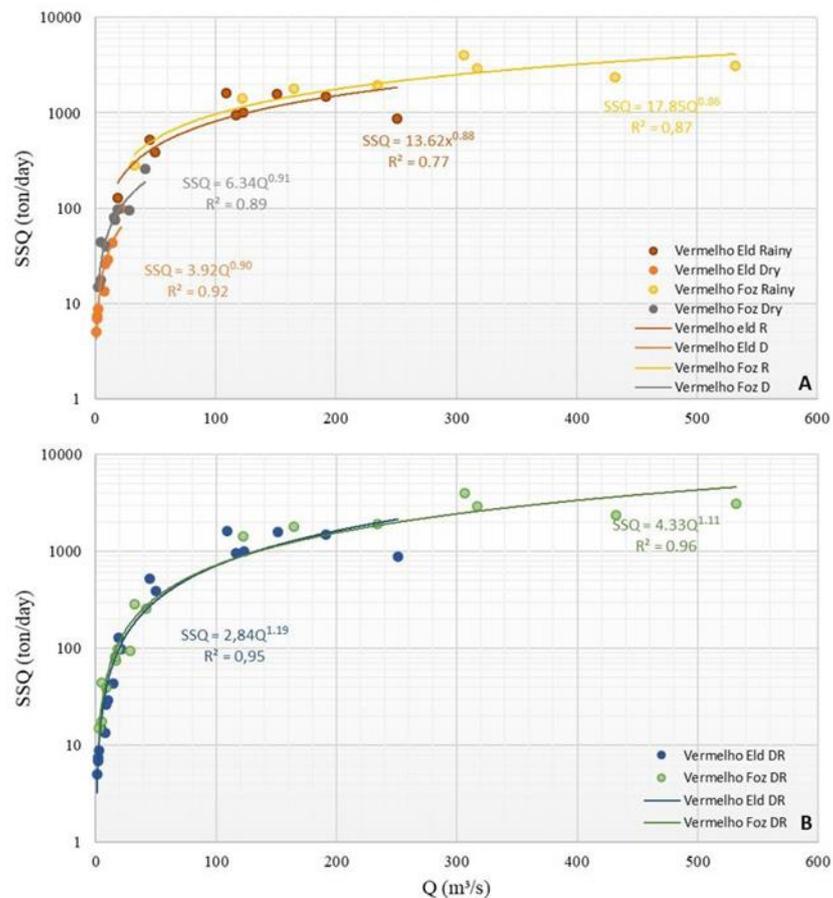


Figure 15. Suspended sediment rating curves as a function of streamflow in the Vermelho River for both monitoring sections (Eldorado dos Carajás and Foz) and their respective regression equations.

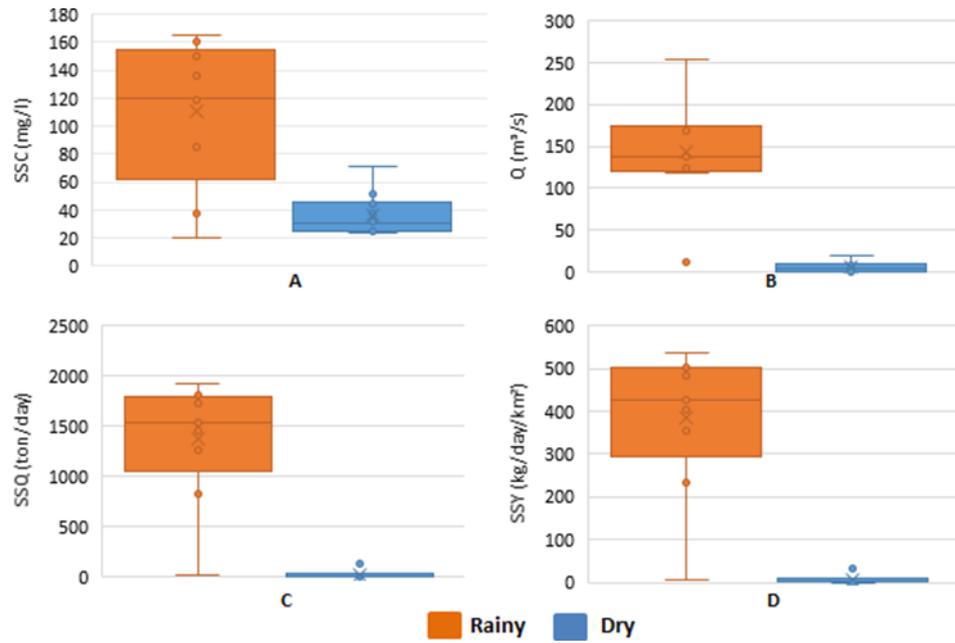


Figure 16. Boxplot of suspended sediment concentration (A), streamflow (B), suspended sediment discharge (C), and specific sediment yield (D) in different seasons along the monitoring sections of the Sororó River subbasin.

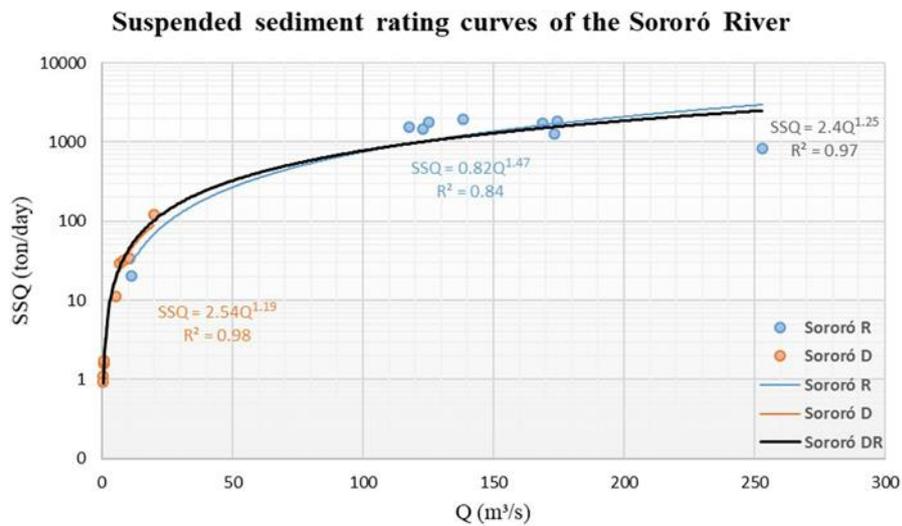


Figure 17. Sediment rating curves of the Sororó River in the rainy (R) and dry (D) seasons.

The low outliers identified early in the rainfall season of 2016 (February) are also distinctive. These outliers occurred in the most downstream sections (Fazenda Abadia, Fazenda Alegria, and Foz) when the lowest streamflow, sediment discharge, and specific suspended sediment yield values were obtained.

The sediment rating curves for the Itacaiúnas River for the dry season (Figure 19A) showed mostly good fits, except for the Montante Tapirapé section, which showed more scattered values. The sediment rating curves of the rainy season for the Água Azul, Salobo and

Montante Tapirapé sections had high R² values (0.96, 0.94, and 0.87, respectively), whereas the corresponding curves of the Parauapebas Montante, Fazenda Abadia, Fazenda Alegria, and Foz sections had lower R² values (0.66, 0.75, 0.80, and 0.74, respectively) (Figure 19B). The Montante Parauapebas, Fazenda Abadia, Fazenda Alegria, and Foz sections received additional inputs from sedimentary discharges from the Tapirapé, Parauapebas, Vermelho, and Sororó Rivers, respectively. At a specific time, discharges of larger sediments occurred at lower streamflows (corresponding to the beginning of the rainy season), and sediment discharges decreased (upper branches of the curves) with the gradual streamflow increases.

Similar to the trend observed in the sediment rating curves of the other subbasins, when integrating all data, the fit of the sediment rating curves improved (Figure 19C). Importantly, in the intermediate portion of the sediment rating curves of the Fazenda Alegria and Foz sections, sediment discharges were underestimated at streamflows ranging from 1,000 to 1,300 m³/s and overestimated at streamflows higher than 2,000 m³/s. Nevertheless, the coefficients of determination and correlation of the regression equation of these sections were high, namely 0.95 and 0.85, respectively.

DISCUSSION

COMPARISON OF THE SUSPENDED SEDIMENT RATING CURVES

When analyzing the sediment rating curve, the separation between the rainy and dry seasons did not improve the curve fitting. The curves obtained using all data had higher determination coefficients than those using only the values of the rainy or dry season, except for two hydrosedimentological stations where the curve obtained for the dry season had a slightly higher R² than those obtained using all data.

Considering sediment rating curves obtained using all data, the R² varied from 0.92 (Montante Tapirapé station at Itacaiúnas River) to 0.99 (Sossego station at Parauapebas River), indicating a good fit of the power equation to SSQ and Q data for all the river sections in the IRW.

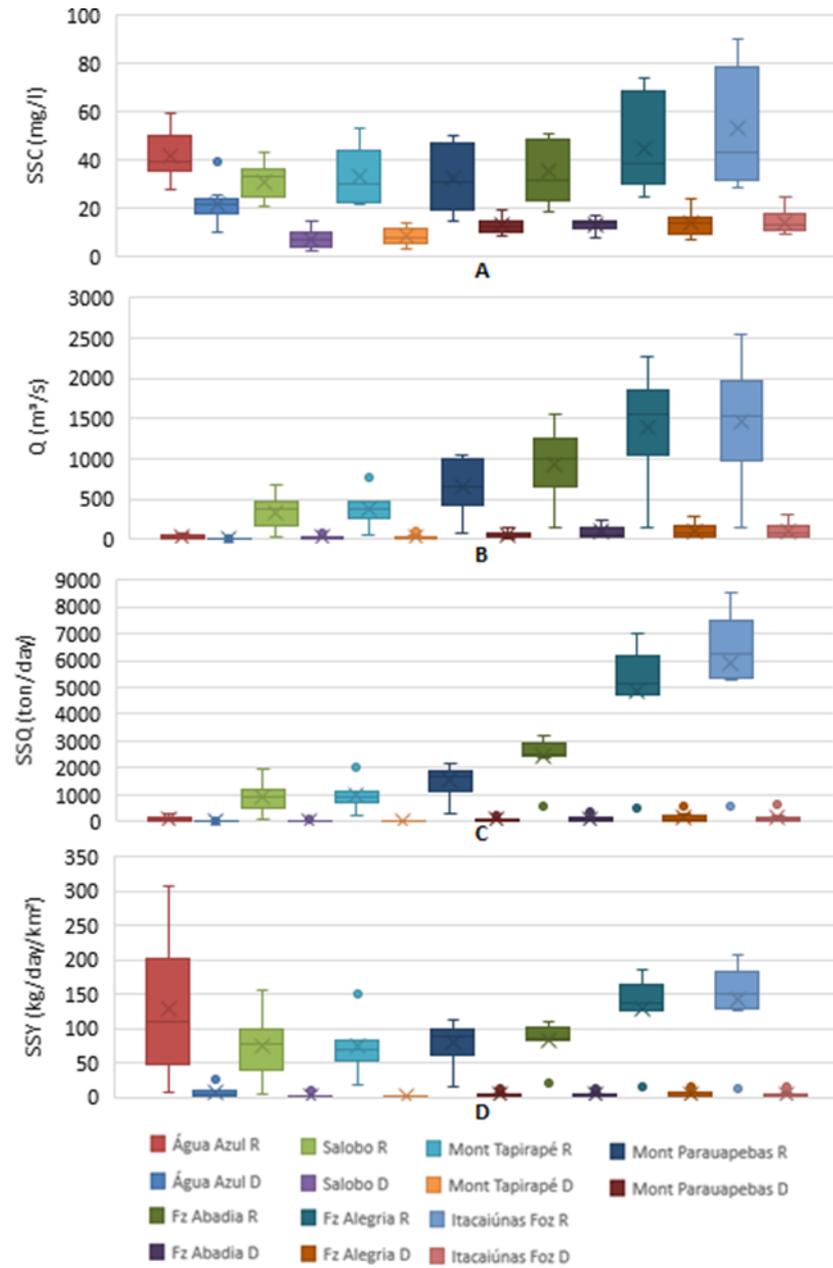


Figure 18. Boxplots of suspended sediment concentration, seasonal streamflow variation, suspended sediment discharge, and specific suspended sediment yield of the hydrosedimentological stations of the Itacaiúnas River (from upstream to downstream) from 2015 to 2019.

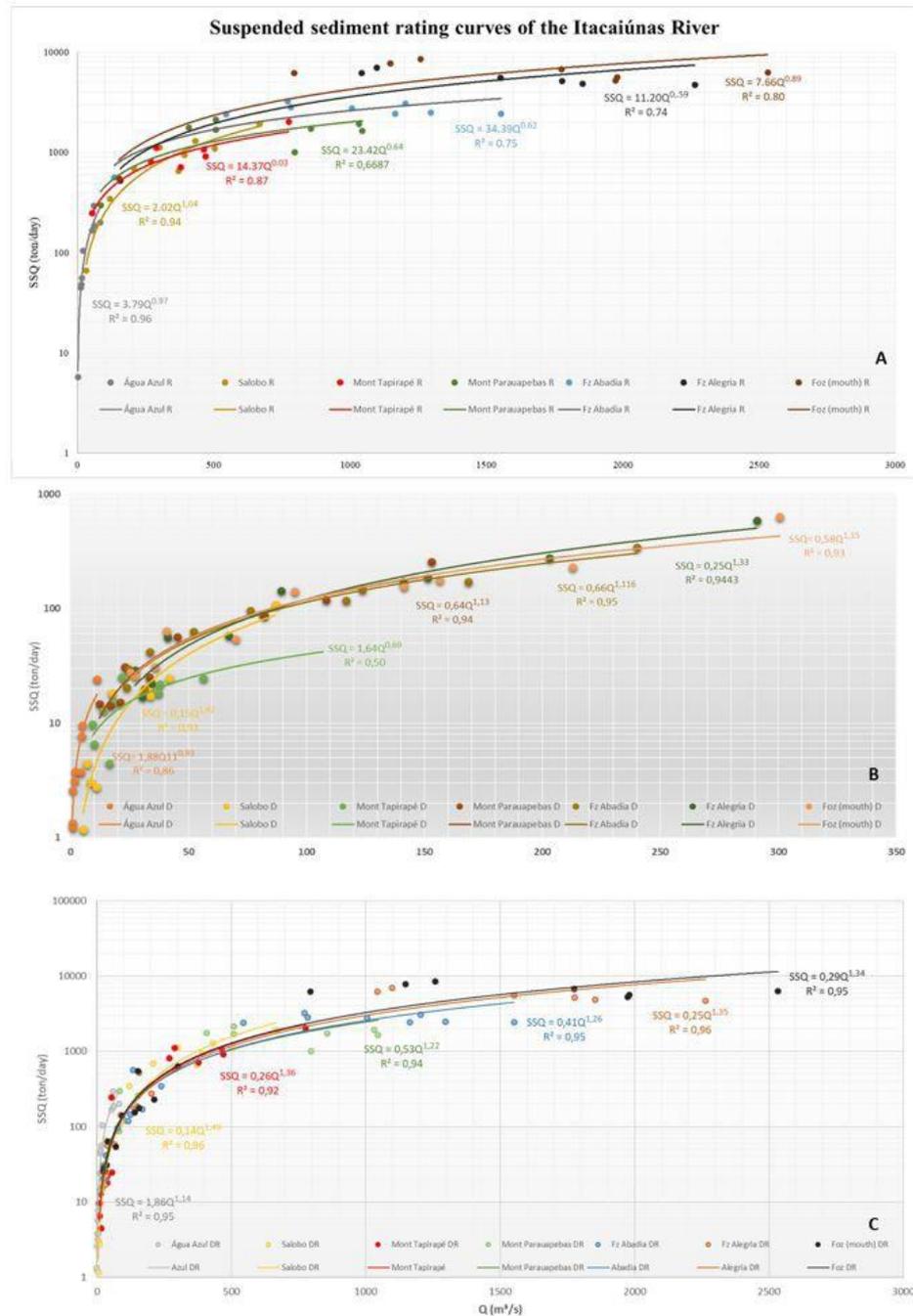


Figure 19. Suspended sediment rating curves for the Itacaiúnas River for the dry season (A), rainy season (B), and all seasons (C).

Although the a and b coefficients of the exponential sediment rating curve have no physical meaning, some physical interpretation of them is usually presented (Asselman, 2000). Morgan (1995) stated that higher values of coefficient a indicate materials that can be more easily transported. For the 16 hydrosedimentological stations of the IRW, coefficient a ranged from 0.14 to 4.33. Higher values were observed at the stations in the Vermelho and Sororó

subbasins in the eastern IRW; these stations are in the geologic province of the Araguaia Belt, which has very friable metasedimentary rocks (shales and phyllites) and very different textural characteristics of the soils from those of the clay-silty soils in the rest of the IRW. Additionally, these 3 stations are the most deforested and are only surpassed by the Sossego station (Parauapebas River). Lower coefficients are observed at the stations with lower percentages of deforested area: Salobo and Tapirapé; these stations are both on the Itacaiúnas River at locations where it crosses protected areas. The correlation between the a coefficients and percentage of deforested areas in the catchment area was 0.66, and that between the a coefficients and the SSC was 0.82. Therefore, the results are in accordance with the interpretation of Morgan (1995).

Asselman (2000) stated that the b coefficient is related to the erosive power of the river or to the extent to which new sediment sources become available when discharge increases. In the IRW, the b coefficient ranged from 0.92 (Tapirapé River) to 1.49 (Salobo station on the Itacaiúnas River). The Salobo station is located near the Serra de Carajás, which is the region in the IRB that has higher altitudes.

SUSPENDED SEDIMENT THROUGH THE IRW

Figure 20 shows the one-line diagram of the IRW, which makes it possible to schematically visualize the hydrosedimentological control sections with their mean streamflow, suspended sediment discharge, specific suspended sediment yield, and SSC values for each season (rainy and dry); the diagram summarizes the assessed hydrosedimentological characteristics of the IRW by integrating all data discussed above. After receiving contributions from protected areas, especially in the dry season, the decrease in the SSY in the Itacaiúnas River (Salobo and Montante Tapirapé sections) stands out. Conversely, the high SSY values of the Vermelho and Sororó Rivers in the rainy season increase the SSY in the final stretches of the Itacaiúnas River after receiving the contributions from these tributaries.

According to the parameters adopted by ANA, in the IRW, the SSCs would be low (50 to 100 mg/L) in the Cateté, Tapirapé, Parauapebas, and Itacaiúnas subbasins and moderate (100 to 150 mg/L) in the Vermelho (106 mg/L) and Sororó subbasins (110 mg/L) by considering the mean of the rainy seasons when the highest concentrations are recorded; that is, in the dry season, the concentrations are low. In general, the average values in the rivers that make up the Itacaiúnas River basin for the concentration of suspended sediments are higher than those found by Lima et al. (2003) in the Tocantins River, which has an average concentration of 8.84 mg/L; they are

within the average of 27.38 mg/L in the São Francisco River (Lima, 2001); they are less than 149.33 mg/L in the Amazon River (Guyot et al., 2005); and they are 108.11 mg/L in the Paraguay River (Carvalho et al., 2005).

The specific sediment yield is low in the Tapirapé River subbasin, in the Salobo section of the Itacaiúnas River, and in the Sossego and Estação de Captação sections of the Parauapebas River; it is moderate in the Cateté River subbasin and in the Água Azul, Montante Tapirapé, Montante Parauapebas, Fazenda Abadia, Fazenda Alegria, and Itacaiúnas River Foz sections; and it is high to very high in the Vermelho and Sororó River subbasins. The Vermelho and Sororó River subbasins, which have deforestation surpassing 77% of their areas and are dominated by pasture, are the main producers of suspended sediments per drained area within the IRW. These are also the regions first deforested in the IRW.

CONCLUSIONS

The hydrosedimentological data monitoring of the IRW from March 2015 to October 2019 showed striking seasonality in the form of a rainy (November to May) and a dry season (June to October), as identified in previous rainfall analyses and schematized in the one-line diagram of Figure 16.

At the Itacaiúnas River mouth, the mean streamflow measured in the rainy season was 1,460.88 m³/s, and the suspended sediment discharge was 5,864.15 tons/day. The mean streamflows and suspended sediment discharges measured in the dry season corresponded to only 7% and 2% of these values.

Although the study lacked a long data collection period, once it was limited to 4 field campaigns along 5 years (2015-2019), sediment rating curves have been properly developed, letting us estimate the suspended sediment discharges of the six subbasins that make up the IRW in different stretches and thus evaluate their spatial variation. Most equations showed a good correlation with and fit to the sampled data, including in the upper branches of the curves. The use of seasonal curves did not improve the results. The coefficient of the exponential curve showed a strong relation with the deforestation and geological characteristics of the catchment areas.

The eastern IRW subbasins (Vermelho and Sororó River subbasins) are the main producers of suspended sediments per drained area within the IRW. Reforestation and improvement of pasture management actions should be considered for the region to reduce soil erosion and its consequences.

As a final word, the authors would like to highlight that studies using the soil loss equation (USLE and variations) jointly with distributed hydrological modeling are presently under development in the study area. Such type of further studies deserves attention since they will allow better understanding of soil loss processes in the IRW and their relationships with environmental issues.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the members of DIPF and GABAN of Vale S.A. for the field support. This paper is a scientific product funded by Vale S.A./ITV – Itacaiúnas Project.

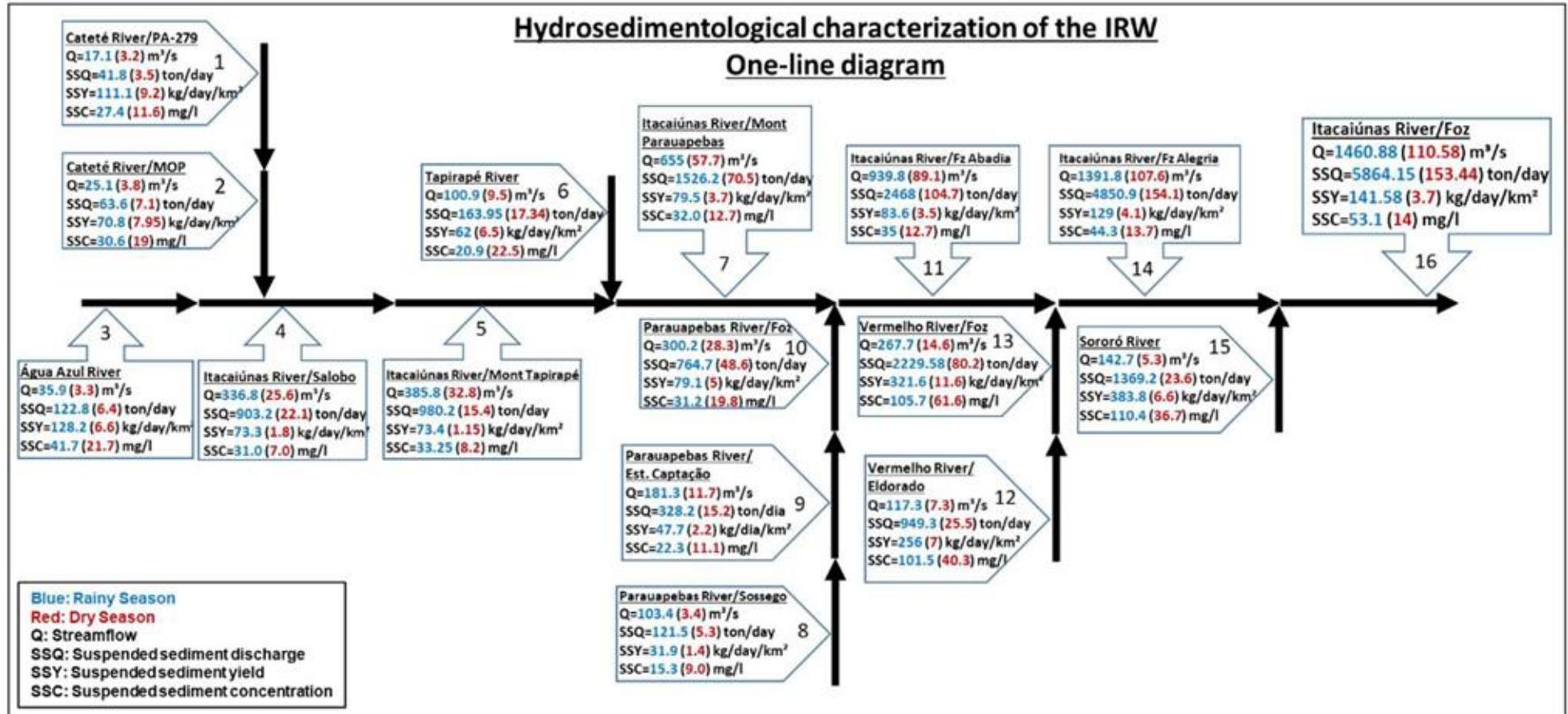


Figure 20. One-line diagram of the monitoring sections and respective mean values of the main hydrosedimentological parameters of the Itacaiúnas River Watershed.

REFERENCES

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. (2021). Retrieved in 2021, January 22, from <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/sistema-de-informacoes-sobre-recursos-hidricos>.

Aguiar, A. M. (2009). Análises hidrogeomorfológicas e hidrossedimentológicas para comparação de duas bacias hidrográficas contribuintes do reservatório de Itaipu (Dissertação de mestrado). Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift (Berlin)*, 22(6), 711-728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.

Asselman, N. E. M. (2000). Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 234(3-4), 228-248. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00253-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00253-5).

Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059-6086. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>.

Buarque, D. C. (2015). Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do rio Madeira (Tese de doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Carvalho, N. O. (1994). Guia de práticas sedimentométricas. Brasília: ANEEL.

Carvalho, N. O. (2008). Hidrossedimentologia prática (2. ed., 600 p.). Rio de Janeiro: Interciência.

Carvalho, N. O., Filizola Júnior, N. P., Santos, P. M. C., & Lima, J. E. F. W. (2000). Guia de práticas sedimentométricas (154 p.). Brasília: ANEEL.

Carvalho, N. O., Ide, C. N., Val, L. A. A., Rondon, M. A. C., Barbedo, A. G. A., & Cybis, L. F. A. (2005). Riscos devido à degradação e agradação de solos na bacia do alto Paraguai. In *Anais do 16º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. São Paulo: ABRH.

Cavalcante, R. B. L., Pontes, P. R. M., Souza-Filho, P. W. M., & Souza, E. B. (2019). Opposite effects of climate and land use changes on the annual water balance in the Amazon arc of deforestation. *Water Resources Research*, 55(4), 3092-3106. <http://dx.doi.org/10.1029/2019WR025083>.

Colby, B. R. (1957). Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. *Transactions - American Geophysical Union*, 38(5), 708-719. <http://dx.doi.org/10.1029/TR038i005p00708>.

Dall'Agnol, R., Cunha, I. R. V., Guimarães, F. V., Oliveira, D. C., Teixeira, F. B. T., Feio, G. R., & Lamarão, C. N. (2017). Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: the origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos*, 277, 3-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.09.032>.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI.

Fagundes, H. O., Fan, F. M., Paiva, R. C. D., Siqueira, V. A., Buarque, D. C., Kornowski, L. W., & Collischonn, W. (2020a). Sediment flows in South America supported by daily hydrologic- hydrodynamic modeling. *Water Resources Research*, 1-39. <http://dx.doi.org/10.1002/essoar.10503046.2>.

Fagundes, H. O., Paiva, R. C. D., Fan, F. M., Buarque, D. C., & Fassoni-Andrade, A. C., (2020b). Sediment modeling of a large- scale basin supported by remote sensing and in-situ observations. *Catena*, 190, <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104535>.

Fassoni-Andrade, A. C., & Paiva, R. C. D. (2019). Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 221, 94-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.038>.

Feio, G. R. L., Dall'Agnol, R., Dantas, E. L., Macambira, M. J. B., Santos, J. O. S., Althoff, F. J., & Soares, J. E. B. (2013). Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, 227, 157-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.007>.

Garrido, J. W. A., Sousa, T. M. I., Ismael, L. L., Crispim, D. L., Ferreira, P. M. L., & Queiroz, M. M. F. (2018). Determinação das curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(1), 69-75. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018138711>.

Glysson, G. D. (1987). *Sediment-transport curves* (Open-file Report, pp. 87-218). Reston, Virginia: USGS.

Guyot, J. L., Filizola, N. P., & Laraque, A. (2005). Régime et bilan du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos (Pará, Brésil) de 1995 à 2003. In D. E. Walling & A. J. Chorowitz. *Sediment budgets* (Vol. 291, pp. 347-354). UK: IAHS.

Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, (204)(1-4), 182-196. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2017). Censo Agro. Retrieved in 2021, January 22, from <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. (2021). Retrieved in 2021, January 22, from <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. New York: Oxford University Press.

Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D. I., & Becker, A. (1996). *Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds (PIK Report)*. Germany: Potsdam Institute for Climate Impact Research.

Lima, J. E. F. W. (2001). *Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do Rio São Francisco Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; Brasília, DF: ANEEL/ANA*.

Lima, J. E. F. W., Santos, P. M. C., Carvalho, N. O., & Silva, E.M. (2003). *Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins. Brasília, DF: ANA/ANEEL*.

Lohani, A. K., Goel, N. K., & Bhatia, K. K. S. (2007). Deriving stage–discharge–sediment concentration relationships using fuzzy logic. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 793-807. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.4.793>.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>.

Mendonça, M. T., Maier, C., Grimm, E. L., Merten, G. H., Netto, J. F., Boscaini, R., Rodrigues, M. F., Silva, T. P., Bastos, F., Batista, R. F., & Fachi, S. M. (2019). Determinação da curva-chave das concentrações de sedimentos em suspensão na Bacia Do Rio Quaraí, na fronteira Oeste Do Rio Grande Do Sul. In J. González Aguilera & A. M. Zuffo (Orgs.), *Ciências exatas e da terra e a dimensão adquirida através da evolução tecnológica* (2. ed., Vol. 2, pp. 1-317). Ponta Grossa: Atena.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS (2021). Retrieved in 2021, January 22, from <https://modis.gsfc.nasa.gov/about>

Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Hitzman, M. W., Juliani, C., De Souza Filho, C. R., & Carvalho, E. (2008). Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper- gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34(3), 317-336. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.01.003>.

Moraes, B. C. D., Costa, J. M. N. D., Costa, A. C. L. D., & Costa, M. H. (2005). Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. *Acta Amazonica*, 35(2), 207-214. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672005000200010>.

Morgan, R. P. C. (1995). *Soil erosion and conservation* (2nd ed.). London: Longman.

Nunes, S., Cavalcante, R. B. L., Nascimento Junior, W. R., Souza-Filho, P. W. M., & Santos, D. (2019). Potential for forest restoration and deficit compensation in Itacaiúnas Watershed, Southeastern Brazilian Amazon. *Forests*, 10(5), 439. <http://dx.doi.org/10.3390/f10050439>.

Oliveira, S. F., & Cabral, J. B. P. (2011) Análise da Concentração de sedimentos em suspensão e da descarga sólida da Bacia do rio Doce em Jataí GO. In: 19º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Vol. 1). Maceió, AL: ABRH.

Phillips, J. M., Webb, B. W., Walling, D. E., & Leeks, G. J. L. (1999). Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area infrequent samples. *Hydrological Process*. Chichester, 13(7), 1035-1050. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199905\)13:7<1035::AID-HYP788>3.0.CO;2-K](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<1035::AID-HYP788>3.0.CO;2-K).

Pina Neto, A. N., Silva Júnior, R. O., & Silva, M. S. (2020). Avaliação da produção e transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Parauapebas, Amazônia Oriental (Produção técnica-científica ITV-DS N001/2020). Belém: ITV. <http://dx.doi.org/10.29223/PROD.TEC.ITV.DS.2020.10.PinaNeto>.

RD Instruments. (2013). Workhorse Rio Grande. Retrieved in 2021, January 22, from http://www.teledynemarine.com/Documents/Brand%20Support/RD%20INSTRUMENTS/Technical%20Resources/Manuals%20and%20Guides/Workhorse/Rio%20Grande%20ADCP%20Guide_Sep13.pdf

Reid, I., Bathurst, J. C., Carling, P., Walling D. E., & Webb, B. (1997). Sediment erosion, transport and deposition. In C. R. Thorne, R. D. Hey & M. D. Newson. *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management* (pp. 95-135). New York: John Wiley & Sons.

Sahoo, P. K., Dall'Agnol, R., Salomão, G. N., da Silva Ferreira Junior, J., Silva, M. S., e Souza Filho, P. W. M., Powell, M. A., Angélica, R. S., Pontes, P. R., da Costa, M. F., & Siqueira, J. O. (2019). High resolution hydrogeochemical survey and estimation of baseline concentrations of trace elements in surface water of the Itacaiúnas River Basin, Southeastern Amazonia: implication for environmental studies. *Journal of Geochemical Exploration*, 205, 106321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.06.003>.

Salomão, G., Dall'Agnol, R., Sahoo, P., Ferreira-Júnior, J., Silva, M., Souza-Filho, P., Berrêdo, J. F., Nascimento-Junior, W., & Costa, M. (2018). Geochemical distribution and thresholds values determination of heavy metals in stream water in the sub-basins of Vermelho and Sororó rivers, Itacaiúnas River watershed, Eastern Amazon, Brazil. *Geochimica Brasiliensis*, 32(2), 179-197. [http:// dx.doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018322180](http://dx.doi.org/10.21715/GB2358-2812.2018322180).

Santos, I., Fill, H. D., Sugai, M. R. V. B., Buba, H., Kishi, R. T., Marone, E., & Lautert, L. F. C. (2001). *Hidrometria aplicada* (Vol. 1, 372 p.). Curitiba: LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

Santos, J. Y. G. (2015). Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil) (Tese de doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Silva Júnior, R. O., Queiroz, J. C. B., Ferreira, D. B. S., Tavares, A. L., Souza-Filho, P. W. M., Guimarães, J. T. F., & Rocha, E. J. P. (2017). Estimativa de precipitação e vazões médias para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), Amazônia Oriental, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(5), 1638-1654. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v.10.5.p1638-1654>.

Sontek. (2018). Retrieved in 2021, January 22, from https://info.xylem.com/RiverSurveyorManual.html?_ga=2.136309041.1628213744.1624044107-1939132500.1624044107

Sousa, S. D., Monteiro, L. V. S., De Oliveira, D. C., Delinardo Da Silva, M. A., Moreto, C. P. N., & Juliani, C. (2015). O Greenstone Belt Sapucaia na região de Água Azul do Norte, Província Carajás: contexto geológico e caracterização petrográfica e geoquímica. In: P. S. Gorayeb & A. M. M. Lima (Org.), *Contribuições a geologia da Amazônia* (1. ed., Vol. 9, pp. 305-328). Belém, PA: SBG-NO.

Souza-Filho, P. W. M., De Lucia Lobo, F., Barbosa Lopes Cavalcante, R., Mota, J. A., Nascimento, W. R., Santos, D. C., Novo, E. M. L. M., Barbosa, C. C. F., & Siqueira, J. O. (2021). Land-use intensity of official mineral extraction in the Amazon region: linking economic and spatial data. *Land Degradation & Development*, 32, 4, 1706-1717. <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.3810>.

Souza-Filho, P. W. M., De Souza, E. B., Silva Júnior, R. O., Nascimento Junior, W. R., Versiani De Mendonça, B. R., Guimarães, J. T. F., Dall'Agnol, R., & Siqueira, J. O. (2016). Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. *Journal of Environmental Management*, 167, 175-184. PMID:26686070. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.039>.

Souza-Filho, P. W. M., Nascimento Junior, W.R., Versiani de Mendonça, B. R., Silva Junior, R.O., Guimarães, J.T.F., Dall'agnol, R., & Siqueira, J.O. (2015). Changes in the land cover and land use of the Itacaiunas river watershed, arc of deforestation, Carajas, southeastern Amazon. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, 1491-1496. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1491-2015>.

Souza-Filho, P., Nascimento, W., Santos, D., Weber, E., Silva, R., & Siqueira, J. (2018). A GEOBIA approach for multitemporal land-cover and land-use change analysis in a Tropical Watershed in the Southeastern Amazon. *Remote Sensing*, 10(11), 1683. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10111683>.

Vestena, L. R. (2009). Análise da dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, 21(3), 413-424. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132009000300014>.

Viney, N. R., & Sivapalan, M. (1999). A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia. *Hydrological Processes*, 13(5), 727-743. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5<727::AID-HYP776>3.0.CO;2-D](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<727::AID-HYP776>3.0.CO;2-D).

Wetzel, R. G., & Likens, G. E. (1991). *Limnological Analysis* (2nd ed.). New York: Springer Verlag. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-4098-1>.

Williams, G. P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology, Toulouse*, 111(1-4), 89-106. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90254-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(89)90254-0).

Zappi, D. C. (2017). *Paisagens e plantas de Carajás/Landscapes and plants of Carajás* (248 p.). Belém: Instituto Tecnológico Vale.

Authors contributions

Marcio Sousa da Silva: Responsible for the paper writing, development and conclusions, including the introduction, bibliographical review, methodology, interpretation of the results, discussion, and final considerations. General review of the paper.

Rosane Lopes Cavalcante: Guided the definition of the paper objectives and methodology structuring. Additionally, contributed to and guided the interpretation of the results, discussion, and conclusions. General review of the paper.

Pedro Walfir Martins e Souza Filho: Guided the definition of the paper objectives, methodology structuring, and discussion. Additionally, contributed to and guided the interpretation of the results, discussion, and final considerations. General review of the paper.

Renato Oliveira da Silva Júnior: Contributed to the general review of the paper and discussions and field work.

Paulo Rógenes Pontes: Contributed to the general review and discussions of the paper.

Roberto Dallagnol: Guided the structuring of the paper.

Edson José Paulino da Rocha: Guided the structuring and review of the paper.

Editor in-Chief: Adilson Pinheiro

Associated Editor: Massimo Gerrero

4 CONCLUSÕES GERAIS

Esta pesquisa teve como principal objetivo avaliar de que forma a vulnerabilidade ambiental se relaciona com a produção de sedimentos na BHRI e, por fim, comparar as áreas de maior e menor vulnerabilidade ambiental com a produção de sedimentos. Para tanto, foi considerada a integração entre as vulnerabilidades da bacia em termos de geologia, geomorfologia (relevo), tipos de solos, uso e ocupação do solo e clima, avaliada com base em um sistema de informações geográficas (SIG) e os processos hidrossedimentológicos (descargas líquidas e sólidas, concentração de sedimentos em suspensão e produção de sedimentos), adquiridos e obtidos por meio de fórmulas empíricas.

Visando responder as hipóteses levantadas, pretende-se neste capítulo apresentar respostas a elas, quais sejam: “As áreas ambientalmente mais vulneráveis da BHRI representam as principais fontes de sedimentos da bacia. Enquanto as áreas menos vulneráveis são áreas de passagem-transporte (“by-pass”) de sedimentos.”

Como marco temporal de análise, descritos nos capítulos 2 e 3, tem-se o ano de 2019, o qual também se refere ao ano de elaboração do mapa de uso e cobertura vegetal, essencial nas análises realizadas, e por outra vertente, coincidente com o período (2015 a 2019) de aquisição dos dados hidrossedimentológicos usado nos cálculos da produção de sedimentos. As metodologias adotadas são amplamente utilizadas em estudos semelhantes que buscam representar a vulnerabilidade ambiental e a dinâmica da produção de sedimentos em bacias hidrográficas (WILLIAMS, 1989; ROSS et al., 1996; REID et al., 1997; CREPANI et al., 2001; MORGAN, 2005; VESTENA, 2009; SANTOS, 2015; BUARQUE, 2015; MENEZES et al., 2021).

4.1 Resultados Chave: Impactos e Implicações

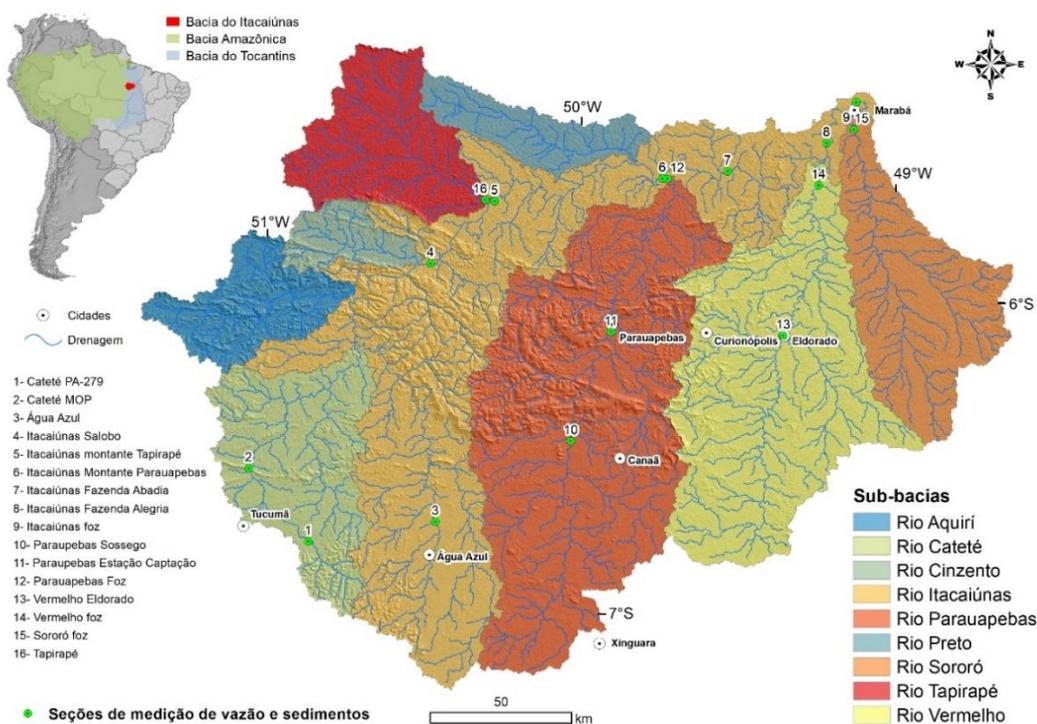
4.1.1 Relação vulnerabilidade ambiental x produção de sedimentos na BHRI

Os resultados obtidos, demonstram que a vulnerabilidade ambiental e a produção de sedimentos estão intimamente relacionadas, pois, os fatores atuantes utilizados para diagnosticar o grau de vulnerabilidade, são também os principais fatores controladores da magnitude e da característica da produção de sedimentos. Estas características naturais, tais como topografia, geologia, tipo de solo, uso e cobertura do solo, quantidade e intensidade das chuvas, bem como os fatores antropogênicos, afetam a quantidade de sedimentos gerados pela erosão das margens e canais, das encostas das serras, das distâncias percorridas pelos sedimentos, o armazenamento/mobilização de sedimentos disponíveis e a taxa de sedimentação.

Na busca de estabelecer a relação entre estes estudos, e para uma melhor compreensão de suas inter-relações, realizou-se a análise tendo como referências as áreas drenadas correspondentes as 16 seções de controle e monitoramento hidrossedimentológicas, as quais compõem as sub-bacias dos rios: Itacaiúnas (com 7 seções), Parauapebas (com 3 seções), Vermelho e Cateté (com 2 seções cada), Tapirapé e Sororó (com uma seção cada) (Figura 4.1).

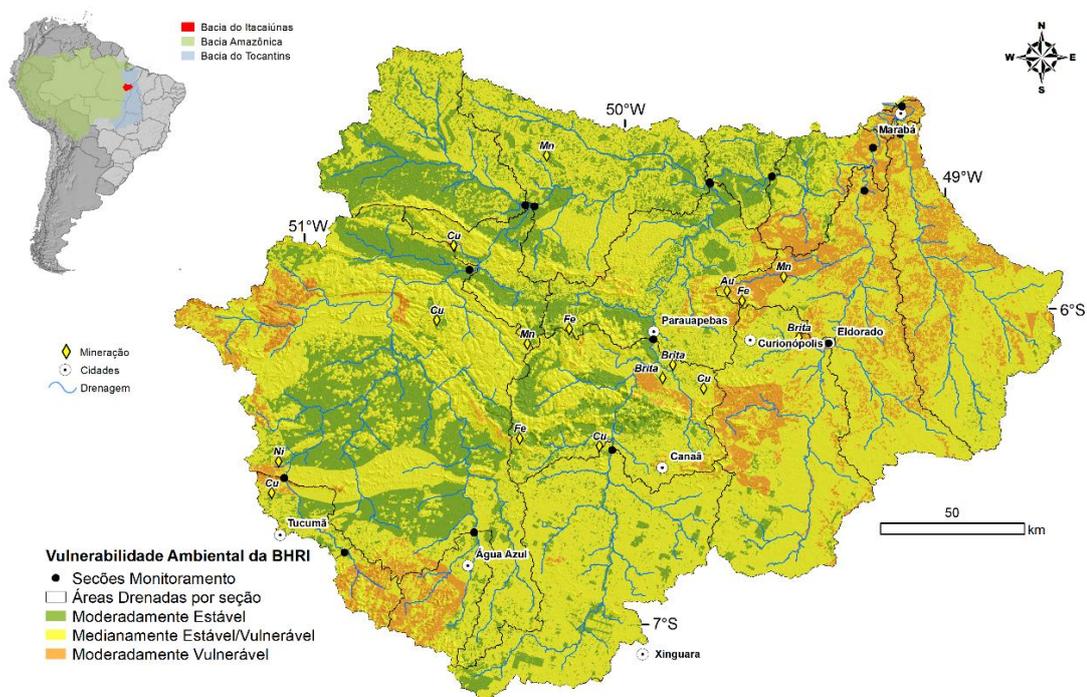
O mapa síntese de vulnerabilidade ambiental (Figura 4.2) resultante dos valores médios das vulnerabilidades dos fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos (intensidade pluviométrica) e de uso e cobertura vegetal, permitiu uma visão integrada da vulnerabilidade ambiental da BHRI, de tal maneira que foi possível avaliar de que forma cada fator influenciou no resultado final. Estes quando associados aos resultados da produção de sedimentos obtidos por Silva et. al. (2021) para cada uma das 16 seções de controle hidrossedimentológico mostra de forma clara suas relações, indicando as principais fontes de geração de sedimentos na bacia.

Figura 4.1 Área da BHRI e o arranjo de suas sub-bacias e as seções hidrossedimentológicas.



Fonte: Autor.

Figura 4.2 – Mapa de Vulnerabilidade Ambiental da BHRI, suas respectivas sub-bacias de drenagem, e os pontos de controle e monitoramento hidrossedimentológicos.



Fonte: Autor.

Os dados do monitoramento sazonal realizado entre 2015 e 2019, tornaram possível a construção das curvas-chave de sedimentos, que permitiram estimar as descargas de sedimentos em suspensão das seis sub-bacias principais que compõem a BHRI em diferentes trechos, bem como a avaliação da variação sazonal e espacial da concentração média de sedimentos em suspensão (CSS) (Figuras 4.3 e 4.4) e produção média específica de sedimentos (PSS) (Figura 4.5). Os resultados revelam que o período chuvoso é responsável por 93% das descargas líquidas com médias de 1460,88 m³/s e por 98% das descargas de sedimentos em suspensão com média de 5864,15 ton/dia (SILVA et al., 2021).

Os mapas de CSS e PSS (Figuras 4.3 e 4.4), mostram de forma detalhada a contribuição média da CSS e PSS do período chuvoso de cada área drenada na seção de controle e quais são as áreas com maior e menor aporte de sedimentos em suspensão carregados pelas águas superficiais que banham a bacia, no mapa de Descarga Sólida em Suspensão (QSS) apresentado na Figura 4.5.

A seguir serão abordados os resultados por sub-bacias de tal forma que se possa ter um melhor entendimento de suas relações espacialmente:

A **sub-bacia do rio Sororó** na porção leste/nordeste da BHRI, apresenta grau de **vulnerabilidade ambiental de medianamente a moderadamente vulnerável** (Figura 4.2) em resposta a: uma alta vulnerabilidade do uso e cobertura vegetal, com mais de 77% de sua área desmatada e ocupada por pastagens; solos com grau de vulnerabilidade ambiental mediano dominante, atributo dos argissolos vermelho-amarelos distróficos, com textura variando de muito argilosa a argilosa que recobrem a maior parte da área, e uma pequena porção a leste com neossolos quartzarênicos órticos de textura arenosa de grau vulnerável; geologia com graus de vulnerabilidade de medianamente estável/vulnerável a vulnerável, característicos das rochas que compõem o Cinturão Araguaia (arenitos, siltitos, pelitos, conglomerados, filitos, xistos e depósitos quaternários e recentes); geomorfologia com vulnerabilidade moderada, qualidade de relevo predominantemente plano, representado pelas Depressões do Médio e Baixo Araguaia, Planícies e Terraços Fluviais e pelo Patamar Dissecado Capim-Moju; uma intensidade climática medianamente estável/vulnerável. Nesse contexto, as vulnerabilidades identificadas se refletem nas mais altas taxas de CSS e PSS, com 110,4 mg/l e 383,8 (kg/dia/km²) respectivamente (Figura 4.3), sendo classificada como moderada CSS (Figura 4.4). Esse conjunto resulta em uma descarga sólida em suspensão média para o período chuvoso de 1369,2 ton/dia, representando 23,3% de toda a carga de sedimentos em suspensão transportada na

BHRI, para uma área de drenagem de apenas 3567 km², ou seja, menos de 9% da área total da bacia (SILVA et al., 2021).

A **sub-bacia do rio Vermelho**, monitorada por duas seções de controle (uma na porção média em Eldorado dos Carajás e a outra em sua foz), apresenta **vulnerabilidade ambiental de medianamente a moderadamente vulnerável** (Figura 4.2), relacionada a sua área de drenagem que apresenta em mais de 80% as mesmas características, quanto aos fatores de vulnerabilidade, da sub-bacia do rio Sororó. Diferencia-se apenas em algumas pequenas porções a oeste onde nascem os seus afluentes da margem esquerda (rio Sereno em Serra Leste) sob uma geologia estável a moderadamente estável, porém, com solos e geomorfologia vulneráveis;

Como mensurado por Silva et al. (2021), estas características também lhes proporcionam a geração de altas taxas de CSS, com 101,5 mg/l (na seção de Eldorado dos Carajás), alcançando 105,7 mg/l em sua foz (Figura 4.3) e com PSS variando de 256 (kg/dia/km²) a 321,6 (kg/dia/km²) (Figura 4.5) para cada uma de suas áreas drenadas. Classificando a mesma quanto a CSS como moderada (Figura 4.4). Todas essas interações se revertem em uma alta taxa de produção de sedimentos gerando uma descarga sólida média de 2230 ton/dia de sedimentos em suspensão para uma área drenada de 6930 km², representando 38,3% de toda o transporte de sedimentos, ou seja, é a área onde ocorre a maior produção de sedimentos em suspensão na BHRI.

A **sub-bacia do rio Parauapebas**, segunda maior com 9671 km² que corresponde a 23% da área drenada da BHRI, situada na porção central, de eixo norte-sul, apresenta grau de **vulnerabilidade ambiental moderadamente a medianamente estável**. Apresenta três seções de monitoramento de controle, compartimentando a sub-bacia em alto, médio e baixo curso, possibilitando assim, um melhor entendimento de suas características de vulnerabilidades e geração de sedimentos em suspensão. É classificada como de muito baixa CSS. As propriedades de seus fatores de vulnerabilidades que contribuem em maior ou menor intensidade na produção sedimentos ou na energia erosiva e de transporte da área são avaliados e classificados a seguir:

Na porção do alto curso, apresenta características distintas de suas porções média e baixa, pois têm mais de 80% de sua área (3804 km²), desmatada e coberta por pastagens, resultando em um área vulnerável quanto ao uso e cobertura vegetal; é estável geologicamente, cujo embasamento é sustentado por rochas cristalinas (principalmente granitos) da Província Carajás (Domínios Sapucaia e Rio Maria); com solos medianamente estáveis/vulneráveis, de textura argilosa e representados por argissolos vermelhos-amarelos distróficos; quanto a

geomorfologia apresenta grau de vulnerabilidade moderadamente estável predominante, característico de um relevo suavemente ondulado, de baixa e média declividade da Depressão do Médio Xingu; e intensidade pluviométrica entre 250 – 275 mm de grau mediano. Possui como característica hidrológica marcante um regime intermitente e fundo rochoso, associada a um solo pouco profundo em resposta a sua base geológica de rochas graníticas, com isso, essa porção da sub-bacia do rio Parauapebas, apesar de suas vulnerabilidades, registra a menor CSS (15,3 mg/l) e, conseqüentemente, a menor PSS (31,9 kg/km²/dia) e uma das menores descargas sólidas em suspensão com 121,5 ton/dia (SILVA et al., 2021).

A porção média da sub-bacia apresenta graus de vulnerabilidade moderados, dominando suas áreas de drenagem da margem esquerda a medianamente estáveis nas áreas da margem direita, refletindo suas características bem complexas, quanto aos seus fatores de vulnerabilidades: a vulnerabilidade quanto ao uso e cobertura vegetal é estável, representado por floresta (na porção da margem esquerda) da Floresta Nacional de Carajás (FLONA Carajás), Parque Nacional da Bocaina e Área de Proteção Ambiental do Gelado (APA do Gelado), e vulnerável com pastagens em sua margem direita; a geologia varia de estável a moderadamente vulnerável refletindo a diversidade geológica da bacia geológica de Carajás, com rochas metavulcano-sedimentares, granitos e granitóides; solos estáveis e medianamente estáveis, variando de muito argilosa a média, de argilossolos e latossolos vermelhos-amarelos distróficos; a geomorfologia é dominada por áreas moderadamente vulneráveis a vulneráveis, de relevo ondulado da Depressão do Médio Xingu a montanhoso da Serra de Carajás e dos Planaltos Residuais do Sul do Pará; com clima de vulnerabilidade mediana, com a mais baixa intensidade pluviométrica variando de 243-250 mm. Mesmo com essas características dinâmicas da vulnerabilidade, essa porção da sub-bacia do rio Parauapebas, ainda exibe uma baixa taxa de CSS (22,3 mg/l) e baixa PSS (47,7 kg/dia/km²), resultando em uma descarga de sedimentos em suspensão média de 328,2 ton/dia, sendo classificada como de baixa CSS;

O baixo curso da sub-bacia do rio Parauapebas, com seção de controle na foz, banha nessa porção uma área de vulnerabilidade de moderada a medianamente estável/vulnerável. Suas vulnerabilidades não apresentam características uniformes pois este drena uma áreas diferenciadas, nas quais: A vulnerabilidade do uso e cobertura vegetal é representada por áreas fragmentadas de floresta estáveis e áreas de pastagens vulneráveis em uma proporção de 50%; por sua vez, a geologia é dominada por áreas estáveis a moderadamente estáveis do Domínio Bacajá, formada por rochas metassedimentares da formação Buritirama, Metamórficas da formação Tapirapé e granulitos máficos e félsicos arqueanos; enquanto os solos, ao longo de

suas margens, são estáveis e dominados por latossolos vermelho-amarelos distróficos e texturas muito argilosa; a vulnerabilidade geomorfológica varia de moderadamente estável nas pequenas faixas das planícies, mediana nas porções dominadas pela depressão do Bacajá e moderadamente a vulneráveis nas porções relacionadas a unidade de Serra dos Carajás; e com mediana vulnerabilidade do clima. De acordo com Silva et al. (2021), estas características somadas as anteriores (do médio e alto curso) refletem diretamente no fornecimento de sedimentos, portanto, a sub-bacia apresentou em sua foz uma CSS (31,7 mg/l) e PSS (79,1 kg/dia/km²) baixas, mesmo drenando uma grande área resultando numa descarga média de sedimentos em suspensão de 764,7 ton/dia, umas das mais baixas da BHRI.

A **sub-bacia do rio Tapirapé**, que drena a porção noroeste da BHRI, revelou grau de **vulnerabilidade ambiental moderadamente estável a medianamente estável** cuja produção de sedimentos é marcada, principalmente, por: sua condição de uso e ocupação, pois ao longo de sua margem direita encontra-se a Reserva Biológica do Tapirapé (REBIO Tapirapé) que permitiu a preservação da floresta, resultando em uma área estável, em contra partida, ao longo de sua margem esquerda, predomina a ocupação por pastagens e alguns remanescentes de floresta, dominando áreas vulneráveis; a geologia é dominada por áreas estáveis (70%) a moderadamente estáveis (30%) dentro do Domínio Bacajá, constituído por rochas metassedimentares da formação Buritirama, Metamórficas da formação Tapirapé e granulitos máficos e félsicos arqueanos; solos muito argilosos com vulnerabilidade estável ao longo da margem esquerda com predomínio de latossolos e medianamente estável/vulnerável na direita de argissolos; vulnerabilidade geomorfológica moderadamente estável domina a porção das nascentes no extremo noroeste e de medianamente chegando a vulnerável na porção a sul que margeia as Serras de Carajás (Salobo), é dominada pela Depressão do Bacajá. O clima como em toda a bacia é medianamente vulnerável. Essas condições quando integradas resultam em uma CSS e PSS baixas com 20,9 mg/l e 62 kg/dia/km², respectivamente, gerando um transporte de 163,95 ton/dia de sedimentos em suspensão, representando 3,1 % como contribuição para a BHRI (SILVA et al., 2021).

A **sub-bacia do rio Cateté**, por questões de dificuldades de acesso, possui apenas duas seções de monitoramento em seu alto curso, onde é possível realizar as atividades de coleta e medição de vazão, representando uma área drenada de aproximadamente 900 km². A seção mais a montante (Cateté/PA279), drena uma área mais vulnerável quanto ao uso e cobertura vegetal, com geologia estável formada por uma base granítica, solos vulneráveis de textura indiscriminada representado por neossolos litólicos distróficos, relevo moderadamente

vulnerável a vulnerável representado pelos Planaltos residuais do Sul do Pará de declividade de média a alta e relevo fortemente ondulado; e de maior intensidade pluviométrica, mas, ainda, medianamente estável, proporcionando conforme Silva et. al. (2021) em uma CSS de 27,4 mg/l e uma PSS de 111,1 kg/dia/km², gerando 41,8 ton/dia de sedimentos em suspensão. E quanto à sua porção mais a jusante, somando-se a essa, apresenta uma CSS de 30,6 mg/l e PSS de 70,8 kg/dia/km² para um montante de 63,6 ton/dia de sedimentos em suspensão transportados, representando 1,4% do total da BHRI. Verificou-se que ocorreu uma redução na PSS em mais de 30%, provavelmente associada a retenção ao longo do canal ou menor produção nas áreas onde se tem a floresta.

A **sub-bacia do rio Itacaiúnas**, representa o curso principal da BHRI que é o receptor de todas as contribuições dos tributários principais (rios Parauapebas, Vermelho, Sororó, Tapirapé e Cateté) os quais tem sido monitorados, além de outros tributários menores (rios Preto, Aquiri e Cinzento) integrados nessa sub-bacia. Possui sete seções de controle hidrossedimentológicas distribuídos ao longo de seu percurso, tornando possível uma avaliação conjunta e integrada de suas vulnerabilidades e suas relações com a produção de sedimentos em suspensão ao longo de todo o percurso.

A **seção do rio Água Azul**, situa-se no ramo inicial onde se localiza a nascente do rio Itacaiúnas (município de Água Azul do Norte), com 960 km², representando 2,3 % da área da bacia. Revela características de **vulnerabilidade ambiental moderadamente vulnerável**, resultante da combinação de fatores intrínsecos nesse setor da bacia, onde: 70% de sua área é desmatada e os 30% restantes são fragmentos dispersos, predominando o grau vulnerável quanto ao uso e cobertura vegetal; a geologia representada por rochas cristalinas graníticas, proporciona um embasamento geológico estável; com um neossolo litólico distróficos de textura indiscriminada vulnerável; associado a um relevo ondulado a fortemente ondulado, de declividade média a alta, com altitudes superiores a 500 metros, dos Planaltos Residuais do Sul do Pará, representadas por áreas moderadamente vulneráveis a vulneráveis e porções de relevo mais baixos ondulados imprimindo, assim, uma vulnerabilidade moderada, e mediana no que se refere ao clima. Esses fatores associados proporcionam a esse setor da bacia uma CSS de 41,7 mg/l e uma PSS de 128,2 kg/dia/km² gerando uma produção de sedimentos em suspensão de 122,8 ton/dia (SILVA et al., 2021).

A **seção do Salobo** representa a seção que cobre a maior área drenada da bacia com 12300 km², recebendo os *inputs* dos rios Cateté, Aquiri, Cinzento e todo o tramo do alto curso do rio Itacaiúnas, e a mais complexa quanto se tratam dos fatores relacionados às

vulnerabilidades ambientais, a saber: a geologia formada por rochas que compõem a Província de Carajás, onde tem-se desde cristalinas representadas pelos granitos e granitóides do Domínios Canaã dos Carajás, Sapucaia e Rio Maria, por rochas sedimentares, metavulcano-sedimentares e os granitos e granitóides que integram a bacia geológica de Carajás de graus de vulnerabilidade estável a moderadamente estável, cujo trecho é constituído por rochas sedimentares de grau moderadamente vulnerável; a geomorfologia desse trecho se inicia a sul nos terrenos da depressão do Médio Xingu, atravessa os Planaltos Residuais do Sul do Pará, cruzando a Serra dos Carajás e, finalmente, chegando à Depressão do Bacajá a norte, são áreas de relevo desde planos a muito montanhosos, onde o grau de vulnerabilidade dominante é o vulnerável, com trechos moderadamente a medianamente vulneráveis; os solos refletem a geologia, apresentando texturas muito argilosas dos argissolos de grau medianamente vulnerável, argilosa a média dos latossolos de grau estável e indiscriminada dos neossolos litólicos vulneráveis; o fator uso e cobertura vegetal é o destaque pois, a área de floresta pristina cobre 82 % do trecho, graças as unidades de conservação da Flona Carajás, Flona Itacaiúnas, Flona Tapirapé- Aquiri e a Terra Indígena Xicrin-Cateté imprimindo uma vulnerabilidade predominantemente estável, destacam-se as áreas das Minas de S11D, do Salobo e Igarapé Bahia como vulneráveis. Com todo esse contexto complexo relacionado aos fatores que constituem a vulnerabilidade ambiental, resultou em predomínio de áreas com grau moderadamente estáveis seguidas das medianamente a moderadamente vulneráveis. Segundo Silva et al. (2021), quando relacionadas à produção de sedimentos verifica-se que a CSS é de 31 mg/l e a PSS é de 73,3 kg/dia/km², resultando em uma descarga de 903,2 ton/dia. Mesmo com o aumento considerável da descarga sólida, função de um maior volume de água, nota-se que ocorreu uma queda expressiva na CSS e na PSS, de 24% e 43% menores, respectivamente, em relação as obtidas na seção de controle anterior, evidenciando que esse trecho tem um *input* de sedimentos menor, funcionando como área de “by-pass” ou de sumidouro de sedimentos.

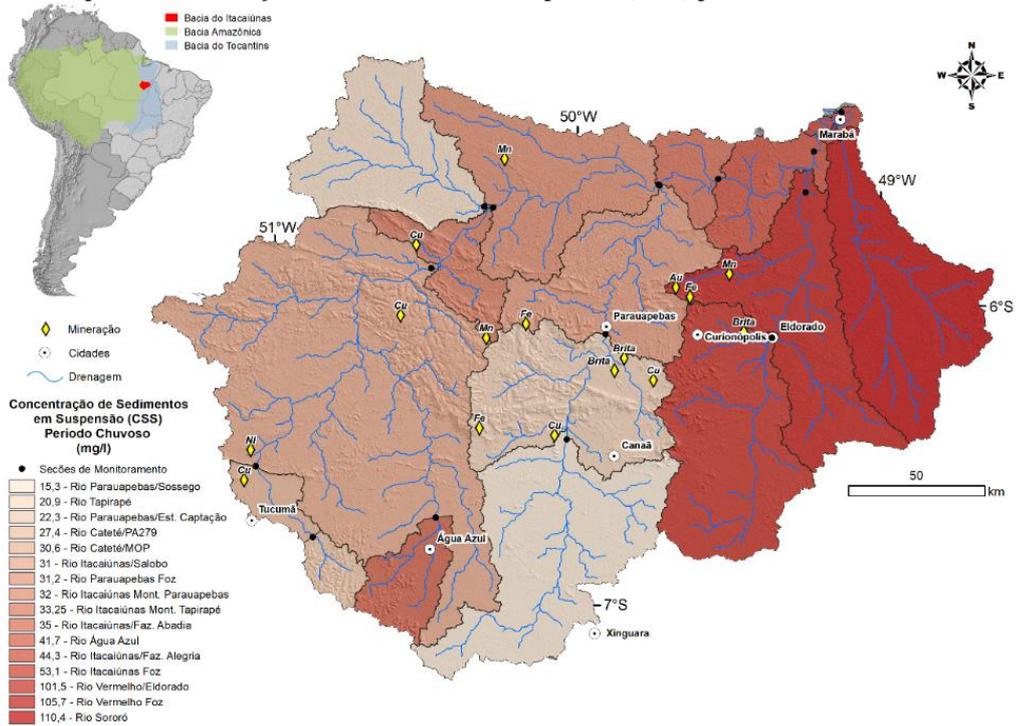
A **seção montante do Tapirapé**, representa a uma seção de saída do rio Itacaiúnas de uma região dominada por florestas e áreas da Serras dos Carajás, drenando uma pequena área após o Salobo, cruza as últimas serras e adentra a depressão do Bacajá de áreas mais baixas e relevo mais suave, apresenta uma CSS de 33,25 mg/l e PSS de 73,4 kg/dia/km² (SILVA et al., 2021), quase a mesma do trecho anterior, mas com um pequeno aumento na descarga sólida, alcançando 980,2 ton/dia. Área medianamente estável.

A **seção a Montante do rio Parauapebas**, já recebe o *input* fluvial e de carga sedimentar dos rios Tapirapé e Preto, que drenam as áreas a noroeste da BHRI e das áreas a

montante, atualmente com graus de vulnerabilidade ambiental medianamente vulneráveis e fragmentos moderadamente estáveis, refletindo o uso e cobertura vegetal da região, onde áreas de florestas foram substituídas por pastagens, acarretando em áreas vulneráveis; a geologia é dominada pelas rochas metamórficas e metassedimentares das formações Tapirapé e Buritirama e pelos granulitos máficos e félsicos do Domínio Bacajá, de grau moderado a estável de vulnerabilidade; O relevo ondulado com vulnerabilidade moderada nas porções mais baixas ao longo das planícies de inundação e medianamente no restante da área, da Depressão do Bacajá e Planícies e Terraços Fluviais; os solos de textura muito argilosa a argilosa, é representado pelos latossolos e argissolos, revertendo-se em áreas estáveis e medianamente estáveis, respectivamente. Esses fatores somados aos de montante, retratam conforme Silva et al. (2021) em uma CSS de 32 mg/l e PSS de 79,1 kg/dia/km² para uma descarga sólida média de 1526,2 ton/dia nessa porção, que corresponde a uma área drenada de 19183 km² ou 46 % da BHRI.

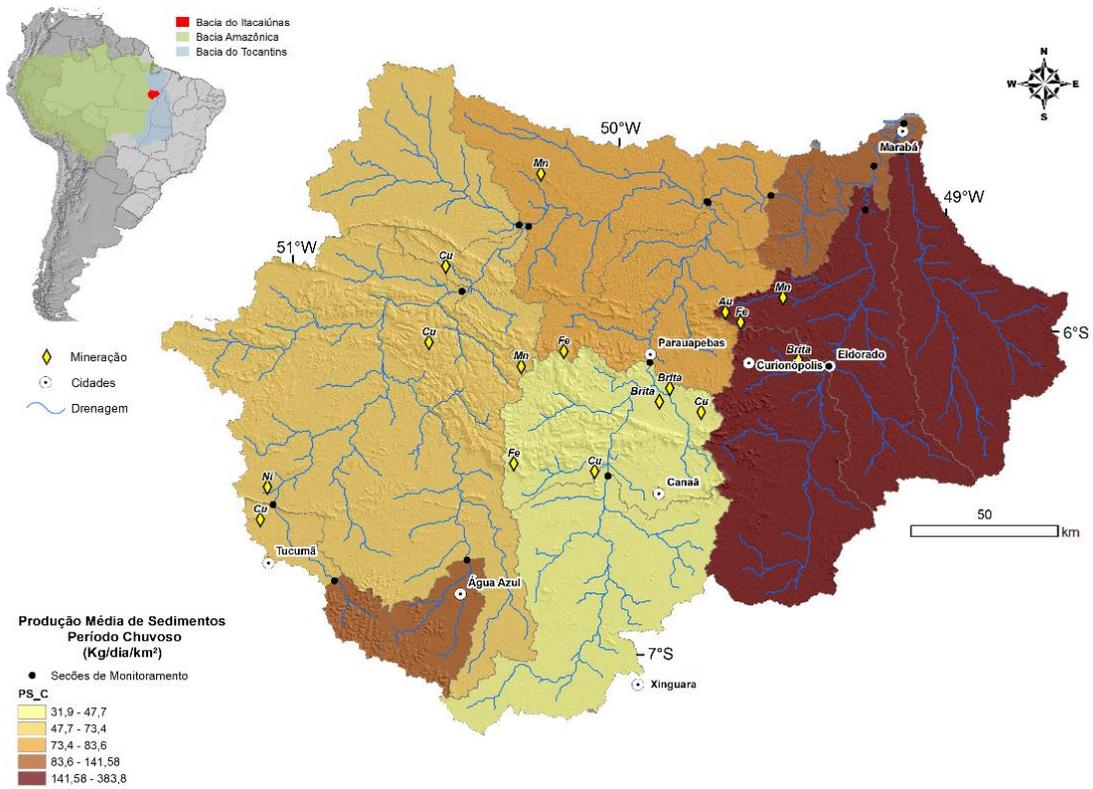
As **seções da Fazenda Abadia, Fazenda Alegria e Foz do rio Itacaiúnas**, apresentam grau de vulnerabilidade ambiental de moderadamente estável a moderadamente vulnerável, saindo de uma área geologicamente estável em rochas cristalinas para uma vulnerável em sua foz, representadas pelas áreas das planícies de inundação em terrenos quaternários, de uso e cobertura vegetal (áreas urbanas e pastagens) vulnerável, recebendo respectivamente as descargas líquidas e sólidas das sub-bacias dos rios Parauapebas, Vermelho e Sororó, as quais de acordo com Silva et. al. (2021) são reproduzidas em seus valores de CSS com 35, 44,3 e 53,1 mg/l e de PSS com 83,6, 129 e 141,58 kg/dia/km² e por fim tem-se a descarga média de sedimentos em suspensão com valores de 2468, 4850,9 e 5864,15 ton/dia, respectivamente.

Figura 4.3 – Mapa de Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) por área Drenada.



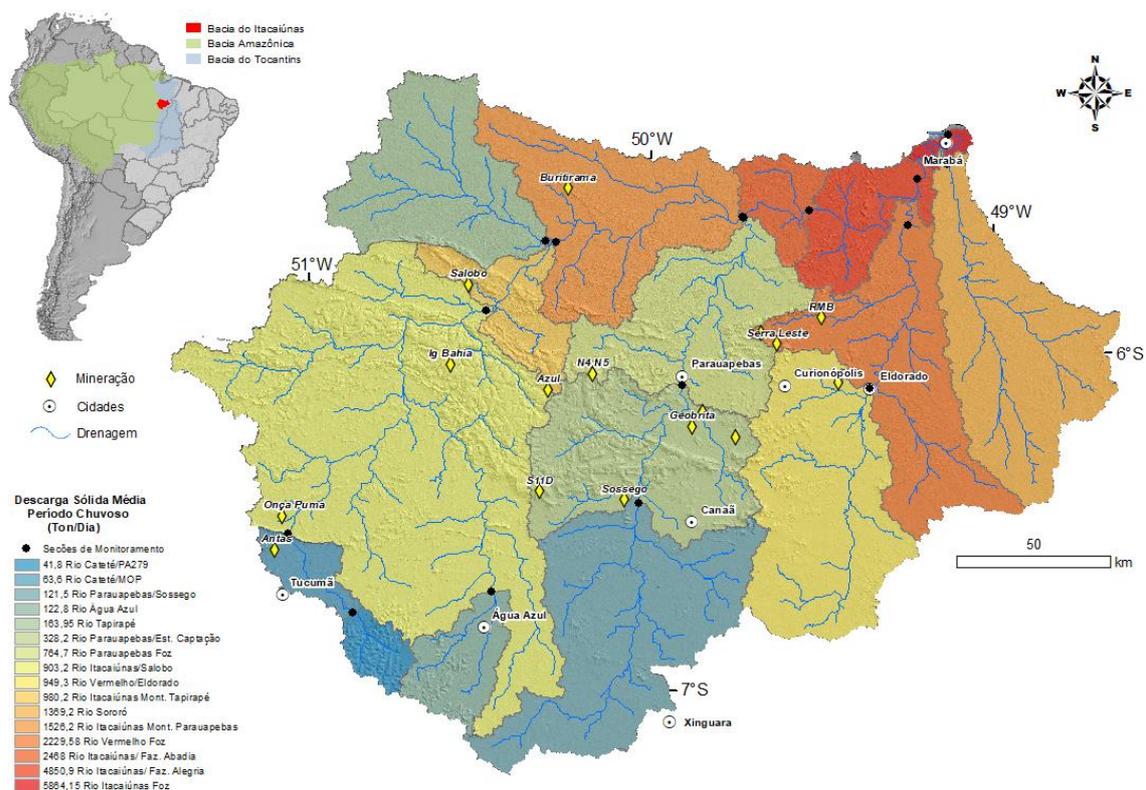
Fonte: Autor.

Figura 4.4 – Mapa de Produção de Sedimentos em Suspensão (CSS) por área Drenada.



Fonte: Autor.

Figura 4.5 – Mapa de Descarga Sólida de Sedimentos em Suspensão (CSS) em cada seção de controle.



Fonte: Autor.

4.2 Conclusões Integradas

Os mapas 4.2, 4.6 e 4.7 permitem concluir que as áreas mais e menos vulneráveis ambientalmente, ocorrem em dois setores específicos da BHRI, sendo distinguidas principalmente pelas áreas onde a geologia e o relevo são distintos, ou seja, a leste tem-se o Cinturão Araguaia com rochas friáveis (sedimentares e metassedimentares) e os depósitos quaternários associados às planícies de inundação dos rios Vermelho, Sororó e baixo curso do rio Itacaiúnas, mais suscetíveis aos processos erosivos, com relevo plano a ondulado moderadamente estável, e onde o uso e cobertura vegetal é dominado por áreas desmatadas e revertidas em pastagens (77%), e o restante da bacia, onde a geologia é dominada por rochas cristalinas da Província Carajás e domínio Bacajá, mais estáveis e uma faixa central da bacia dos Carajás constituída por rochas sedimentares, cujo relevo é fortemente ondulado a

fortemente montanhoso de moderado a vulnerável, áreas desmatadas predominam nas porções sul-sudoeste e norte e na porção centro-oeste dominada por florestas das áreas de conservação e terras indígenas, propiciando a essa região as áreas de menor vulnerabilidade ambiental. Estas características estão diretamente associadas a maior ou menor produção de sedimentos identificadas BHRI e evidenciadas pelas muito baixas, baixas a moderadas CCS e baixas e moderadas PSS de acordo com a classificação estabelecida por Lima et al. (2004) para as bacias hidrográficas do Brasil.

Em geral, os valores médios nos rios que compõem a BHRI para a concentração de sedimentos em suspensão são superiores aos encontrados por Lima et al. (2003) no rio Tocantins, que tem concentração média de 8,84 mg/L; estão dentro da média de 27,38 mg/L do rio São Francisco (Lima, 2001); são inferiores a 149,33 mg/L no rio Amazonas (Guyot et al., 2005); e comparáveis aos 108,11 mg/L do rio Paraguai (Carvalho et al., 2005).

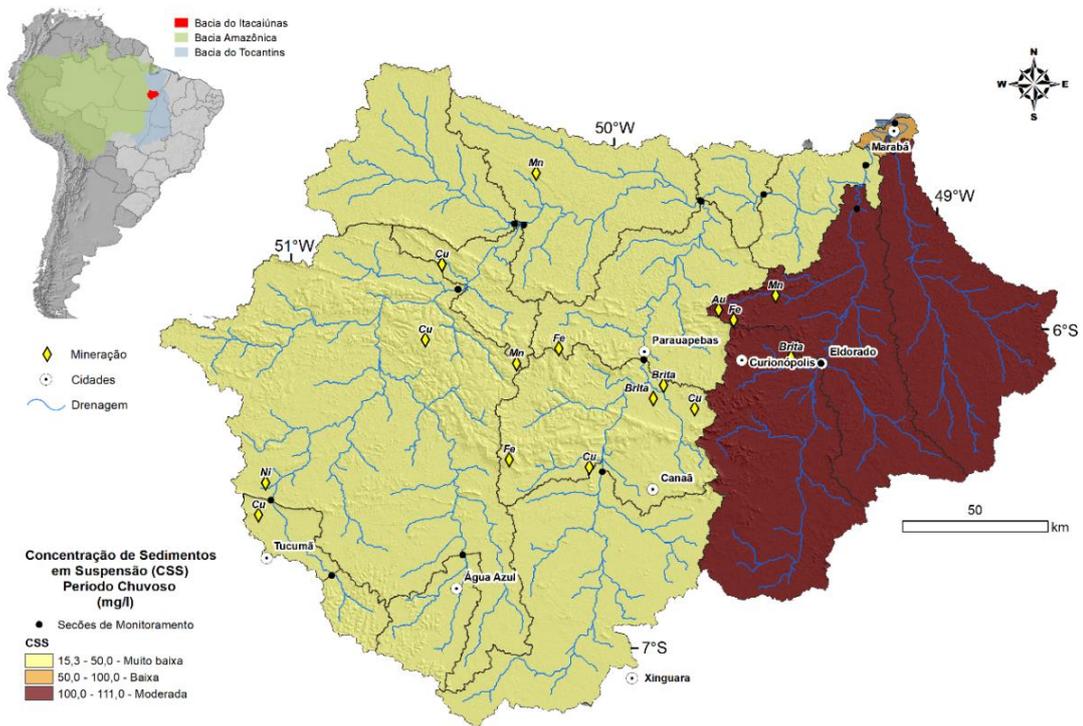
4.3 Principais contribuições da pesquisa

- Identificação dos fatores de vulnerabilidade que predominam sobre os demais avaliados para a produção de sedimentos na BHRI, são: **o grau de uso e cobertura vegetal e a geologia**, ou seja, suas relações com a produção de sedimentos são diretamente proporcionais aos seus graus de vulnerabilidade. Destaca-se que apesar da vulnerabilidade geomorfológica (relevo) mostrar grande impacto no grau de energia que o sistema tem, ele é atenuado e, até mesmo, anulado pelo tipo de uso e cobertura vegetal.

- O processo de ocupação principal da região, se deu por meio da substituição da floresta nativa por pastagem para implantação da atividade da pecuária, sendo esta um reflexo das condições ambientais encontradas, de relevo plano e solos adequados, que conforme EMBRAPA (2016), são áreas boas para a prática da pecuária, afirmativa esta também corroborada por Santos et al. (2020).

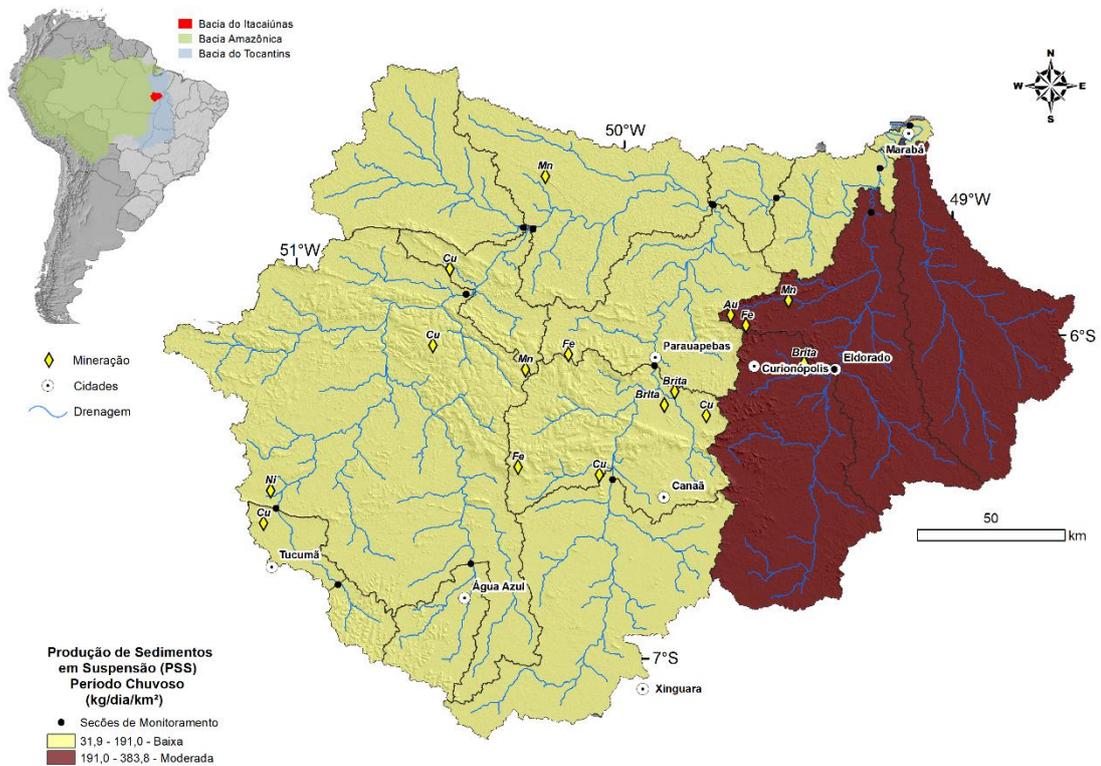
- Os resultados obtidos por Silva et al. (2021) e corroborados aqui, permitiram confirmar que as atividades minerais legais em curso dentro de áreas protegidas de florestas, não geram impactos diretos na produção de sedimentos como prováveis fontes. Por sua vez, as áreas de pastagens estão diretamente associadas ao maior ou menor “*input*” de sedimentos no sistema.

Figura 4.6 – Mapa de Classificação da Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS).



Fonte: Autor (baseado na Classificação de Lima et al., 2004).

Figura 4.7 – Mapa de Classificação da Produção de Sedimentos em Suspensão (PSS).



Fonte: Autor (baseado na Classificação de Lima et al., 2004).

- Produção de uma cartografia temática específica relacionando as diferentes vulnerabilidades da BHRI permitindo uma visão integrada e consistente da vulnerabilidade do meio físico, associados aos seus diversos usos e ocupação e de pronta aplicação para e devida gestão da BHRI.

- Em síntese, foi possível confirmar que as áreas ambientalmente mais vulneráveis representam sim as principais fontes de sedimentos da bacia. Enquanto as áreas menos vulneráveis são áreas de passagem-transporte (“by-pass”) de sedimentos.

REFERÊNCIAS

- ACSELRAD, H. Vulnerabilidade ambiental, processos e relações. *In: COMUNICAÇÃO AO II ENCONTRO NACIONAL DE PRODUTORES E USUÁRIOS DE INFORMAÇÕES SOCIAIS, ECONÔMICAS E TERRITORIAIS*, FIBGE, Rio de Janeiro, [Resumo]. 5p. 24/8/2006. 5p.
- AGUIAR, A. P. D.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, v. 209, p. 169–188, 2007.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift (Berlin)**, v. 22, n. 6, p. 711-728. 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology**, v. 234, n. 3-4, p. 228-248, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00253-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00253-5).
- BANIYA, M. B.; ASAEDA, T.; SHIVARAM, K. C.; JAYASHANKA, S. M. D. H. Hydraulic Parameters for Sediment Transport and Prediction of Suspended Sediment for Kali Gandaki River Basin, Himalaya, Nepal. **Water**, v. 11, e1229; 2019. doi:10.3390/w11061229.
- BAYER, D.M. **Effects of land use changes on the hydrological regime of large-scale basins**. 2014. 156f. Thesis (Doctorate). Institute for Hydraulic Research of the Federal University of Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), 2014.
- BOAVENTURA, R. S. Geomorfologia da Folha Tocantins. *In: BRASIL*. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto Radam Folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1974.
- BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: estudo de caso do rio Madeira**. 2015. 165f. Tese. (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.
- CARVALHO, N. O.; IDE, C. N.; VAL, L. A. A.; RONDON, M. A. C.; BARBEDO, A. G. A.; CYBIS, L. F. A. Riscos devido à degradação e agradação de solos na bacia do alto Paraguai. *In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 16, 2005, São Paulo. **Anais[...]**. São Paulo: ABRH, 2005.
- CECONI, D. E.; PICCILLI, D. G. A.; BERNARDI, F.; FENSTERSEIFER, P. Análise de vulnerabilidade visando o planejamento ambiental em bacia de captação para abastecimento público. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo. v. 21, e00782, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0078r2vu18L1AO>.

CHAVES, H.M.L.; ALIPAZ, S. An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. **Water Resour Manage** v. 21, p. 883–895, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9107-2>.

CHRISTOFOLETTI, A. A Análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, v. 4, n. 8, p. 23-42, outubro de 1979.

COLBY, B. R. Fluvial sediments – a summary of source, transportation deposition, and measurement of sediment discharge. Contributions to General Geology. **Geological survey Bulletin** 1181-A. United States Government Printing Office, Washington. 1963.

COLLARES, E. G. **Avaliação de Alterações em Rede de Drenagem de Microbacias como Subsídio ao Zoneamento Geoambiental de Bacias Hidrográficas**: Aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari-SP. 2000. 2v. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

CONEJO, J. G. L.; MARANHÃO, N.; BURNETT, J. A.; ANTUNES, B. 2 Sobre um índice de disponibilidade hídrica aplicável à gestão dos recursos hídricos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande – MS. **Anais[...]**. Campo Grande – MS. 2009.

COSTA, F. R.; SOUZA, R. F.; SILVA, S. M. P. Análise das vulnerabilidades natural e ambiental da bacia hidrográfica do rio Doce (RN). São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 40, n. 2, p. 459 - 475, 2021.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, VALDETE; B.; FARIA, C. C. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. INPE, São José dos Campos, 2001, 103 p.

DALL'AGNOL, R.; CUNHA, I. R. V.; GUIMARÃES, F. V.; OLIVEIRA, D. C.; TEIXEIRA, F. B. T.; FEIO, G. R.; LAMARÃO, C. N. Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: the origin of hydrated granites associated with charnockites. **Lithos**, v. 277, p. 3-32. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.09.032>.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E. L.; MACAMBIRA, M. J. B.; SANTOS, J. O. S.; ALTHOFF, F. J.; SOARES, J. E. B. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p. 157-185. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.007>.

FREITAS, E. G. Análise da vulnerabilidade ambiental do município de feira nova/se através da utilização de produtos de sensoriamento remoto. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM GEOGRAFIA, 14. 2021, **Anais[...]** ISSN: 2175-8875. 2021. Disponível em: [//efaidnbnmnnibpcajpcgclcfndmkaj/https://editorarealize.com.br/editora/anais/enanpege/2021/61e6c43e16147_18012022104430.pdf](https://efaidnbnmnnibpcajpcgclcfndmkaj/https://editorarealize.com.br/editora/anais/enanpege/2021/61e6c43e16147_18012022104430.pdf). Acesso em 17.05.2022.

GLYSSON, G. D. **Sediment-transport curves** Reston, Virginia: USGS. p. 87-218. 1987. <https://doi.org/10.3133/ofr87218>.

GOLDENFUM, J.A. **Simulação hidrossedimentológica em pequenas bacias rurais**. 1991. 133f. Dissertação (mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

GOMES, D. J. C.; SILVA, L. P.; FERREIRA, N. S.; LOBATO, R. R. C.; SERRÃO, E. A. O.; LIMA, A. M. M. Impactos climáticos na erosão hídrica do solo para a Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 242-265, 2021.

GRIGIO, A. M. **Aplicação de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica na Determinação da Vulnerabilidade Natural e Ambiental do Município de Guamaré / RN: simulação de risco das atividades da indústria petrolífera**. Natal: UFRN, 2003. 222f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

GUYOT, J. L.; FILIZOLA, N. P.; LARAQUE, A. Régime et bilan du flux sédimentaire de l'Amazone à Ôbidos (Pará, Brésil) de 1995 à 2003. *In*: WALLING, D. E. ; CHOROWITZ, A. J. **Sediment budgets**. UK: IAHS. v. 291, p. 347-354. 2005.

HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. **Hydrological processes**. v. 17, 3387–3409, 2003. Published online 21 August 2003. Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.1299.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Agropecuário**. 2017. Censo Agro. (2017). Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em 22 de janeiro 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Dados históricos**. 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em 22 de janeiro 2021.

LAMBIN, E.F.; GEIST, H.J.; LEPERS, E. Dynamics of land use and land cover change in tropical regions. **Annu. Rev. Environ. Resour.** 28, 205–241. 2003.

LANNA, A. E. L. **Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília. IBAMA. 1995.

LEITE, E. F.; BEREZUK, A. G.; SILVA, C. A.; CARVALHO, E. A. O relevo e o uso da terra da bacia hidrográfica do rio Miranda, MS. *In*: LIMA, T. N.; FARIA, R. Q. **Ecótono cerrado pantanal: meio ambiente e história natural**. [livro eletrônico] Campina Grande: Editora Amplla, Capítulo 1, p. 12-30, 2021. DOI: 10.51859/amplla.ecp.672.1121-1.

LENSE, G. H. E.; AVANZI, J. C.; PARREIRAS, T. C.; MINCATO, R. L. Effects of deforestation on water erosion rates in the Amazon region. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. ISSN (on line) 1981-0997. v.15, n.4, e8500, 2020. Recife, PE, UFRPE. 2020. www.agraria.pro.br, DOI:10.5039/agraria.v15i4a8500.

LIMA, J. E. F. W. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do Rio São Francisco**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; Brasília, DF: ANEEL/ANA. 2001.

LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CARVALHO, N. O.; SILVA, E. M. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Brasília, DF: ANEEL: ANA, 2004.

LIMA, J. E. F. W.; SANTOS, P. M. C.; CARVALHO, N. O.; SILVA, E.M. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados; Brasília, DF: ANA/ANEEL. 2003.

LOBO, F.D.L.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; NOVO, E.; CARLOS, F.M.; BARBOSA, C.C.F., Mapping Mining Areas in the Brazilian Amazon Using MSI / Sentinel-2 Imagery (2017). **Remote Sensing**. 2018, v. 10, e1178; 2018. DOI:10.3390/rs10081178.

LUBINI, A.; ADAMOWSKI, J. Assessing the Potential Impacts of Four Climate Change Scenarios on the Discharge of the Simiyu River, Tanzania Using the SWAT Model. **International Journal of Water Sciences**. v. 2, n.1:2013. DOI: 10.5772/56453.

LUCAS-BORJA, M. E.; CARRÀ, B. G.; NUNES, J. P.; BERNARD-JANNIN, L.; ZEMA, D. A.; & ZIMBONE, S. M. (2020). Impacts of land-use and climate changes on surface runoff in a tropical forest watershed (Brazil). **Hydrological Sciences Journal**, v.65, n.11, p. 1956-1973. 2020. DOI: 10.1080/02626667.2020.1787417.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Mapas de solos e de aptidão agrícola das áreas alteradas do Pará. [Belém, PA]**. Não paginado. Biblioteca(s): Embrapa Amazônia Oriental. 2016. Disponível na Base de Dados da Pesquisa Agropecuária (BDPA) ou no link: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147241/1/MapasSolosPara.pdf>.

MARANHÃO, N. **Sistema de indicadores para planejamento e gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas**. 2007. 397f. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.

MARQUES, V. S.; CEDDIA, M. B.; ANTUNES, M. A. H.; CARVALHO, D. F.; ANACHE, J. A. A.; RODRIGUES, D. B. B.; OLIVEIRA, P. T. S. USLE K-Factor Method Selection for a Tropical Catchment. **Sustainability**. 2019, v. 11, e1840, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11071840>.

MENEZES, D.; MARCUZZO, F. F. N.; PEDROLLO, M. C. R. Estimativa da produção de sedimentos utilizando a curva-chave de sedimentos. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 43, e17, p. 1-31, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X37623>. Acesso em: 25.05.2022.

MILLIMAN, J. D. **River inputs**. Gloucester, VA, USA: College of William and Mary, Academic Press. e2419. 2001. doi:10.1006/rwos.2001.0074.

MILLIMAN, J. D.; MEADE, R. H. World-wide delivery of river sediment to the oceans: **Jour. Geology**: v. 91, p. 1-21,. 1983.

MONTEIRO, L. V. S.; XAVIER, R. P.; HITZMAN, M. W.; JULIANI, C.; DE SOUZA FILHO, C. R. de; CARVALHO, E. Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. **Ore Geology Reviews**, v. 34, n.3, p. 317-336. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.01.003>.

MORAES, B. C. D.; COSTA, J. M. N. D.; COSTA, A. C. L. D.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 207-214. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672005000200010>.

MORAN, E. F.; Lu, D.; LI, G.; HETRICK, S. Mapping impervious surface area in the Brazilian Amazon using Landsat Imagery. **GIScience & Remote Sensing**, v. 50, p. 172-183, 2013.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3.ed. Malden: Blackwell, 2005. 304p. 2005.

MOTA, S.O.; VALLADARES, G.S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. In: **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.1, jan./mar., 2011, p.39-50,. 2011.

NUNES, S.; CAVALCANTE, R. B. L.; NASCIMENTO JUNIOR, W. R.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SANTOS, D. Potential for forest restoration and deficit compensation in Itacaiúnas Watershed, Southeastern Brazilian Amazon. **Forests**, v. 10, n. 5, e439. 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/f10050439>.

PAILLER, S. Re-election incentives and deforestation cycles in the Brazilian Amazon. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 88, p. 345-365. 2018. DOI: 10.1016/j.jeem.2018.01.008.

PAIVA, F. M. L. **Avaliação do padrão de distribuição espaço-temporal dos processos de mobilização e depósito de sedimentos**. 2012. 624f. Tese (Doutorado) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, CTG, 2012, CDD. 22.ed. UFPE/BCTG-2012 / 242. 2012.

PALHETA, J. M.; LIMA, R. A. P. Economia mineral e os impactos nos territórios amazônicos sudeste paraense. Planeta Amazônia: **Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas**. ISSN 2177-1642 Macapá, n. 9, p. 103-116, 2017. <https://periodicos.unifap.br/index.php/planeta>.

PHILIPPI JR, A. S.; CARVALHO, M. C.; OLIVEIRA, R. M. C. M. Bacia hidrográfica no contexto da sustentabilidade. In: PHILIPPI JR., A; SOBRAL, M. do C. **Gestão de bacias hidrográficas e sustentabilidade**. 1.ed. Barueri, SP: Ed. Manole, p. 3-18, 2019.

PHILLIPS, J. M.; WEBB, B. W.; WALLING, D. E.; LEEKS, G. J. L. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area infrequent samples. **Hydrological Process**. Chichester, v. 13, n. 7, p. 1035-1050. 1999. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199905\)13:7<1035::AID-HYP788>3.0.CO;2-K](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<1035::AID-HYP788>3.0.CO;2-K).

- PONTES, P. R. M.; CAVALCANTE, R. B. L.; SAHOO, P. K.; SILVA, R., JR., SILVA, M. S.; DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J. O. The role of protected and deforested areas in the hydrological processes of Itacaiúnas River Basin, eastern Amazonia. **Journal of Environmental Management**, v. 235, p. 489–499. 2019. DOI:10.1016/j.jenvman.2019.01.090.
- RANZINI, M.; LIMA, W.P. Comportamento hidrológico, balanço de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com Eucalyptus, no Vale do Paraíba, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 61, p. 144-159, 2002.
- REID, I.; BARTHURST, J.C.; CARLING, P. A.; WALLING, D. E.; WEBB, B. Sediment Erosion, Transport and Deposition. *In*: THORNE, C.R.; HEY, R.D.; NEWSON, M.D. (ed). **Applied fluvial geomorphology for river engineering and management**. [Internet] New York: John Wiley & Sons, p. 95-135. 1997.
- RESENDE. M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. de; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: bases para distinção de ambientes. Editora UFLA, 2007. 322p. 2007.
- RIBEIRO, K. V.; ALBUQUERQUE, E. L. S. Mapeamento da fragilidade potencial na bacia hidrográfica do Rio Mulato, no médio Parnaíba piauiense. **Revista de Geografia** (Recife), v. 38, p. 374, 2021.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 264 p.
- RODRIGUES, L. P.; LEITE, E. F. Analyse of the Relief Energy and Land Use, and Coverage of Acôgo Watershed Stream, MS, Brazil. **TERR@ PLURAL** (UEPG. ONLINE), v. 15, p. 1-25, 2021.
- ROSS, J.L.S. **Geomorfologia ambiente e planejamento**. São Paulo, Contexto, 1996. 85 p.
- SALOMÃO, F. X. T.; IWASA, O. Y. Erosão e ocupação rural e urbana. *In*: BITAR, O.Y. (coord.). **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: ABGE/IPT/ DIGEO. 1995. p. 31-57.
- SANTOS, J. F.; MATLABA, V. J.; SILVA, R. N. P.; SOUZA, A. A. L.; VILARINHO, C. C. V.; ALMEIDA, E. G.; MACHADO, F. F.; BORJA, O. R. P.; DIAS, R. P.; CRUZ, T. L.; PIRES, V. A.; SILVA, Y. Y. F. **Avaliação do potencial para diversificação socioeconômica dos territórios em Canaã dos Carajás, Parauapebas, Curionópolis, Ourilândia do Norte e Tucumã, com vista a prospecção de novos negócios e identificação de potenciais empreendedores**. Belém: ITV, 2020. 211. p.
- SANTOS, J. Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá** (Pernambuco, Brasil). 2015. 205f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2015. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17400>.
- SANTOS, J. Y. G.; SILVA, R. M.; CARVALHO NETO, J. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, A. M. Land cover and climate change effects on streamflow and sediment yield: a case study of Tapacurá River basin, Brazil. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 371: p. 189–193. 2015.

SILVA, M. S.; CAVALCANTE, R. L.; SOUZA FILHO, P. W. M.; SILVA JÚNIOR, R. O.; PONTES, P. R.; DALLAGNOL, R.; ROCHA, E. J. P. Comparison of sediment rating curves and sediment yield in subbasins of the Itacaiúnas River Watershed, Eastern Amazon. **Brazilian Journal of Water Resources**. Versão On-line ISSN 2318-0331RBRH, Porto Alegre, v. 26, e18, 2021 Scientific/Technical Article. 2021. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210009>.

SILVA JÚNIOR, R. O. **Resposta hidrológica devido às mudanças no uso do solo e cobertura vegetal na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI) - Amazônia Oriental**. 2017. 133f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, UFPA, Belém., 2017.

SILVA JÚNIOR, R. O.; QUEIROZ, J. C. B.; FERREIRA, D. B. S.; TAVARES, A. L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; GUIMARAES, J. T. F. Estimativa de precipitação e vazões médias para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (BHRI), Amazônia Oriental, Brasil. **Rev. Bras. Geogr. Física**, v. 10, p. 1638–1654. 2017b. DOI: 10.26848/rbgf.v.10.5.p1638-1654.

SILVA JÚNIOR, R. O.; SOUZA, E. B.; TAVARES, A. L.; MOTA, J. A.; FERREIRA, D.; SOUZA-FILHO, P. W. Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. **An. Acad. Bras. Cienc.** v. 89, p. 1985–2002. 2017a. DOI: 10.1590/0001-3765201720170147.

SILVA-JÚNIOR, R. O. daD.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SALOMÃO, G. N.; TAVARES, A. L.; SANTOS, J. F. D.; SANTOS, D. C.; DIAS, L. C.; SILVA, M. S.; MELO, A. M. Q.; COSTA, C. E. A. D. S.; AND ROCHA, E. J. P. (2021) Response of Water Balance Components to Changes in Soil Use and Vegetation Cover Over Three Decades in the Eastern Amazon. **Front. Water** v. 3, e749507. 2021. DOI: 10.3389/frwa.2021.749507.

SOARES-FILHO, B. S.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DIAZ, M. D. C.; SOLÓZARNO, L.; VOLL, E. Simulating the Response of Land-Cover Changes to Road Paving and Governance Along a Major Amazon Highway: The Santarém-Cuiabá Corridor. **Global Change Biology**, EUA, v. 10, n.5, p. 745-764, 2004.

SONTER, L. J.; BARRETT, D. J.; MORAN, C. J.; SOARES-FILHO, B. S. A Land System Science meta-analysis suggests we underestimate intensive land uses in land use change dynamics. **J. Land Use Sci.** v. 10, p. 191–204. 2013.

SONTER, L. J.; HERRERA, D.; BARRETT, D. J.; GALFORD, G. L.; MORAN, C. J.; SOARES-FILHO, B. S. Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. **Nat Commun.**, v. 8, e1013, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w>.

SONTER, L. J.; MORAN, C. J.; BARRETT, D. J.; SOARES-FILHO, B. S. Processes of land use change in mining regions. **J. Clean. Prod.** v. 84, p. 494–501. 2014.

SOUSA, S. D.; MONTEIRO, L. V. S.; OLIVEIRA, D. C. de; SILVA, M. A. D. da; MORETO, C. P. N.; JULIANI, C. O Greenstone Belt Sapucaia na região de Água Azul do Norte, Província Carajás: contexto geológico e caracterização petrográfica e geoquímica. *In*: GORAYEB, P. S.; LIMA, A. M. M. (Org.), **Contribuições a geologia da Amazônia**. 1. ed., v. 9, p. 305-328. Belém, PA: SBG-NO. 2015.

SOUZA-FILHO, P.W.M.; NASCIMENTO, W.; SANTOS, D.; WEBER, E.; SILVA, R.; SIQUEIRA, J. A GEOBIA Approach for Multitemporal Land-Cover and Land-Use Change Analysis in a Tropical Watershed in the Southeastern Amazon. **Remote Sens.** v. 10, e1683, 2018.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; NASCIMENTO JUNIOR, W. R.; VERSIANI DE MENDONÇA, B. R.; SILVA JUNIOR, R. O., GUIMARÃES, J. T. F.; DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J. O. Changes in the land cover and land use of the Itacaiunas river watershed, arc of deforestation, Carajas, southeastern Amazon. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, p. 1491-1496. 2015. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1491-2015>.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; SOUZA, E. B.; SILVA JÚNIOR, R. O.; NASCIMENTO Jr. W. R.; MENDONÇA, B. R. V.; GUIMARÃES, J. T. F.; DALL'AGNOL, R.; SIQUEIRA, J. O. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **J. Environ. Manage.** v. 167, p. 175–184. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.039>.

SYVITSKI, J. P.; MOREHEAD, M. D.; BAHR, D. B.; MULDER, T. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. **WATER RESOURCES RESEARCH**, v. 36, n. 9, p. 2747-2760, 2000. <https://doi.org/10.1029/2000WR900133>.

TOWNSEND, P. A.; HELMERS, D. P.; KINGDON, C. C.; MCNEIL, B. E.; DE BEURS, K. M.; ESHLEMAN, K. N. Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976-2006 Landsat time series. **Remote Sens. Environ.** v. 113, p. 62–72, 2009.

TRICART, J. **Ecodinâmica**, Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN, 1977, 91p. (Recursos Naturais e Meio Ambiente). 91p., 1977.

VALENTIM, R. F.; OLIVITO, J. P. R. **Unidade Espeleológica Carajás**: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da IN-02/2009 MMA. *In*: EspeleoTema, v.22, n.1, 41-60 p., 2011.

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J.; GILLIJNS, K.; GOVERS, G. The use of riparian vegetated filter strips to reduce river sediment loads: an overestimated control measure?. **Hydrological Processes**. v. 20, n. 20, p. 4259-4267. 2006. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/hyp.6155>.

VESTENA, L. R. Análise da dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 21, n. 3, p. 413-424. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-45132009000300014>.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, Toulouse, v. 111(1-4), p. 89-106. 1989. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90254-0](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(89)90254-0).

ZANELLA, M. E.; OLÍMPIO, J. L.; COSTA, M. C. L.; DANTAS, E., W. C. Vulnerabilidade Socioambiental do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. **Soc. & Nat.**, Uberlândia, v. 25, n. 2. p. 317-332, mai/ago.2013.

ZAPPI, D. C. **Paisagens e plantas de Carajás/Landscapes and plants of Carajás**. 248 p.). Belém: Instituto Tecnológico Vale. 2017.