



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

NELSON PEREIRA DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO MADEIRA: grandes obras hidráulicas, sedimentos e
os possíveis impactos na dinâmica fluvial**

Ilha Solteira
2019

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS

NELSON PEREIRA DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO MADEIRA: grandes obras hidráulicas, sedimentos e
os possíveis impactos na dinâmica fluvial**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, por meio da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp campus Ilha Solteira) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Instrumentos de Política de Recursos Hídricos

Prof. Dr. Paulo Cesar Rocha
Orientador

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- C355a Castro, Nelson Pereira de.
Avaliação de indicadores de alteração hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Madeira: grandes obras hidráulicas, sedimentos e os possíveis impactos na dinâmica fluvial / Nelson Pereira de Castro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
79 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Instrumentos de Política de Recursos Hídricos, 2019
- Orientador: Paulo Cesar Rocha
Inclui bibliografia
1. Regime hidrológico. 2. Rio Madeira. 3. IAH.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CIBLIS - 9999

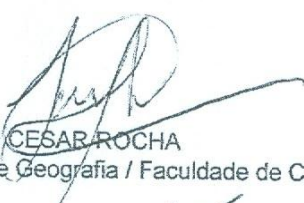
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO MADEIRA: GRANDES OBRAS HIDRÁULICAS,
SEDIMENTOS E OS IMPACTOS NA DINÂMICA FLUVIAL

AUTOR: NELSON PEREIRA DE CASTRO

ORIENTADOR: PAULO CESAR ROCHA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em GESTÃO E
REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, área: Instrumentos de Política de Recursos Hídricos pela
Comissão Examinadora:


Prof. Dr. PAULO CESAR ROCHA
Departamento de Geografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente


Prof. Dr. ANTONIO CEZAR LEAL
FCT / UNESP/Presidente Prudente (SP)


Prof. Dr. PAULO FERNANDO SOARES
Engenharia Civil / Universidade Estadual de Maringá/Maringá (PR)

Ilha Solteira, 02 de março de 2019

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha família, amigos e colegas de trabalho.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

A Deus, por me conduzir no caminho do bem.

A minha mãe Sara Pereira de Castro e ao meu pai José Ailton de Castro por terem cedido a mim, os genes da vida. Por terem educado e criado eu e meu irmão com o pouco que tinham com tanta qualidade e sabedoria. Por me darem forças nas horas mais difíceis. Por acreditarem em mim.

A minha esposa Ayslane e nosso filhote peludo Imbra, por terem suportado tantas horas de ausência minha e muitas vezes quando presente estava empenhado nos estudos da jornada ProfÁgua. Sem eles do meu lado, Ayslane e Imbra, este trabalho não seria concluído.

Ao Professor Doutor Paulo Cesar Rocha, pela orientação no trabalho, com sua experiência de conteúdo e serenidade para conduzir. Pelo incentivo na hora certa, evitando a desistência devido à dupla jornada trabalho/mestrado, que não foi algo fácil de ser vencido.

Ao Professor Doutor Newton de Oliveira Carvalho, exemplo a ser seguido em todos os sentidos. Pelas parcerias nos trabalhos técnicos, pelos inúmeros e-mails trocados com toda paciência, relacionados direta e indiretamente com este trabalho. Por ter me despertado a vontade de estudar um pouco mais hidrossedimentologia fluvial de forma muito humorada com seus 85 anos de idade, obrigado (*in memorian*).

Ao Grupo Construserv, empresa que me empregou e autorizou minhas ausências nos períodos das aulas presenciais, principalmente na pessoa de Daniel Alcamim e sua esposa Claudilene.

A todos os colegas de turma, em especial a Silvia Shinkai, primeira pessoa que eu conheci sentado no banco da UNESP na fase do processo seletivo. Durante todo o período do mestrado sempre deu dicas e força para seguir em frente.

A vida é muito curta para ser pequena.
(DISRAELI, B.)

RESUMO

O regime hidrológico do rio Madeira é caracterizado pela sazonalidade dos volumes de água na bacia hidrográfica. As variações do clima e as ações antrópicas são os principais responsáveis pelas alterações nestes volumes. Para avaliar tais mudanças alguns indicadores podem ser analisados levando em consideração períodos com regime de fluxo natural e alterado. Os Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH) são ideais para comparar regimes hidrológicos afetados por usinas hidrelétricas, que criam barreiras no fluxo natural e modificam o regime de vazões. Calculados com métodos paramétricos e não paramétricos, o IAH leva em consideração as análises das estatísticas de médias, desvio padrão e percentuais dos hidrogramas fluviais. No rio Madeira, as hidrelétricas de Jirau (3.750 MW) e Santo Antônio (3.568 MW) entraram em operação a fio d'água no ano de 2012. Como resultado este trabalho apresentou anos úmidos após o término destas obras hidráulicas gerando vazões mais altas que as médias do período anterior as usinas. O ano de 2014 (grande cheia) pode ser considerado um ano atípico e pode ter camuflado os resultados, elevando as médias de vazões e outros indicadores observados no IAH, denominado período pós impactos. Além das variações de vazões bem definidas nos períodos úmido e seco, a bacia hidrográfica do Madeira é uma grande produtora e transportadora de sedimentos. Foram encontrados valores médios de retenção de sedimentos pelos barramentos na ordem de 17%, o que pode indicar que o rio ainda busca a estabilidade no período pós barramentos.

Palavras-chave: Regime hidrológico. Rio Madeira. IAH.

ABSTRACT

The hydrological regime of the Madeira River is characterized by the seasonality of water volumes in the river basin. The changes in climate and anthropic actions are mainly responsible for the changes in these volumes. In order to evaluate such changes some indicators can be analyzed taking into account periods with natural and modified flow regime. The Indicators of Hydrological Alteration (IHA) are ideal for comparing hydrological regimes affected by hydroelectric plants, which create barriers in the natural flow and modify the flow regime. Calculated using parametric and non-parametric methods, the IHA takes into account the statistical analysis of means, standard deviation and percentages of fluvial hydrograms. In the Madeira River, Jirau hydroelectric plants (3,750 MW) and Santo Antônio (3,568 MW) entered operation in 2012 and result this paper presented wet years after the completion of these hydraulic works. The year 2014 (large flood) can be considered an atypical year and may have camouflaged the results, raising the averages of flows and other indicators observed in the IHA, called post-impact period. In addition to well-defined variations and flows in the wet and dry periods, the Madeira basin is a major producer and sediment conveyor. Averages values of sediment retention were found in the order of 17% of suspended sediment.

Keywords: Hydrological regime. Madeira River. IHA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Rio Madeira em azul e seus empreendimentos de geração de energia....	18
Figura 2 – Sub-bacias do rio Madeira.	22
Figura 3 - Área de Drenagem da Bacia do Rio Madeira.....	23
Figura 4 - Geologia do Estado de Rondônia. Fonte: Autor.....	25
Figura 5 –Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal.....	26
Figura 6 - Gráfico Comparativo Precipitação Acumulada (mm).	27
Figura 7 –Tipos de Solo do Estado de Rondônia.	28
Figura 8 - Relevo da Bacia Hidrográfica.....	28
Figura 9 -Desmatamento 2014 de Rondônia. Fonte de dados INPE 2014.	31
Figura 10 - Divisor Topográfico e Freático da Bacia Hidrográfica.	33
Figura 11 – Distribuição da Matriz Elétrica do Brasil.	34
Figura 12 – Quadro metodológico.	37
Figura 13 – Contribuições hídricas na bacia Amazônica.....	44
Figura 14 – Permanência das vazões naturais do rio Madeira com destaque para a cheia de 2014.....	46
Figura 15 – Série histórica das médias anuais, com destaque para o início da operação comercial dos empreendimentos.....	47
Figura 16 - Fluxos Médios de vazão do Mês de Março.....	52
Figura 17 – Taxa de Aproximação da Variabilidade Natural –TAV.	54
Figura 18 - Hidrograma anual pré e pós impacto.	55
Figura 19 – Períodos hidrológicos distintos.....	56
Figura 20 -Comparação da pluviosidade mensal em 2014 com a Normal Climatológica INMET 1975-1990.....	59
Figura 21 – H1 – 1968 a 1972.....	59
Figura 22 – H2 - 1973 a 1982.....	59
Figura 23 – H3 – 1983 a 2001.....	60
Figura 24 – H4 – 2002 a 2011.....	60
Figura 25 – H5 – 2012 a 2017.....	60
Figura 26 –Comparação de Hidrogramas.	61
Figura 27 – Variação da Vazão ao Longo do tempo por mês.	61
Figura 28 – Rio Mamoré e Beni na formação do rio Madeira.	62
Figura 29 – Cheia no Rio Madeira.....	63
Figura 30 – Formação de praias	63
Figura 31 - Processo de erosão das margens do Rio Madre de Dios na cheia de 2019.	64
Figura 32 - Atividade de Garimpo com Dragas	65
Figura 33 – Zoneamento Hidrossedimentológico do Brasil.	66
Figura 34 - Série de dados de concentração de material em suspensão no rio Madeira.	67
Figura 35 - Série de dados de concentração de material em suspensão no rio Madeira.	67

Figura 36 - Processo de erosão das margens do Rio Madeira.	69
Figura 37 – Jusante da UHE Jirau com acúmulo de sedimentos (assoreamento).	69
Figura 38– Comparação da Descarga Sólida.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–Ocupação da terra no estado nas bacias hidrográficas da margem direita do rio Amazonas.	30
Tabela 2 – Impactos das Barragens na Dinâmica Fluvial	35
Tabela 3 -Regime Hidrológico, parâmetros utilizados nos Indicadores de Alteração Hidrológica. Fonte: RICHTER 1996.	38
Tabela 4 – Valores característicos das vazões.	48
Tabela 5– Resultados dos IAH – Magnitude mensal.....	49
Tabela 6– Resultados dos IAH – Magnitude e Duração.....	49
Tabela 7– Resultados dos IAH – Frequência e duração dos pulsos altos e baixos. .	50
Tabela 8– Resultados dos IAH – Taxa de alteração e vazão.....	50
Tabela 9 – Resultados dos valores médios, mínimos e máximos para os IAH.	51
Tabela 10– Resultados da Avaliação de Alteração Hidrológica	53
Tabela 11 – Valores característicos para os períodos hidrológicos identificados.	56
Tabela 12 – Dados hidrológicos das Usinas Santo Antonio e Jirau.	68
Tabela 13 – Descarga líquida, sólida e concentração.	70

LISTA DE SIGLAS

ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica

CEMADEM - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

IAH – Indicadores de Alteração Hidrológica

IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia

PERH-MDA Plano Estratégico de Recursos Hídricos dos Afluentes da Margem Direita do Rio Amazonas

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

SIPAM – Sistema de Proteção da Amazônia

TAV - Taxa de Aproximação da Variabilidade Natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
2	JUSTIFICATIVA	19
3	OBJETIVOS	20
3.1	OBJETIVO GERAL	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4	REVISÃO DE LITERATURA	21
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E SEU ENTORNO	23
4.1.1	Geologia Regional	24
4.1.2	Características Climáticas	25
4.1.2.1	<i>Regime de Chuvas</i>	26
4.1.3	Tipos de Solos e Relevo	27
4.1.4	Composição da vegetação	29
4.1.5	Ocupação da terra	29
4.1.6	Desmatamento na região de Rondônia	30
4.2.1	Hidrossedimentologia Fluvial	32
4.2.2	Impactos de Barramentos no Regime Hidrossedimentológico	34
5	MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1	DADOS DE ENTRADA	40
5.2	VERIFICAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO	40
5.3	ANÁLISE DA DESCARGA SÓLIDA	42
5.4	IMPACTOS NO FLUXO SEDIMENTOLÓGICO	42
6	RESULTADOS	44
6.1	REGIME HIDROLÓGICO	44
6.2	AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA (IAH)	48
6.2	SEDIMENTOLOGIA FLUVIAL	62
6.2.1	Concentração de Sedimentos	66
6.3	INFLUÊNCIA DOS BARRAMENTOS NO RIO MADEIRA	68
7	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Lei nº 9.433 de 1997, conhecida pelos profissionais do ramo ambiental como Lei das Águas, deve-se assegurar à atual e futuras gerações, água em qualidade e quantidade suficientes e em padrões adequados aos respectivos usos (BRASIL, 1997). Para que se cumpra esse objetivo, há uma grande quantidade de ferramentas disponíveis e métodos de análise que, se bem utilizados podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos de forma efetiva. Uma vez que é muito difícil gerir o recurso hídrico sem conhecer a qualidade e quantidade da água, se faz necessário o levantamento de dados indicadores em campo.

Freire (2005) ressalta que a gestão de recursos hídricos se faz necessária para resolver ou minimizar os conflitos entre os diferentes usos, visando à utilização racional dos recursos. Através de medições sistemáticas de variáveis básicas como precipitação e fluxo ao longo do tempo, é possível determinar o comportamento hidrológico e diminuir a margem de erro na tomada de decisão. É por meio do monitoramento hidrológico constante que se determina a perenidade e a intermitência do curso d'água. Estas análises, por exemplo, devem auxiliar na distribuição correta das outorgas dos usos dos recursos hídricos.

Os estudos hidrológicos em bacias hidrográficas vêm da necessidade de se compreender o funcionamento dos processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudança do uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água (WHITEHEAD; ROBINSON, 1993).

O conceito de variabilidade hidrológica, baseado nos Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH), vem sendo aplicado por diversos autores (FIUZA *et al.* 2014; ROCHA, 2010; ROCHA *et al.* 2003; POFF *et al.* 1997; RICHTER *et al.* 1997). Entre as variáveis indicadoras, que auxiliam no entendimento do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, a quantidade de chuvas pode ser elencada com maior significância. A parcela da chuva que infiltra na zona saturada, abaixo da superfície freática do solo, gerando o escoamento de base adicionada a parcela da chuva que escoia superficialmente para os cursos d'água, predominantemente representam a vazão fluvial. É importante ressaltar a ocorrência de fatores climáticos mundiais representados pelo Efeito Estufa e

El Niño/La Niña que tendem a influenciar o clima em escala continental, principalmente quanto a ocorrência de eventos pluviométricos extremos e outras formas de entrada de água em bacias hidrográficas, como por exemplo, o derretimento de geleiras na região hidrográfica amazônica ou transposição de águas entre bacias hidrográficas como os projetos do rio São Francisco (MOTA, 2016) e rio Paraíba do Sul para o sistema Cantareira (MACHADO, 2015).

A avaliação de Indicadores de Alterações Hidrológicas (IAH) torna o conhecimento das características hidrológicas da bacia, uma ferramenta importante para que os aproveitamentos de seus recursos possam ser otimizados com menor impacto ambiental por meio das análises das alterações ocorridas no regime hidrológico. Tais indicadores são baseados na série histórica de vazões médias diárias e podem ser usados para caracterizar estatisticamente a variabilidade temporal dos hidrogramas e quantificar as alterações hidrológicas associadas ao regime hidrológico anterior e posterior aos impactos antrópicos, como por exemplo os causados por usinas hidrelétricas (RICHTER, 1997).

Diretamente ligado ao escoamento do curso d'água está o transporte de material particulado derivado de processos erosivos na bacia. Estes processos podem ser classificados em três tipos de erosão: eólica, hídrica superficial e fluvial. A erosão eólica é decorrente da ação dos ventos quando o terreno está muito seco. A erosão hídrica superficial é proveniente das chuvas e escoamentos superficiais difusos ou intensos. A erosão fluvial ocorre diretamente nos cursos d'água, se processando de forma contínua e natural ou antrópica como escavações para obras hidráulicas e atividades de dragagem e garimpo. As partículas areia, silte, argila e pedregulho recebem o nome de material sedimentar ou sedimentos. Além do transporte de sedimentos, os rios podem transportar matéria orgânica, sais minerais, poluentes, entre outros materiais (CARVALHO, 2008).

Normalmente, em áreas com clima tropical, no período chuvoso as atividades erosivas na bacia hidrográfica aumentam carreando mais partículas para o rio quando comparado com o período seco. Em bacias com o solo exposto, onde o desmatamento avança a cada ano, este carregamento pode ser ainda maior devido ao impacto das gotas no solo e a consequente desagregação (GUERRA, 1999).

Carvalho (2008) atribui o aumento das ações antrópicas, principalmente no uso e ocupação da terra, ao aumento dos processos erosivos e carreamento dos sedimentos para os rios. Diversos problemas podem ser relacionados aos processos sedimentológicos da bacia hidrográfica, sendo o principal deles o assoreamento de rios e lagos podendo causar inundações mais frequentes devido à redução da capacidade de transportar o fluxo d'água pelo leito do rio ou até mesmo inviabilizar usos como abastecimento de água, navegação e geração de energia.

Apesar dos efeitos de processos erosivos serem antigos, os estudos nesta área no Brasil podem ser considerados recentes. O primeiro registro de estudo sedimentológico é datado no ano de 1951, pela Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) no rio Camaquã-RS. Em 1998 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), emitiu a Resolução 396 que condicionava aos agentes de geração de energia a instalação e monitoramento de postos hidrométricos. O monitoramento hidrológico ganhou ainda mais força após o consenso entre as agências de águas e energia, agora desmembradas (ANA e ANEEL), exigindo a obrigatoriedade de implantação de postos limimétricos, pluviométricos, fluviométricos, sedimentométricos e qualidade da água com o respectivo monitoramento mediante a Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03 de 2010, entre outras providências (BRASIL, 2010).

A utilização dos recursos hídricos para aproveitamentos hidroenergéticos faz parte da história mundial e do Brasil no que diz respeito à matriz energética nacional. Com grandes e pequenas hidrelétricas a geração de energia de fonte hídrica no Brasil, proveniente das vazões dos rios corresponde a 73.3% do total de energia gerada no período entre janeiro a setembro de 2018, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018). Já a níveis globais a geração renovável de fonte hídrica chega a 71% (REX *et al.*, 2014) com utilização de apenas 22% de todo potencial. (ZARFL *et al.*, 2014).

A construção de barragens, seja para geração de energia, abastecimento público ou controle de cheias causam inúmeros impactos ambientais significativos no curso d'água e impactos sociais na região como um todo, sendo que muitas vezes são subestimados na composição dos custos do empreendimento (MORAN *et al.*, 2018). A integridade ecológica do curso d'água depende das características dinâmicas naturais daquele rio (POFF *et al.* 1997,

citado por ROCHA, 2012). A magnitude do impacto causado depende do grau de modificação do regime de fluxo de cada rio.

Moran *et al.* (2018), chama atenção para o fato dos países em desenvolvimento como China, Laos, Tailândia, Vietnã (Sudeste Asiático), Congo (África) e Brasil (América do Sul), terem projetos em andamento para a construção de mais usinas hidrelétricas de grande porte nas bacias dos rios Mekong, Congo e Amazonas. De acordo com Moran, países desenvolvidos como Estados Unidos, França, Suécia, Espanha, Portugal e Inglaterra já exploraram todo potencial hidroenergético e um movimento de renaturalização dos rios está em andamento. As ações de remoção de barragens, ao invés das renovações de concessão após 30 a 50 anos de vida útil, são escolhidas pois além da parcela de incerteza climática e riscos de rompimento das estruturas das barragens, os custos elevados para reparos nas turbinas e na estrutura da barragem tornam as renovações de baixa atratividade. Em contrapartida fontes de energia solar, biomassa e eólica recebem cada vez mais investimentos.

Quando uma hidrelétrica é construída os reservatórios podem ser operados de duas formas distintas: regularização ou a fio d'água. Os reservatórios de regularização têm a função de reservar a água do período úmido (armazenamento) de forma a obter boa eficiência de geração de energia mesmo no período de escassez (deplecionamento) e manter os usos múltiplos da água já outorgados, seja na geração de energia para as usinas de jusante ou em quaisquer outros usos. Como exemplos de usinas de regularização têm-se a UHE Sobradinho, UHE Ilha Solteira e UHE São Simão. Já os reservatórios operados a fio d'água, têm pouca ou nenhuma capacidade de regularização (base diária ou semanal) e praticamente operam com a vazão afluente. São exemplos de usinas a fio d'água: UHE Belo Monte, UHE Jirau, UHE Santo Antônio e UHE Itaipu. Independentemente do tipo da operação do reservatório os impactos devem ser observados nas dinâmicas fluvial e ecológica, pois o fluxo natural é parcialmente bloqueado pela barragem e a velocidade diminui consideravelmente a montante do empreendimento.

De forma geral, em relação ao transporte de sedimentos, os barramentos diminuem a velocidade do escoamento a montante, causando a deposição de sedimentos mais grossos na área de remanso e de sedimentos finos ao longo do reservatório. Já na área de jusante, como há um aumento de energia do

escoamento devido à retenção de sedimentos, podem ocorrer erosões. O sedimento depositado no fundo do reservatório é responsável por diminuir o volume disponível para o uso daquele recurso, pois o volume que antes era ocupado por água, começa a ser ocupado por sólidos. Este processo é denominado assoreamento do reservatório (CARVALHO, 2008).

1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho, considerou-se a bacia hidrográfica do rio Madeira para o estudo de caso. O rio Madeira é o principal afluente em vazão líquida e transporte de sedimentos do rio Amazonas pela margem direita. O rio recebe o nome de Madeira na cidade de Nova-Mamoré no estado de Rondônia, após a confluência dos rios Beni da Bolívia e Mamoré no Brasil. Seu curso passa ainda pela capital do estado, Porto Velho, atravessa a divisa do estado de Rondônia e deságua no rio Amazonas, aproximadamente 130 km a jusante da cidade de Manaus-AM, conforme figura 1.

No ano de 2012 duas grandes usinas hidrelétricas entraram em operação no rio Madeira e há previsão de construção de uma terceira na fronteira entre Brasil e Bolívia (MME, 2016).

Neste contexto, o presente trabalho aborda os temas regime hidrológico e sedimentológico e as possíveis alterações após a construção de barragens para geração de energia na bacia hidrográfica do rio Madeira.

Figura 1 –Rio Madeira em azul e seus empreendimentos de geração de energia.



Fonte: Modificado de Hidroweb/ANA (2018).

2 JUSTIFICATIVA

A água é essencial para o bem-estar e longevidade da humanidade sendo os principais usos o consumo humano, dessedentação de animais, produção de alimentos e energia. Por isso, é natural que seja tratada como um recurso de alto valor para o progresso de uma sociedade e deve ser objeto de pesquisas que busquem o desenvolvimento sustentável e a gestão estratégica dos recursos hídricos.

No ano de 2012, foi publicado o Plano Estratégico de Recursos Hídricos dos Afluentes da Margem Direita do Rio Amazonas – PERH-MDA. Este plano considera as bacias do rio Madeira, Tapajós e Xingu como prioritários para a gestão dos recursos hídricos, devido ao potencial energético, hidroviário e minerário (BRASIL, 2012).

A Política Nacional dos Recursos Hídricos, PNRH, definida pela Lei nº9.433 de 1997, prevê que a gestão das águas deve ser realizada de forma plena, tendo os aspectos de qualidade e quantidade integrados. De acordo com a PNRH, o planejamento dos recursos hídricos, deve ser feito em conjunto com os órgãos governamentais, setor usuário e sociedade civil, sem deixar de lado a integração com a gestão ambiental (BRASIL, 1997).

Os cinco instrumentos de gestão regulamentados na PNRH (planos de recursos hídricos, outorga de direito de uso da água, cobrança pelo uso da água, enquadramento de corpos de água e sistemas de informações sobre recursos hídricos), indicam um caminho para o bom funcionamento da gestão das águas no Brasil. Contudo, para efetuar a aplicação dos mesmos, deve-se considerar o uso de dados hidrológicos confiáveis, ou seja, dados consistentes que represente a realidade hídrica.

As produções de resultados por meio da interpretação dos dados hidrológicos, do conhecimento do regime hidrológico do rio e suas variáveis como, por exemplo, o transporte de sedimentos e os impactos na dinâmica fluvial causados por ações antrópicas, auxiliam o diagnóstico das bacias hidrográficas e serve como instrumento para atos de regulação nos planos de recursos hídricos. Esta busca deve ser permanente com foco na sustentabilidade hídrica e redução de riscos associados a eventos críticos (secas e cheias).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo efetuar análises hidrológicas e sedimentológicas da série histórica de vazão líquida e sólida, identificadas nos períodos anterior e posterior a construção de barragens. Busca-se também identificar seus possíveis impactos na dinâmica fluvial, avaliando por meio Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH) as modificações no regime hidrológico da bacia hidrográfica do rio Madeira.

Embora o período das obras hidráulicas no rio Madeira tivera seu início antes do ano de 2012 e eventualmente já possa ter causado algum impacto na dinâmica fluvial do rio Madeira, considerou-se para este trabalho o ano de 2012 como limite para as análises pré e pós impactos, por ser coincidente com o início da operação comercial dos empreendimentos (enchimento dos reservatórios).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos almeja-se:

- a. utilizar indicadores estatísticos para avaliar o regime hidrológico do rio Madeira (1967 – 2017), considerando o ano de 2012 limite entre os períodos pré e pós impactos;
- b. analisar a descarga sólida nos períodos pré e pós impactos antrópicos; e
- c. avaliar os impactos dos barramentos no regime hidrossedimentológico do rio Madeira, por meio dos dados disponíveis.

4 REVISÃO DE LITERATURA

O rio Madeira é investigado desde o século XIX, conforme apresenta o engenheiro alemão Franz Keller-Leuzinger (1875), que realizou uma expedição na época do Brasil Imperial buscando melhorias na navegação e a construção de uma ferrovia ao longo do rio. Contudo, de acordo com Cintra (2009), o rio já havia sido desbravado na época do Brasil Colônia, onde bandeirantes buscavam aumentar os limites do Tratado de Tordesilhas. O rio era utilizado para escoamento da produção de metais preciosos oriundos do estado do Mato Grosso sentido ao Oceano Atlântico.

A exploração da borracha no passado foi, de fato, o que atraiu as populações para a região, ao sul da Amazônia. A mão de obra local indígena e tantas outras como as vindas de trabalhadores do Pará e do Amazonas para o baixo madeira, dos bolivianos no alto Madeira, serviram para explorar os seringais existentes e abertura de novas frentes (ROSA, 2015). O processo de desenvolvimento de uma região ou país depende basicamente das informações disponíveis sobre seus recursos naturais, incluindo os recursos hídricos como elementos vitais (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Afluente pela margem direita do rio Amazonas na região norte do Brasil, o rio Madeira é contemplado com algumas quedas em sua parte alta o que no passado tornava a navegação complexa e perigosa, causando inúmeras mortes em suas cachoeiras principalmente quando se tentava transpor os desníveis e a força das águas jogavam as embarcações contra as pedras naufragando-as (KELLER-LEUZINGER, 1875). Sua importância ambiental é incontestável, devido sua biodiversidade e essencial para a economia da região por apresentar boas condições para a pesca e transporte hidroviário (CEMADEN, 2018). O rio Madeira se destaca também pelo transporte hidroviário, sendo curso d'água responsável, por exemplo, no escoamento de 66% da soja de toda navegação interior ocupando a terceira posição no ranking das hidrovias mais utilizadas no país (ANTAQ, 2013).

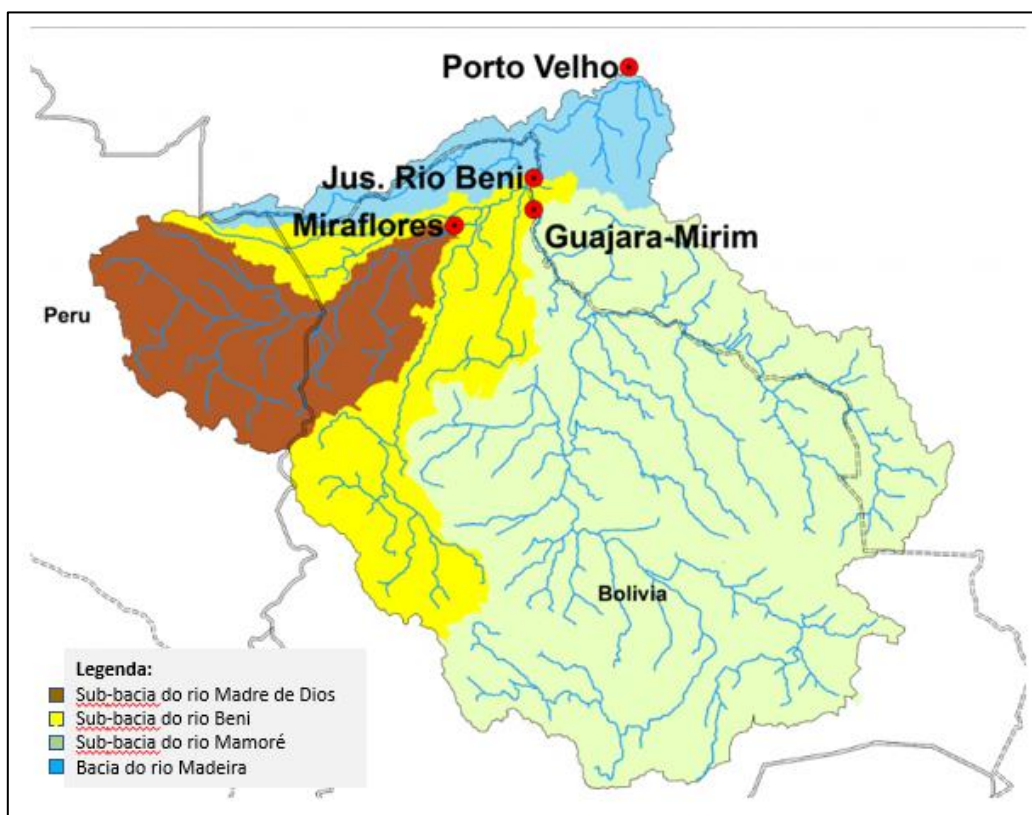
Conforme descreve Garcez e Alvarez (1988), as bacias hidrográficas, podem ser definidas como um conjunto de regiões com declividades em um sentido determinado de uma seção transversal de um curso d'água, fechada

topograficamente, de forma que toda vazão afluente possa ser medida na seção, também chamada de exutório. Estas regiões podem ter seus limites não coincidentes com as linhas de divisão política de um estado ou país. A bacia hidrográfica do rio Madeira é uma bacia transfronteiriça, ou seja, suas águas provêm do território nacional e estrangeiro.

A rede de drenagem do rio Madeira, após a confluência dos rios Beni e Mamoré, é marcada por bacias hidrográficas de médio porte na margem direita que contrastam com pequenas bacias da margem esquerda, caracterizando a assimetria da bacia e controle tectônico proveniente do basculamento de blocos (HAYAKAWA; ROSSETTI, 2012).

Os rios principais que alimentam o rio Madeira nascem na região andina, na bacia do rio Beni na Bolívia e sub-bacia do rio Madre de Dios no Peru (figura 2). Pelo lado brasileiro, o rio Mamoré que nasce no norte do estado do Mato Grosso é o principal contribuinte nacional para a formação do Madeira.

Figura 2 – Sub-bacias do rio Madeira.



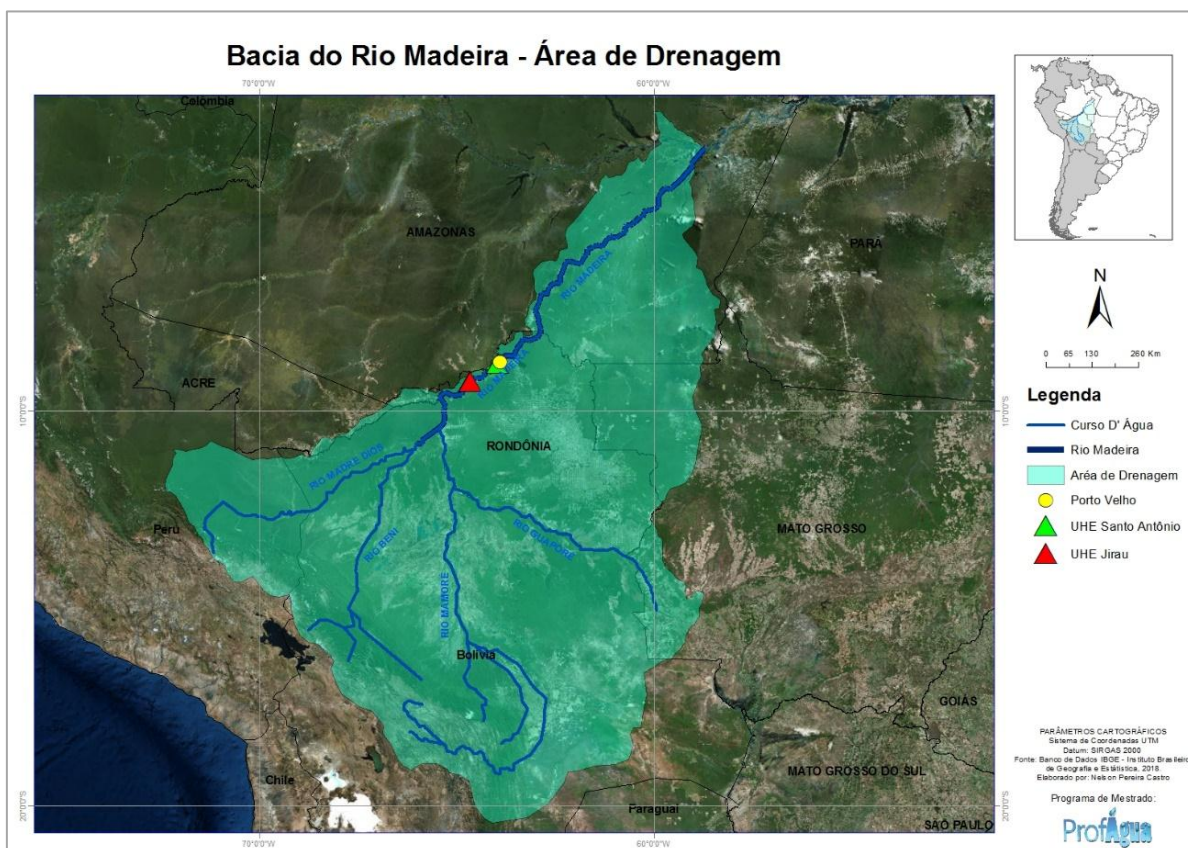
Fonte: Adaptado de CEMADEM (2018).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E SEU ENTORNO

Richter *et al.* (1996), alerta que os usos da água e do território tem impactado substancialmente no regime hidrológico devido as modificações naturais e antrópicas. Diante disso é importante caracterizar o ecossistema e seus elementos visando obter o que de fato pode alterar o regime hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica do rio Madeira, conforme ilustrado na figura 3, é composta pelos principais afluentes: Rio Machado-RO, Rio Mamoré-RO Rio Guaporé – RO/MT, Rio Beni e Rio Madre de Dios, sendo os dois últimos com origem nos países Peru e Bolívia, respectivamente. Existem outros diversos rios e ribeirões com menor vazão e área de contribuição como são os casos do rio Abunã, rio Mutum e rio Jaci.

Figura 3 - Área de Drenagem da Bacia do Rio Madeira.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento hidrológico é diretamente influenciado por uma série de características topográficas, geológicas, geomorfológicas, pedológicas e térmicas ou climatológicas (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). De forma geral, este

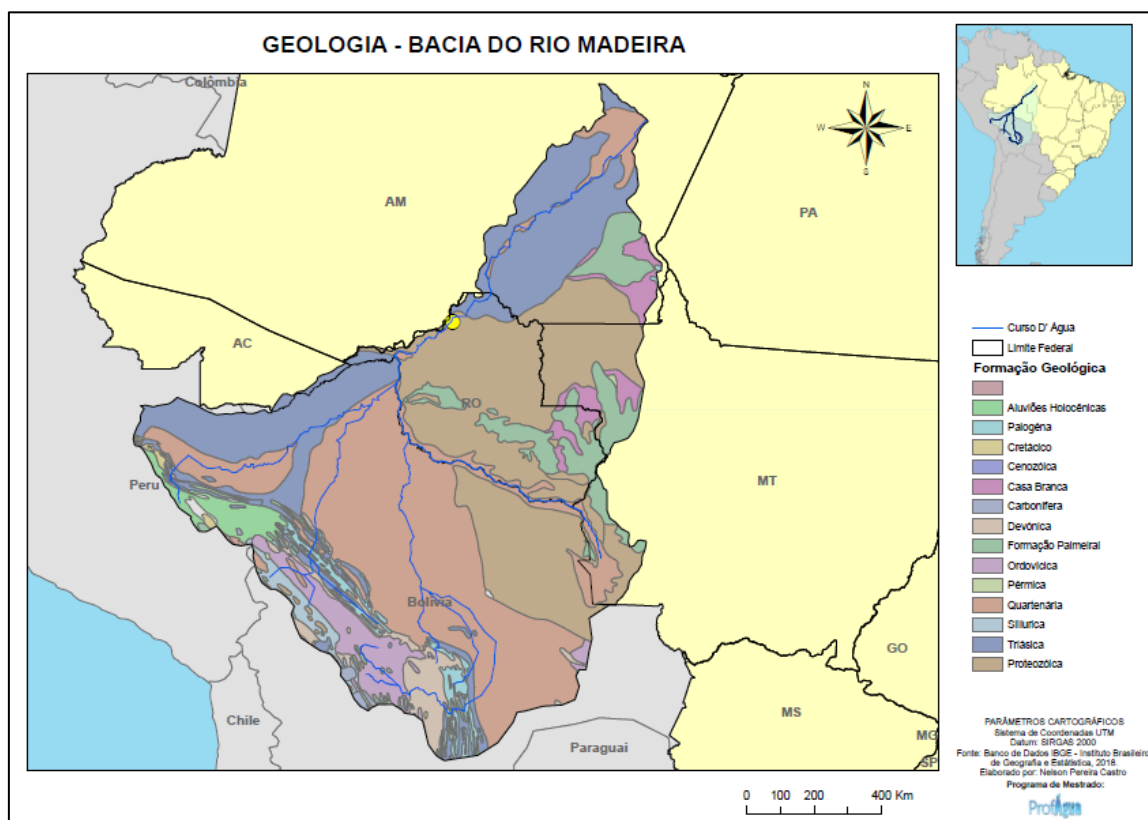
item aborda os principais fatores que podem influenciar na dinâmica da hidrossedimentologia fluvial. Características regionais de geologia, relevo, clima, composição de solos e vegetações, além de ocupações do solo e ações antrópicas como desmatamento são abordadas para a região do estudo.

4.1.1 Geologia Regional

A geologia da região é bastante diversificada (figura 4). De acordo com IBGE, a geologia da área de Porto Velho, cidade que é cruzada pelo rio Madeira, está ligada a subprovíncia amazônica ocidental com aluviões holocênicos de depósitos com areias grossas e conglomeráticas, representando residuais de canal; arenosos relativos a barra de pontal, pelíticos retratando aqueles de transbordamento e fluviolacustres; tendo também o complexo Jamari, com rochas de médio a alto grau de metamorfismo na forma de ortognaisses dioríticos, quartzo dioríticos e tonalíticos, gnaisses paraderivados, migmatitos, xistos, granitoso (IBGE, 2017b).

Hayakawa e Rossetti (2012) apresentam a área de estudo da bacia de drenagem do rio Madeira, sendo sua abrangência definida pela presença de sedimentação terciária e quaternária.

Figura 4 - Geologia da bacia do rio Madeira.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Características Climáticas

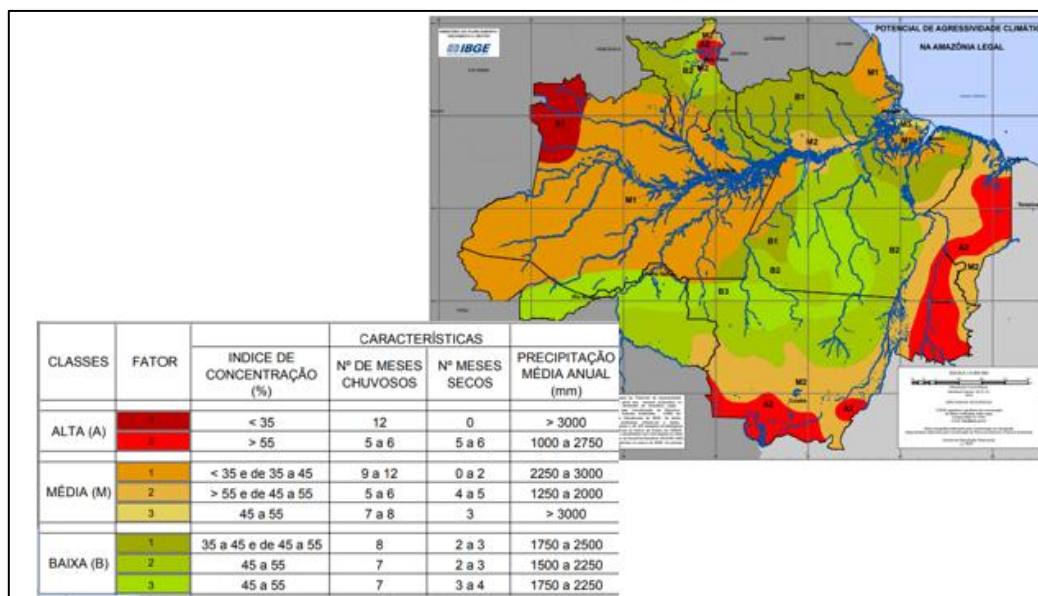
O clima é classificado como tropical chuvoso do tipo Am (clima tropical de monção), segundo a classificação de Köppen. As principais características são: elevados índices pluviométricos e um breve período de estiagem (três meses secos). Já o período chuvoso se inicia em outubro e finaliza em abril. Maio e setembro são períodos de transição (TEJAS, 2012).

A média anual da temperatura do ar varia entre 24 a 26 °C. No estado de Rondônia, em alguns anos, durante os meses de junho, julho e/ou agosto, há influência de anticiclones. Os sistemas se deslocam em direção da Amazônia causando o fenômeno conhecido como friagem. Por ser de curta duração, o fenômeno não influencia significativamente nas médias climatológicas da temperatura mínima do ar. (RONDÔNIA, 2017)

IBGE (2017) apresentou em seus estudos o índice de agressividade climática, que em resumo representa o dano potencial do clima para determinada região. O mapa de agressividade climática na Amazônia Legal é representado

na figura 5. É possível perceber que, de forma geral, a região amazônica tem características de agressividade média e baixa. A região do rio Madeira em Rondônia, a agressividade climática é considerada baixa com aproximadamente 7 meses chuvosos.

Figura 5 –Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal.



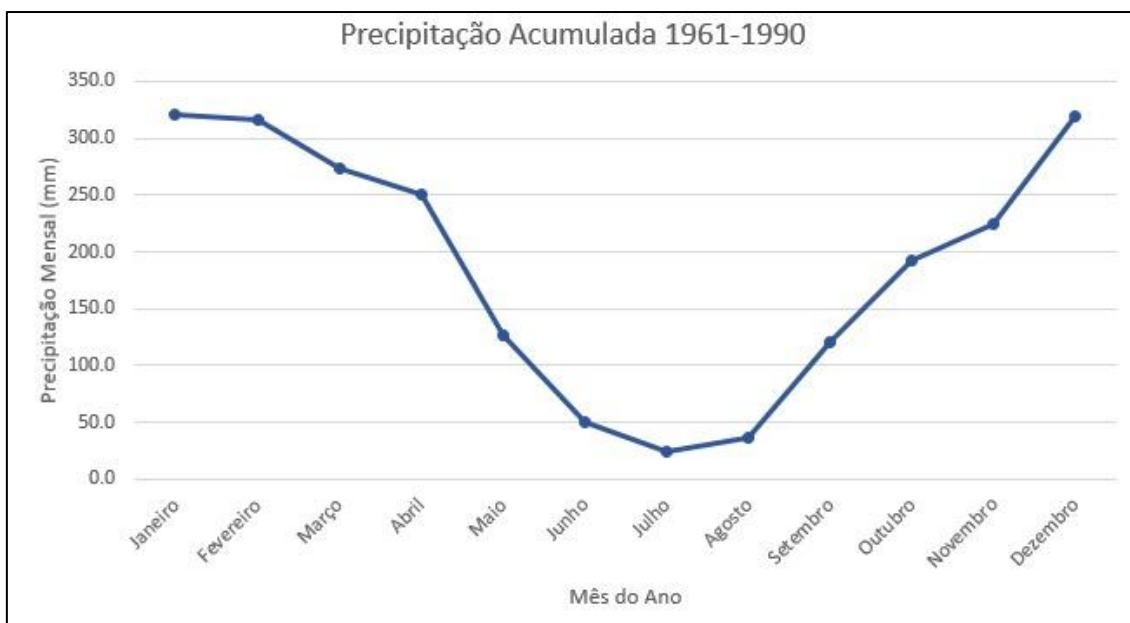
Fonte: IBGE (2017).

4.1.2.1 Regime de Chuvas

Os volumes de chuva encontrados para a região de Rondônia variam entre 1300 e 2600 mm.ano⁻¹ (RONDÔNIA, 2000 citado por FRANCA, 2015). A distribuição espacial da pluviosidade apresenta índices menores na região sudoeste do estado, como no município de Costa Marques-RO, cuja ANA tem um posto ligado à Rede Hidrometeorológica Nacional, e ao longo do vale do rio Guaporé. A pluviosidade aumenta de forma gradativa a leste/sudeste até 2000 mm, chegando a 2500 mm na região de Cujubim (ZUFFO *et al.*, 2010).

De acordo com dados comparativos de 1961-1990 disponibilizados pelo INMET, da estação código 82825, localizada na cidade de Porto Velho, os meses entre novembro a abril, são os mais chuvosos, apresentando em média 3 meses com precipitações acima de 300 mm (dezembro, janeiro e fevereiro). Os meses de junho, julho e agosto são caracterizados pelas chuvas abaixo 50 mm, conforme apresenta figura 6.

Figura 6 - Gráfico de Precipitação Acumulada (mm).



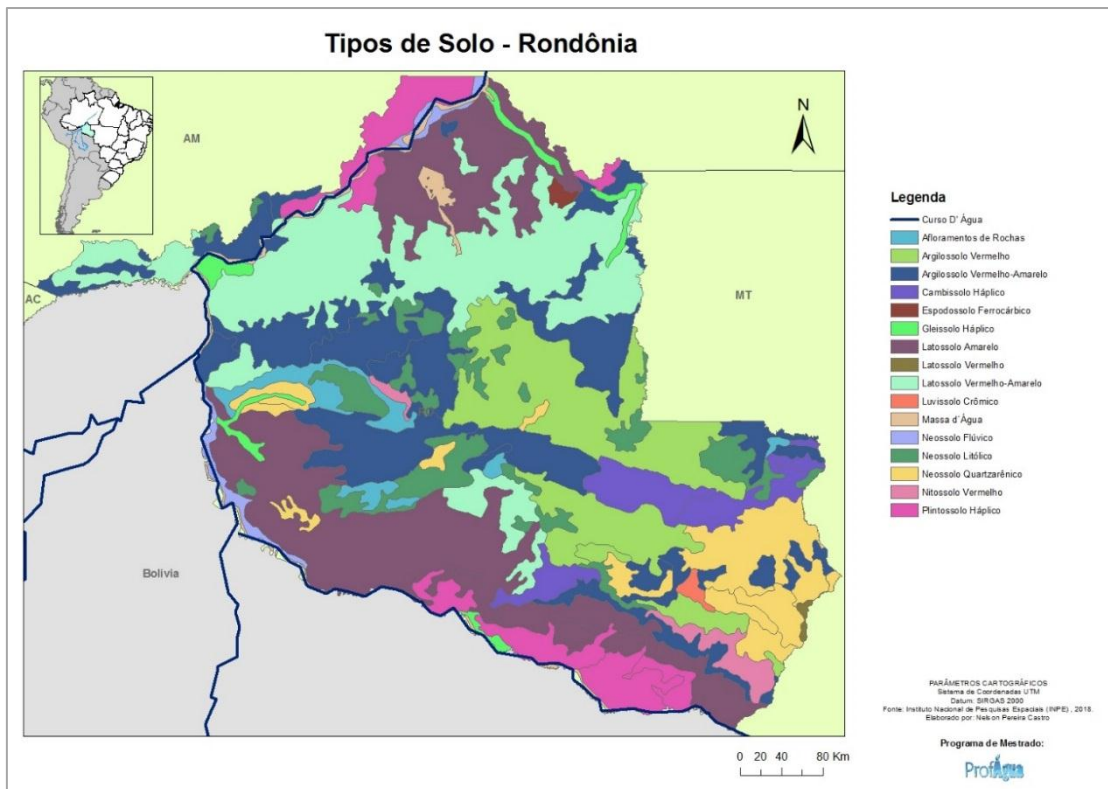
Fonte: INMET (2019).

4.1.3 Tipos de Solos e Relevo

A bacia hidrográfica do rio Madeira é composta por diversos tipos de solo diferentes entre si. Próximo a cidade de Porto Velho, por exemplo, conforme se observa na figura 7, predomina é o Argissolo vermelho amarelo distrófico petroplântico e típico, com textura argilosa muito cascalhenta e médio/argilosa, de relevo ondulado e suave ondulado, mais plintossolo pétrico concrecionário típico, textura argilosa cascalhenta, relevo ondulado. Geomorfologicamente têm-se bacias e coberturas sedimentares fanerozóicas, cuja nomenclatura é a depressão Porto Velho e depressão do Ituxi (IBGE, 2017b).

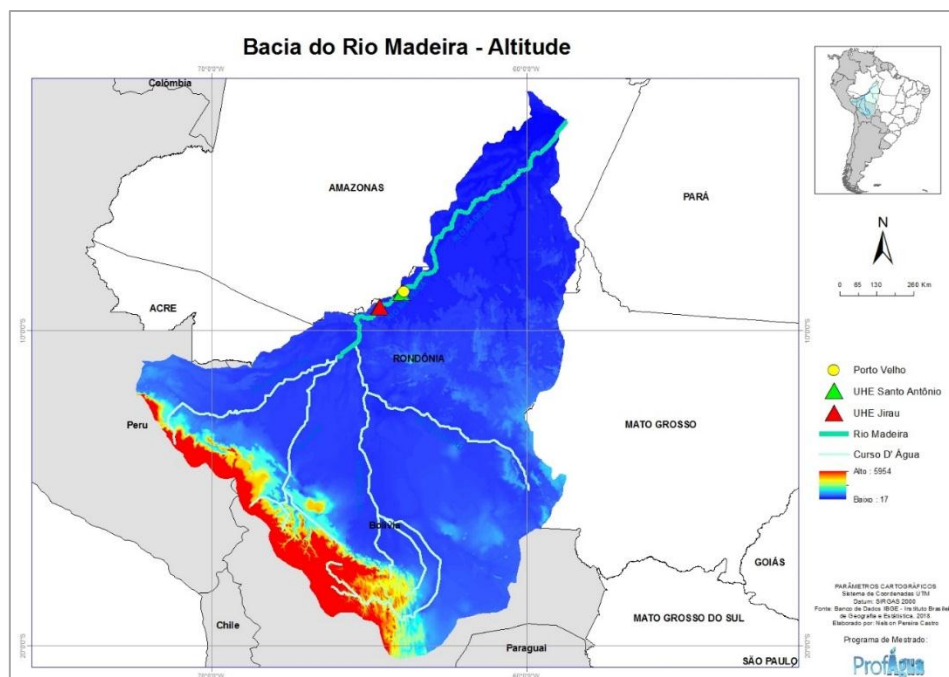
O relevo de Rondônia (figura 8) é pouco acidentado, não apresentando grandes elevações ou depressões. O vale do rio Madeira apresenta área de terras baixas e sedimentares. As áreas mais acidentadas encontram-se localizadas na região sudeste, onde ocorrem elevações e depressões, com altitudes que passam dos 1.000m. O ponto mais alto da bacia está localizado entre a Bolívia e o Peru com altitude de até 5.954m.

Figura 7 –Tipos de Solo do Estado de Rondônia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 8 - Relevo da Bacia Hidrográfica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.1.4 Composição da vegetação

A vegetação somada a fatores geológicos de uma bacia hidrográfica tem um papel fundamental no regime hidrológico, uma vez que aceleram ou retardam o escoamento das gotas de chuva (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). A presença ou não de vegetação e o seu tipo podem interferir nas propriedades do solo e consequentemente no regime fluvial dos rios.

Na região Norte, as florestas contribuem para o regime de chuvas e para a regularização do clima na região com suas cheias e vazantes, além de que, o aporte de sedimentos neste corpo hídrico contribui para a fertilidade do solo. Isso proporciona o agrupamento necessário das condições a um ambiente favorável para o estabelecimento da floresta e da vegetação típica da região: Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas com Palmeiras (Floresta de Terra Firme); Floresta Ombrófila Aberta Sub-montana com Palmeiras; Floresta Ombrófila Aberta Aluvial (composta por floresta de Igapó e floresta de várzea); formações pioneiras de várzea e vegetação dos pedrais (SAE, 2012).

4.1.5 Ocupação da terra

Em termos absolutos, de acordo com IBGE (2017), no Brasil mais de 1.100.000 km² sofreram algum tipo de alteração na sua cobertura e uso – área maior que o território de grande parte dos países do mundo.

Apesar do estado de Rondônia apresentar 37% com áreas de intervenção antrópica, a maior parcela de ocupação do solo na bacia do Madeira ainda é a floresta com 65.1% da área em território nacional, 18.3% uso antrópico, 6.4% cerrado e 0.9% de água (BRASIL, 2012). A tabela abaixo apresenta a composição do solo nas bacias da margem direita do rio Amazonas.

Tabela 1–Ocupação da terra no estado nas bacias hidrográficas da margem direita do rio Amazonas.

Bacia	Água (%)	Floresta (%)	Cerrado (%)	Uso antrópico (%)
Xingu	1,5	50,7	6,7	18,9
Tapajós	1,3	39,1	8,9	26,4
Madeira	0,9	65,1	6,4	18,3
Purus	0,1	89,3	1,0	4,0
Juruá	2,1	94,9	0,3	2,4
Jutaí	0,003	99,6	0,2	0,2
Javari	-	92,6	0,03	0,2
Xingu-Tapajós	208	71,9	4,2	12,1
Tapajós-Madeira	5,0	88,5	1,3	3,3
Madeira-Purus	4,1	89,6	1,4	4,9
Purus-Juruá	3,4	95,4	0,1	0,3
Juruá - Jutaí	22,4	73,6	3,0	1,0
Jutaí-Javari	6,2	99,8	0,4	0,5
Total	1,4	67,6	4,8	14,0

Fonte: Plano de Recursos Hídricos da Margem direita do Rio Amazonas (2012).

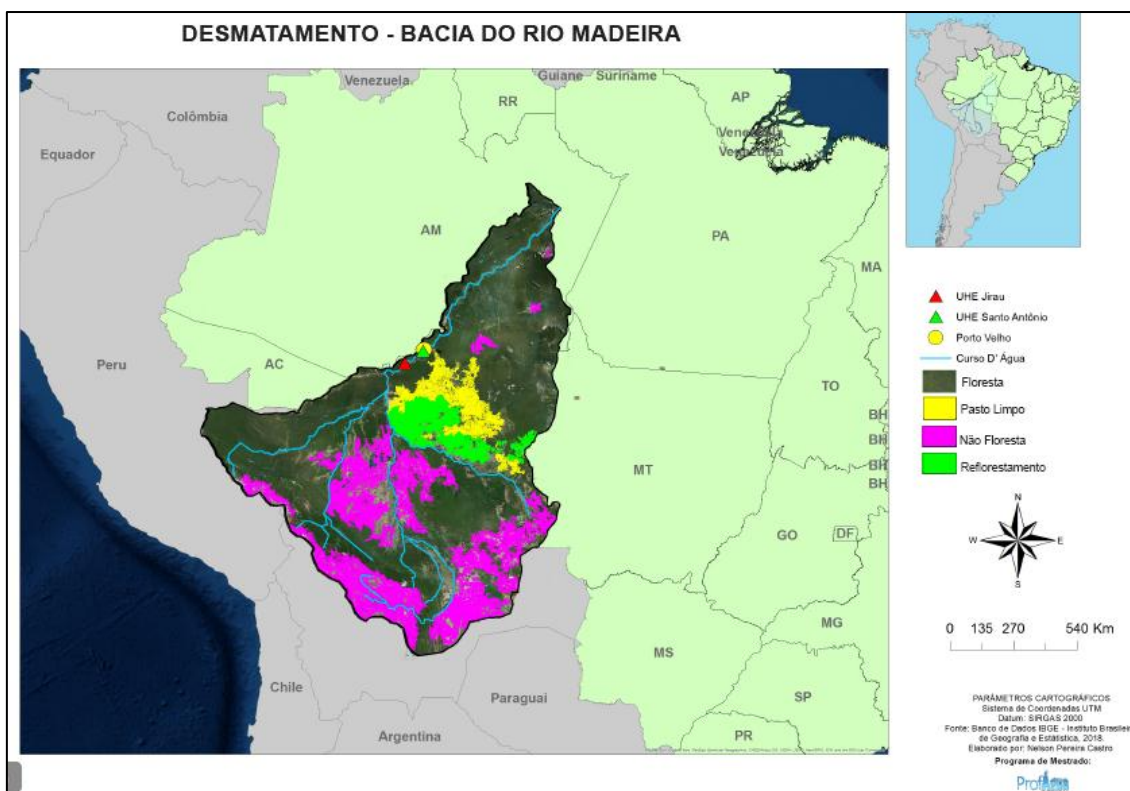
4.1.6 Desmatamento na região de Rondônia

Segundo Rocha (2012), as perdas de água podem ser atribuídas ao desmatamento ou desflorestamento. Em curto prazo, a supressão das árvores reduz a perda de água do solo por transpiração, uma vez que as raízes são arrancadas, aumentando assim o escoamento superficial em decorrência da ausência de amortecimento das gotas de chuva.

Alteração do microclima, desertificação, desaparecimento de fauna são outros efeitos que podem ser causados com o avanço do desmatamento. Becker, (1997, 2004) e Machado (1998), citado por Pereira *et al.* (2007), atribuem ao desenvolvimento agrícola o aumento de atividades antrópicas em desfavor da floresta.

O desmatamento na Amazônia Legal tem aumentado nos últimos anos devido a múltiplos fatores como exploração madeireira, abertura de estradas, crescimento da população, aumento da pecuária extensiva entre outros, conforme é apresentado na figura 9 (FERREIRA *et al.*, 2005).

Figura 9 -Desmatamento na bacia do rio Madeira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

No estado de Rondônia, entre os anos de 2015 e 2016 houve um aumento de 35% na taxa de desmatamento principalmente em áreas de Unidades de Conservação e Assentamento, segundo o relatório Panorama sobre o Desmatamento da Amazônia em 2016, elaborado pelo do Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM). Sua capital, Porto Velho está entre os 10 municípios que mais desmataram em área entre os anos de 2013 a 2016 (IPAM, 2016).

4.2 PRINCIPAIS CONCEITOS ACERCA DOS ESTUDOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICO E IMPACTOS DE BARRAGENS

As barragens são barreiras físicas de terra ou concreto utilizadas para reter ou acumular água ou qualquer outro líquido, rejeito, detritos para fins de irrigação, mineração, geração de energia entre outros (CDBD, 2018). Estas barreiras modificam e impedem o fluxo natural hidrossedimentológico do curso d'água. Seus impactos são muitas vezes irreversíveis ao ecossistema e quando reversíveis demoram anos para se estabilizar. Os sedimentos, matéria orgânica

e tudo que compõe o fluido escoado no rio são impedidos através da barreira de concreto ou de terra de fluir naturalmente pelo caminho, antes criado pela própria natureza (FONSECA, 2002).

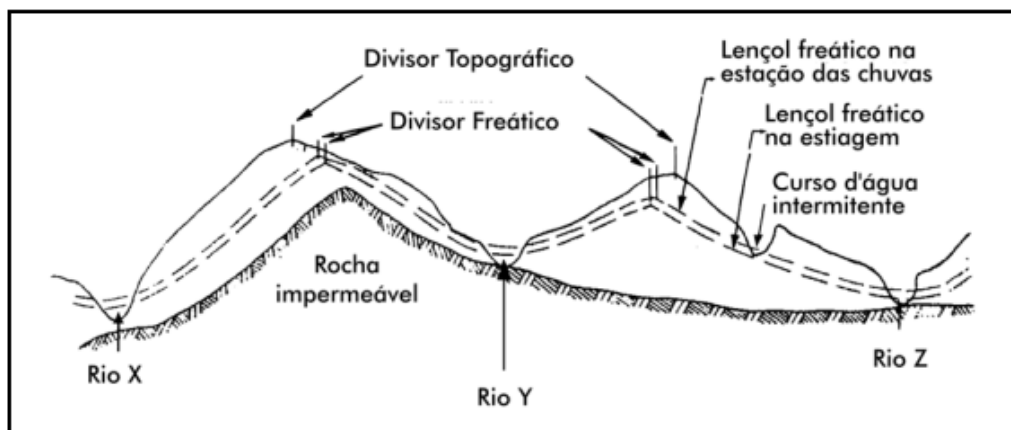
De acordo com Coelho (2008), poucas bacias do mundo escaparam de algum represamento e o tema sobre a geomorfologia fluvial brasileira. O tema relacionado aos impactos das barragens na dinâmica fluvial hidrológica e de sedimentos, foi pouco discutida no Brasil durante muitos anos. Nas últimas 2 décadas, estes temas ganharam mais pesquisadores e alguns trabalhos e publicações são debatidas em eventos, como por exemplo, Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, realizado a cada 2 anos, promovido pela ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

4.2.1 Hidrossedimentologia Fluvial

A ciência que estuda o fluxo de sedimentos, composto por água e partículas sólidas oriundas da decomposição de solos e rochas e escoado pelos rios e lagos é denominada hidrossedimentologia fluvial (CARVALHO, 2008). Nesta área da ciência estuda-se a gênese dos sedimentos, e suas combinações com os regimes hidrológicos fluviais.

A Lei Federal nº 9.433 de 1997, estabelece a bacia hidrográfica como a unidade territorial para gerenciamento dos recursos hídricos. A bacia hidrográfica é a região fisiográfica limitada por divisores topográficos, cuja delimitação teoricamente drena as águas e sedimentos para um único ponto chamado de exutório. Tais divisores topográficos delimitam o escoamento superficial das águas das chuvas entre duas bacias vizinhas. Entretanto, o divisor do lençol freático (águas subterrâneas ou escoamento de base) pode ser deslocado do divisor topográfico conforme figura 10 (FREIRE; OMENA, 2005).

Figura 10 - Divisor Topográfico e Freático da Bacia Hidrográfica.



Fonte: Villela e Matos (1975, citado por FREIRE; OMENA, 2005).

A combinação dos diferentes tipos de processos erosivos na bacia hidrográfica e energia do fluxo levam ao transporte de sedimentos. Este fenômeno tem grande variação no espaço e no tempo e dentro da sedimentologia é muito complexo realizar os estudos (SANTOS *et al.*, 2001).

Os estudos ligados a hidrossedimentologia fluvial não são considerados triviais, principalmente quando se trata de sedimentos, devido ao grande número de métodos empíricos e geralmente poucas amostragens em campo. Naghettini *et al.* (2007), considera quase todos os processos hidrológicos estocásticos, ou seja, são regidos por uma probabilidade de ocorrência. Embora os cálculos estatísticos possam indicar uma probabilidade de ocorrência, não há como determinar com exatidão os efeitos das diversas variáveis hidrológicas no regime de vazões. Os riscos devem ser levados em consideração em relação à confiabilidade dos dados, como por exemplo a construção de usinas hidrelétricas considera a vazão decamilenar (10 mil anos) para dimensionar as estruturas que devem garantir a estabilidade da barragem.

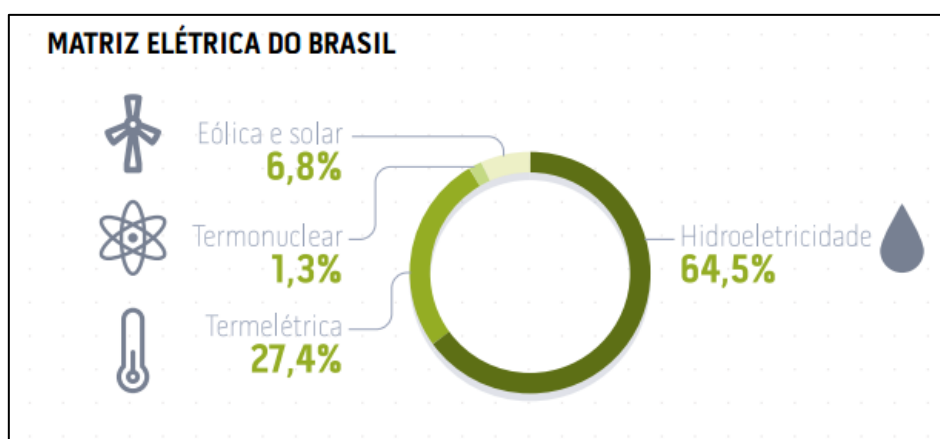
Carvalho *et al.* (2000), apresentam o Guia de Práticas Sedimentométricas métodos de amostragem de sedimentos em suspensão e de fundo para rios e reservatórios. A carga sólida coletada em campo e analisada em laboratório é composta por partículas classificadas de acordo com o tamanho dos grãos, podendo ser argila, silte, areias e pedregulhos.

4.2.2 Impactos de barramentos no regime hidrossedimentológico

A construção de barramentos para captação de água, geração de energia ou outra aplicação pode causar impactos positivos e negativos de natureza social, econômica e ambiental. Cunha (2001), Coelho (2008) e Carvalho (2008) observaram que o advento de uma grande obra hidráulica como as barragens modificam o comportamento hidrossedimentológico do rio, podendo ter redução da carga sólida a jusante e a deposição na região a montante dos barramentos.

Conforme apresentado na figura 11, a matriz energética brasileira tem o modelo baseado na hidroeletricidade. Considerada energia renovável, as usinas hidrelétricas, seja de pequeno ou grande porte, geram impactos significativos nos rios onde são implantadas, inclusive no transporte de sedimentos.

Figura 11 – Distribuição da Matriz Elétrica do Brasil.



Fonte: ANA (2017).

Com o avanço da legislação ambiental a importância da construção de uma barragem passou a ser observada não só do ponto de vista energético, como também ambiental. Diante das exigências ambientais, alguns instrumentos foram implementados para equilibrar os impactos das obras à natureza. O estudo de impacto ambiental e a outorga de direito de uso das águas são exemplos destes avanços da legislação.

A construção de barragens influencia na quantidade de sedimentos que é transportado pelo curso d'água de duas formas principais: retendo os sedimentos afluentes e modificando o fluxo natural e o carreamento na jusante (CARVALHO *et al.*, 2000).

Além dos efeitos ao fluxo natural do rio e todo ecossistema envolvido, a própria barragem pode ser afetada pela alteração que a mesma causou na

dinâmica fluvial, como por exemplo o acúmulo de sedimentos no pé da barragem pode levar ao entupimento do canal de adução das máquinas hidráulicas gerando prejuízos ao empreendimento. A tabela 2 apresenta os principais impactos hidrológicos e geomorfológicos gerados quando há uma barragem no rio.

Tabela 2 – Impactos das Barragens na Dinâmica Fluvial

SETOR DA BACIA	PRINCIPAIS IMPACTOS HIDROLÓGICOS	PRINCIPAIS IMPACTOS GEOMORFOLÓGICOS
MONTANTE DA BARRAGEM	Deposição de carga sólida; Mudança térmica das águas; Redução da velocidade das águas; Subida do nível das águas.	Assoreamento na desembocadura dos rios principais; Assoreamento no fundo dos vales principais; Assoreamento na desembocadura e no fundo dos vales afluentes; Formação de novas áreas de inundação
RESERVATÓRIO E ENTORNO	Aumento da evaporação com consequente redução das vazões; Armazenamento de carga líquida; Armazenamento de carga sólida; Modificação no conteúdo de gases dissolvidos; Elevação do nível piezométrico (compressibilidade dos líquidos); Alteração nas taxas de infiltração; Maior disponibilidade de água subterrânea; Ocorrência de Inundações; Assoreamento no reservatório; Redução da vida útil da barragem;	Submersão das formas de relevo; Processos de abrasão lacustre; Recuo das margens ou das falésias lacustres; Formação de praias e depósitos de abrasão; Processos de assoreamento; Formação de bancos arenosos emersos ou imersos; Formação de lagoas fechadas; Colmatação da desembocadura dos/ rios principais; Formação de novas áreas de Inundação.

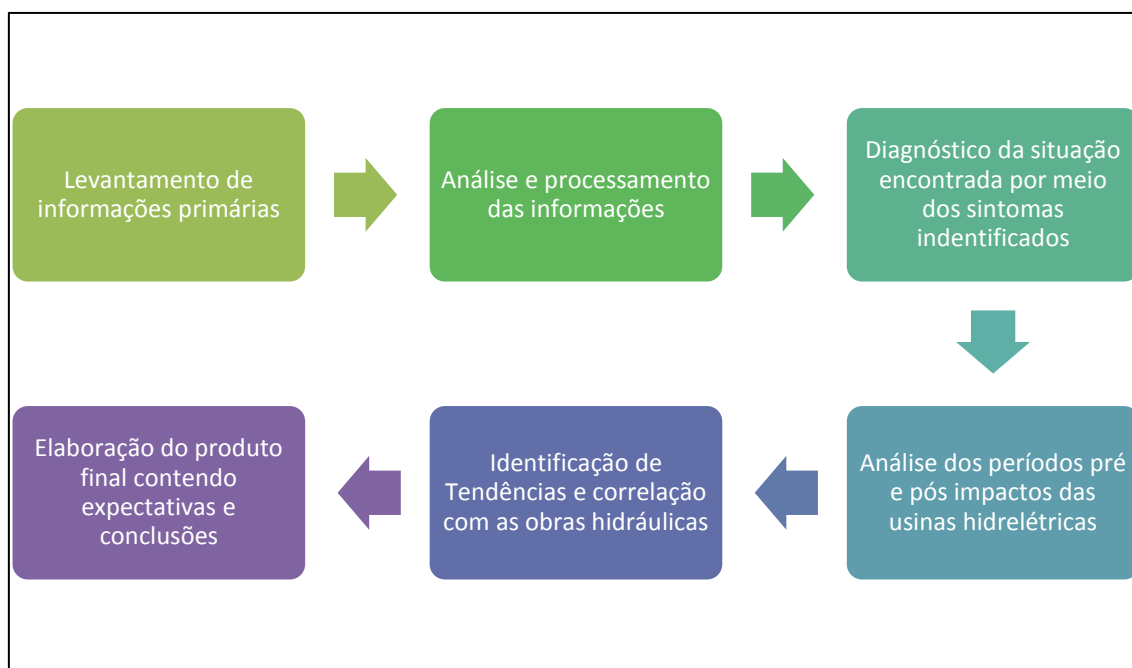
	Alteração na transparência da água; Alteração na estrutura térmica da água.	
JUSANTE DA BARRAGEM	Controle da regularização das descargas; Redução da carga sólida (sedimentos); Salinização da água; Alteração na estrutura térmica; Redução do nível piezométrico; Alteração nas taxas de infiltração; Menor disponibilidade de água subterrânea	Entalhe no leito do rio, com consequente descida do nível de base local Descida do nível de base dos afluentes com retomada erosiva (entalhe) dos seus leitos; Processos de erosão nas margens; Alteração nos sedimentos de fundo e das margens; Reajustamento na morfologia do canal pela migração dos setores de erosão e sedimentação; Processos de deposição nas margens e fundo do leito; Modificações na dinâmica da foz.

Fonte: Cunha (1995).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para chegar aos resultados deste trabalho, se faz necessário o uso de dados indicadores. Em resumo a figura 12, logo abaixo, apresenta os passos utilizados para alcançar os resultados:

Figura 12 – Quadro metodológico.



Fonte: Elaboração do autor.

Foram utilizados dados hidrológicos com série histórica longa (51 anos) contendo valores de descarga líquida. Os dados de concentração de sedimentos, embora mais escassos, foram utilizados para gerar a descarga sólida em suspensão. Para realizar os cálculos estatísticos foi considerado o ano civil (janeiro a dezembro).

O software IHA 7.1, que calcula os Indicadores de Alteração Hidrológica (IAH), desenvolvido pela The Nature Conservancy foi a principal ferramenta utilizada para verificar as modificações pré e pós impactos. O IAH calcula 67 parâmetros estatísticos referentes à alteração hidrológicas (33) e ecológicas (34), tais indicadores propostos por Richter (1997). Os parâmetros do IAH estão apresentados na tabela 3. O objetivo do software é processar registros hidrológicos diários e permitir caracterizar as condições naturais dos rios além

de possibilitar avaliações sobre as atividades antrópicas ao regime de vazões, por meio de análises estatísticas do IAH caracteriza-se a magnitude, o tempo, a duração, a frequência e taxa de mudança dos fluxos hidrológicos, conforme definidas em Poff *et al.* (1997).

Tabela 3 - Regime Hidrológico, parâmetros utilizados nos Indicadores de Alteração Hidrológica.

	IAH - Grupos de parâmetros	Características do regime	Parâmetros Hidrológicos
12 parâmetros	Grupo 1: Magnitude das condições mensais	Magnitude Mensal	✓ Valor médio para cada mês do calendário
12 parâmetros	Grupo 2: Duração e magnitude dos eventos extremos anuais	Duração e Magnitude	✓ Mínimo anual com 1 dia de duração ✓ Mínimo anual com 3 dia de duração ✓ Mínimo anual com 7 dia de duração ✓ Mínimo anual com 30 dia de duração ✓ Mínimo anual com 90 dia de duração ✓ Máximo anual com 1 dia de duração ✓ Máximo anual com 3 dia de duração ✓ Máximo anual com 7 dia de duração ✓ Máximo anual com 30 dia de duração ✓ Máximo anual com 90 dia de duração
2 parâmetros	Grupo 3: Eventos extremos anuais	Periodicidade	✓ Data juliana do valor mínimo de cada ano ✓ Data juliana do valor máxima de cada ano
4 parâmetros	Grupo 4: Frequência e duração de altos e baixos pulsos	Frequência e duração	✓ N° baixos pulsos no ano ✓ Duração média (em dias) dos baixos pulsos ✓ N° altos pulsos no ano ✓ Duração média (em dias) dos altos pulsos

3 parâmetros	Grupo 5: Taxa/Frequência das condições de alteração da vazão	Taxa de mudança e frequência	✓ N° baixos pulsos no ano ✓ Duração média (em dias) dos baixos pulsos ✓ N° altos pulsos no ano ✓ Duração média (em dias) dos pulsos
-----------------	---	------------------------------	--

Fonte: Richter (1996).

A partir dos dados diários de vazão da série histórica de 51 anos, foram calculados os Indicadores de Alteração Hidrológica. Utilizando análises estatísticas foram definidos dois períodos hidrológicos 1967 a 2011 e 2012 a 2017, denominados pré-impactos e pós impactos antrópicos de grande magnitude, no caso a construção dos empreendimentos de geração de energia, para avaliação de alteração hidrológica do rio Madeira. Os dados do ano 1967 da série de dados foram interpolados pelo próprio software, devido a uma parcela de dados ausentes.

Foram avaliados estatisticamente também, dados de períodos hidrológicos diferentes entre si dentro da série histórica baseado em aspectos climatológicos como, por exemplo, a Oscilação Decadal do Pacífico – ODP e La Nina e El Nino. Neste sentido, foram definidas as médias mensais para cada ano. Com as médias mensais, foi calculada a média anual e desvio padrão da série. Logo após esta etapa, foi gerado gráficos apresentando as mudanças no regime hidrológico ao longo do tempo.

Os dados de concentração de sedimentos foram utilizados para obter a descarga sólida. Estes dados expressos em miligramas por litro apresentaram falhas ao longo da série. O período da série contendo o regime natural hidrossedimentológico foi comparado com período do regime influenciado pelos barramentos.

Com o conjunto de indicadores hidrológicos e sedimentológicos, pode-se:

- a) Investigar impactos hidrológicos nas atividades humanas;
- b) Definir vazões ambientais para fins de gestão de recursos hídricos;
- e
- c) Estimar, por meio de modelagem, as características do curso d'água e ambiente fluvial nas condições natural e alterada.

5.1 DADOS DE ENTRADA

Este estudo foi realizado em parte da bacia hidrográfica do rio Madeira, ou seja, da nascente até o trecho médio na cidade de Porto Velho, por intermédio de um posto hidrométrico localizado na capital do estado de Rondônia. O posto fluviométrico Porto Velho, inscrito sob o código da ANA 15400000, foi selecionado para este trabalho devido a sua localização privilegiada para cumprir o objetivo deste trabalho (figura 8). Este posto integra a Rede Hidrometeorológica Nacional pertencente à Agência Nacional das Águas (ANA), é operado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e outras instituições, apresenta uma série longa de dados hidrossedimentológicos e tem localização a jusante das duas barragens distando aproximadamente 9 Km da UHE Santo Antônio.

Os dados foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas através do sistema Hidroweb e parcialmente enviados por e-mail, mediante solicitação. Embora o site Hidroweb/ANA informa a instalação da seção de réguas no ano de 1964 com medições de vazão, no ato do download estes dados aparecem somente após 1967. Portanto, o período utilizado neste estudo é compreendido entre os anos de 1967 a 2017, ou seja, 51 anos de dados. Os dados de nível e vazões foram disponibilizados em intervalos diários e os dados de sedimentos em intervalos mensais, disponibilizados em arquivos Excel e Access.

Eventualmente, outros postos da rede nacional foram utilizados como apoios, como por exemplo o posto UHE Jirau Porto R4, UHE Jirau Jusante Rio Beni e UHE Santo Antônio – Porto Velho, principalmente nas análises após a construção dos empreendimentos.

5.2 VERIFICAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO

Compreender a variabilidade das vazões dos rios é etapa importante nas pesquisas hidrológicas, pois permite observar se esta variabilidade apresenta tendência significativa, tanto positiva, como negativa, ou ausência de tendência, e, também, mudanças bruscas dos dados que indiquem a existência de períodos hidrológicos distintos, e, assim, levantar hipóteses sobre a gênese destas rupturas.

Utilizando análises estatísticas, conceitos históricos de mudanças climáticas, foram identificados dois períodos hidrológicos, para avaliação de alteração hidrológica do rio Madeira. Esses períodos foram estabelecidos principalmente como pré e pós impacto, ou seja, antes e depois da construção de usinas hidrelétricas no rio Madeira.

O software IAH permite que o usuário aplique a Taxa de Aproximação da Variabilidade Natural (TAV) descrita em Richter et al. (1997). A análise de TAV também gera uma série de alterações hidrológicas, ou seja, fatores que quantificam o grau de alteração dos 33 parâmetros de fluxo IAH.

Em uma análise de TAV, a gama completa de dados de pré-impacto para cada parâmetro é dividida em três diferentes categorias. Os limites entre categorias são baseados em valores percentuais (para análise não-paramétrica) ou um número de desvios-padrão longe da média (para análise paramétrica), que são especificadas pelo usuário.

Os cálculos do IHA 7.1 contemplam a frequência esperada com a qual os valores "pós-impacto" dos parâmetros IHA devem estar dentro de cada categoria (no padrão não paramétrico, isso seria 33% para cada uma das três categorias). O programa calcula a frequência com a qual os valores anuais "pós-impacto" dos parâmetros IHA caíram em cada uma das três categorias. Essa frequência esperada é igual ao número de valores na categoria durante o período pré-impacto multiplicado pela relação entre anos pós-impacto e anos pré-impacto. Por fim, um fator de alteração hidrológica é calculado para cada uma das três categorias como: $(\text{frequência observada} - \text{frequência esperada}) / \text{frequência esperada}$. Um valor de Alteração Hidrológica positivo significa que a frequência de valores na categoria aumentou do pré-impacto para o período pós-impacto, enquanto um valor negativo significa que a frequência dos valores diminuiu (THE NATURE CONSERVANCY, 2014).

Rocha (2010), alerta para o uso desta ferramenta que, segundo o autor, o fato de um determinado índice se apresentar dentro do intervalo-meta não significa que não haverá alteração do regime do rio, sendo necessária uma observação mais completa dos valores de variabilidade obtidos para os dois períodos.

5.3 ANÁLISE DA DESCARGA SÓLIDA

A descarga sólida em suspensão foi calculada mediante o uso da equação 1 que leva em conta a vazão líquida e a concentração de sedimentos em suspensão. Esta fórmula foi estudada por uma comissão de entidades norte-americanas e segundo Carvalho *et al.* (2014) é comumente utilizada no Brasil. Os dados de sedimentos, diferentemente dos dados de vazão, não apresentaram uma série constante, tampouco uma boa correlação entre si. A série histórica com 51 anos de descarga líquida, apresenta apenas 21 anos de dados de concentração de sedimentos, sendo a principal falha entre os anos de 1985 a 1993 (8 anos). Espera-se observar uma diminuição dos valores de descarga sólida no período posterior a construção dos barramentos.

$$Q_{ss} = 0,0864 Q_L C \quad (1)$$

Onde:

Q_{ss} – Descarga sólida em suspensão (t/dia)

Q_L – Descarga líquida (m³/dia)

C – Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/l)

5.4 IMPACTOS NO FLUXO SEDIMENTOLÓGICO

Para avaliar os impactos causados no sistema hidrossedimentológico do rio Madeira é necessário observar a série histórica antes, durante e depois das obras hidráulicas. As primeiras movimentações de máquinas e trabalhadores para erguer as usinas hidrelétricas no complexo do rio Madeira foram no ano de 2009. O fim das obras mais pesadas, civis e eletromecânicas foi em 2015.

Os efeitos na dinâmica hidrossedimentológica foi observada a partir das análises dos dados anteriores e posteriores a estas datas. A expectativa natural é principalmente observar a retenção dos sólidos pelas barragens. Os efeitos a jusante poderão ser os mais diversos, desde erosões nas margens devido ao aumento de energia da água, até perda de nutrientes que são carreados com a descarga sólida, porém estes são mais difíceis de quantificar a curto prazo, uma vez que este processo é lento e poderá refletir na diminuição de peixes e fertilidade das terras agrícolas. Devido à retenção de nutrientes, decorrida da

barragem, pode ocorrer o empobrecimento da qualidade da água os nutrientes, ou seja, quando reduz a carga de sedimento à jusante, também reduz a oferta de nutrientes (COELHO, 2008).

Nesta fase dos estudos, dados de outros postos da rede hidrometeorológica foram utilizados como apoio para análises. Tanto a usina de Jirau, quanto a usina de Santo Antônio, atende a legislação brasileira que exige a instalação e operação de postos hidrossedimentométricos em suas bacias de interesse, através da Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03 de 2010. Esta Resolução conduz os agentes de geração de energia hidrelétrica a realizar o monitoramento hidrológico mediante medições de níveis, descargas líquidas, descargas sólidas, qualidade da água entre outras ações.

O regime hidrológico do rio Madeira é determinado principalmente pelas incidências pluviométricas na área de drenagem, mas o derretimento de geleiras andinas também contribui de forma menos expressiva com a descarga líquida. No caso do rio Madre de Dios (Peru) tem sua nascente no rio Pilcopata que recebe contribuição hídrica andina.

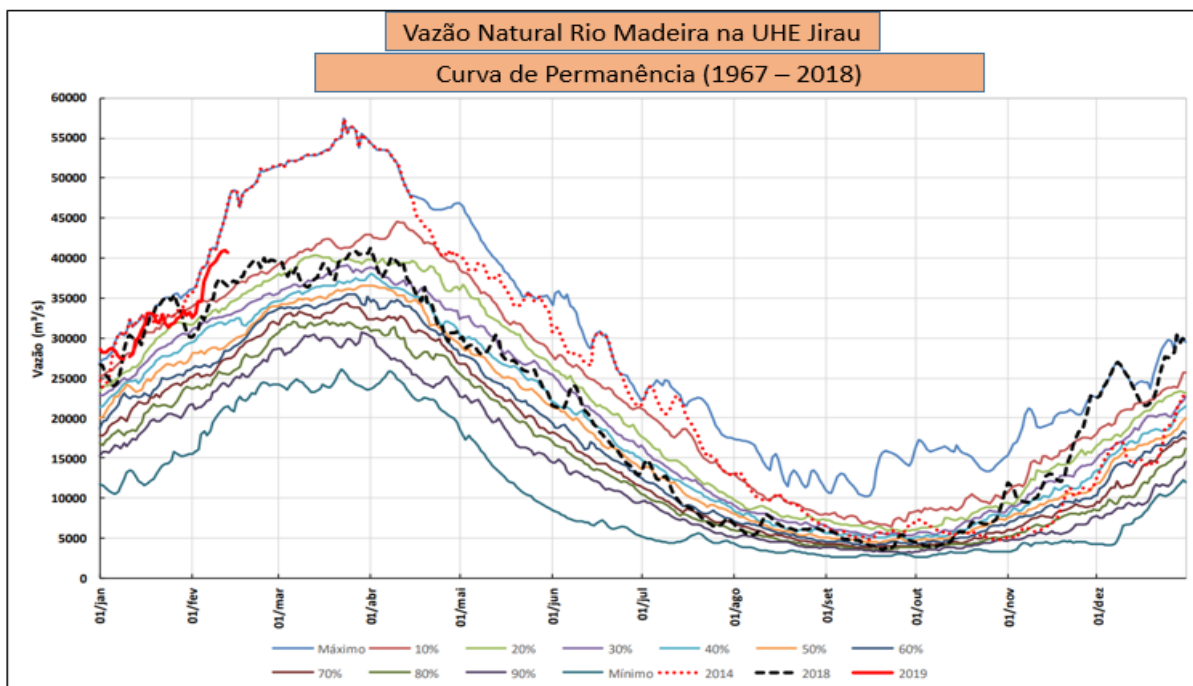
Em deflúvio, os rios Beni (Bolívia) e Madre de Dios (Peru) contribuem significativamente para a formação do rio Madeira. Além disso, são grandes contribuintes para a descarga sólida devido ao transporte elevado de sedimentos.

No ano de 2014, foi registrada uma cheia com dimensões catastróficas na bacia do Madeira. O fato ocorreu praticamente ao mesmo tempo da conclusão das obras hidráulicas de energia. De acordo com o SIPAM – Sistema de Proteção da Amazônia, em novembro de 2013 a bacia já apresentou os primeiros sintomas da cheia que estava por vir. O tempo de recorrência, variável que expressa o grau do evento hidrológico, foi de 124 anos o que pode ser considerado alto (SIPAM, 2015)

Diversas regiões ficaram isoladas como a cidade de Rio Branco, capital do Acre, que passou por uma crise de abastecimento de combustíveis e alimentos devido a BR-364, única rodovia federal de acesso, ter ficado submersa. A cidade de Porto Velho também foi atingida pela cheia com inundação em mais de 6 bairros (SIPAM, 2015).

Na figura 14, é possível observar na linha pontilhada cor vermelha, a cheia no ano de 2014. Nota-se que os anos de 2018 e 2019 também iniciaram o período úmido com vazões bem acima da média, representado na cor laranja.

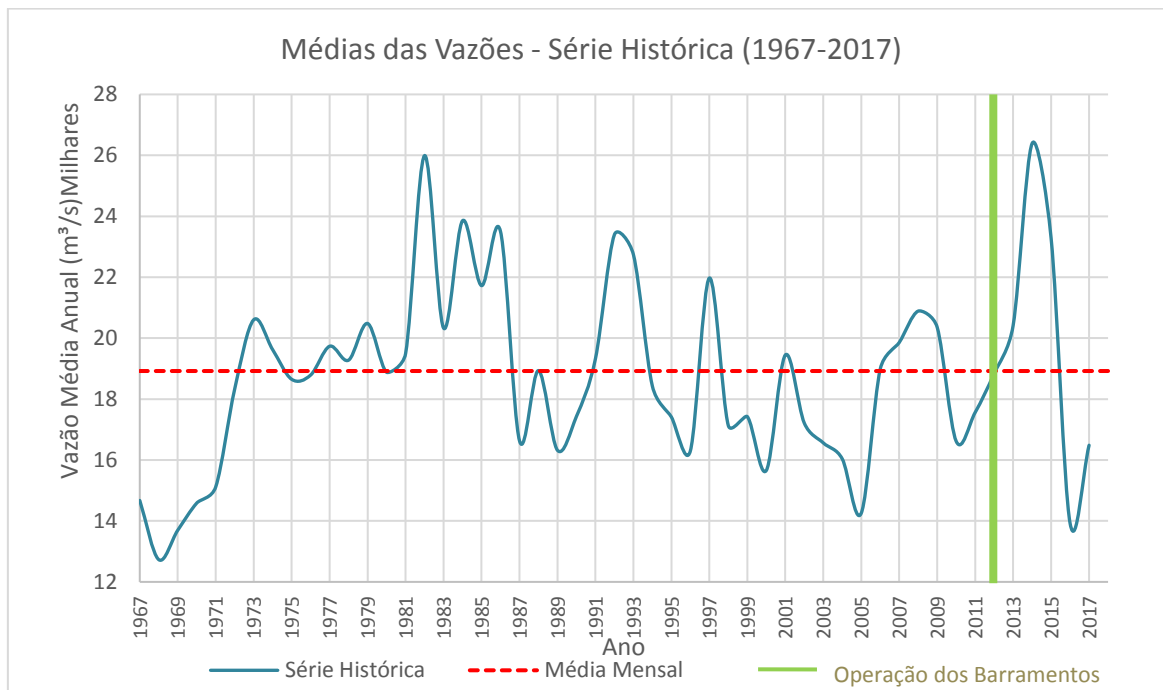
Figura 14 – Permanência das vazões naturais do rio Madeira com destaque para a cheia de 2014.



Nota: Sala de Situação
Fonte: ANA (2019).

A seguir, a figura 15 apresenta a série histórica (1967-2017) das médias anuais de vazão. A linha vermelha, traçada na horizontal, simboliza o valor médio da vazão sendo $18.832,37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, obtido para toda a série. Alguns autores apresentam a série de vazões médias na foz do rio Madeira, distante 1.116 km do posto fluviométrico utilizado, com valores de $23.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (COSTA SILVA, 2016; ANTAQ, 2013). Carvalho (2017) apresenta a vazão média para o posto em $18.323 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ com dados de vazão medidos entre 2003 a 2010. Os estudos de viabilidade aprovados pela ANA apresentam em Porto Velho valores bem próximos ao encontrado no trabalho para a vazão média de $17.983 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (ANA, 2006). De acordo com ANA (2018), o Brasil tem em média cerca de $260 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de água escoando sob o território nacional, o que em média, significa que o rio Madeira escoia aproximadamente 7% de todo volume de água.

Figura 15 – Série histórica das médias anuais, com destaque para o início da operação comercial dos empreendimentos.



Fonte: Elaboração do autor.

A análise de dados mostrou que a vazão média encontrada, acima dos valores encontrados na literatura, pode ser explicada pela cheia histórica de 2014 que contribui significativamente para o aumento da média, conforme apresenta o gráfico anterior. Por outro lado, o início da série histórica é marcado por um período com vazões abaixo da média.

A vazão líquida mínima identificada ocorreu no ano de 2005 no mês de setembro com o valor de $2.599,13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Já o valor máximo de vazão registrado ocorreu no ano de 2014 com $55.600,00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A tabela 4, logo abaixo sintetiza os valores característicos do rio Madeira. O desvio padrão encontrado foi de $11.192,73 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, o que confirma grandes diferenças entre os períodos hidrológicos secos e úmidos. O coeficiente geral de variação foi obtido a 59%, ou seja, considerando-se a média dos desvios padrões em relação ao valor médio de vazão, os desvios atingem a média 59% do valor desta.

Tabela 4 – Valores característicos das vazões.

Índice	Ano	Vazão (m^3s^{-1})
Média	1968-2018	18.920,88
Mínima	Setembro - 2005	2.599,00
Máxima	Março - 2014	55.600,00
Desvio Padrão	1968-2017	11.192,73
Coef. de Variação	1967-2017	59 %

Fonte: Elaboração do autor.

6.2 AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA (IAH)

A escolha das estatísticas não paramétricas, se deve ao fato de ser indicada como melhor método para comparar dois períodos distintos, como por exemplo a construção de barragem. O ano civil foi escolhido para realizar as comparações entre os diferentes períodos (pré e pós impactos). Para compreender melhor os processos envolvidos na alteração do regime hidrológico, foram utilizadas técnicas de estatística descritiva, com base nos IAH, como medidas de tendência central, médias mensais, medidas de dispersão (desvio padrão), coeficiente de variação (CV) e curvas de tendência. Cabe ressaltar que em relação ao CV, quanto mais próximo de zero menor é a intensidade das alterações no período analisado.

A tabela 5 apresenta os resultados de IAH calculados por parâmetros e divididos por períodos. O período pré-impacto corresponde aos anos de 1967-2011 e o período pós-impacto corresponde aos anos de 2012-2017. Nota-se que a magnitude mensal (grupo 1) das vazões foi em média 21% maior após os empreendimentos de geração de energia. Além disso, pode-se observar que o mês de setembro foi o mês que teve a maior elevação nas médias de vazões, alcançando valores 52%. O mês de dezembro apresentou as menores diferenças nas médias das vazões, tendo desvios de apenas $114 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tabela 5– Resultados dos IAH – Magnitude mensal.

	Vazão Média (m³s)				Coeficiente de Variação			
	Pré- impacto	Pós- impacto	Desvio Magnitude	%	Pré- impacto	Pós- impacto	Desvio C.V	%
	Magnitude Mensal							
Janeiro	24170	25190	1023	4	0.16	0.21	0.05	32
Fevereiro	30700	32470	1772	6	0.13	0.24	0.11	83
Março	35290	39480	4190	12	0.12	0.21	0.08	66
Abril	34270	35830	1562	5	0.17	0.21	0.04	21
Maio	26050	28610	2568	10	0.23	0.22	-0.01	-3
Junho	17960	21810	3844	21	0.27	0.29	0.03	10
Julho	11220	15750	4527	40	0.33	0.38	0.05	16
Agosto	6627	10000	3374	51	0.30	0.67	0.36	119
Setembro	5045	7647	2602	52	0.37	0.92	0.54	145
Outubro	6063	8012	1949	32	0.39	0.86	0.47	121
Novembro	9858	11050	1188	12	0.32	0.57	0.26	80
Dezembro	15930	16050	114	1	0.25	0.32	0.08	31
Média de variação do grupo %				21				61

Fonte: Elaboração do autor.

A tabela 6, apresenta os valores mínimos e máximos das médias móveis para os períodos de 1, 3, 7,30 e 90 dias. Nota-se que as vazões extremas sentiram variações ainda maiores que as porcentagens mensais. Além disso, apresenta-se um índice de escoamento de base 316% maior para o período posterior aos impactos.

Tabela 6– Resultados dos IAH – Magnitude e Duração.

	Magnitude e Duração dos (extremos anuais)							
	Vazão Média (m³s)				Coeficiente de Variação			
	Pré- impacto	Pós- impacto	Desvio Magnitude	%	Pré- impacto	Pós- impacto	Desvio C.V	%
1- dia mínimo	3898	6501	2603	67	0.27	1.14	0.87	318
3- dias mínimo	3931	6638	2707	69	0.28	1.11	0.84	304
7- dias mínimo	4031	6712	2680	66	0.28	1.10	0.82	296
30- dias mínimo	4598	7127	2529	55	0.32	1.01	0.69	219
90- dias mínimo	5688	8013	2325	41	0.33	0.85	0.52	160
1- dia máximo	38500	42350	3849	10	0.13	0.19	0.06	47
3- dias máximo	38400	42020	3619	9	0.13	0.19	0.07	51
7- dias máximo	38150	41700	3556	9	0.13	0.20	0.07	53
30- dias máximo	36830	40120	3294	9	0.13	0.21	0.08	59
90- dias máximo	33930	36370	2439	7	0.13	0.21	0.07	55
Dias com vazão zero	0	0			0.00	0.00		

Índice de escoamento base	0	0	0	35	0.20	0.84	0.64	316
Média de variação do grupo %				34				171

Fonte: Elaboração do autor.

A tabela 7, apresenta os a contagem e duração dos pulsos hidrológicos. Estes parâmetros são importantes por representarem os sinais que as bacias hidrográficas apresentam sobre o regime hidrológico. Notou-se que os pulsos baixos apesar de terem aumentado, tiveram uma duração menor. Já a duração de pulsos altos, tiveram um aumento no coeficiente de variação de 56%.

Tabela 7– Resultados dos IAH – Frequência e duração dos pulsos altos e baixos.

	Frequência e duração de pulso - altos e baixos							
	Vazão Média (m³s)				Coeficiente de Variação			
	Pré-impacto	Pós-impacto	Desvio Magnitude	%	Pré-impacto	Pós-impacto	Desvio C.V	%
Contagem de pulsos baixos	2	3	1	36	0.57	0.46	-0.11	-20
Duração de pulsos baixos	47	27	-20	-42	0.63	0.39	-0.24	-38
Contagem de pulsos altos	1	2	1	71	0.57	0.52	-0.05	-8
Duração de pulsos altos	68	51	-17	-25	0.60	0.94	0.34	56
Média de variação do grupo %				43				31

Fonte: Elaboração do autor.

A tabela 8 apresenta taxas de subida e decidas em termos de vazões médias com queda de 173% nas taxas de decida para o período posterior aos barramentos.

Tabela 8– Resultados dos IAH – Taxa de alteração e vazão.

	Taxa/Frequência das condições de alteração e vazão							
	Vazão Média (m³s)				Coeficiente de Variação			
	Pós-impacto	Desvio Magnitude	%	Pré-impacto	Pós-impacto	Desvio Magnitude	%	
Taxa de subida	398	559	161	40	0.17	0.14	-0.02	-13
Taxa de decida	-297	-470	-173	58	-0.12	-0.21	-0.09	74
Número de reservas	52	112	60	114	0.17	0.28	0.11	64
Média de variação do grupo %				71				50

Fonte: Elaboração do autor.

A tabela 9, apresenta os resultados da magnitude mensal do fluxo de vazão entre médias, máximas e mínimas dos períodos pré-impacto e pós-

impacto. No período pré-impacto os resultados apontaram magnitude máxima de $47.050 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no mês de abril (período chuvoso) e magnitude mínima de $2599 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no mês de setembro relativamente período de seca.

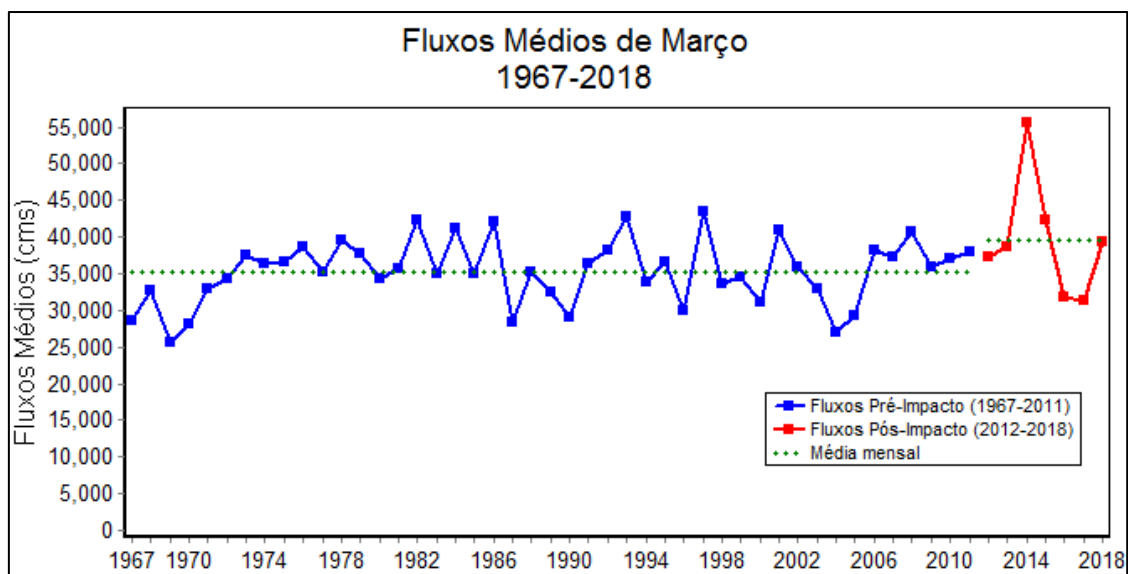
Tabela 9 – Resultados dos valores médios, mínimos e máximos para os IAH.

Grupo 1	Período pré-impacto (1967-2011)			Período pós-impacto (2012-2018)		
	Vazão (m³s¹)			Vazão (m³s¹)		
	Magnitude Mensal					
	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média
Janeiro	30890	13330	24170	31690	17940	25190
Fevereiro	39390	22410	30700	45280	23060	32470
Março	43410	25600	35290	55600	31390	39480
Abril	47050	24050	34270	50360	27050	35830
Maio	39590	13500	26050	37830	21310	28610
Junho	27400	6808	17960	30130	12500	21810
Julho	20920	4665	11220	23240	6776	15750
Agosto	11200	3476	6627	23240	3955	10000
Setembro	12460	2599	5045	23240	3480	7647
Outubro	15440	3245	6063	23240	3878	8012
Novembro	18470	5068	9858	23240	6021	11050
Dezembro	22870	8927	15930	23240	8514	16050
Duração de pulsos baixos	121	6	46.68	45.33	16.67	26.88
Duração de pulsos altos	143	3.33	67.62	145	9	50.9
Contagem de pulsos altos	4	0	1.422	5	1	2.429
Grupo 5	Taxa/Frequência das condições de alteração e vazão					
	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média
Taxa de subida	595.8	224.5	397.9	682.2	433.1	559
Taxa de decida	-198.8	-375.6	-297.3	-350	-641.3	-470
Número de reservas	84	32	52.33	133	43	111.9

Fonte: Elaboração do autor.

Para os resultados de pós-impacto apresentam-se valores de magnitude máxima de $55.600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (figura 16) no mês de março, sendo essa a vazão máxima entre os dois períodos, já a vazão mínima deste período foi $3.480 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Figura 16 - Fluxos Médios de vazão do Mês de Março.



Fonte: Elaboração do autor.

O software IAH permitiu aplicar a Taxa de Aproximação da Variabilidade Natural (TAV) descrita em Richter et al. (1997). A análise de TAV gera uma série de alterações hidrológicas, fatores que quantificam o grau de alteração dos 33 parâmetros de fluxo IAH.

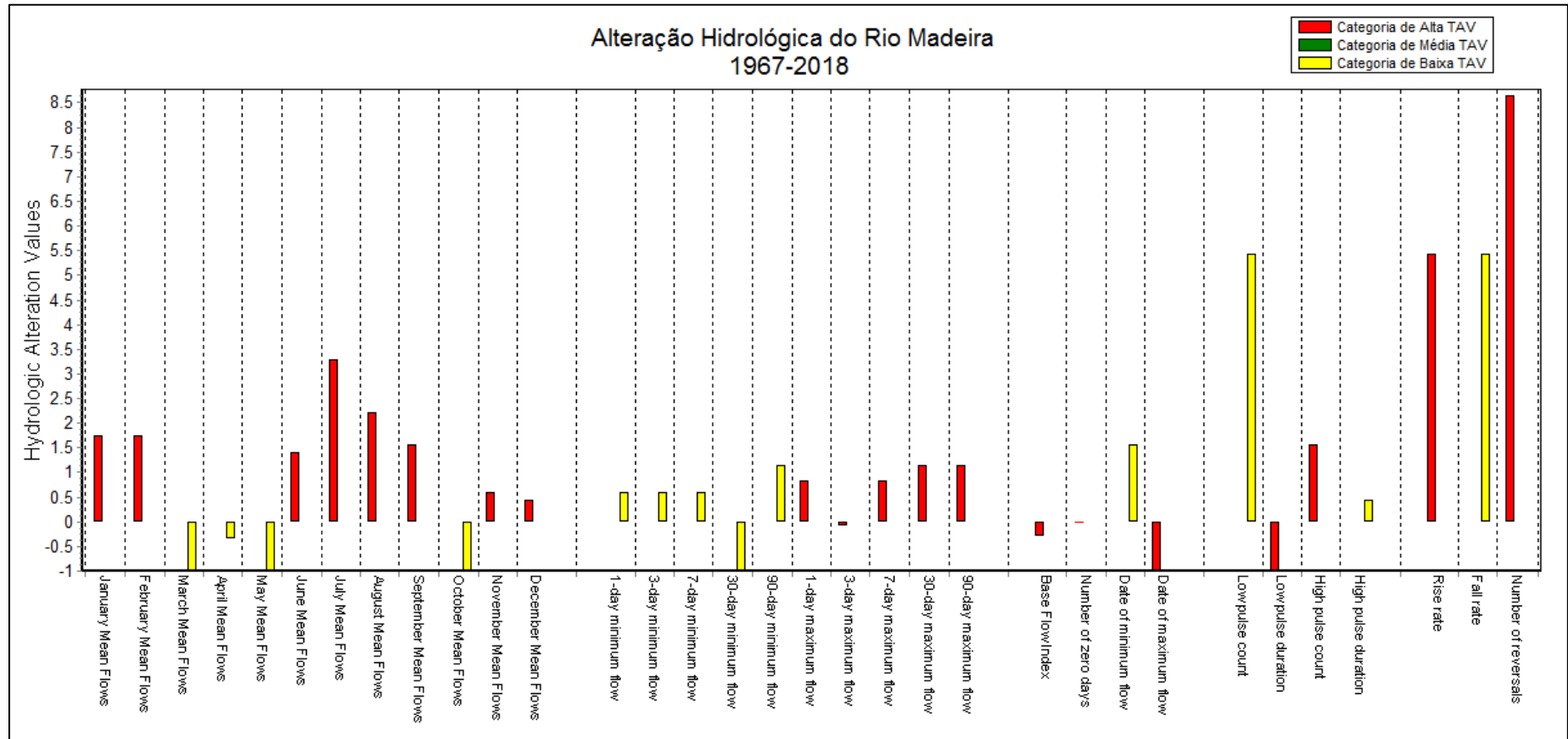
Em resumo, a tabela 10 apresenta os resultados da alteração hidrológica calculados a partir da TAV pelo software de acordo com as categorias. A figura 17 apresenta o gráfico ilustrativo de todos os parâmetros e TAV.

Tabela 10– Resultados da Avaliação de Alteração Hidrológica

Magnitude	Categoria Média de TAV			Categoria Alta de TAV			Categoria Baixa de TAV		
	Esperado	Observado	Alter.	Esperado	Observado	Alter.	Esperado	Observado	Alter.
Janeiro	4.667	2	-0.5714	1.089	3	1.755	1.244	2	0.6071
Fevereiro	4.822	2	-0.5853	1.089	3	1.755	1.089	2	0.8367
Março	4.667	5	0.07143	1.089	2	0.8367	1.244	0	-1
Abril	4.2	5	0.1905	1.244	1	-0.1964	1.556	1	-0.3571
Maio	4.822	5	0.03687	1.244	2	0.6071	0.9333	0	-1
Junho	4.667	3	-0.3571	1.244	3	1.411	1.089	1	-0.08163
Julho	5.133	2	-0.6104	0.9333	4	3.286	0.9333	1	0.07143
Agosto	5.289	3	-0.4328	0.9333	3	2.214	0.7778	1	0.2857
Setembro	5.911	5	-0.1541	0.7778	2	1.571	0.3111	0	-1
Outubro	5.911	6	0.01504	0.6222	1	0.6071	0.4667	0	-1
Novembro	4.511	4	-0.1133	1.244	2	0.6071	1.244	1	-0.1964
Dezembro	4.2	3	-0.2857	1.4	2	0.4286	1.4	2	0.4286

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 17 – Taxa de Aproximação da Variabilidade Natural –TAV.

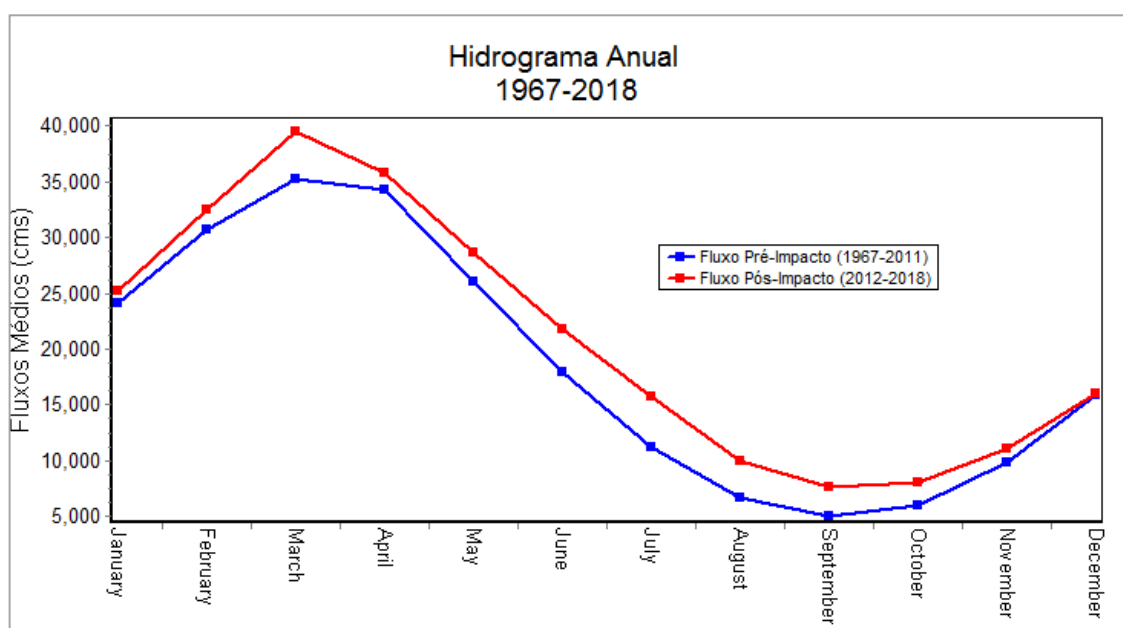


Fonte: Elaboração do autor.

O hidrograma da série histórica foi gerado no software IHA 7.1 e está apresentado na figura 18, observa-se que foi analisado o comportamento do fluxo mensal dos meses em dois períodos pré e pós barramento. Nota-se que o período chuvoso entre os meses de outubro a abril e o período seco entre os meses de maio a setembro são bem definidos. O mês de março apresenta o pico de cheia no período pós-barramento, esse pico pode ser explicado devido ao aumento das temperaturas assim como o mês de setembro representa o fim do período de estiagem.

Conforme já apresentado, após o período pós impacto, tiveram um aumento nas médias de vazões e o gráfico representa exatamente a condições de anos úmidos após as construções das usinas.

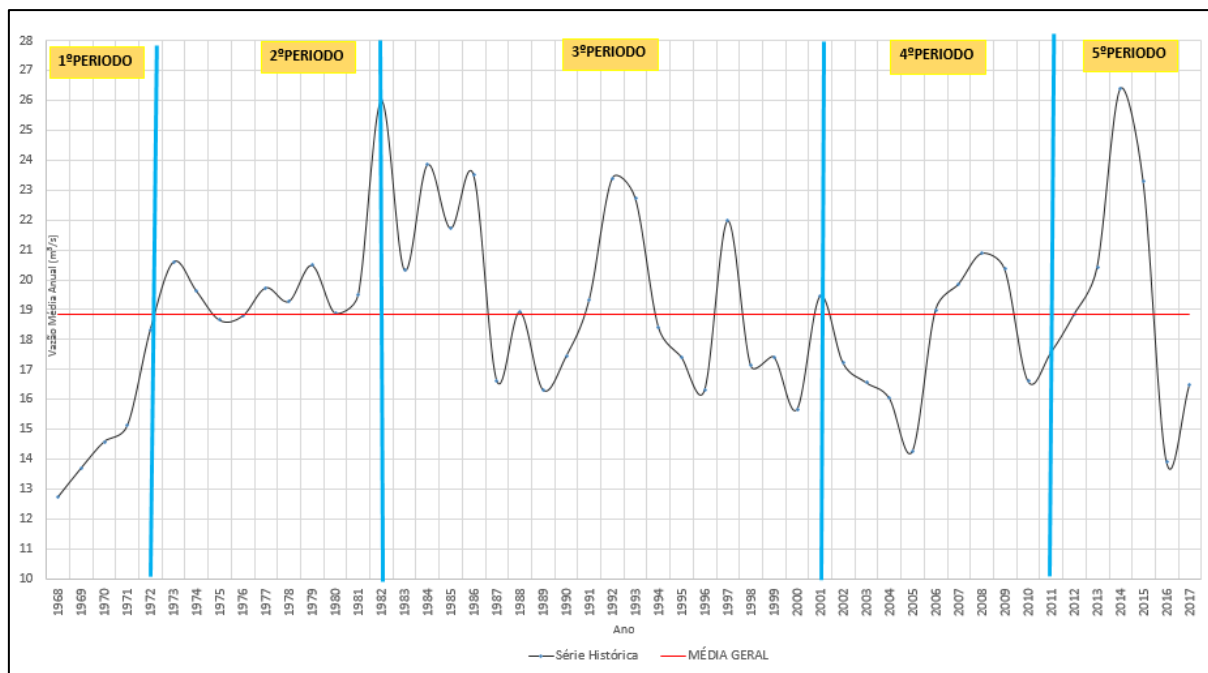
Figura 18 - Hidrograma anual pré e pós impacto.



Fonte: Elaboração do autor.

Diante da figura 15, que apresentou o gráfico das médias anuais para toda a série, foram identificados 5 períodos hidrológicos distintos. O período 1 entre os anos de 1968 a 1972. O período 2 está contido entre os anos de 1973 a 1982. O período 3 foi determinado entre os anos de 1983 a 2001. O período 4 foi delimitado entre os anos de 2002 a 2011. O período 5 ficou após estabelecido entre 2012 até 2017. A figura 19 apresenta as divisões dos períodos escolhidos para análises.

Figura 19 – Períodos hidrológicos distintos.



Fonte: Elaboração do autor.

A tabela 11 apresenta os valores estatísticos para os diferentes períodos hidrológicos identificados na série.

Tabela 11 – Valores característicos para os períodos hidrológicos identificados.

Períodos (H)	Anos	Média (m³s-1)	Desvio Padrão (m³s-1)	Coef. De Variação %
1	1968 a 1972	14587	1902	13.04%
2	1973 a 1982	20151	2044	10.15%
3	1983 a 2001	19366	2670	13.79%
4	2002 a 2011	17833	2017	11.31%
5	2012 a 2017	19890	4130	20.76%

Fonte: Elaboração do autor.

O primeiro período hidrológico (H1) apresentou o valor de desvio padrão abaixo dos demais com valor de 1.902,22 m³s-1. Já o quinto período (H5) apresentou valores mais altos para o desvio padrão. A menor média de vazão foi observada no primeiro período, onde nitidamente houve longos períodos secos.

Ainda na figura 19, observa-se uma grande variabilidade interanual, com grandes quedas nas vazões, relacionadas as grandes secas que afetaram a Amazônia nos anos de 1964-68, 1980, 1983, 1991 e 1998, provocando aumento das

queimadas e graves impactos à população, consequências do fenômeno climático El Niño.

No segundo período hidrológico (H2) é perceptível uma mudança no fluxo de vazão do regime hidrológico. Esta alteração pode ser associada a mudanças nos campos de circulação atmosférica e oceânica no Oceano Pacífico. Esta mudança aparentemente está ligada a variação das temperaturas do Pacífico, fenômeno climático conhecido por Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).

De 1950 a 1976, a ODP encontrava-se na fase negativa, diminuição das temperaturas do Oceano Pacífico, associa-se aos períodos de seca do primeiro Período Hidrológico (H1). Nas décadas de 1980/90, a oscilação tornou-se novamente positiva, propiciando a ocorrência dos El Niños mais fortes do século, em 1983, 1997 e 1998.

O terceiro período hidrológico (H3) apresenta indícios de vazão alto em relação ao primeiro e segundo período, com presença de períodos (anos) de seca 1986-1990. Em muitas regiões da Amazônia, as chuvas desse período foram insuficientes para repor a umidade extraída do solo durante a estação seca. Devido principalmente à baixa precipitação e à secura do ar as queimadas principalmente agrícolas tiveram forte proporção (LUCEAN *et al.*, 2011). Nos anos de 1991 a 1993 apresentou um fluxo relevante de vazão, ou seja, períodos de eventos extremos de precipitação. No episódio de 1997/1998, no mês de maio de 1997 choveu excessivamente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste da Amazônia, época em que normalmente inicia-se o período seco. O inverno seguinte caracterizou-se por anomalias quentes e seca severa na região norte do país. O El Niño de 1997/98 apresentou praticamente a mesma intensidade de 1983, sendo que a sua formação foi a mais rápida de todos os episódios dos períodos anteriores (MARENGO, 2007).

No quarto período hidrológico (H4), a partir dos anos 2000, novamente a ODP passou a ser negativa e a influência do La Niña foi maior do que do EL Niño. Especificamente em setembro de 2005, os fluxos de vazão tiveram forte interferência climática e antrópica. Durante esse período houve um aumento de 300% nas queimadas, em relação ao mesmo período de 2004. Os impactos do aumento das queimadas foram desastrosos para as comunidades afetadas, e também para o clima do planeta, pois a proliferação dos incêndios intensificou as emissões de carbono. Estudos do IPAM mostram que, num quadro de aquecimento global e secas mais

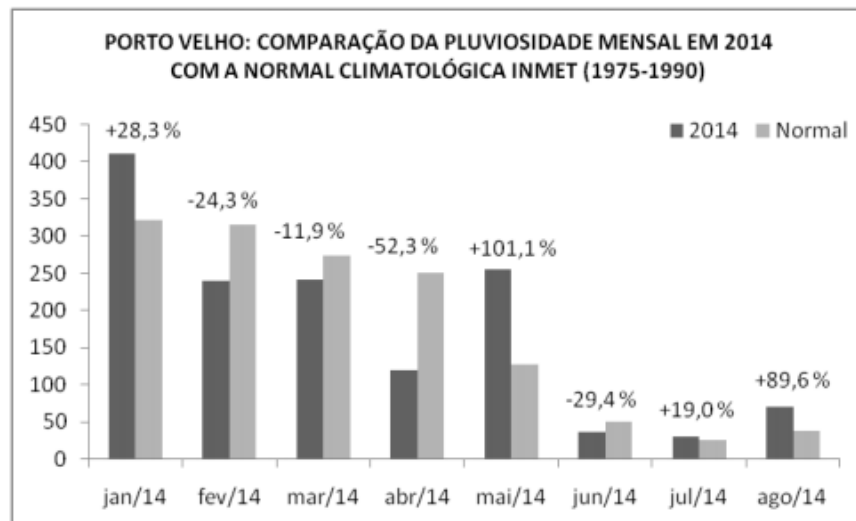
frequentes, as florestas da região amazônica perdem muita umidade, tornam-se muito mais vulneráveis às queimadas, a mortalidade de árvores aumenta significativamente e há um aumento nas emissões de carbono para a atmosfera (Nepstad et al. 2004).

O quinto período hidrológico (H5) está associado a operação das barragens de Jirau e Santo Antônio. Observa-se uma elevação gradual nos fluxos de vazão entre os anos de 2013 e 2014, evento extremo de pluviosidade que caracterizou o comportamento do regime hidrológico deste período.

Segundo dados das Normais Climatológicas do (INMET, na cidade de Porto Velho, o total pluviométrico anual é de 2255,4 mm, sendo os meses de dezembro (319,1 mm), janeiro (320,9 mm) e fevereiro (316 mm) os mais chuvosos e os meses de junho (49,6 mm), julho (24,2 mm) e agosto (36,4 mm) os mais secos do ano. Já temperatura média anual é de 25,6°C, o mês mais quente é setembro (26,2°C) e o menos quente é julho (24,6°C).

No ano de 2014, apesar dos índices de enchentes e inundações do Rio Madeira, o volume de chuva ficou próximo à normalidade na cidade de Porto Velho. De acordo com dados do INMET (figura 18) que apresenta o volume de chuva mensal entre janeiro e agosto de 2014. Observa-se, por um lado, choveu acima do habitual em janeiro (+28,3 %), por outro, choveu menos em fevereiro (-24,3 %), março (-11,9%) e abril (-52,3 %). Em maio, contudo, a chuva voltou a exceder o volume climatológico em 101,1 %.

Figura 20 -Comparação da pluviosidade mensal em 2014 com a Normal Climatológica INMET 1975-1990.



Fonte: Franca; INMET (2015).

As figuras de 21 a 25 apresentam os hidrogramas com as médias das vazões mensais para cada período hidrológico identificado. Nota-se em todos os períodos o mês de março tendo o pico da cheia. Para o período de estiagem, o H1 apresenta o mês de julho com o menor valor médio de vazão, e os demais períodos o mês de setembro.

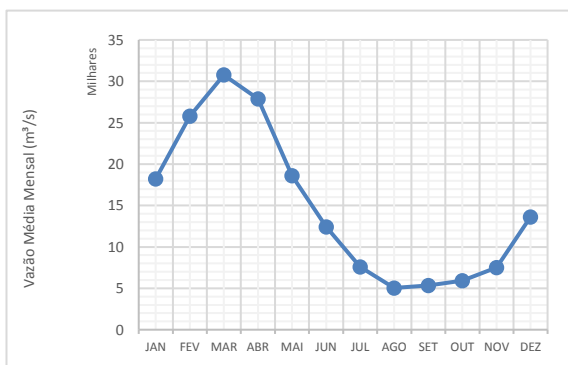


Figura 21 – H1 – 1968 a 1972.

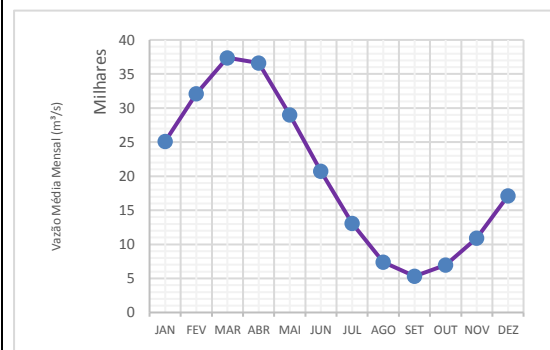


Figura 22 – H2 - 1973 a 1982.

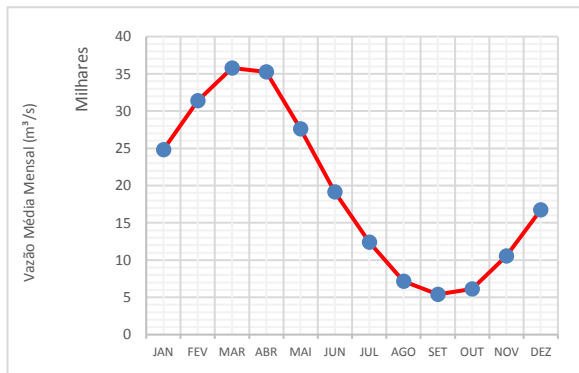


Figura 23 – H3 – 1983 a 2001.

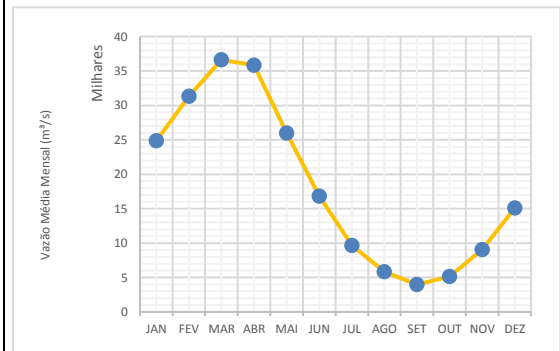


Figura 24 – H4 – 2002 a 2011.

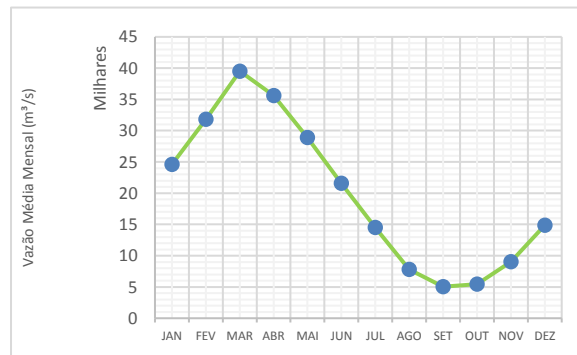
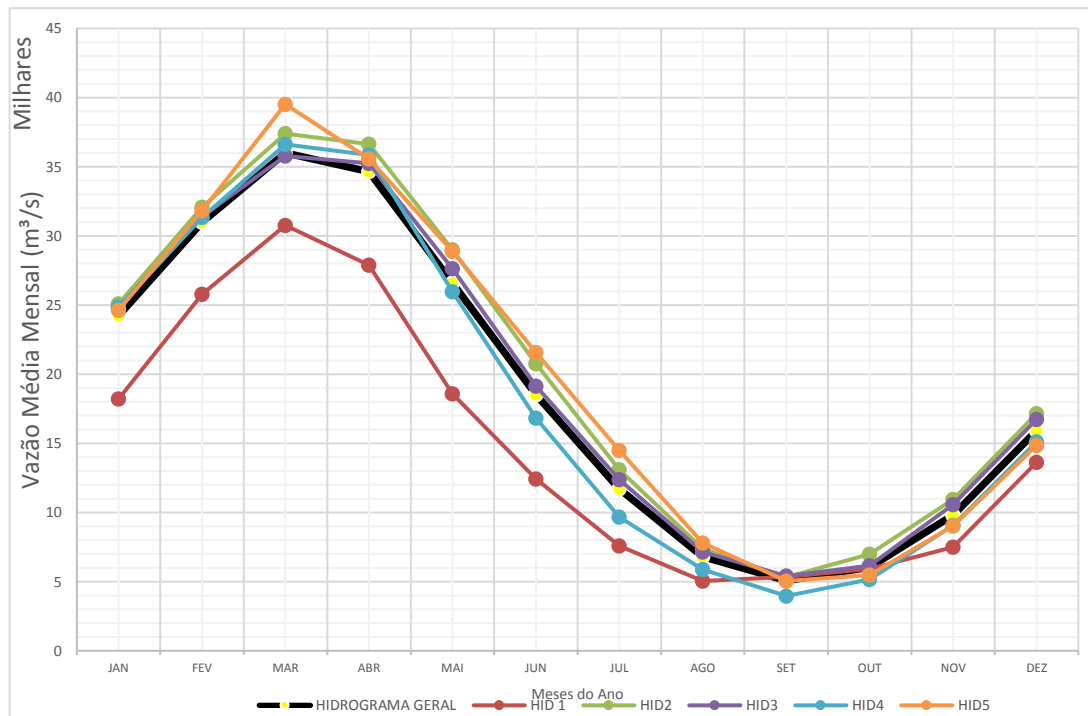


Figura 25 – H5 – 2012 a 2017.

Fonte: Elaboração do autor.

No gráfico onde todos os hidrograma se concentram em um mesmo ambiente (figura 24), pode-se constatar as diferenças entre eles e algumas sobreposições. A cor laranja apresenta o hidrograma do período após a construção dos barramentos. Este período é coincidente com a cheia histórica de 2014, conforme apresenta no gráfico o maior valor de pico de cheia em março. Já o primeiro período apresentou valores menores de vazões para boa parcela do hidrograma.

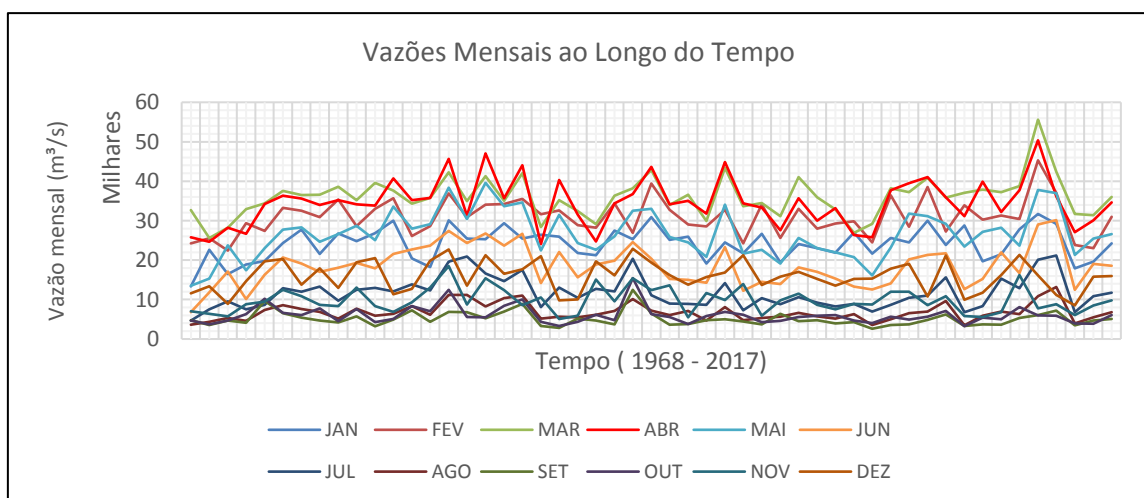
Figura 26 – Comparação de Hidrogramas.



Fonte: Elaboração do autor.

O gráfico da figura 27 apresenta a variação da vazão a cada mês, ao longo do tempo. Nota-se que os meses de agosto, setembro e outubro são os mais secos. Já os meses de março e abril aparecem como os mais úmidos em toda praticamente toda série histórica.

Figura 27 – Variação da Vazão ao Longo do tempo por mês.



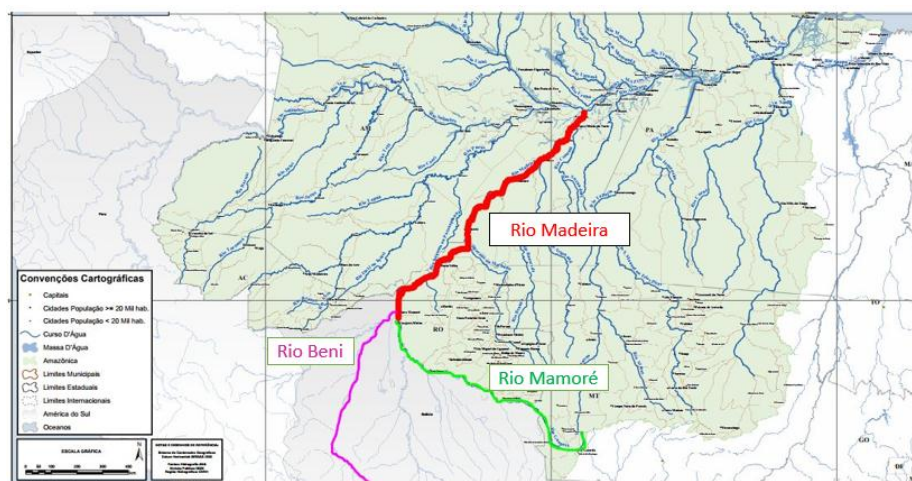
Fonte: Elaboração do autor.

6.2 SEDIMENTOLOGIA FLUVIAL

Sendo o principal afluente do rio Amazonas pela margem direita, o rio Madeira é também o mais habitado e explorado comercialmente da região, engloba uma área de 1.420.000 km² e cobre cerca de 20% da bacia amazônica, abrangendo territórios da Bolívia, Peru e Brasil, é formado pela confluência dos rios Mamoré e Beni, ambos com nascentes nas Cordilheiras dos Andes, conforme figura 2 (DINIT, 2016; SAE, 2013). Seu curso total tem extensão de 3.315 km e está dividido em 3 porções: alto, trecho das cachoeiras e baixo, tendo como ponto exutório o Rio Amazonas. A dominialidade do rio Madeira é federal, ou seja, suas águas são interestaduais, pois nasce no estado de Rondônia e deságua no Amazonas.

Na bacia hidrográfica do Rio Madeira existem afluentes significativos apenas na margem direita (figura 28), fato que define a assimetria de sua bacia em território rondoniense, os principais afluentes pela margem direita são os rios Ribeirão, Castanho, Mutum-Paraná, Jaci-Paraná, São Francisco, Caracol, Candeias, Jamari e Ji-Paraná, além dos igarapés das Araras, Mururé e Cirilo e na margem esquerda destaca-se apenas o Rio Abunã (BERNARDI, 2009).

Figura 28 – Rio Mamoré e Beni na formação do rio Madeira.



Fonte: Modificado de ANA (2012).

O rio Madeira está entre os maiores rios do mundo e recebe este nome em decorrência dos períodos de chuvas e cheias, inunda as florestas adjacentes e carrega troncos da planície fluvial; porém seu comportamento no período de seca é bem distinto, formando praias (figura 29 e 30), variando profundidade e formando corredeiras periódicas (SAE, 2012).

Figura 29 – Cheia no Rio Madeira.	Figura 30 – Formação de praias
 18/03/2017 11:22 AM	
Fonte: Elaboração do autor.	Fonte: Elaboração do autor.

As bacias hidrográficas existentes no estado de Rondônia possuem um comportamento muito variável quanto ao transporte de sedimentos, condicionados por ações dos processos erosivos. Além da concentração de sedimentos em suspensão e ao transporte de material de fundo, o rio Madeira tem destaque especial, pois possui a drenagem de maior transporte de sedimentos no estado de Rondônia, é também um dos rios que mais carregam material sólido em todo o mundo (ADAMY, 2010). Os rios formadores do Madeira, Beni e Madre de Dios (figura 31), possuem comportamentos semelhantes de quedas de margens e transporte de troncos.

Figura 31 - Processo de erosão das margens do Rio Madre de Dios na cheia de 2019.



Fonte: Elaboração do autor.

O transporte de sedimentos acentuado pode ser relacionado a composição da bacia sedimentar, constituída por rochas de fácil desagregação. Os sedimentos servem como abrigos de nutrientes, que são transportados pela calha do rio e fertilizam as terras por onde escoam.

Além da atividade erosiva natural da bacia, a ação de garimpos, conforme registro apresentado na figura 32, podem influenciar na quantidade de material em suspensão do Madeira. A movimentação de sólidos pode ter consequências para a navegabilidade do rio no período de estiagem na porção que é navegável. A atividade garimpeira causa mais danos ambientais com a liberação de mercúrio na água, elemento químico utilizado para agregar as partículas de ouro. Com essa atividade o leito do rio se modifica tanto com a ação ambiental, quanto ação antrópica.

A quantidade de sedimentos dispersos nas águas do Madeira cria a aparência barrenta, com cor amarronzada. Por esse motivo, o rio pode ser denominado como rio de água branca, ou seja, contém grande quantidade de sedimentos em suspensão.

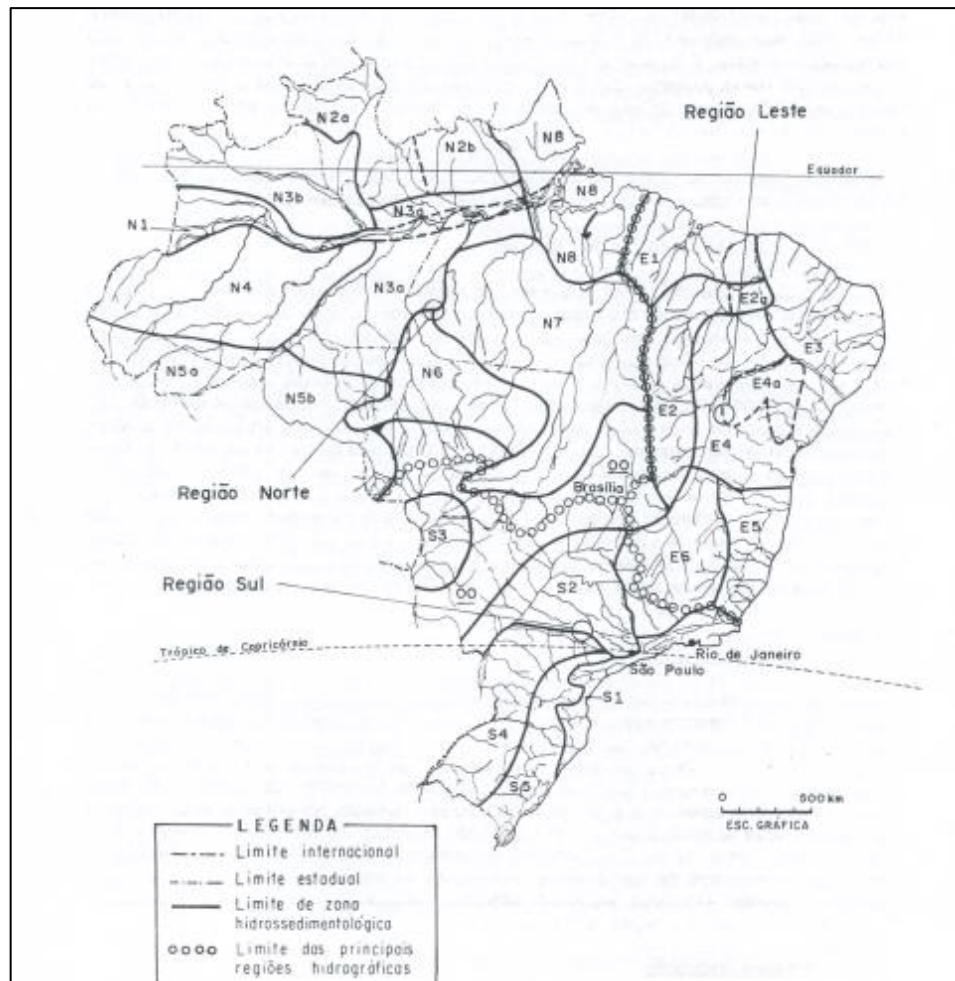
Figura 32 - Atividade de Garimpo com Dragas



Fonte: Elaboração do autor.

Um estudo feito pela Eletrobrás em 1991, determinou um mapa com o zoneamento hidrossedimentológico do Brasil. Denominado *Diagnóstico Sedimentológico dos Principais Rios Brasileiros*, o mapa divide o país em zonas hidrossedimentológicas a partir da interpretação de dados, conforme figura 33. Neste estudo é possível verificar para a região a bacia do rio Madeira variações de concentração médias entre 25 a 400 mg/l, com uma média de 170 mg/l. A taxa de erosão máxima foi aferida em 1800 t/km²/ano, sendo a maior taxa encontrada em território brasileiro (ELETROBRAS, 1992).

Figura 33 – Zoneamento Hidrossedimentológico do Brasil.

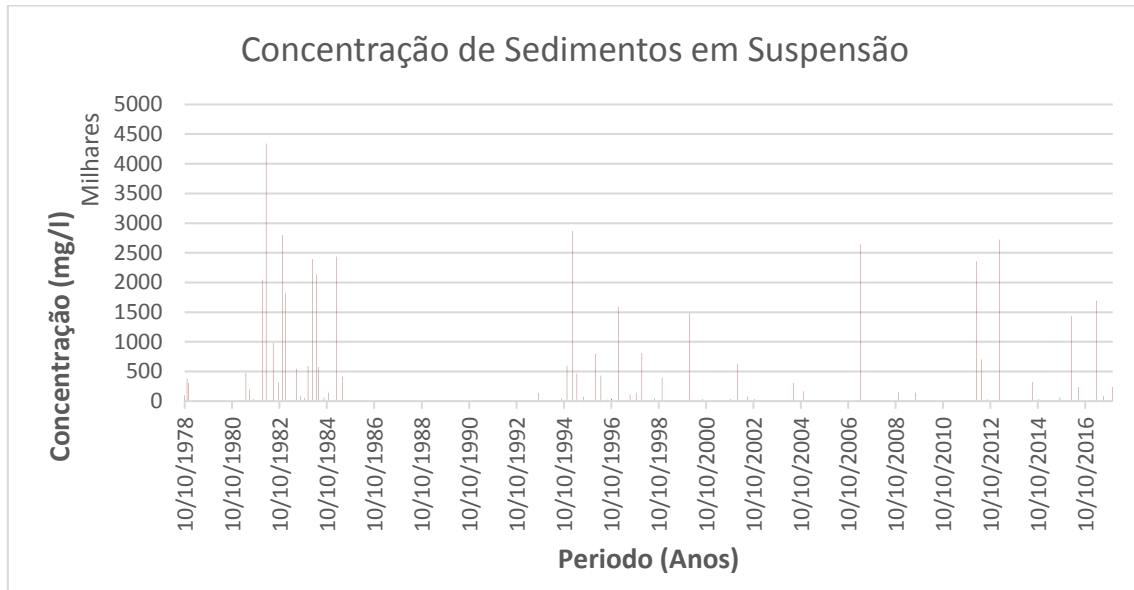


Fonte: Eletrobrás (1992).

6.2.1 Concentração de Sedimentos

O gráfico da figura 34 apresenta o histórico de dados de concentração de material em suspensão, disponíveis para o posto em estudo. Apenas 74 valores de concentração de sedimento foram encontrados no site Hidroweb, muito pouco perto da grande quantidade de dados de vazão. Nota-se que o período entre 1985 a 1993, ou seja, 8 anos, não foram encontrados dados disponíveis de concentração de sedimentos. Observa-se ainda períodos que apresentam falhas de dados.

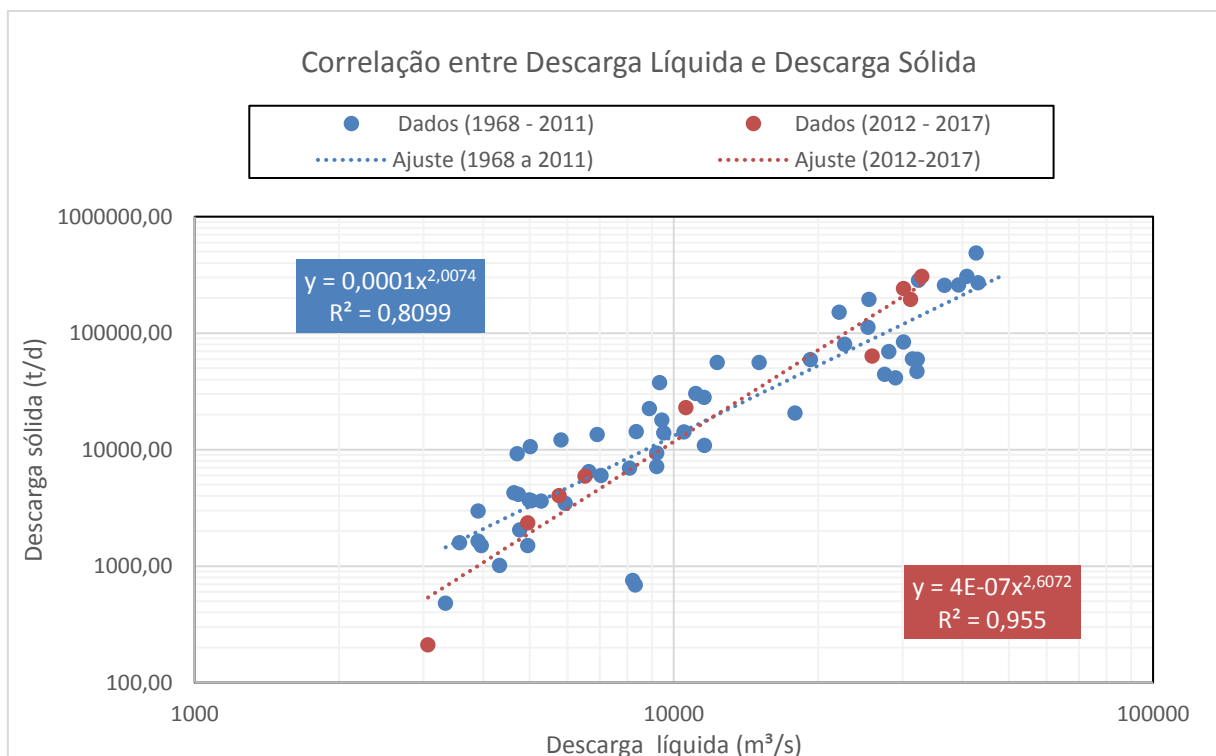
Figura 34 - Série de dados de concentração de material em suspensão no rio Madeira.



Fonte: Elaboração do autor.

Os dados de concentração foram tabulados e por meio da equação 1, foram calculadas as descargas sólidas em suspensão. A figura 35, correlaciona os dados de descarga líquida com a descarga sólida. A correlação indicou um coeficiente r^2 de 64, o que pode ser visto com uma correlação média entre as descargas líquidas e sólidas em suspensão.

Figura 35 – Descarga sólida pela descarga líquida.



Fonte: Elaboração do autor.

6.3 INFLUÊNCIA DOS BARRAMENTOS NO RIO MADEIRA

No rio Madeira, duas grandes obras hidráulicas foram concluídas recentemente. As usinas hidrelétricas de Santo Antônio (3568 MW) e Jirau (3750 MW) foram erguidas e entraram em operação em março de 2012 e setembro de 2013 respectivamente. Uma terceira usina está sendo estudada no rio Madeira, próximo à cidade de Nova Mamoré-RO, em comunhão com o país fronteiriço, Bolívia. Se concluída, o empreendimento hidrelétrico será o terceiro do rio Madeira e ficará a montante das demais usinas.

No caso das usinas hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio, a outorga fornecida aos empreendimentos foi dada em conjunto, uma vez que os reservatórios são em cascata. Os dados que foram apresentados à ANEEL e ANA para a solicitação de outorga, no ano de 2006, estão elencados na tabela a seguir.

Tabela 12 – Dados hidrológicos das Usinas Santo Antonio e Jirau.

Características dos Aproveitamentos Jirau e Santo Antônio		
Características	Jirau	Santo Antônio
Bacia Hidrográfica do rio Madeira (km ²)	1.420.000	
Potência instalada (MW)	3.300	3.150
Área inundada do Reservatório (km ²)	258,00	271,3
Vazão Natural Q95% (m ³ s ⁻¹)	4.789	4.869
Vazão Média Natural QMLT (m ³ s ⁻¹)	17.687	17.983
Vazão máxima Tr=10.000 anos (m ³ s ⁻¹)	82.600	84.000
Vazão Mínima Média Mensal (m ³ s ⁻¹)	3.591	3.651
Vazão Máxima Média Mensal (m ³ s ⁻¹)	46.710	47.492

Fonte: ANA (2009).

Segundo Carvalho (2008), a água a jusante de barramentos transporta menos sedimentos que o curso natural a montante, pois uma parte foi deposita no reservatório. Com o aumento da energia de fluxo, amplia o poder de erosão das margens do canal e assoreamento do leito do rio, conforme pode-se perceber nas figuras 36 e 37. Além dos sedimentos, ficam retidos nas barragens parcelas de nutrientes, afetando aspectos da fauna e da flora a jusante dos barramentos.

Contudo, a bacia do rio madeira é considerada uma bacia em processo de formação localizada em um terreno suscetível as alterações morfológicas. Portanto, não é tarefa simples caracterizar as mudanças na geomorfologia e conformação do leito que são naturais e que foram causadas pelas barragens.

Figura 36 - Processo de erosão das margens do Rio Madeira.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 37 – Jusante da UHE Jirau com acúmulo de sedimentos (assoreamento).



Fonte: Elaboração do autor.

Para o empreendimento em si, os impactos são a diminuição da vida útil, devido ao assoreamento do reservatório. Algumas técnicas de engenharia podem ser empregadas para solucionar o problema da sedimentação, como comportas de fundo, dragagem, controle de sedimento na bacia entre outras (CARVALHO, 2008).

Apesar de existirem técnicas de engenharia para contornar ou controlar os impactos causados pela sedimentação, a eficiente gestão dos recursos hídricos bem

como a regulação podem evitar que estes impactos significativos ocorram, por meio de análise de estudos de caso com dados consistentes.

Conforme apresentado por Moran (2018), os impactos causados pelas obras hidráulicas de grande porte, por vezes não levam em consideração (como deveriam) os custos na manutenção e recuperação ambiental e social. No caso das usinas do Madeira, pode-se adicionar a estes custos, os gastos com o desassoreamento do reservatório (dragagem). Os técnicos dos órgãos responsáveis pelas aprovações dos estudos de impactos ambientais devem estar preparados para avaliar os cenários apresentados pelas empresas detentoras dos direitos da exploração hidroenergética.

Conforme apresentado por Castro *et al.* (2018), os sedimentos em suspensão e de fundo podem ficar retidos no reservatório. Dados obtidos entre os anos de 2015 a 2018, ou seja, após o início da operação plena dos reservatórios evidenciou o que se espera de uma barragem em relação aos sedimentos, a contenção parcial dos sólidos suspensos e de leito. O estudo apresentou valores de descarga sólida e concentração de sedimentos em postos hidrossedimentométricos antes da região de remanso do reservatório e a jusante do barramento da UHE Jirau. Os valores são apresentados abaixo na tabela 13.

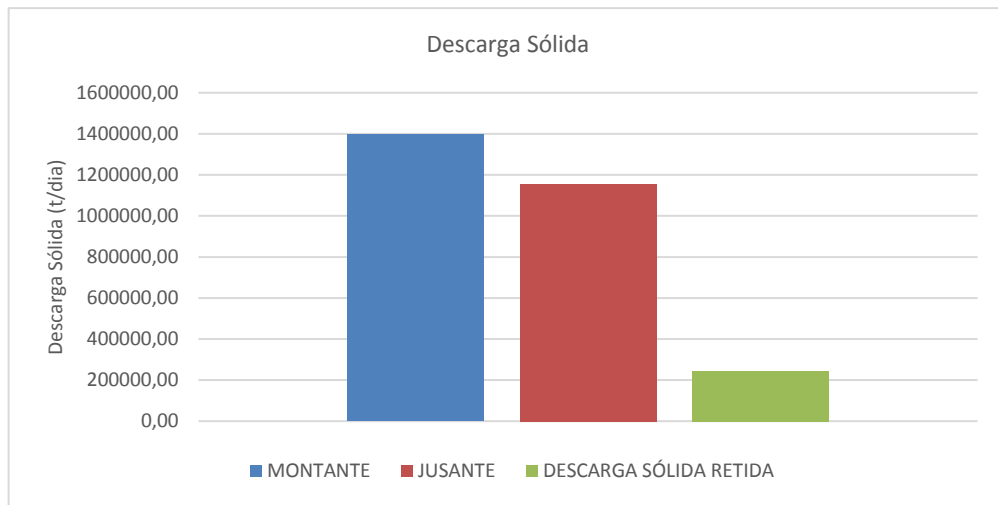
Tabela 13 – Descarga líquida, sólida e concentração.

Parâmetro	Descarga Líquida (m ³ s ⁻¹)		Concentração (mg L ⁻¹)		Descarga Sólida Suspensão Medida (tdia ⁻¹)	
	JUSANTE RIO BENI	PORTO R4	JUSANTE RIO BENI	PORTO R4	JUSANTE RIO BENI	PORTO R4
MÍNIMO	3.688	3.521	92,28	22,34	30.849,18	7.528,91
MÁXIMO	31.502	36.776	2.402	2.384	6.537.734,38	7.575.113,99
MÉDIO	15.072	16.951	767,65	500,76	1.398.712,45	1.154.480,52

Fonte: Castro *et al.* (2018).

Tomando-se valores médios das diferenças entre descarga sólida de montante e descarga sólida de jusante tem-se 244232 t.dia⁻¹. Portanto, verifica-se uma retenção de aproximadamente 17.5% da carga sólida em suspensão no reservatório da UHE Jirau. O gráfico da figura 38 ilustra a quantidade de descarga sólida retida relacionado ao material em suspensão.

Figura 38– Comparação da Descarga Sólida.



Fonte: Elaboração do autor.

7 CONCLUSÃO

O uso de dados consistentes eleva a confiabilidade das análises hidrológicas e torna a gestão dos recursos hídricos mais eficientes. Este trabalho apresentou boa série de dados de vazão líquida antes e após os reservatórios das usinas no rio Madeira. Contudo, notou-se períodos de falhas no banco de dados sedimentológicos disponíveis, o que pode ser explicado pelos elevados custos e complexidade de obtenção em campo para grandes rios.

De qualquer forma, o uso do software estatístico IHA 7.1, propiciou identificar as diferenças do regime hidrológico com eficácia, pré e pós a construção das usinas hidrelétricas. O estabelecimento do ano de 2012 como data limite para elaborar as análises, mostrou-se coerente e eficaz. Embora o período pós impacto, apresentar elevações de 21% em média nas vazões, os resultados podem ter sido tendenciados pela própria condição natural do clima na bacia, que apresentou mais anos úmidos acima da média após a construção das barragens. A elevação das médias de vazão após as obras hidráulicas, não se configura como alteração hidrológica causada pelas barragens e sim pelo conjunto de eventos climatológicos da área de drenagem. Ressalta-se que não era esperado reflexos significativos de vazões líquidas, pois os empreendimentos são operados a fio d'água.

Em relação aos indicadores de alteração hidrológica, observou-se que ocorreu de maneira geral uma média alteração no regime hidrológico, os valores estatísticos ficaram bem próximos de valores negativos em relação a TAV, ou seja, significa que ocorreu uma mudança em alguns específicos períodos e em outros não que no meu entendimento as alterações estão correlacionadas as mudanças climáticas e não pela operação dos barramentos.

Richter *et al.* (1997) sugere que os gestores da água devem esforçar-se para manter a distribuição dos valores anuais dos parâmetros IAH tão próximos do impacto pré-impacto distribuições possíveis.

O conjunto dos resultados possibilita afirmar que o aumento da vazão média interanual, estão relacionadas a fenômenos climáticos, especificamente, alteração do regime pluviométrico, processos de desmatamento e transformação da cobertura vegetal. Nesse sentido, é importante relacionar a variabilidade hidrológica, com variabilidade climática em escala interanual e interdecenal, como exemplo, Oscilação

Decadal do Pacífico (ODP), fenômeno muito semelhante aos eventos do El Niño e La Niña (ENSO), pois se trata da variação das temperaturas do Oceano Pacífico.

De maneira geral, foi possível analisar de forma mais eficiente parâmetros hidrológicos do que sedimentológicos, devido ao fato de se obter poucos dados de concentração. Entretanto, mediante as observações de campo e experiências do autor, notou-se modificações na calha e margens do rio Madeira, tanto a jusante quanto a montante.

Os impactos hidrossedimentológico foram analisados, por meio de estudos recentes, onde autores apresentaram índices médios de retenção de sedimentos pelos barramentos. Contudo, com a operação a fio d'água dos barramentos, espera-se que os fluxos hidrológicos e de sedimentos não sejam afetados de maneira considerável abrupta.

Recomenda-se nos próximos trabalhos utilizar valores de descarga sólidas coletados pelos empreendimentos no âmbito do atendimento a Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº03/2010 e no atendimento aos programas ambientais das licenças de operação (IBAMA). Estudos batimétricos levando em consideração as características dos sedimentos podem ser elaboradas com vistas a realizar a previsão de vida útil dos empreendimentos.

Neste sentido, recomenda-se adotar três linhas de pesquisas para trabalhos futuros: a continuidade no uso do software IHA, com vistas a confirmar os primeiros resultados deste trabalho; avaliação da qualidade dos resultados do IHA de acordo com a qualidade (consistência) dos dados de entrada; e análise de vida útil dos empreendimentos levantando em consideração os dados de descarga sólida antes e depois das barragens.

REFERÊNCIAS

ADAMY, A. (org.) **Serviço geológico do Brasil**: geodiversidade do estado de Rondônia. Porto Velho: CPRM, 2010. 337 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Banco de informações de geração**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>. Acesso em: 01 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS - ANTAQ. **Hidrovias Brasileiras indicadores do Transporte de Cargas**. Brasília, DF, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/> Acesso em: 03 fev. 2019.

BERNARDI, J. V. E.; LACERDA, L. D.; DÓREA J. G.; LANDIM, P. M. B.; GOMES, J. P.; ALMEIDA, O. R.; MANZATTO, A. G.; BASTOS, W. R. Aplicação da análise das componentes principais na ordenação dos parâmetros físico-químicos no alto Rio Madeira e afluentes, Amazônia Ocidental. **Geochimica Brasiliensis**, Belo Horizonte, v. 23, n. 1, p. 79-90, 2009.

BRASIL. **Lei 9433 de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 30 nov. 2017.

BRASIL. **Resolução Conjunta Agência Nacional de Águas e Agência Nacional de Energia Elétrica, nº 03 de 10 de agosto de 2010**. Brasília, DF, 2017. Acessado em: 10 jun. 2017. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/ResolucaoConjunta_n_003-2010.pdf.

BRASIL. **Plano estratégico de recursos hídricos dos afluentes da margem direita do rio Amazonas**: resumo executivo. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas-, ANA, 2012. 144 p.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília, DF: ANEEL. 2000. 154 p.

CASTRO, N. P.; RONIX, A.; CARVALHO, N. O.; CRUZ, A.; ROCHA, P. C.; NETO, P. S. G.; SOUTO, C. S. Análise da operação de postos da rede hidrossedimentométrica no Rio Madeira no Período de 2015 a 2018. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS E I PARTÍCULAS DAS AMÉRICAS, 13., 2018, Vitória. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2018.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 9, n. 26, p. 16-32, 2008.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES NATURAIS - CEMADEN. **Previsão de Vazão para a Bacia do Rio Madeira**. [S. l.], 2018. Disponível em <https://www.cemaden.gov.br/13042018-previsao-de-vazao-para-bacia-do-rio-madeira/> Acessado em 16 set. 2018.

CINTRA, J. P. O Mapa das Cortes: perspectivas cartográficas. **Anais do Museu Paulista**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 63-77, 2009.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 9, n. 26, p. 16-32, 2008.

ADAMY, A. Dinamica fluvial Rio Madeira. In: COSTA SILVA, R. G.(org.) Porto Velho: cultura, natureza e território. Porto Velho: Temática Editora; Edufro, 2016. 266 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. **Brasil e Bolívia firmam acordo para estudo de UHE binacional**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/brasil-e-bolivia-firmam-acordo-para-estudo-de-uhe-binacional. Acesso em: 14 out. 2018.

CUNHA, S. B. **Geomorfologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 392 p.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - CDBD. **Apresentação de barragens**. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20das%20Barragens>. Acesso em: 21 out. 2018.

CUNHA, S. B. **Impactos das obras de engenharia sobre o ambiente biofísico da bacia do Rio São João (Rio de Janeiro – Brasil)**. Rio de Janeiro: Ed: Instituto de Geociências, UFRJ, 1995. 378 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Hidrovia do madeira**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/hidrovias/hidrovias-interiores/hidrovia-do-madeira>. Acesso em: 07 jul. 2017.

ELETROBRAS. **Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 100 p.

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O Desmatamento na Amazônia e a Importância das áreas Protegidas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FIUZA, F.; OLIVEIRA, R. P.; FERREIRA, M. T. Seleção de parâmetros hidrológicos para avaliação da alteração do regime de escoamento em Portugal continental. **Revista da Associação Portuguesa de Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 35, n. 2, p. 5-18, 2014.

FRANCA, R. R. A cheia histórica do Rio Madeira no ano de 2014: riscos e impactos à saúde em Porto Velho (RO). **Hygeia**, Uberlândia, v. 11, n. 21, p. 62-79, 2015.

FREIRE, C. C.; OMENA, S. P. **Princípios de hidrologia ambiental**. São Paulo: EESC/USP, 2005. Curso de Aperfeiçoamento em Gestão de Recursos Hídricos.

FONSECA, R. M. F. Impactos ambientais associados a barragens e a albufeiras. estratégia de re-aproveitamento dos sedimentos depositados. In: UNIVERSIDADE DE ÉVORA. Centro de Geofísica de Évora. **Dams: Impacts and Hazards**. Évora, 2002.

FRANCA, R. R. **Climatologia das Chuvas em Rondônia**: período de 1981-2011. Belo Horizonte: UFMG, 2015. Disponível em <http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/viewFile/650/503>. Acesso em: 15 jan. 2018.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo: [s. n.], 1988. 291 p.

GUERRA, A. J. T. Início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. I.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 1999. p. 17-50

GUYOT, J. L.; CALLÈDE, J.; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N.; GUIMARÃES, V.; KOSUTH, P.; MOLINIER, M.; OLIVEIRA, E.; SEYLER, S.; SEYLER, P. Caractéristiques hydrologiques du bassin amazonien. In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM HYDROLOGICAL AND GEOCHEMICAL PROCESSES IN LARGE SCALE RIVER BASINS, 1999, Manaus. **Anais [...]** Manaus: ANEEL, 1999. p. 82.

HAYAKAWA, E. H.; ROSSETTI, D. F. Caracterização da rede de drenagem da bacia do médio e baixo Rio Madeira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 4, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco de Dados Cidades**. Rio de Janeiro, 2017a. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=110020>. Acesso em 07 jul. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mapas temáticos**. Rio de Janeiro, 2017b. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/tematicos.html>. Acesso em 07 jul. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.
Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2000 – 2010 – 2012 – 2014. Rio de Janeiro, 2017c.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA – IPAM. **Panorama sobre o desmatamento da Amazônia em 2016.** Manaus: Instituto de Pesquisas Ambiental da Amazônia, 2016.

KELLER, F. **The Amazon and Madeira Rivers.** Philadelphia: J. B. Lippincott and Co, 1875.

LUCEAN, D. B; FILHO, M. G; SERVAIN, J. Avaliação do impacto de eventos climáticos extremos nos oceanos Pacífico e Atlântico sobre a estação chuvosa no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 297-312, 2011.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NEPSTAD, D.; MOREIRA, A.; ALENCAR, A. **A Floresta em chamas:** origens, impactos e prevenção de fogo na Amazônia. PPG7. Brasília, DF, 1999. 172 p.

NEPSTAD, D.; LEFREVE, P.; SILVA, U. L.; TOMASELLA, J.; SCHLESINGER, P.; SOLÓRZANO, L.; MOUTINHO, P.; RAY, D.; BRNITO, J. G. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p. 704-717, 2004.

MACHADO, P. A. L. **Crise hídrica:** alternativas e soluções. São Paulo: Procuradoria Regional da República, 2015.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; AMBRIZZI, T.; SALATI, E. **Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade:** subprojeto: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade, 2007.

MARQUES, F. B. R.; STRASSER, M. A.; CARVALHO, N. O. Avaliação da sazonalidade da descarga sólida e da granulometria no Rio Madeira. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, Vitória, 23. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2018.

MEGGERS, B. J. Archaeological Evidence for the Impact of Mega-Niño Events on Amazonia During the Past Two Millennia. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 28, p. 321-38, 1994.

MOTA, M. F. Q. **A participação da sociedade civil organizada nos casos de transposição de bacias: experiências em Brasil e Espanha.** 2018. 286 f. Tese de Doutorado Universidad de Salamanca. Disponível em: https://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/132945/1/DDPG_FonsecaQueir%C3%B33zMotaM_Participaci%C3%B3nSociedad.pdf. Acesso em: 16 set. 2018.

MORAN, E. F.; LOPEZ, M. C.; MOORE, N.; MULLER, N.; HYNDMAN, D. W. **Sustainable hydropower in the 21st century**. Michigan: Department of Geography, Environment and Spatial Sciences, Michigan State University, 2018.

PCE ENGENHARIA. **Estudo Sinérgico do Assoreamento dos Reservatórios de Jirau e Santo Antônio**. [S. l.: s. n.], 2009. Relatório Técnico.

PEREIRA, L. M.; ESCADA M. I. S. M.; RENNÓ, C. D. Análise da evolução do desmatamento em áreas de pequenas, médias e grandes propriedades na região centro-norte de Rondônia, entre 1985 e 2000. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais** [...] Florianópolis: [s. n.], 2007.

POFF, H. L.; ALLAN, D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. R. E.; STROMBERG, J. C. The Natural Flow Regime: A Paradigm for River Conservation and Restoration. **Bioscience**, Washington, v. 47, n.11, p. 769-784, 1997.

REX, W.; FOSTER, V.; LYON, K.; BUCKNALL, J.; LIDEN, R. **Supporting hydropower**: an overview of the World Bank Group's engagement. Washington: World Bank Group, 2014.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; WIGNINGTON, R.; BRAUN, D. P. How Much Water Does a River Need. **Freshwater Biology**, Oxford, v. 37. p. 231-249, 1997.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, V.; POWELL, J.; BRAUN, D. P. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. **Conservation Biology**, Boston, v. 10, n. 4, p. 1996.

ROCHA, P. C.; ANDRADE, L. F. **O Regime Interanual de Rios na Região Oeste de São Paulo**. [S. l.: s. n.], 2012.

ROCHA, P. C. **Dinâmica dos canais no Sistema rio-planície fluvial do alto rio Paraná, nas Proximidades de Porto Rico – PR**. 2002. 171 f. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2002.

ROCHA, P. C.; COMUNELLO, É.; SOUZA FILHO, E. E. Considerações sobre a variabilidade hidrológica do alto rio Paraná. Rio de Janeiro: Geo UERJ, Ed. Esp, 2003. p. 2022-2031.

ROSA, P. S. A bacia do Rio Madeira: processos de reconfiguração das populações (1850 -1912). **Revista Veredas Amazônicas**, Manaus, v. 4, n. 1, 2015.

RONDÔNIA. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. *Site*. Porto Velho, 2007. Disponível em: <http://www.sedam.ro.gov.br/index.php/institucional/noticias/noticias-em-destaque/4459-temperatura-acima-da-media-e-algumas-friagens-caracterizarao-o-verao-amazonico-neste-ano-em-rondonia.html>. Acesso em: 10 jan. 2018.

RONDÔNIA. **Plano Agropecuário e Florestal de Rondônia – PLANAFLORO**. Zoneamento Sócio-econômicoecológico do Estado de Rondônia. Relatório de Climatologia. Rondônia: Planaflo, 2000.

SANTOS, I. D.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**, Curitiba: IDT, 2001.

SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZÔNIA - SIPAM. **Rio Madeira**: a cheia histórica de 2013/2014. Manaus, 2017. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17137>. Acesso em: 11 nov. 2017.

THE NATURE CONSERVANCY. **Indicators of Hydrologic Alteration Version 7 User's Manual**. [S. l.], 2009. Disponível em: <http://www.nature.org/initiatives/freshwater/files/ihav7.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019.

VASCONCELOS, F.; TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Avaliação da qualidade da água**: base tecnológica para gestão ambiental. Belo Horizonte: SMEA, 2009.

ZARFL, C.; LUMSDON, A. E.; BERLEKAMP, J.; TYDECKS, L.; TOCKNER, K. A global boom in hydropower dam construction. **Aquatic Sciences**, Basel, v. 77, p. 161–170, 2014.

ZUFFO, C. E.; FRANCA, R. R. Caracterização climática de Rondônia e variabilidade do clima em Porto Velho. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 9., 2010, Fortaleza. **Anais** [...] Fortaleza: SBCG, 2010.

WHITEHEAD, P.G.; ROBINSON, M. Experimental basin studies: an international and historic perspective of forest impacts. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 145 p. 217-230, 1993.

WILLIAMS, E.; DALL'ANTONIA, A.; DALL'ANTONIA, V.; DE ALMEIDA, J.; SUAREZ, F.; LIEBMANN, B.; MALHADO, A. The Drought of the Century in the Amazon Basin: an analysis of the regional variation of Rainfall in South America in 1926. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 231-238, 2005.