



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DAS ÁGUAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

ANA PAULA DOS ANJOS PINTO

**CARACTERIZAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO EM AFLUENTES DE PEQUENA
ORDEM DE TERRA FIRME DOS RIOS CUPARI E CURUÁ-UNA, AMAZÔNIA**

**SANTARÉM-PARÁ
2021**

ANA PAULA DOS ANJOS PINTO

**CARACTERIZAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO EM AFLUENTES DE PEQUENA
ORDEM DE TERRA FIRME DOS RIOS CUPARI E CURUÁ-UNA, AMAZÔNIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Oeste do Pará para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia
Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dra. Amanda Frederico Mortati.

**SANTARÉM-PARÁ
2021**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA**

P659c Pinto, Ana Paula dos Anjos
Caracterização do nível freático em afluentes de pequena ordem de terra firme dos rios Cupari e Curuá-Una, Amazônia. / Ana Paula dos Anjos Pinto – Santarém, 2021.
45 p. : il.
Inclui bibliografias.

Orientador: Amanda Frederico Mortati

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas, Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental.

1. Precipitação pluvial. 2. Recarga hídrica 3. Sazonalidade. 4. Poço piezométrico. 5. Hidrometeorologia de Igarapés. 5. Áreas úmidas. I. Mortati, Amanda Frederico, *ori-ent.* II. Título.

CDD: 23 ed. 551.57098115

Bibliotecária - Documentalista: Mary Caroline Santos Ribeiro – CRB/2 566

ANA PAULA DOS ANJOS PINTO

**CARACTERIZAÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO EM AFLUENTES DE PEQUENA
ORDEM DE TERRA FIRME DOS RIOS CUPARI E CURUÁ-UNA, AMAZÔNIA**

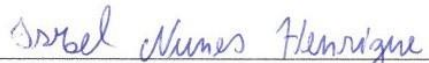
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências e Tecnologia das águas da Universidade Federal do Oeste do Pará, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Conceito: **aprovada** - 9,2

Data de aprovação 17 / 06 / 2021



Orientadora: Dra. Amanda Frederico Mortati – Orientadora



Membro Titular: Dr. Israel Nunes Henrique



Membro Titular: Dra. Leidiane Leão de Oliveira

DEDICATÓRIA

“À minha mãe, Maria dos anjos”.

AGRADECIMENTO

A Deus, por sempre me guiar pelos melhores caminhos.

À minha mãe Maria dos Anjos, ao meu pai Francisco da Conceição Pinto, ao meu irmão Paulo Franklin e aos meus tios, tias e toda a família em geral. Meu eterno agradecimento por todo amor e carinho ao longo de toda minha vida, por todo apoio financeiro durante essa caminhada em busca de conhecimento, por estarem sempre ao meu lado e não medirem esforços para a realização de meus sonhos.

À Universidade Federal do Oeste do Pará, em especial a Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia sanitária e Ambiental, pela oportunidade e apoio concedido.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro via Rede Ripária (441520/2017-0), pela bolsa PIBIC (julho/2018 a julho/2019) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes) pelo financiamento 001.

À minha orientadora Amanda Frederico Mortati pela confiança, paciência, ensinamentos e oportunidade de realização deste trabalho.

Aos professores e técnicos, por todo suporte e ensinamentos.

E a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Considerando a ampla cobertura espacial das zonas ripárias de terra firme da Amazônia e a variação espacial e temporal da disponibilidade hídrica em pequenas bacias hidrográficas, este trabalho teve como objetivo caracterizar o nível do lençol freático de sete áreas de floresta de terra firme amazônica nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una. As unidades amostrais foram distribuídas em áreas próximas a riachos de primeira a terceira ordem ao longo das duas bacias, três na bacia do rio Curuá-Una e quatro na bacia do rio Cupari. Para monitorar o lençol freático e os níveis fluviométricos, para todas as sete unidades amostrais, foi instalado um poço piezométrico adjacente ao canal do riacho e uma régua linimétrica na margem do riacho. Os dados foram lidos mensalmente ao longo de 12 meses (novembro de 2018 a dezembro de 2019). Tanto o nível do lençol freático quanto os níveis fluviométricos apresentaram maior amplitude de variação durante o período chuvoso (dezembro de 2018 a maio de 2019). O lençol freático variou 119,2 cm na estação chuvosa e apenas 96,1 cm na estação seca. Durante o período de seca, foi possível observar em algumas unidades amostrais (CUR 1, CUR 2 e CUR 3) que as médias do nível do lençol freático permaneceram abaixo de 0 cm (acima da superfície do solo), revelando que nesses casos o nível piezométrico não seguiu o ciclo sazonal. Ressalta-se também que as parcelas CUP1 e CUP4, localizadas nos limites leste (BR 163) e sul da Floresta Nacional do Tapajós, apresentaram os maiores valores tanto para nível fluviométrico (220 cm em fevereiro de 2019) quanto para nível piezométrico (-50 cm em maio de 2019). A porção da bacia do rio Cupari localizada na área de estudo historicamente acumula maiores volumes de chuva. A variação espacial dos parâmetros hidrológicos monitorados demonstra a importância da realização de estudos científicos em escala local para a caracterização de pequenas bacias hidrográficas, no que diz respeito aos aportes hídricos superficiais e subterrâneos. Este modelo de monitoramento hidrológico de afluentes pode nortear o desenvolvimento de programas de manejo e proteção de águas subterrâneas rasas na Amazônia.

Palavras-chave: Precipitação pluvial. Recarga hídrica. Sazonalidade. Poço piezométrico. Hidrometeorologia de igarapés. Áreas úmidas.

ABSTRACT

Considering the wide spatial coverage of the Amazonian *terra firme* riparian zones and water availability spatial and temporal variation in small hydrographic basins, this study aimed to characterize the water table level of seven Amazonian *terra firme* forest streams in the Cupari and Curuá-Una river basins. Sampling units were distributed in first to third order streams along the two basins, three in the Curuá-Una river basin and four in the Cupari river basin. To monitor water table and fluviometric levels, for all seven sampling units, a piezometric well was installed adjacent to the stream channel and a limimetric ruler on the stream bank. Data were read monthly over 12 months (November 2018 to December 2019). Both water table and the fluviometric levels showed greater variation range during the rainy season (December 2018 to May 2019). The water table varied 119.2 cm in the rainy season and only 96.1 cm in the dry season. During the dry period, it was possible to observe in some sampling units (CUR 1, CUR 2 and CUR 3) that water table level averages remained below 0 cm (above soil surface), revealing that in these cases the piezometric level did not follow the seasonal cycle. It is also noteworthy that CUP1 and CUP4 plots, located on the eastern (BR 163) and southern limits of the Tapajós National Forest, presented the highest values for both fluviometric level (220 cm in February 2019) and piezometric level (-50 cm in may 2019). The Cupari river basin portion located in the studied area has historically accumulated greater volumes of rainfall. Hydrological parameters spatial variation demonstrates the importance of carrying out scientific studies at local scales for small hydrographic basins characterization, with regard to surface and underground water inputs. This streams hydrological monitoring model could guide the development of management and protection programs for shallow groundwater in the Amazon.

Keywords: Rainfall. Water recharge. Seasonality. Piezometric well. Streams Hydrometeorology. Wetlnads.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos componentes do Ciclo hidrológico.....	15
Figura 2 - Representação da zona saturada e zona de aeração.....	20
Figura 3 - Localização da área de estudo e das unidades de monitoramento hidrológico localizadas em floresta de terra firme, ao longo das bacias dos rios Curuá-Una e Cupari, em sua porção localizada dentro da Flona do Tapajós, região do baixo rio Amazonas, Brasil.....	24
Figura 4 - Fluxograma das análises inferenciais dos dados do nível médio do rio e do nível médio do lençol freático	28
Figura 5 - Fluxograma da construção do mapa de precipitação pluviométrica da área de estudo.....	29
Figura 6 - Variação mensal do nível fluviométrico (rio) e piezométrico (lençol freático) nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una, região do baixo Amazonas, entre novembro de 2018 e janeiro de 2020.....	33
Figura 7 - Variação dos níveis médios do rio (A) e do lençol freático (B) entre os períodos chuvoso (dezembro/2018 a maio/2019) e período seco (junho/2019 a novembro/2019)) nas bacias dos rios Curuá-Una e Cupari, região do baixo Amazonas, entre novembro de 2018 e dezembro de 2019.....	34
Figura 8 - Correlação entre o nível máximo do lençol freático e o nível mínimo da coluna d'água (A) e o nível médio da coluna d'água (B).	35
Figura 9 - Distribuição espacial da precipitação pluvial média nas unidades de monitoramento localizadas em afluentes de floresta de terra firme, ao longo das bacias dos rios Curuá-Una e Cupari. Série histórica de 1977-2006/CPRM.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos registros máximos e mínimos dos níveis do rio e do lençol freático entre as unidades de monitoramento em nascentes hidrográficas localizadas nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una, na região do baixo Amazonas, para o período de novembro de 2018 a janeiro de 2020	31
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO.....	14
2.1	Objetivos Específicos.....	14
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1	Processos Hidrológicos.....	15
3.2	Água Subterrânea.....	19
3.3	Água Superficial.....	21
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1	Área De Estudo	24
4.2	Desenho Amostral	26
4.3	Monitoramento Hidrológico	26
4.4	Análises Estatísticas	27
4.5	Distribuição Espacial da Precipitação Pluviométrica.....	29
5	RESULTADOS	31
6	DISCUSSÃO	36
7	CONCLUSÃO.....	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	APÊNDICE	45

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior bacia hidrográfica tropical do mundo, com cerca de 6.869.000 km² de área terrestre e abrangência de sete países. O rio Amazonas possui três principais afluentes com mais de 3.000 km de comprimento e descarrega mais de 15% do volume anual de água no oceano (PEKÁROVA et al., 2003). Apesar da grande extensão do canal principal do rio Amazonas e seus afluentes, a maior parte da água ainda entra nestes grandes rios em pequenas bacias hidrográficas. Os cursos de primeira e segunda ordem são responsáveis por 84% do comprimento da drenagem na bacia do rio Cuieiras, que compreende uma área de 3.300 km² na Amazônia central, e por 74% na bacia do rio Ji-Paraná na Amazônia ocidental (NEILL et al., 2006; MCCLAIN; ELSENBEER, 2001).

As formações florestais amazônicas localizadas em áreas altas do terreno e acima do efeito do pulso anual de inundação (JUNK et al., 1989) são denominadas florestas de terra firme. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2020), essas formações constituem aproximadamente 200 milhões de hectares da Amazônia brasileira, onde pequenos riachos cobrem cerca de 1 milhão de quilômetros quadrados da bacia amazônica (JUNK et al., 2011). Grande parte dos ecossistemas aquáticos amazônicos é constituída por complexas redes de corpos d'água formadas por pequenos riachos, ligados à terra por fluxos de água superficial e subsuperficial (NEILL et al., 2006), podendo ser denominadas de zonas ripárias (WARD; STANFORD, 1983).

A formação dos lençóis subterrâneos tem origem na infiltração e percolação das águas pluviais e superficiais, através das camadas permeáveis do solo, das falhas nas estratificações, das fendas e de discordâncias de camadas geológicas (TUCCI, 1993). Esse mecanismo ocorre de cima para baixo, onde a água satura inicialmente a superfície e vai alterando posteriormente o perfil de umidade nas camadas mais profundas onde se localizam os lençóis freáticos (TUCCI, 2004), e quando o nível freático atinge algum ponto da superfície, surgem as nascentes perenes o ano todo ou intermitentes. Ressalta-se que em bacias hidrográficas sem proteção florestal as taxas de erosão do solo acontecem de forma mais intensa, o escoamento superficial é potencializado, provocando inundações, e redução na infiltração de água no solo (BISWELL; SCHULTZ, 1958; TUCCI; CLARKE, 1997).

A maior parte do território brasileiro é considerada intensamente sazonal (JUNK; PIEDADE, 2015), visto que uma época chuvosa se alterna com uma época seca durante o ciclo anual e, conseqüentemente, há uma forte oscilação no nível de água dos rios, denominada “pulso de inundação”. Em virtude dessa dinâmica hídrica, as Florestas Úmidas da Amazônia são notadamente resistentes à seca, retirando água do solo a profundidades maiores que 12 m (NEPSTAD et al., 2002), assim como são bastante tolerantes aos picos de inundações, dado que o nível dos grandes rios pode atingir a cota de 29,84 m, como é o caso do rio Negro em Manaus (CPRM, 2021). A grande capacidade de armazenamento de água e resistência contra longos períodos de estiagem fazem dos recursos hídricos subterrâneos um grande aliado na redução dos estresses hídricos que populações têm enfrentado ou ainda enfrentarão (HIRATA et al., 2010), visto que um lençol freático raso pode ser uma fonte direta de absorção pela planta nas extensas áreas úmidas, funcionando como uma zona tampão (POKHREL et al., 2013).

Considerando a vasta abrangência espacial das zonas ripárias de terra firme na Amazônia, e a variação espacial e temporal da disponibilidade de água em pequenas bacias hidrográficas, o monitoramento em escala local das águas superficiais e subterrâneas se faz necessário. Assim, a implantação de unidades amostrais para o monitoramento do nível piezométrico e fluviométrico são fundamentais para a compreensão do balanço hídrico desde as escalas locais até a da bacia hidrográfica, bem como, para o desenvolvimento de programas de manejo e proteção da água subterrânea (RAMOS et al., 2009). Conhecer a interação dessas águas é essencial para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, visto que as águas subterrâneas e superficiais apresentam conexões de modo que o uso de uma tem efeito sobre a outra (MARTELLI, 2012), ainda que essas interações sejam ignoradas nas considerações e políticas de gerenciamento de água devido à dificuldade de acesso a determinadas áreas e à observação desses recursos (WINTER et al., 1998). Desse modo, o presente estudo permitiu conhecer a variação espacial e a dinâmica do nível do lençol freático e do nível fluviométrico de zonas ripárias em floresta de terra firme nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una, na região do baixo rio Amazonas.

2 OBJETIVO

Caracterização do nível do lençol freático e do nível fluviométrico de sete afluentes em floresta de terra firme nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una, região do baixo rio Amazonas.

2.1 Objetivos Específicos

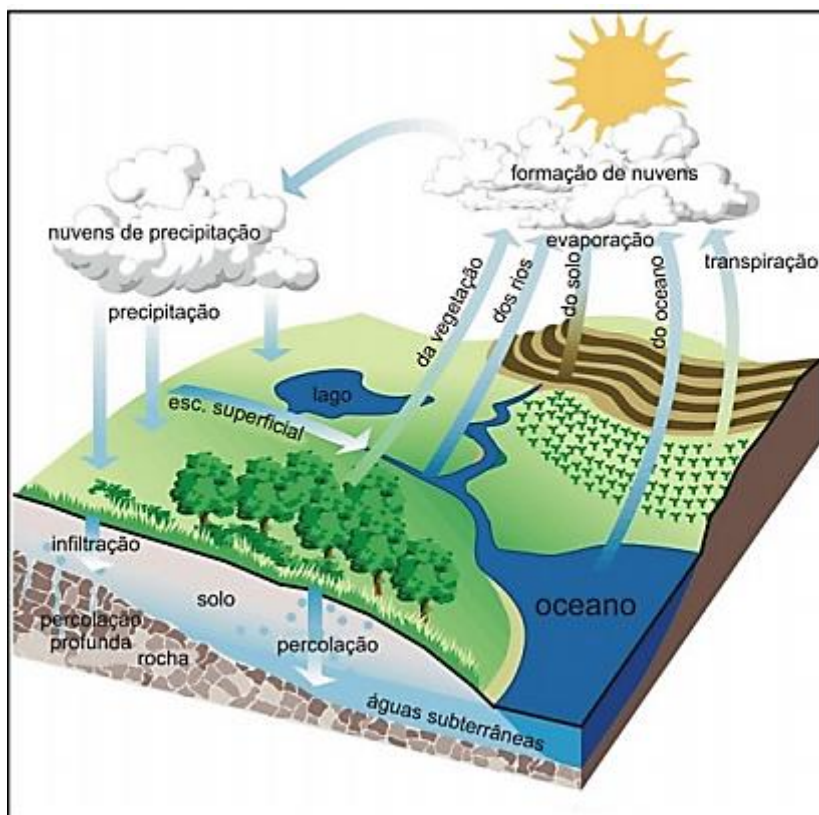
- Instalar instrumentos de monitoramento hidrológico de baixo custo em sete afluentes ao longo das bacias dos rios Cupari e Curuá-Una;
- Caracterizar a dinâmica do lençol freático e do nível fluviométrico ao longo de um ciclo sazonal;
- Identificar a distribuição espacial da precipitação pluvial na área de estudo;
- Relacionar a precipitação pluvial com o lençol freático e o nível fluviométrico.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Processos Hidrológicos

Impulsionado basicamente pela energia proveniente do sol associada à gravidade e à rotação terrestre, o ciclo hidrológico é a movimentação que a água realiza entre a superfície terrestre e a atmosfera. Segundo Tucci (2001), a energia solar promove a manutenção do ciclo, uma vez que tal energia favorece a evaporação da água líquida ou o derretimento da mesma quando em estado sólido (Figura 1). Para descrever os processos desse ciclo é usual definir um ponto de início, como a formação do vapor d'água na atmosfera. O vapor de água existente na atmosfera, transportado pela circulação atmosférica carrega as nuvens a partir das quais se forma a precipitação (GUIMARÃES; SHAHIDIAN; RODRIGUES, 2017).

Figura 1 - Representação dos componentes do Ciclo hidrológico



Fonte: Da Paz (2004).

A evaporação e a evapotranspiração são componentes essenciais do ciclo hidrológico por serem processos que ligam a hidrosfera, a litosfera e a biosfera à

atmosfera e condicionam marcadamente a continuidade do ciclo (GUIMARÃES; SHAHIDIAN; RODRIGUES, 2017). A **evaporação** é o processo físico pelo qual uma substância passa do estado líquido para o estado gasoso, direcionando água da superfície terrestre para a atmosfera. A **evapotranspiração** é o processo combinado de **transpiração** da vegetação que cobre o solo e a **evaporação** da superfície da água (GANGOPADHYAYA et al., 1966; GUIMARÃES; SHAHIDIAN; RODRIGUES, 2017). Os fatores que afetam esses componentes são: Fornecimento de calor, diferença na pressão do vapor, temperatura, armazenamento de calor, vento, mudanças na pressão barométrica, tamanho da superfície evaporante, teor de sal, estado de entorno, impurezas e vegetação, água em movimento e ação das ondas, umidade do solo e remoção da cobertura florestal (GANGOPADHYAYA et al., 1966).

Por ser decorrente principalmente de ações fisiológicas da vegetação, o processo de evapotranspiração florestal pode sofrer bruscas alterações causadas pelas mudanças no microclima ocasionadas pela substituição da floresta por vegetações rasteiras (ALVES; FISCH; VENDRAME, 1999). Experimentos de hidrologia realizados por Trancoso (2006), comparando duas microbacias experimentais de igarapés de primeira ordem, uma em área de floresta e outra em pastagem na Amazônia, mostram que a evapotranspiração na área de pastagem foi $1,1 \text{ mm.dia}^{-1}$ inferior à área de floresta, promovendo conseqüentemente o aumento da vazão e recarga do lençol em $0,98 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $0,25 \text{ mm.dia}^{-1}$, respectivamente. Esses resultados representam um aumento de 17% do escoamento superficial na pastagem.

Ainda em um contexto amazônico, a formação de vapor d'água resultante dos processos de evaporação e evapotranspiração dá origem a cursos de água atmosféricos, conhecidos comumente como "rios voadores". Os rios voadores são transportados pelas correntes de ar rumo ao oeste até encontrar a barreira natural formada pela Cordilheira dos Andes, onde parte da água precipitará novamente e o restante avançará em sentido sul levando a umidade para outras regiões do país (MOSS et al., 2011).

Entende-se por **precipitação** a água resultante do vapor de água da atmosfera que atinge a superfície terrestre em forma de chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geada. Os elementos necessários para sua formação podem ser subdivididos em: umidade atmosférica; mecanismo de resfriamento do ar, presença de núcleos higroscópios ou núcleos de condensação (partículas de poeira flutuando pelo ar) e

mecanismo de crescimento das gotas d'água. Em outras palavras, a umidade presente na atmosfera devido à evapotranspiração passa por um processo de condensação, resultado do esfriamento do ar à temperatura inferior ao ponto de saturação de vapor, ou seja, na razão de 1°C por 100m, e por meio da colisão de gotas pequenas surgem as gotas maiores (coalescência) que se tornam muito grandes para permanecerem em suspensão (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; CARVALHO; MELLO; SILVA, 2007).

As precipitações são ainda classificadas em três classes (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; CARVALHO; MELLO; SILVA, 2007):

- **Precipitações ciclônicas ou frontais:** chuvas resultantes da interação de massas de ar com características distintas (massas de ar quente e massas de ar frio), são marcadas por atingirem grandes áreas com intensidade baixa a moderada em longa duração;
- **Precipitações Orográficas:** correspondem à ascensão de correntes de ar úmido horizontal sobre obstáculos naturais, como montanhas, por exemplo;
- **Precipitações convectivas:** iniciadas pelo aquecimento da superfície causando instabilidade vertical de ar úmido que sobe e condensa provocando precipitações de grande intensidade e curta duração abrangendo áreas relativamente pequenas. Esse tipo de precipitação é típico de regiões tropicais, como a Amazônia, onde a precipitação é a principal fonte de água, correspondendo à média de 2400 mm/ ano (VAL; SANTOS, 2008).

Nem todas as precipitações alcançam a superfície devido à ocorrência de evaporação direta quando em contato com ar quente da atmosfera próxima à superfície. Além disso, em meio natural, as águas que atingem a vegetação sofrem processo de interceptação pelas folhas, galhos e ramos das plantas que se encontram em temperaturas elevadas pelo armazenamento de energia solar (PEREIRA, et al., 1997). No que diz respeito ao balanço hídrico, constatou-se em um estudo realizado em Manaus que os pequenos rios drenam 25% da precipitação, 25% são interceptados pelas folhas da vegetação e 50% são transpirados pelas plantas, voltando à atmosfera. (VAL; SANTOS, 2008).

A **interceptação** da chuva pela cobertura florestal representa uma importante parcela de água que cai sob a forma de chuva, por retornar diretamente e mais

rapidamente vapor d'água para a atmosfera, contribuindo assim diretamente para a massa de vapor de água precipitável (FERREIRA et al., 2005). Em alguns casos o dossel florestal pode reter até 100% das chuvas, impedindo que esta atinja o solo (HEWLETT, 1969). É inegável que alguns fatores como a precipitação, as condições climáticas, a época do ano e, principalmente, o tipo e densidade da vegetação são importantes para o processo de interceptação da chuva pelo dossel (TUCCI, 1993). Ferreira et al. (2005) mostraram que a extração seletiva de madeira, por exemplo, produziu redução significativa de até 83,2% da quantidade de água retida pelo dossel em uma área de Floresta de Terra Firme na Amazônia Central.

A movimentação da água no solo pode ser dividida em movimentação horizontal ou escoamento (superficial ou subterrâneo) e movimentação vertical ou infiltração (ao longo do perfil de profundidade do solo). A infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988) e de acordo com Carvalho, Mello e Silva (2007, p. 32):

A infiltração é o nome dado ao processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo. É um processo de grande importância prática, pois afeta diretamente o escoamento superficial, que é o componente do ciclo hidrológico responsável pelos processos de erosão e inundações. Após a passagem da água pela superfície do solo, ou seja, cessada a infiltração, a camada superior atinge um "alto" teor de umidade, enquanto que as camadas inferiores apresentam-se ainda com "baixos" teores de umidade. Há então, uma tendência de um movimento descendente da água provocando um molhamento das camadas inferiores, dando origem ao fenômeno que recebe o nome de redistribuição.

Ressalta-se que em solos com boa infiltração, os fluxos de água subterrâneos podem alimentar os cursos de água durante extensos períodos de seca (COELHO NETTO, 2007).

Segundo Lencastre e Franco (2003), o volume de água excedente dos processos anteriores escoam da superfície do terreno até à linha de água mais próxima, dando origem ao escoamento superficial. As linhas de água de menor fração associam-se às de fração sucessivamente maior, que alimentam cursos d'água, convergem para um rio principal e este atinge o mar. Esta etapa do processo está subdividida em 3 componentes: escoamento superficial, subsuperficial e escoamento de base (GUIMARÃES; SHAHIDIAN; RODRIGUES, 2017).

O **escoamento superficial** resulta da fração da precipitação que após satisfazer os processos de evaporação e infiltração percorre a superfície do solo até alcançar a rede hidrográfica (GUIMARÃES; SHAHIDIAN; RODRIGUES, 2017). Essa componente do escoamento torna-se mais expressiva durante os períodos em que a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração e por isso acaba ocorrendo o empocamento da água nas depressões existentes na superfície do solo (PRUSKI, 2003). O **escoamento subsuperficial** corresponde à água infiltrada que volta a aparecer à superfície, sem ter atingido a zona de saturação. Esse escoamento resulta da fração da precipitação que se infiltra, mas devido à existência de partículas impermeáveis no perfil do solo escoam a pouca profundidade no terreno. Difere-se do escoamento superficial apenas por chegar aos pequenos cursos d'água após um pequeno atraso de percurso. Por fim, o **escoamento de base** corresponde à água que foi sujeita a processos de infiltração profunda e atingiu a zona de saturação (GUIMARÃES; SHAHIDIAN; RODRIGUES, 2017).

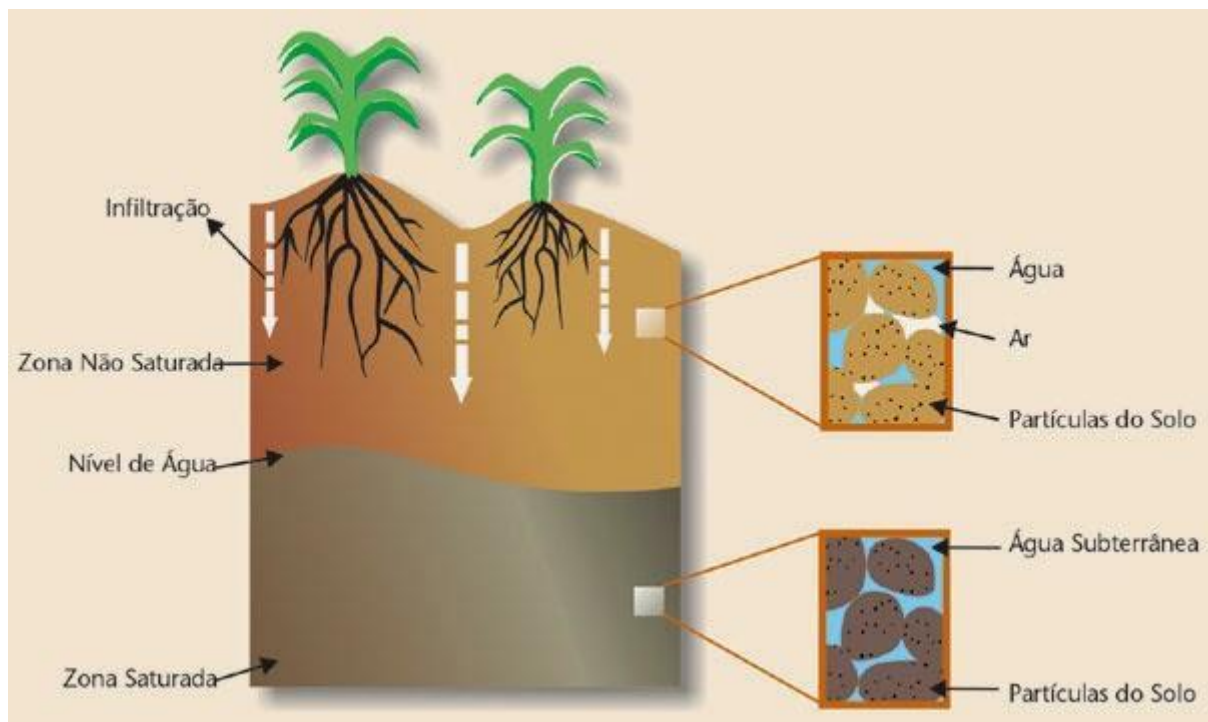
3.2 Água Subterrânea

A formação dos lençóis subterrâneos tem origem na infiltração e percolação das águas pluviais e superficiais através das camadas permeáveis, das falhas nas estratificações, das fendas e de discordâncias de camadas geológicas (TUCCI, 1993). Esse mecanismo ocorre de cima para baixo, onde a água satura inicialmente a superfície e vai alterando posteriormente o perfil de umidade nas camadas mais profundas onde se localizam os lençóis freáticos (TUCCI, 2004). Portanto, é inegável que a capacidade de infiltração da água no solo é uma propriedade essencial e depende fundamentalmente de sua granulometria, distribuição do tamanho de poros, umidade antecedente à chuva, condição superficial do solo e presença de adensamento subsuperficial (SILVA et al., 2007).

Filho (2000) indica a existência de duas grandes camadas do subsolo: zona saturada e zona de aeração ou zona não saturada (Figura 2). A zona saturada é onde a maioria dos poros do solo estão preenchidos com água e a superfície freática é o lugar geométrico no qual todos os pontos da água se encontram submetidos à pressão atmosférica. A zona de aeração é uma zona intermediária entre a zona saturada e a

superfície do solo, onde os poros se encontram parte preenchidos por ar e parte por água. Essa zona pode ser dividida em três zonas: a zona capilar, considerada como a mais profunda, em ligação com a zona saturada se estendendo da superfície freática até o limite de ascensão capilar; a zona intermediária, situada entre o limite de ascensão capilar e do alcance das raízes das plantas; a zona de água no solo, em que as raízes das plantas utilizam essa água para suas funções de transpiração e nutrição.

Figura 2 - Representação da zona saturada e zona de aeração



Fonte: LNEG (2001).

De acordo com Lemes (2001), o sistema radicular da vegetação tem um importante efeito na estabilização do solo. O sistema formado pelo adensamento das raízes retém o solo, inserindo-se em espaços vazios, agregando grânulos, seixos e até blocos maiores aos materiais mais finos, com um efeito importante sobre a resistência ao cisalhamento, impedindo a erosão do solo e infiltrações excessivas.

Lima (2006) chama atenção acerca do efeito da cobertura vegetal na água do solo, evidenciando seu papel no ciclo hidrológico, bem como na manutenção do funcionamento hidrológico das microbacias hidrográficas. Em locais onde o lençol freático é superficial, como na zona ripária, a cobertura florestal provoca o rebaixamento do lençol freático por meio da evapotranspiração. Neste sentido, a remoção súbita da floresta pode resultar na subida do lençol freático.

O abastecimento natural da água subterrânea está diretamente ligado à cobertura superficial do solo. Ao contrário das áreas urbanas impermeabilizadas, as áreas com vegetação natural são eficientes em reduzir o escoamento, visto que o adensamento de raízes evita a erosão, retendo o solo onde se armazena a água, reduzindo o fluxo e contribuindo para infiltração em profundidade e recarga dos freáticos e aquíferos. Além disso, a vegetação diminui as perdas por evaporação superficial, pois retém grande parte da água, evitando sua rápida evaporação ou evapotranspiração (COELHO et al., 2006).

A importância das áreas com cobertura florestal natural para a recarga dos lençóis freáticos tem grande magnitude em regiões urbanizadas, considerando o grau de impermeabilização dessas áreas. Sabe-se que áreas com diferentes coberturas vegetais proporcionam condições diversificadas de infiltração da água. Estima-se, por exemplo, que áreas com mata em estágio sucessional avançado retém quase que a totalidade da água pluvial (COELHO et al., 2006). Além disso, Oliveira et al. (2008) destacam a eficiência do escoamento pelo tronco na reposição de água no solo que devido à sua baixa velocidade provocada pelo atrito com a casca dos vegetais, chega à superfície e se direciona próximo às raízes reduzindo o escoamento superficial. Assim, essa água se infiltra com maior facilidade no solo e favorece o reabastecimento do lençol freático.

3.3 Água Superficial

Segundo Silva (2007), podem ser identificados três mecanismos que contribuem para a vazão de corpos hídricos superficiais: precipitação direta, escoamento superficial e escoamento subsuperficial.

A precipitação direta corresponde a água que cai diretamente sobre o canal do rio. Quando a precipitação é intensa a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio pode ser superior à sua capacidade de drenagem, transbordando a da sua calha normal, resultando na inundação das áreas ribeirinhas. Quando a quantidade de água é inferior às condições de drenagem normais a linha d'água pode permanecer abaixo do leito inferior do rio (TUCCI, 2002).

O escoamento superficial é aquele que ocorre sobre a superfície do solo quando este se encontra saturado ou quando a taxa de precipitação supera a capacidade de infiltração. Já o escoamento subsuperficial ocorre a uma velocidade maior que a velocidade do escoamento subterrâneo e menor que a do escoamento superficial (SILVA, 2007).

Quando se trata de recarga dos rios é evidente a relação de interdependência das águas subterrâneas e superficiais, que ocorre basicamente por meio dos processos de contribuição de um fluxo para o outro. Larkin e Sharp (1992) estabeleceram três configurações com sistemas de fluxos:

- Rio efluente: ocorre a transferência de água subterrânea para os rios, estes têm sua vazão aumentada para jusante, com infiltração principalmente nas regiões úmidas. Exemplo: rios perenes;
- Rio influente: o processo de influência ocasiona a diminuição da vazão do rio à jusante, com infiltração da água para o fluxo subterrâneo. Exemplo: rios efêmeros;
- Rio efluente/influente: os rios contribuem ou recebem água subterrânea em apenas algumas épocas do ano. Exemplo: rios intermitentes.

Silva (2007) destaca que na condição de rio efluente, para que haja contribuição em um canal é necessário que a altura do nível freático nas proximidades do rio esteja maior que a altura da água no canal. Já em condição de rio influente é necessário que a altura do nível freático próximo ao rio esteja menor que a altura de água na sua calha. O autor ressalta ainda que em regiões onde o clima é predominantemente úmido há uma tendência maior à corpos d'água influenciados pela água subterrânea, ou seja, em condição de rio efluente.

Considerando a importância da cobertura vegetal para a continuidade do ciclo hidrológico e manutenção dos cursos d'água, Bosch e Hewlett (1982) avaliaram o resultado 94 estudos experimentais pareados (vegetação nativa vs. diversos tipos de cobertura vegetal não natural) e observaram que a redução da cobertura florestal aumenta a vazão média dos rios, assim como o estabelecimento de cobertura florestal em áreas de vegetação esparsa diminui essa vazão. Contudo, não é possível detectar influência na vazão média quando o desmatamento é menor que 20%. Tendo como exemplo, a remoção de cobertura de coníferas ou eucaliptos causa aumento de cerca de 40 mm na vazão anual, enquanto que a remoção da vegetação rasteira produz aumento de 25 e 10 mm na vazão média, para cada 10% de alteração de cobertura.

Tais experimentos demonstram a importância da vegetação no controle da água via escoamento superficial.

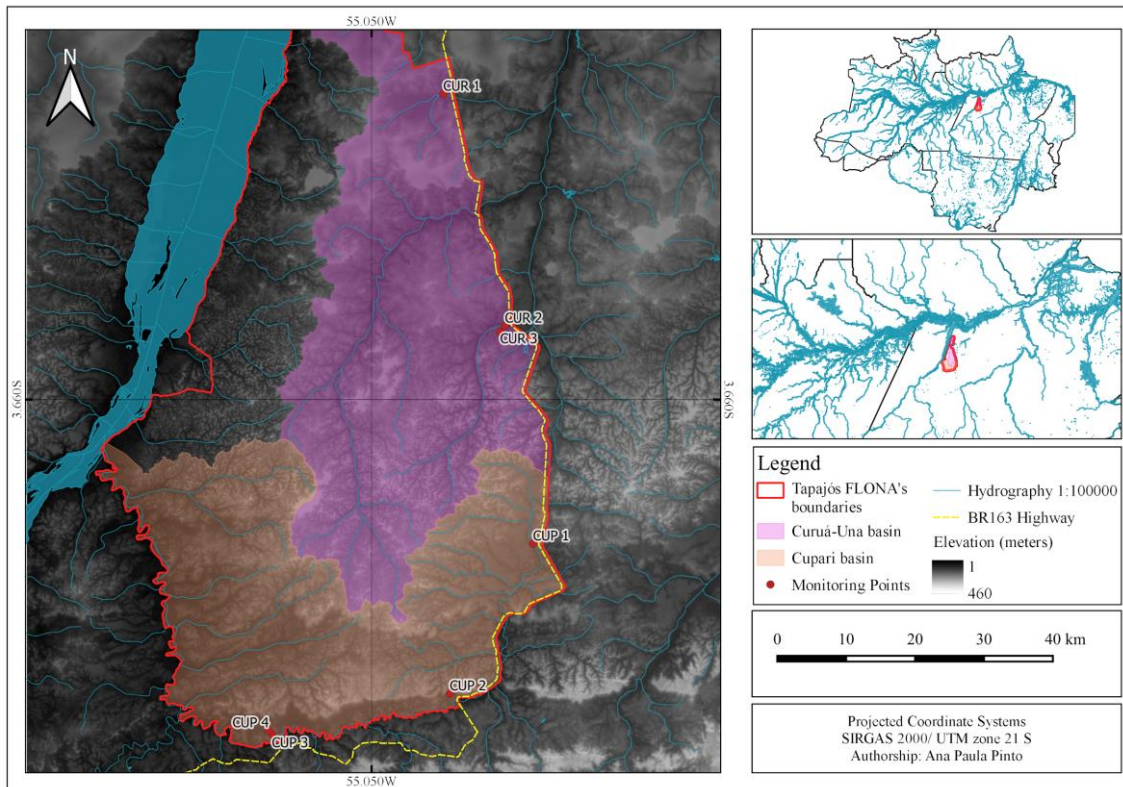
O nível da água ou cota fluviométrica é representado normalmente pela letra **h**, e equivale à altura atingida da água na seção em relação a uma determinada referência, como um valor instantâneo ou a média em um intervalo de tempo estabelecido (MARTINS, 2000). A medição do nível da água é realizada por meio de linímetros, geralmente chamados de réguas linimétricas e linígrafos. Para Santos et al. (2001), uma régua linimétrica corresponde a uma escala graduada, de madeira, de metal ou mesmo pintada sobre uma superfície vertical de concreto. A realização da coleta de dados acerca dos níveis fluviométricos é a mais acessível em termos de custo e treinamento de pessoal, e é capaz de gerar dados para fomentar políticas públicas e avaliação da disponibilidade hídrica.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área De Estudo

O presente estudo foi conduzido em zonas ripárias de florestas de terra firme nas bacias hidrográficas dos rios Curuá-Una e Cupari, em sua porção localizada dentro da Floresta Nacional do Tapajós (FNT). Esta unidade de conservação federal foi criada pelo Decreto nº 73.684 de 19/02/74, abrange uma superfície territorial de 5306,21 km² dominada pela floresta ombrófila amazônica. É delimitada a oeste pela margem direita do rio Tapajós, ao sul pelo rio Cupari, e a leste pela BR-163, e compreende os municípios de Aveiro, Belterra, Placas e Rurópolis, no oeste do Estado do Pará, Brasil (Figura 3). A FNT é de extrema relevância para a conservação da biodiversidade e de serviços ecossistêmicos desta região que sofre grande pressão pelo desmatamento observado no entorno da BR-163.

Figura 3 - Localização da área de estudo e das unidades de monitoramento hidrológico localizadas em floresta de terra firme, ao longo das bacias dos rios Curuá-Una e Cupari, em sua porção localizada dentro da Flona do Tapajós, região do baixo rio Amazonas, Brasil



Fonte: Elaborado pela própria autora.

A bacia do rio Curuá-Una localiza-se no lado leste da FNT e possui uma área aproximada de 17.351 km² (JATI; SILVA, 2017), e em sua porção localizada na UC tem como tributário principal o Rio Moju, cuja foz é no rio Amazonas. A bacia do rio Curuá-Una delimita a porção sul da FNT, possui área de drenagem aproximada de 7216 km² e deságua no rio Tapajós.

O clima da região é classificado como Ami no sistema Köppen, ou seja, tropical úmido com variação térmica anual inferior a 5 °C. No sistema Gaussen, o clima é classificado como Xeroquimênico, apresentando temperaturas mais baixas superiores a 15 °C e um período seco de até 40 dias. Dados climáticos coletados em Belterra, entre 1988 e 2003, registraram temperatura média anual de 25,5 °C, máxima de 30,6 °C e mínima de 21,0 °C. A evapotranspiração média registrada no período foi de 122 mm, com os maiores valores registrados no período de outubro a janeiro. Já a precipitação média anual está em torno de 1820 mm, porém, o regime de chuvas apresenta grande variação durante o ano, com as maiores precipitações ocorrendo nos meses de janeiro a maio (IBAMA, 2004).

De acordo com Damasceno (2001), a Flona do Tapajós encontra-se na região da unidade estratigráfica denominada Formação Barreiras, constituída por arenitos finos e folhelhos cinza calcífero. Essa formação é composta principalmente por sedimentos continentais vermelhos e formados por intercalações de arenitos e argilitos com conglomerados subordinados. Os arenitos são finos e médios, geralmente com estratificação cruzada, tendo cores vermelhas e variegadas, caulíníticas e friáveis. Na porção sul junto ao Rio Cupari ocorre a Formação Nova Olinda, formada por camadas de halita e anidrita, com camadas delgadas de siltitos e arenitos finos. Essa formação ocorre em contato concordante na base e no topo com as formações Itaituba e Andirá, respectivamente (CAPUTO, 1984).

Segundo classificação do Radambrasil (1976), a porção de flanco às margens do Rio Tapajós insere-se na unidade morfoestrutural Planalto Rebaixado da Amazônia (Médio Amazonas), com cotas altimétricas em torno de 100 m, relevos dissecados, colinas com ravinas e vales encaixados. As superfícies de aplainamento são inundadas periodicamente por ocasião das chuvas. A região de planalto compreende a unidade morfoestrutural Planalto Tapajós-Xingu, cuja cota altimétrica varia entre 120 e 170 m. Estão presentes extensas superfícies de formação tabular com rebordas erosivas, e alguns trechos com forte ou fraca declividade.

4.2 Desenho Amostral

Os pontos amostrais foram distribuídos em zonas ripárias de afluentes de até terceira ordem ao longo das duas bacias, totalizando sete unidades amostrais de monitoramento, três na bacia do rio Curuá-Una e quatro na bacia do rio Cupari (Figura 3). Foram selecionados afluentes em área de floresta de terra firme, considerando a máxima independência hidrográfica, uma distância mínima de um quilômetro entre amostras e locais de fácil acesso e com alto estado de conservação da vegetação ripária, adjacente e no entorno do canal fluvial de cada afluente.

As unidades amostrais ficaram restritas à área da UC para garantir a segurança do experimento e para integrar com os dados do monitoramento da biodiversidade presente na mesma através das iniciativas PPBio/Santarém, POPA (Peld Oeste do Pará) e Rede Ripária na FNT.

4.3 Monitoramento Hidrológico

Para o monitoramento do nível do lençol freático e do nível fluviométrico em cada uma das sete unidades amostrais foi instalado um poço piezométrico adjacente ao canal e uma régua linimétrica à margem do canal do curso d'água, respectivamente. Conforme o protocolo PPBio/RAPELD, em cada unidade amostral foi cavado um poço com trado manual até alcançar a água na época mais seca do ano (novembro de 2018), a 2,5 m da margem do canal. Nos poços, foram instalados piezômetros (conforme FREITAS; SCHIETTI, 2015), consistindo estes em um cano de PVC de seis cm de diâmetro e comprimento variável. A porção inferior do piezômetro foi toda perfurada, revestida por uma malha fina de poliéster e selada com CAP para permitir a entrada e saída da água e para evitar entupimento dos orifícios. A porção superior, também selada com CAP, possui apenas uma perfuração para possibilitar a entrada e saída de ar. As régua linimétricas de alumínio graduadas possuem três metros de altura, e foram posicionadas à margem do curso d'água, evitando locais com troncos caídos, ou curvas que pudessem influenciar a medida do

nível do rio, que se refere à profundidade da coluna d'água ou do leito à margem do canal.

Mensalmente, ao longo de 12 meses (novembro de 2018 a janeiro de 2020), foi utilizado um medidor de nível para realizar a leitura de altura do nível piezométrico. Este medidor consiste em um aparelho com três metros de fita métrica fixada a um fio elétrico, uma lâmpada de LED na extremidade superior e uma boia de isopor na extremidade inferior (conforme RIBEIRO; SILVA; OLIVEIRA, 2018). A lâmpada de LED é apagada quando o isopor atinge a lâmina d'água, dessa forma é possível observar a distância entre a extremidade superior do piezômetro e o respectivo lençol freático. O cálculo do nível do lençol freático foi determinado pela diferença da distância da fita até a água, e pela altura do cano até o solo, como mostra a equação 1:

$$N = D - Hs$$

Onde:

N = Nível do lençol freático (cm)

D = Distância do cano até a água (cm)

Hs = Altura do cano até o solo (cm)

O registro mensal da profundidade do poço piezométrico e do nível fluviométrico (régua linimétrica) foi feito em centímetros. Para a análise da sazonalidade, foram utilizados 12 meses de amostragem considerando-se como período chuvoso de dezembro de 2018 a maio de 2019 e período menos chuvoso de junho de 2019 a novembro 2019, com base nas normais climatológicas do INMET (2018). Ressalta-se que devido à dificuldade de acesso ao local, não foi possível realizar a leitura dos dados no mês de abril de 2019.

4.4 Análises Estatísticas

Para cada variável hidrológica mensurada foram calculados por unidade amostral os valores médios, mínimos e máximos a partir das coletas mensais. Para a investigação da colinearidade entre estas variáveis foi utilizado o coeficiente de correlação de Spearman, segundo a equação 2:

$$p = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d^2}{n(n^2 - 1)}$$

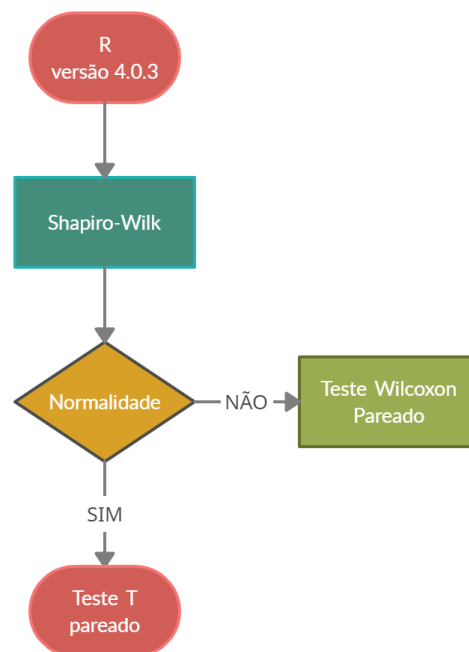
Em que:

- $d = rg(X_i) - rg(Y_i)$ é a diferença entre os dois postos de cada observação;
- n é o número de observações.

O sinal da correlação de Spearman indica a direção da associação entre X (a variável independente) e Y (a variável dependente). Se Y tende a aumentar quando X aumenta, o coeficiente de correlação de Spearman é positivo. Se Y tende a diminuir quando X aumenta, o coeficiente de correlação de Spearman é negativo.

Para iniciar as análises inferenciais, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para testar a normalidade dos dados do nível médio do rio e do nível médio do lençol freático (Figura.

Figura 4 - Fluxograma das análises inferenciais dos dados do nível médio do rio e do nível médio do lençol freático



Fonte: Elaborado pela própria autora.

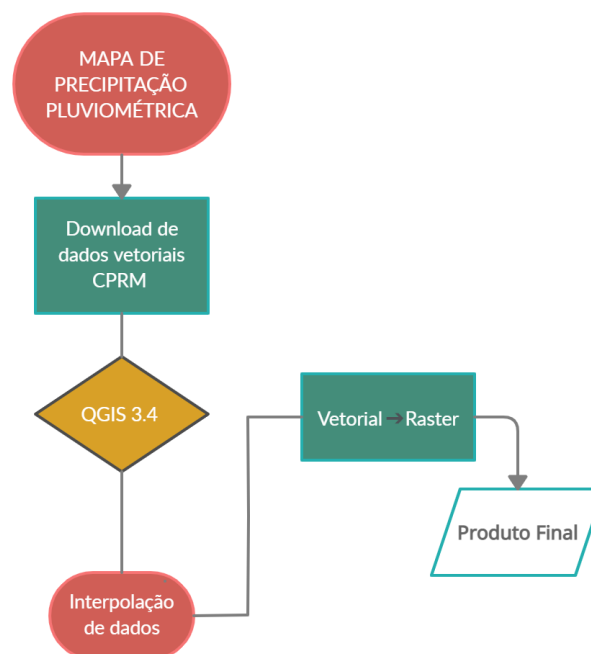
Para testar a relação entre os níveis da água nos afluentes e o período do ciclo sazonal utilizou-se o teste T pareado para variável com distribuição normal (nível do

lençol freático: $p = 0,789$; $W = 0,96$) e teste Wilcoxon pareado para variável de distribuição não normal (nível do rio: $p = 0,003$; $W = 0,78$). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software estatístico R, versão 4.0.3 (2020/10/10). Adotou-se $p \leq 0,05$ como nível de significância.

4.5 Distribuição Espacial da Precipitação Pluviométrica

Para a construção do mapa de distribuição da pluviosidade nas bacias estudadas, foram utilizadas isoietas anuais na escala 1:5.000.000 de 1977 a 2006, disponíveis para download no site do Serviço Geológico do Brasil – CPRM. As séries históricas representam registros coletados, analisados e armazenados em banco de dados desenvolvidas a partir da Rede Hidrometeorológica Nacional – RHN com 2258 estações pluviométricas espalhadas ao total do território nacional, sendo 170 estações no Estado do Pará, denominada SUREG-BE.

Figura 5 - Fluxograma da construção do mapa de precipitação pluviométrica da área de estudo



Fonte: Elaborado pela própria autora.

A construção do mapa foi procedida por meio de uma interpolação realizada de modo discreto entre pontos sucessivos, que converte dados de observações pontuais para campos contínuos, transformando imagens vetoriais em raster (BURROUGH;

MCDONNELL, 1998). O processamento do mapa de precipitação foi realizado com o auxílio do programa de processamento de sistema de informações geográficas (SIG) QGIS 3.4.13.

5 RESULTADOS

Houve variação espacial para os níveis máximos e mínimos tanto do nível do rio, quanto do lençol freático registrados nas zonas ripárias de terra firme dos rios Curuá-Una e Cupari (Tabela 1). Valores negativos do nível do lençol freático representam cotas acima da superfície do solo e valores positivos abaixo da superfície, nesse sentido, valores mais próximos de 0 representam menor distância do lençol freático e superfície do solo. As unidades amostrais foram instaladas em períodos diferentes devido à dificuldade de acesso a determinadas áreas e ao transporte do material até o local. Por conta disso, não foi possível realizar a leitura dos dados no mês de abril de 2019 e as parcelas localizadas nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una apresentaram variações no período de amostragem descritas na parte superior esquerda da Figura 6. A unidade amostral mais afetada pelo atraso na implementação do equipamento foi a CUP2.

Tabela 1 - Resumo dos registros máximos e mínimos dos níveis do rio e do lençol freático entre as unidades de monitoramento em afluentes localizadas nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una, na região do baixo Amazonas, para o período de novembro de 2018 a janeiro de 2020

Nível fluviométrico (cm)			Nível do lençol freático (cm)	
CÓDIGO	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
CUP1	220,0	62,0	-39,0	112,0
CUP2	18,0	0,0	-136,0	61,0
CUP3	20,0	5,0	-30,0	50,0
CUP4	40,0	8,0	-85,0	80,5
CUR1	30,0	9,0	-68,0	90,0
CUR2	100,0	18,0	-34,0	99,0
CUR3	106,0	12,0	-64,0	62,0

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Das quatro unidades de monitoramento localizadas na bacia do rio Cupari, a parcela CUP1 apresentou maior nível fluviométrico, com 220 cm de altura durante o mês de fevereiro de 2019 (Figura 6A), e a parcela CUP4 registrou o maior nível do lençol entre as parcelas, pois a lâmina d'água dentro do poço piezométrico atingiu 50 cm (-50) acima da superfície do solo no mês de maio de 2019 (Figura 6D).

As parcelas CUP3 e CUP4 apresentaram comportamentos semelhantes nas duas variáveis estudadas (Figura 6C e 6D). Observou-se que durante todos os meses de estudo o nível fluviométrico dessas parcelas permaneceu abaixo de 20 cm, com exceção ao mês de março de 2019 da parcela CUP4, onde o nível teve elevação igual a 40 cm. Além disso, houve notável elevação do nível freático nas duas parcelas durante o mês de fevereiro de 2019, indicando que a zona saturada do solo foi atingida. No entanto, nos demais meses o nível da lâmina d'água da superfície do poço se distanciou da superfície do solo.

Observou-se que o nível fluviométrico das parcelas do rio Curuá-Una teve máxima nos meses de janeiro e fevereiro de 2019 e mínimas nos meses de agosto e setembro, período menos chuvoso. Ressalta-se que a parcela CUR1 apresentou valores abaixo de 31cm durante todo o período amostrado para o nível fluviométrico (Figura 6E).

Quanto ao nível freático, a parcela CUR 1 registrou o valor mais elevado entre as parcelas da bacia do rio Curuá-Una, com 68 cm (-68) acima da superfície do solo no mês de fevereiro de 2019. A parcela CUR2 apresentou registros acima da lâmina da água a partir do mês de junho seguindo até novembro de 2019, atingindo 34 cm acima do solo (Figura 6F). Já a parcela CUR3 registrou maior frequência de saturação do solo, correspondendo a 10 meses de saturação (Figura 6G).

Figura 6 - Variação mensal do nível fluviométrico (rio) e piezométrico (lençol freático) nas bacias dos rios Cupari e Curuá-Una, região do baixo Amazonas, entre novembro de 2018 e janeiro de 2020.

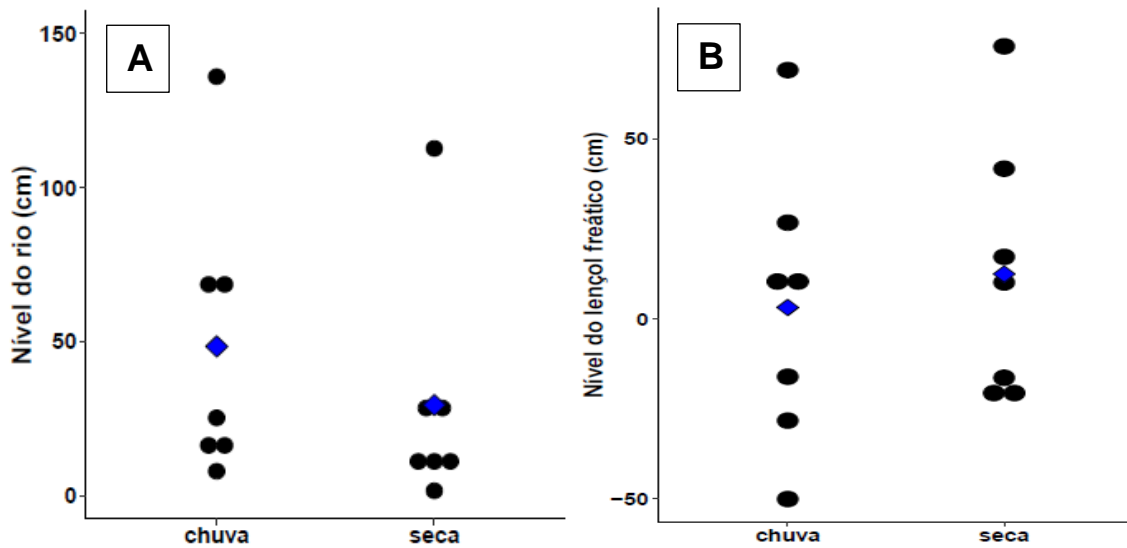


Fonte: Elaborado pela própria autora.

As variáveis nível médio do lençol freático e nível médio do rio foram selecionadas após análise de colinearidade entre as variáveis amostradas (APÊNDICE A). As parcelas apresentaram maior nível fluviométrico no período chuvoso quando comparado ao seco ($p = 0,016$; $V = 28$; $N = 7$; Figura 5A), mas não houve diferença no nível do lençol freático entre os períodos ($p = 0,69$; $V = 11$; $N = 7$;

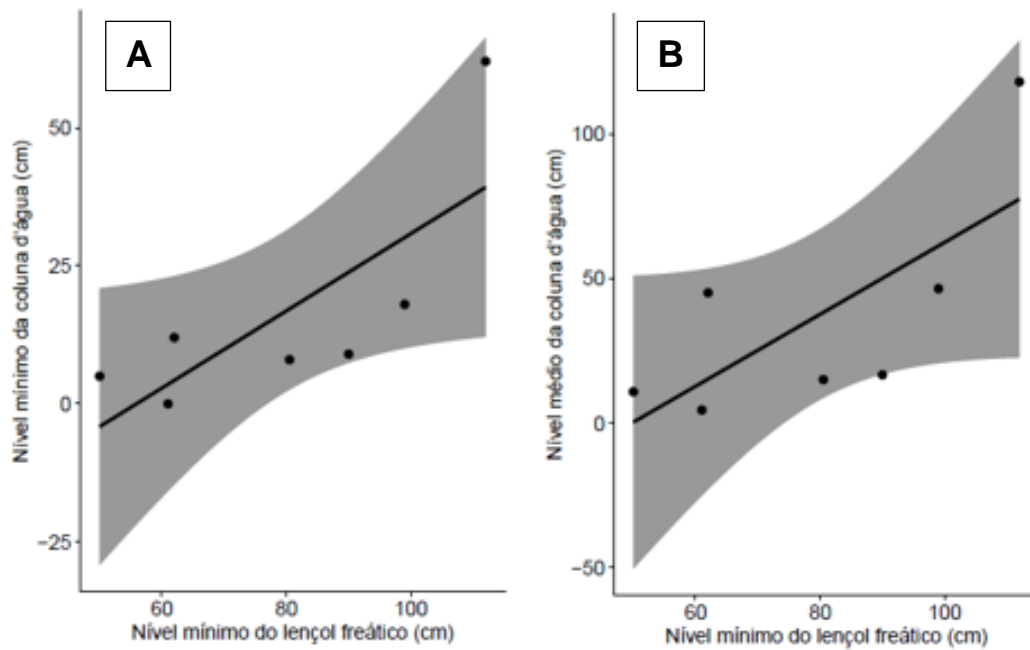
Figura 5B). Em todo caso, as duas variáveis estudadas apresentaram maior amplitude de variação durante o período chuvoso (dezembro de 2018 – maio de 2019). Os níveis mínimo e médio do rio (coluna d'água cm) têm forte correlação com o nível máximo do lençol freático ($p=0,01$; $r^2 = 0,86$; Figura 6).

Figura 7 - Variação dos níveis médios do rio (A) e do lençol freático (B) entre os períodos chuvoso (dezembro/2018 a maio/2019) e período seco (junho/2019 a novembro/2019) nas bacias dos rios Curuá-Una e Cupari, região do baixo Amazonas, entre novembro de 2018 e dezembro de 2019



Fonte: Elaborado pela própria autora.

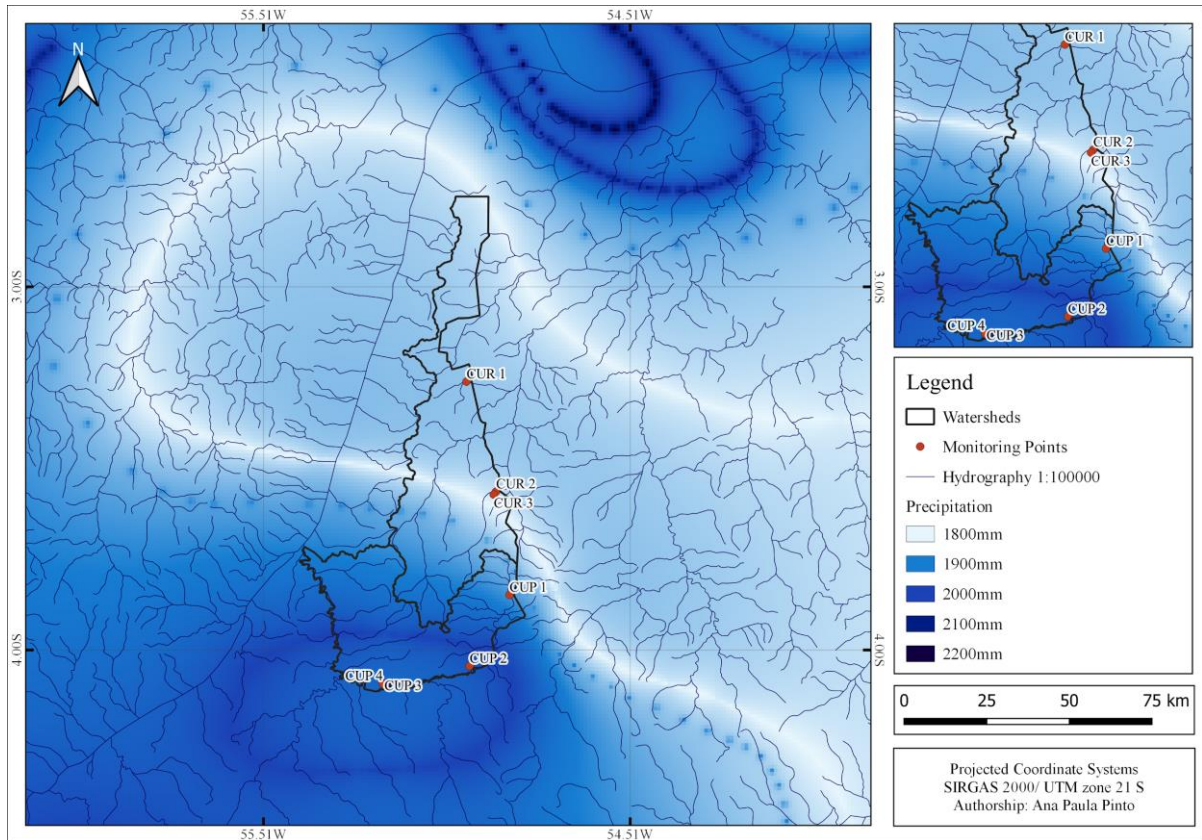
Figura 8 - Correlação entre o nível mínimo do lençol freático e o nível mínimo da coluna d'água (A) e o nível médio da coluna d'água (B).



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Para esta área de estudo, observa-se que a precipitação pluvial apresenta maior concentração de volume precipitado na série histórica de 1977 a 2006 na bacia do rio Cupari (Figura 9).

Figura 9 - Distribuição espacial da precipitação pluvial média nas unidades de monitoramento localizadas em afluentes de floresta de terra firme, ao longo das bacias dos rios Curuá-Una e Cupari. Série histórica de 1977-2006/CPRM.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Os maiores índices pluviométricos anuais da série histórica foram nos pontos CUP2, CUP3 e CUP4, com valores de 1965,8 mm, 1939,5 mm e 1939,8 mm, respectivamente. Já os menores índices foram nos pontos CUR3 e CUR2, com 1813,8 e 1818,7 mm, respectivamente.

6 DISCUSSÃO

Os afluentes das bacias dos rios Cupari e Curuá-Una funcionam como uma zona tampão para os processos hidrológicos locais de pequenas bacias e para os processos biológicos da vegetação de florestas de terra firme. Apesar de toda a variação espacial e temporal observada para o nível do lençol freático e no rio, somente o nível do rio mudou entre a seca e cheia.

De todas as parcelas monitoradas, as parcelas da bacia do rio Cupari apresentaram os maiores registros nas duas variáveis estudadas, nível do lençol freático e nível do rio. A parcela CUP1 apresentou o maior valor do nível fluviométrico (220 cm) em fevereiro de 2019 e a parcela CUP4 o maior valor do nível piezométrico (-50 cm) em maio de 2019. Isso pode ser explicado pelos maiores volumes de precipitação pluvial concentrados na região da bacia do rio Cupari, explícitos na figura 9.

A variação dos níveis piezométricos das parcelas localizadas na bacia do rio Curuá-Una demonstrou uma forte relação com o nível fluviométrico, pois houve um acompanhamento simultâneo do nível piezométrico à medida que o rio tendia a baixar seu nível de água e vice versa, explicado pelo gráfico de correlação entre o nível mínimo da coluna d'água e nível mínimo do lençol freático (Figura 8A).

Durante o período de amostragem, os meses de dezembro de 2018 a novembro de 2019 demonstraram intensa variação sazonal do nível fluviométrico. Observou-se que nos meses de dezembro a maio os níveis médios são bem maiores em relação aos demais, com altura média de 136 cm que reduziu gradativamente até o período seco, com mínima de 8 cm. Sabe-se que a variação no período chuvoso é sempre maior que na seca pois trata-se de cursos de água pequenos respondendo a variações locais. Nesse sentido, Vital (2007) explica que as variações na vazão dos rios se dão quando o volume pluviométrico ultrapassa a quantidade de água evapotranspirada. Por outro lado, quando a evapotranspiração é superior ao volume de água precipitado ocorre contribuição subterrânea para o igarapé, acompanhando o ciclo sazonal das chuvas.

Houve maior dinâmica do nível freático durante o período chuvoso, variando de 69,2 cm a -50 cm (Figura 7B). Winter et al. (1998) explicam que a profundidade do lençol varia sazonalmente porque a recarga das águas subterrâneas, entendida como

a acumulação de água na superfície superior da zona saturada, está relacionada à variação na quantidade e distribuição temporal de precipitação. No entanto, durante o período seco nota-se que em quatro parcelas (CUR 1, CUR 2 e CUR 3) as médias do lençol freático permaneceram abaixo de 0cm, ou seja, acima da superfície do solo. Dessa forma é possível observar que em algumas parcelas o nível piezométrico não acompanha o ciclo sazonal, pois durante a seca não houve redução significativa do nível freático subterraneamente.

De modo geral, a variação da água subterrânea (lençol freático) nas parcelas covaria com a água superficial (altura da coluna d'água) (ver Figura 6). Em alguns casos não há mudanças no nível piezométrico, mesmo que corresponda aos dias de maior volume pluviométrico porque além da precipitação, alguns fatores influenciam localmente o acúmulo de água subterrânea, como a topografia, variáveis hidrológicas, o tipo de solo, a espessura da camada não saturada e a composição dos materiais da zona saturada e não saturada (MOON et al., 2004). Além disso, o lençol freático próximo ao rio sofre influência das chuvas que ocorrem em outros locais da bacia (RAMOS et al., 2009).

Em um estudo realizado ao longo da rodovia federal BR-319, seguindo o mesmo protocolo de amostragem, Sousa et al. (2020) identificaram que secas extremas não tiveram um impacto negativo nas árvores e palmeiras que crescem sobre o lençol freático superficial. Isto revela que o ambiente hidrológico subterrâneo amortece o déficit hídrico climatológico através da complexa interação entre secas climatológicas e acesso à água subterrânea na dinâmica da floresta. Para McLaughlin et al. (2017), esse tipo de refúgio hidrológico pode formar uma base fundamental das estratégias de conservação com conhecimento do clima. Para isso, é inegável que seria indispensável o melhor entendimento acerca dos efeitos da mudança climática nos principais processos hidrológicos, incluindo o fluxo de água subterrânea.

De modo geral, diferente das águas superficiais, cujo banco de dados é amplo devido a facilidade de acesso e menores custos para monitoramento, as águas subterrâneas permanecem carentes de dados detalhados do seu uso e da distribuição geográfica, ainda que novas unidades de monitoramento sejam instaladas e novos estudos científicos sejam desenvolvidos (CLEARY, 2007). Villar (2010) caracteriza a gestão das águas subterrâneas como um desafio que busca proteger um bem oculto, que engloba os dois principais recursos de natureza política: água e solo.

7 CONCLUSÃO

- Os níveis dos canais acompanham o regime anual de precipitação;
- Por meio da análise espacial constatou-se que as duas variáveis sofreram forte influência da precipitação local;
- Os afluentes das bacias dos rios Cupari e Curuá-Una se comportam como uma zona tampão para os processos hidrológicos locais de pequenas bacias e para os processos biológicos da vegetação de florestas de terra firme ao manterem o nível freático estável no período de estiagem;
- Os dados aqui apresentados indicam que os afluentes da Flona do Tapajós são importantes elementos para a manutenção do balanço hídrico e de serviços ecossistêmicos locais, devendo sua preservação ser considerada nos planos de manejo da UC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, F.S.M.; FISCH, G.; VENDRAME, J.F. **Modificações do Microclima e Regime Hidrológico devido ao Desmatamento na Amazônia**. Um estudo de Caso em Rondônia (RO), Brasil. ACTA AMAZÔNICA 29(3): 395-409, 1999.
- BIZWELL, H.H.; A.M. SCHULTZ, 1958. **Effects of vegetation removal on spring flow**. California Fish and Game, 44 (3): 211-230.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment **experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration**. Journal of Hydrology. Amsterdam, volume 55, 1982.
- BURROUGH, P.; MCDONNELL, R. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press. 1998.
- CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. Tese (Pós-Doutorado) - Santa Barbara, California University, 583 p. 1984.
- CARVALHO, D. F.; MELLO, J. L. P.; SILVA, L. D. B. **Irrigação e Drenagem**. Capítulo 1. Introdução à Hidrologia. Maio de 2007.
- CHOW, V., MAIDMENT, D. E MAYS, L. (1988) Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company, Nova York.
- CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Princenton Groundwater Inc.: Clean Environment Brasil, p. 117, 1989.
- COELHO M. C.; SOUZA L. A.; TORRES R. B.; PEREIRA S. Y.; GUADALUME G. W. **Recuperação ambiental, Participação do Poder Público: Uma Experiência em Campinas**. Nível Freático Influenciado pela vegetação nativa e solos em fragmentos de duas formações vegetais na bacia do Ribeirão das Anhumas, Campinas, SP, p.144-173. 2006.
- COELHO NETTO, A. L. **Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia**, in: Geomorfologia: uma atualização de Bases e conceitos. In: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Batista da (Orgs). Geomorfologia: uma atualização de Bases e conceitos. 7a Ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p.93-148.
- DA PAZ, Adriano Rolim. Hidrologia Aplicada. Caxias do Sul: [s.n.] 2004. 138p.
- DAMASCENO, B. C. Gipsita do Rio Cupari, região centro-oeste do Estado do **Pará**. Série Oportunidades Minerais - Exame Atualizado de Projeto no. 9. Belém: CPRM, p. 27, 2001.
- FERREIRA, Sávio J. Filgueiras; LUIZAO, Flávio J.; DALLAROSA, Ricardo L. Godinho. **Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central**. Revista Acta Amazônica, Manaus, v. 35, n. 1, p. 55-62, 2005.

FILHO, J. M. Ocorrência de Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, A. C.; FILHO, J. M. Hidrogeologia - Conceitos e Aplicação. 2ª. ed. Fortaleza: CPRM, 2000. Cap. 2, p. 13-34.

GANGOPADHYAYA, M., HARBECK Jr, G. E., NORDENSON, T. J., OMAR, M. H., URYVAEV, V. A. (1966). **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Technical note 83. Geneva, WMO, 143p.

GUIMARÃES, R. C.; SHAHIDIAN, S; RODRIGUES, C. M. (Editores). **Hidrologia Agrícola**, 2ª edição. ISBN: 978-989-8550-40-8. ECT e ICAAM. Évora, 2017.

HEWLETT, J.D. **Principles of Forest Hydrology**. Athens: University of Georgia Press, 1969. 74 p.

HIRATA, R.; ZOBY, J.L.G.; OLIVEIRA, F.R.O. **Água Subterrânea: reserva estratégica ou emergencial**. In: BICUDO, C.; TUNDISI, J.; SCHEUENSTUHL, M. (Org.). Águas do Brasil: análises estratégicas. 1 ed. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. v. 1, p. 144-164. Disponível em: <https://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-6820.pdf>.

IBAMA, Plano de Manejo da Floresta Nacional do Tapajós. Informações gerais, vol.1. 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Normais Climatológicas do Brasil, 1981- 2010, Brasília, 2018.

JATI, D. A.; SILVA, J. T. **Estudos geo-hidrológicos da bacia do rio Curuá-Una, Santarém, Pará**: Aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH). Revista Brasileira de Geografia Física, v. 10, p. 1296-1311, 2017. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1296-1311>

Junk W J; Bayley, P. B., Sparks, R. E.. 1989. **The flood pulse concept in river-floodplain systems**. In D.Dodge (Ed.). Proceedings of the International Large River Symposium, Vol. 106, pp. 110–127. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Science, Ottawa.

JUNK, W J.; PIEDADE, M. T. F; SCHÖNGART, J.; COHN-HAFT, M. J.; ADENEY, M.; WITTMANN, F. **A Classification of Major Naturally Occurring Amazonian Lowland Wetlands**. Wetlands 31 (4): 623–40. 2011.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. **Áreas Úmidas (AUs) Brasileiras: Avanços e Conquistas Recentes**. Boletim ABLimno, v. 41, n. 2, p. 20-24, 2015.

LARKIN, R. G.; SHARP Jr., J. M. (1992). **On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow Direction in aluvial aquifers**. Geological Society of America Bulletin, vol. 104.

LEMES, M. R. T. **Revisão dos efeitos da vegetação em taludes**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LENCASTRE A.; FRANCO F. M. (2003). **Lições de Hidrologia**, Fundação Armando Lencastre, ISBN 972-8152-59-0, Lisboa.

LNEG. Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Portugal. **Água Subterrânea: Conhecer para Proteger e Preservar**. 2001.

MACEDO, M.; CASTELLO, L. **State of the Amazon: Freshwater Connectivity and Ecosystem Health**; edited by D. Oliveira, C. C. Maretti and S. Charity. Brasília, Brazil: WWF Living Amazon Initiative. P. 136, 2015.

MARTELLI, G. V. **Monitoramento da flutuação dos níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do sistema aquífero guarani em CACEQUI - RS**. 2012. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

MARTINS, J.A. **Escoamento Superficial**. In: PINTO, N; Holtz, A.C.T; Martins, J.A. and Gomide, F.L.S). Hidrologia Básica. Ed. Edgard Blucher. ISBN: 8521201540, 2000, 278 p.

MCCLAIN, M.L. ; ELSENBEER, H. 2001. **Terrestrial inputs to Amazon streams and internal biogeochemical processing**. In: The Biogeochemistry of the Amazon Basin. McCLAIN, M.E., VICTORIA, R.L.; RICHE, J.E. (eds). Oxford University Press: New York, US.

MCLAUGHLIN, B. C., ACKERLY, D. D., KLOS, P. Z., NATALI, J., DAWSON, T. E.; THOMPSON, S. E. (2017). **Hydrologic refugia, plants, and climate change**. *Global Change Biology*, 23(8), 2941–2961. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13629>

MMA. Relatório Parametrizado - Unidade de Conservação: Floresta Nacional do Tapajós. Brasília: 2020.

MOON.S.; WOO, N. C; KWANG, G. L. (2004). **Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge**. *Journal of Hydrology*, v.292, p. 198-209.

MOSS, M.; MOSS, G.; SALATI, E.; DIAS, P. S.; NOBRE, A. D. Caderno do Professor: Os Rios Voadores, a Amazônia e o clima brasileiro. 2011. Disponível em: http://brasildasaguas.com.br/wp-content/uploads/sites/4/2013/05/caderno_rios_voadores.pdf.

NEILL, C.; ELSENBEER, H.; KRUSCHE, A. V.; LEHMANN, J.; MARKEWITZ, D. I.; FIGUEIREDO, R. O. **Hydrological and biogeochemical processes in a changing Amazon: results from small watershed studies and the large-scale biosphere-atmosphere experiment**. Published online in Wiley InterScience, 2006.

NEPSTAD, D.; MOUTINHO, P. Documento de Divulgação do Projeto Simulando o efeito do El Niño na Floresta Amazônica: o experimento “Seca Floresta”. Belém, Pará. 2001. Disponível em: https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2001/03/simulando_o_efeito_do_el_nin%CC%83o_na_florest.pdf.

NEPSTAD, D.; MOUTINHO, P.; DIAS-FILHO, M. B.; DAVIDSON, E.; CARDINOT, G.; MARKEWITZ, D.; GUERREIROS, J. B. **Os efeitos de exclusão inicial significativa nos processos de dossel, produção e biogeoquímica de uma floresta**

amazônica. Diário de Pesquisa Geofísica: Atmosferas, 107 (D20), 8085. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001JD000360>

OLIVEIRA, L. L.; COSTA, R. F.; SOUSA, F. A. S.; COSTA, A. C.; BRAGA, A. P. **Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental.** Acta Amazônica, Manaus, v. 38, n. 4, p. 723- 732, 2008.

PEKÁROVA P, MIKLÁNEK P, PEKÁR J. 2003. Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th–20th centuries. Journal of Hydrology 274: 62–79.

PEREIRA, Antônio Roberto. Et al., **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997.

POKHREL, Y. N.; FAN, Y.; MIGUEZ-MACHO, G.; YEH, P. J. F.; HAN, S. C. The role of groundwater in the amazona water cycle:3. Influence on terrestrial water storage computations and comparison with GRACE. J. Geophys. Res. Atmos. 2013, 118.

PRUSKI, F. F; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial.** Viçosa-MG, Editora UFV, 2003.

RADAMBRASIL. FOLHA SA.21- Santarém: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1976. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv24027.pdf>.

RAMOS, G.J.A.; DIAS, H.C.T.; MAFFIA, V.P.; SILVA, W.A. de S. **Monitoramento do nível do lençol freático do Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG.** In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: recuperação de áreas degradadas, serviços ambientais e sustentabilidade, 2, 2009, Taubaté. Anais. São Paulo: IPABHI, 2009.

RIBEIRO, B.R; SILVA, A.C; OLIVEIRA, L.L. **Instrumentos de baixo custo para monitoramento hidrológico em área úmida de uma nascente em Santarém-PA, Amazônia, Brasil.** IV Congresso Brasileiro de Áreas Úmidas. Brasília, 2-5/12/2018

SANTOS, I. FILL, H. D. SUGAI, M. R., BUBA, H., KISHI, R. T., MARONE, E. LAUTERT, L. F., **Hidrometria Aplicada.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001- p.372.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Boletim De Monitoramento Hidrometeorológico Da Amazônia Ocidental. CPRM, 2021.

SILVA, F. C. 2007. **Análise integrada de usos de água superficial e subterrânea em macro escala numa bacia hidrográfica:** O caso do Alto Rio Parnaíba. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 188p.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. **Uso da Vinhaça E Impactos nas Propriedades do Solo e Lençol Freático.** Revista brasileira engenharia agrícola e ambiental. v.11 n.1, 2007.

SOUSA, T. R., SCHIETTI, J., SOUZA, C. F., ESQUIVEL-MUELBERT, A., RIBEIRO, I. O., EMÍLIO, T., PEQUENO, P.A.C.L., PHILLIPS, O., COSTA, F. R. C. (2020). **Palms**

and trees resist extreme drought in Amazon forests with shallow water tables. Journal of Ecology. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13377>.

TRANCOSO, Ralph. **Mudanças na Cobertura da Terra e alterações na resposta Hidrológica de Bacias Hidrográficas na Amazônia.** Dissertação de Mestrado. INPA/Manaus. 2006.

TUCCI, C. E. M. – organizador (1993). **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Ed. da UFRGS; ABRH; EDUSP

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento:** Revisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.2, p.135-152, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Ed universidade/UFRGS, ABRH. 2001. 943p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p.

VAL, A. L.; SANTOS, G. M. (Org.). Grupo de estudos Estratégicos amazônicos GEEA. Manaus: INPA, 2008, v. Tomo I.

VILLAR, P. C. **Gestão das águas subterrâneas e o Aquífero Guarani:** desafios e avanços. In: V ENCONTRO ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA EM AMBIENTE E SOCIEDADE. 2010, Florianópolis. CD ROM. Brasília, DF: Editora UNB. 2010. P. 1-17.

VITAL, M. H. F. **Impacto ambiental de florestas de eucalipto.** Revista do BNDES, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 235-276, dez. 2007.

WARD, J.V.; STANFORD, J.A. **The serial discontinuity concept in lotic ecosystems.** In: FONTAINE, T.D.; BARTHELL, S.M. (eds). Dynamics of lotic Ecosystems. Ann Arbor Science Publisher, Michigan, US. 1983.

WINTER, T. C.; HARVEY J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Ground Water and Surface Water. A single Resource.** U. S. Geological Survey Circular, p.79, 1998.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Matriz de colinearidade de Spearman. Valores de P e R^2 em negrito representam as correlações significativas. PPT (precipitação mm), RIO (nível fluviométrico cm), LENÇOL (nível do lençol freático cm), RIO max (nível máximo fluviométrico cm), LENÇOL max (nível máximo do lençol freático cm), RIO min (nível mínimo fluviométrico cm), LENÇOL min (nível mínimo do lençol freático cm).

Correlações de Spearman	PPT	RIO	LENÇOL	RIO max	LENÇOL max	RIO min	LENÇOL min
PPT		-0.71	0.04	-0.64	-0.39	-0.71	-0.46
RIO	0.07		0.21	0.93	0.86	1	0.43
LENÇOL	0.94	0.64		0.21	0.29	0.21	0.39
RIO max	0.12	0	0.64		0.71	0.93	0.32
LENÇOL max	0.38	0.01	0.53	0.07		0.86	0.11
RIO min	0.07	0	0.64	0	0.01		0.43
LENÇOL min	0.29	0.34	0.38	0.48	0.82	0.34	

Fonte: Elaborado pela própria autora.

APÊNDICE B – Unidades de monitoramento hidrológico de afluentes localizadas em floresta de terra firme, ao longo das bacias dos rios Curuá-Una e Cupari, em sua porção localizada dentro da Flona do Tapajós, região do baixo rio Amazonas, Brasil. Fotos: Rede Ripária.



