



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Estudo do Comportamento do Fluxo de Água em Zona Saturada - Reserva Biológica do Cuieiras, Amazônia Central

Alexandre Souza Bastos¹, Maria Terezinha Ferreira Monteiro², Sávio José Filgueira Ferreira³, Regison Costa de Oliveira⁴, Robinson Negrón-Juárez⁵, Javier Tomasella⁶, Didier Gastmans⁷, Vinícius Metrado Teixeira⁸, Claudenilson Nogueira de Almeida⁹, Alderlene Pimentel Brito¹⁰

¹ Mestre em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia-INPA, CEP 69067-375, Manaus, Amazonas. alexandre3k39@gmail.com (autor correspondente). ² Dra. Coordenadora Bolsista de Projetos, INPA. mtmont.10@gmail.com. ³ Dr. Pesquisador e Coordenador de Projetos Científicos (FAPEAM), Setor de Recursos Hídricos, INPA-LBA. (92) 99485-9854. saviojferreira@gmail.com. ⁴ Mestre em Clima e Ambiente, INPA. (92) 99150-9396. regison.oliveira@gmail.com. ⁵ Dr. membro integrante do Projeto: The Next-Generation Ecosystem Experiments-Tropics (Ngee Tropics). robinson.inj@lbl.gov. ⁶ Dr. tecnologista sênior do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro Histórico de São Paulo, SP, CEP: 01302-907. (11) 2114-8734. j.tomasella@gmail.com. ⁷ Dr. Professor, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Centro de Estudos Ambientais Campus Rio Claro, CEP 13506-900. Rio Claro, São Paulo. ⁸ Mestre em Clima e Ambiente, INPA. viniciusk2@hotmail.com. ⁹ Hidrotécnico, INPA-LBA. claudenilsonalmeida33@gmail.com. ¹⁰ Dra. em clima e ambiente, INPA. alderlenebrit@gmail.com

Artigo recebido em 13/04/2023 e aceito em 30/06/2023

RESUMO

Estudos sobre o nível subterrâneo de altas a baixas altitudes na região amazônica, em ambientes naturais, quanto à densidade do fluxo de base, são conhecimentos incipientes e não refletem sua relevância atual relacionada à dinâmica da água em diferentes níveis topográficos. O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento interanual do nível do lençol freático em área de platô, encosta e baixio e obter a condutividade hidráulica na zona saturada para estimar o fluxo de base local. O estudo compôs-se na reserva Biológica do Cuieiras na Amazônia Central. A metodologia consistiu em coleta de dados hidrológicos e uso da técnica *Slug test* em piezômetros para determinar a condutividade hidráulica saturada. O resultado demonstrou valores médios da condutividade hidráulica saturada com variação de 30mm/h mínima e máxima de 1177 mm/h. No baixio o nível freático, ao longo dos anos de 2002 a 2022, apresentou predisposição às oscilações em uma frequência de 0.10 m a 0.60 m; na vertente de 3 m a 5 m e no platô de 23 m a 42 m em relação à superfície do solo. O fluxo de base médio obtido foi de 3,62E-06 m³/s, não houve variação sazonal significativa do fluxo de base no período observado entre 2002 e 2019. Considera-se importante explorar esse resultado na caracterização de trabalhos complementares que envolvam transmissividade, rebaixamento do lençol freático e na recarga sazonal de aquífero livres consoante às sequências topográficas da região. A pesquisa contribuiu com novas informações hidrogeológicas, que ajudam a compreender os processos hidrológicos em determinada área.

Palavras-chave: Variabilidade espaço-temporal do lençol freático, condutividade hidráulica saturada e velocidade do fluxo de água subterrânea.

Study of Water Flow Behavior in a Saturated Zone - Cuieiras Biological Reserve, Central Amazon

ABSTRACT

Underground flow studies from high to low altitudes in the Amazon region, in natural environments, regarding base flow density, are incipient knowledge and do not reflect your current conversation related to water dynamics at different topographic levels. The objective of this work was to analyze the behavior of the water table level in plateau, slope and lowland areas and to obtain a hydraulic conductivity in the saturated zone to estimate the local base flow. The study was carried out in the Cuieiras Biological Reserve in the Central Amazon, north of the city of Manaus. The methodology consisted of collecting hydrological data and using the "slug test" technique in piezometers to determine the saturated hydraulic conductivity. The result demonstrates average values of saturated hydraulic conductivity with a minimum and maximum variation of 30mm/h of 1177 mm/h. Over the years, in the shallows, the water table level, there was a predisposition to variation in a frequency of 0.10 m to 0.60 m; on the slope from 3 m to 5 m and on the plateau from 23 m to 42 m deep. The average base flow obtained was 3.62E-06 m³/s, there was no significant seasonal variation in the base flow in the observed period from 2003 to 2019. It is considered important to explore this result in the characterization of complementary works involving transmissivity, underground solute transport and free aquifer recharge according to topographic sequences in the region. The study contributed with new hydrogeological information, which helps to understand the hydrological processes in a given area.

Keywords: Spatiotemporal water table variability, saturated hydraulic conductivity and groundwater flow velocity.

Introdução

As águas subterrâneas desempenham papel fundamental em sua distribuição no território nacional brasileiro. De acordo com o IBGE (2011), cerca de 45% da água subterrânea potável do território está inserida nos aquíferos, não obstante estimativas precisas, quanto ao volume de água armazenado em reservatórios subterrâneos, menciona-se que as maiores áreas de aquíferos porosos estão localizadas nas bacias hidrográficas dos estados do Amazonas, Mato Grosso e Pará.

Além do alto valor econômico agregado aos recursos hídricos para as atividades humanas (Oliveira et al., 2022), a água subterrânea é um fator primordial na manutenção e continuidade do sistema biótico local e global, fundamental na sustentação de corpos hídricos em épocas de seca por meio do fluxo de base (Silva et al., 2021; Souza et al., 2022) sendo um dos componentes chave dos processos hidrológicos na descrição do balanço hídrico e manutenção da umidade do solo que conduz a evapotranspiração (Broedel et al., 2017; Wakode et al., 2018).

Correla e Junior (2021) descrevem a água subterrânea como principal fonte de água doce, onde o monitoramento dos níveis piezométricos e taxa de recarga são relevantes para uma gestão eficaz.

Na região amazônica, a água subterrânea é indispensável para a regulação da disponibilidade hídrica para a biota e uso sustentável da população (Tomasella et al., 2008; Wahnfried & Soares, 2012).

O estudo realizado por Saraiva (2017), reitera a posição sobre a cidade de Manaus como exemplo de uso indiscriminado de águas subterrâneas. Por apresentar-se importante polo industrial e populacional da região norte do Brasil, problemas de superexploração aquífera recorrentes, ainda que haja abundante disponibilidade hídrica superficial, é vista com relutância.

Segundo Petri & Fúlfaro (1988) e Brito, et al (2021), em sua formação geológica, a região de Manaus situa-se sobre sedimentos continentais de unidade aflorante predominante da Formação Alter do Chão (FAC), sob dois sistemas aquíferos: (i) aquífero superior (até 130m de profundidade) e, (ii) aquífero inferior (abaixo de 130m de profundidade). No aquífero superior a recarga é de origem meteórica, e águas pouco mineralizadas, enquanto no sistema aquífero inferior as águas apresentam maior mineralização ulterior ao maior tempo de residência no aquífero e ao processo de interação água-rocha mais desenvolvido (Pita et al., 2018).

Importante esclarecer que em sistemas aquíferos livres, como do Alter do Chão, em razão às propriedades hidráulicas, litológicas e geomorfológicas, vegetação, fenômenos meteorológicos e processos hidrológicos, ocorre a variabilidade do nível da água subterrânea sazonal (Heath, 2004).

Por conseguinte, é essencial caracterizar e compreender que processos de fluxo de águas subterrâneas, em meio natural, sob variações significativas, podem influenciar na quantidade de água disponível para as florestas e áreas urbanas (Wakode et al., 2018).

Na região amazônica, estudos sobre o comportamento e velocidade do fluxo de água subterrânea em áreas de platôs, encostas e vales são exíguos.

A escassez de conhecimentos quanto às propriedades hidrogeológicas tais como condutividade hidráulica saturada, variação sazonal do nível do lençol freático e precipitação em topossequências, está associada à inópia de estudos hidrológicos complementares, de modo que contribua na compreensão da dinâmica das variações do rebaixamento ou elevação do lençol freático ao longo dos anos e observância de possíveis efeitos negativos.

Nesse caso, com base em suposições de Oliveira et al., (2021), estimou-se e confirmou-se que a hidrogeologia apresenta possíveis informações relevantes, como a conduta de fluxos e velocidade da exploração de água subterrânea que sustenta os sistemas hídricos superficiais, através de parâmetros hidrodinâmicos que dispõem de subsídios para inteirar-se das características do fluxo subterrâneo.

Como a velocidade do fluxo de água subterrânea, de acordo com a lei empírica de Darcy, é auferida sujeito aos parâmetros de condutividade hidráulica (K), carga hidráulica e gradiente hidráulico, quando empregados em estudos hidrogeológicos, são importantes em para compreender a velocidade e capacidade de transporte de solutos e a quantificação de poluentes que atingem, com o tempo, o lençol freático, rios e igarapés (Olivia et al., 2005; Kalbus et al., 2007; Ferraz et al., 2015; Ameli et al., 2016; Miranda, 2017).

Evidenciou-se, portanto, a necessidade em compreender o percurso do fluxo de água subterrânea, onde a percepção sistemática das propriedades hidrogeológicas é o elemento básico para o embasamento científico no âmbito do mecanismo da água no solo a partir da aplicação de modelos numéricos de aquíferos e das leis de fluxo

das zonas não saturadas e saturadas (Galvão et al., 2013; Freeze & Cherry, 2017; Pasini, et al., 2022).

O estudo teve como objetivo obter parâmetros hidrogeológicos para analisar o comportamento do fluxo de água na zona saturada do solo, suas implicações na sustentabilidade de corpos hídricos em períodos peculiares regionais climáticos, com base na análise de séries históricas de flutuação do nível freático na microbacia do Igarapé Asú em área de platô, encosta e baixio.

Material e métodos

Área de estudo

O local de estudo situa-se na microbacia do Igarapé Asú, localizada na Zona Florestal 2 (ZF-2), em área específica denominada Reserva Biológica do Cuieiras, via estrada vicinal perpendicular a BR-174, cerca de 50 km de distância ao norte da cidade de Manaus-AM. A área de drenagem estimada é de aproximadamente 14.800 km² (Figura 1). A vegetação local, detém vasta diversidade de espécies lenhosas e herbáceas de floresta primária (Higuchi et al., 1998).

Quanto à morfologia da área apresenta sequências topográficas seguidas de platôs,

Para esse propósito determinou-se a condutividade hidráulica na zona saturada do solo, com o fim de mensurar o fluxo de água subterrânea, em uma microbacia hidrográfica experimental, na escala sazonal e interanual. Os resultados hidrogeológicos alcançados são acessíveis às futuras pesquisas em níveis nacional e internacional, nas mais diversas áreas do conhecimento desenvolvido na Amazônia Central, comparadas a outras sub-regiões da Amazônia e do mundo.

encostas e baixios, altitude variável entre 30 m e 90 m (Carneiro, 2004).

Os tipos de solo identificados são classificados em: latossolo amarelo álico, argiloso em horizonte médio, poroso e microagregado no platô; os baixios com espodossolo cárpico hidromórfico e podzóis, teores de matéria orgânica e encostas com latossolo avermelhado de argilo-arenosos e abundantes latossolos e argisolos identificados na Amazônia (Camarczo & Falesi 1975; Sanchez, 1976; Chauvel, 1982; Lucas et al., 1984; Lucas et al., 1987, 1996; Bravard e Righi, 1989, 1990; Richter & Babbar, 1991; Ferraz et al., 1998).

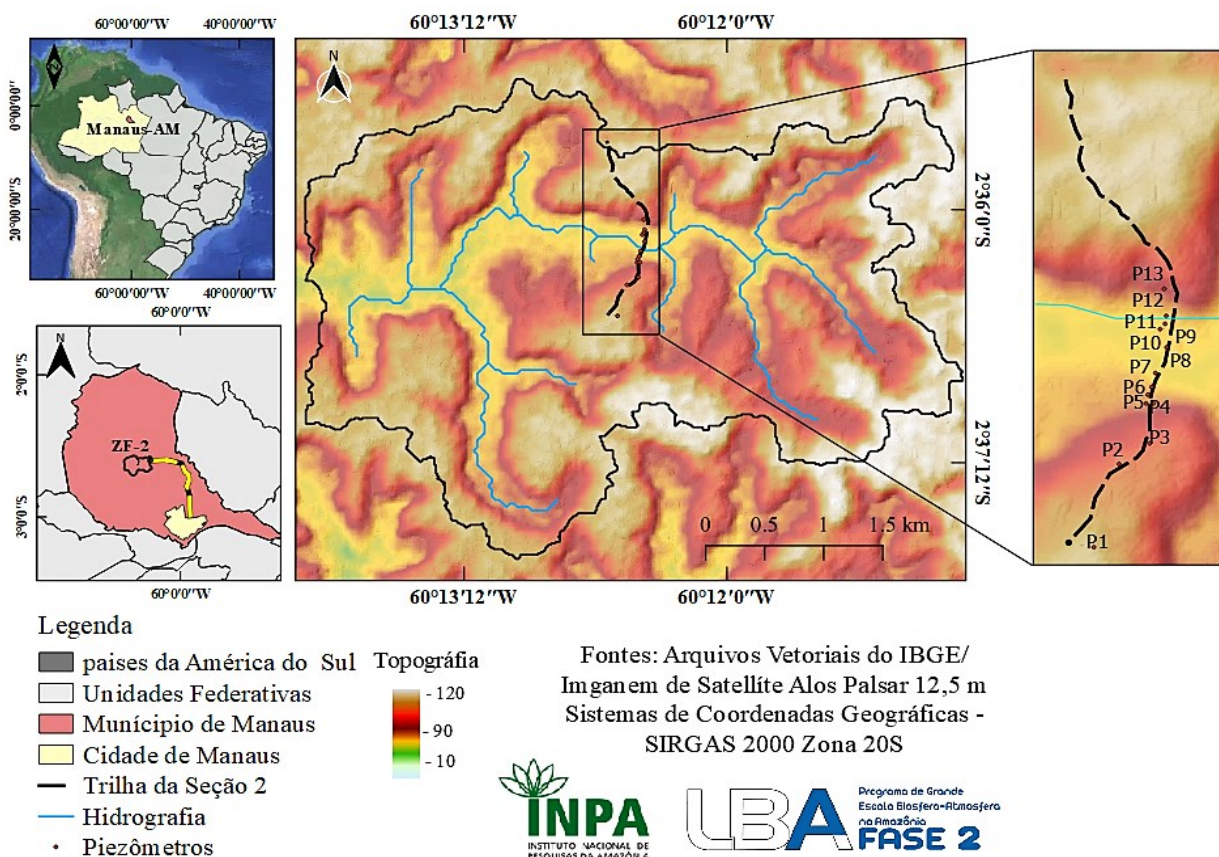


Figura 1. Localização da Microbacia do Igarapé Asú na Região de Manaus-AM, Brasil.

Aquisição de dados

Empregou-se dados hidrológicos disponíveis no laboratório de hidrologia do Programa de Grande Escala da Biosfera–Atmosfera na Amazônia–LBA, localizado no Campus 2 do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia–INPA. Estes dados são obtidos pelo sistema de monitoramento hidrológico realizado na bacia modelo de experimento da reserva biológica do Cuieiras, na seção 2, da microbacia do Igarapé Asú

Os dados de piezômetros do platô, encosta e baixio (Tabela 1) disponibilizados entre os anos de 2003 a 2022 em planilhas do Excel, são dados manuais coletados diariamente por medidor de nível em poços e medidas do Igarapé, observados e registrados pela régua linimétrica até 2014 e

dados automáticos obtidos por sensor de nível da marca HOB0 instalados nos piezômetros e no Igarapé de 2015 a 2022; a precipitação é coletada na estação pluviométrica com sensores da marca HOB0, instalado na torre, identificada como K-34 com 50 m de altura acima da copa das árvores.

Os dados brutos, registrados pelos sensores, são coletados em campo com auxílio de um notebook e o cabo conector e os manuais anotados em pranchetas a cada 15 dias. No laboratório de hidrologia processou-se os dados no programa HOB0, médios, máximo e mínimos mensais, exportados em planilhas de Excel, com data e hora correspondentes.

Os piezômetros do platô ao baixio estão a uma distância em linha reta, próximo de 800 m a 7 m, em relação ao Igarapé (Figura 2).

Tabela1. Cota topográfica e localização dos piezômetros na seção 2 da microbacia do Igarapé Açú.

Locais	Piezômetro	Profundidade do piezômetro (m)	Cota topográfica	Latitude	Longitude
Baixio	P_13	2,5	38,855	02°36'04"	60°12'27"
	P_12	2	33,914	02°36'07"	60°12'26"
	P_11	2	33,438	02°36'06"	60°12'27"
	P_10	2	34,024	02°36'08"	60°12'27"
	P_09	2,3	37,196	02°36'09"	60°12'28"
	P_08	2,6	40,493	02°36'13"	60°12'27"
	P_07	2,6	41,432	02°36'14"	60°12'28"
	P_06	2,8	42,469	02°36'13"	60°12'27"
Encosta	P_05	5,5	45,101	02°36'19"	60°12'28"
	P_04	5,9	45,253	02°36'17"	60°12'28"
Platô	P-03	25	68,499	02°36'23"	60°12'30"
	P-02	35	73,912	02°36'20"	60°12'27"
	P-01	50	82,202	02°36'18"	60°12'20"

Obs.: P: Piezômetro.

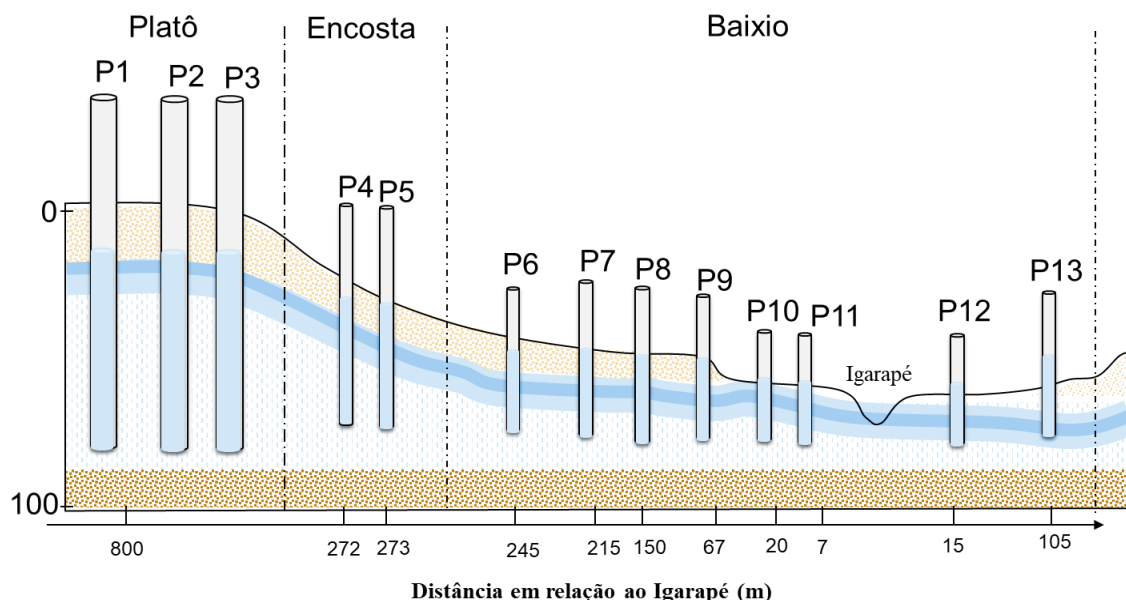


Figura 2: Distribuição dos piezômetros ao longo de um transepto sob diferentes sequências topográficas.

Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada (Ksat)

Seguiu-se os critérios estabelecidos por Hvorslev (1951) para estimativas de condutividade hidráulica (equação 1) em zonas saturadas em poços de água em aquíferos livres com $L/R > 8$. A equação de Hvorslev descreve os parâmetros necessários no cálculo da condutividade hidráulica (Kalbus et al., 2007).

Para isso aplicou-se a técnica de *Slug test*, um método de estabelecer diferença de potencial hidráulico no interior do piezômetro, que causa elevação ou rebaixamento na coluna de água no piezômetro, recomendável na determinação dos coeficientes de baixa permeabilidade de aquíferos. É um teste de campo simples para monitorar o fluxo de água (Carvalho et al., 2013; Ferraz et al., 2015; Souza et al., 2022; Zhao et al., 2022).

Para execução dos ensaios *Slug test* (Figura 3A), utilizou-se alguns equipamentos, tais como: tarugo de 1,20 m de comprimento com 4 mm de diâmetro e peso de 1,5 kg (1,5 L); cabo para fixar o tarugo; sensor LGR HOBOnset (alcance na faixa de 0 m a 50 m de pressão) submerso até a base no interior dos piezômetros, programado a registrar a cada 5 s todas variações de elevação e rebaixamento da coluna de água até sua recuperação ao nível estático, mostrado no gráfico (Figura 3B) e o medidor de nível para acompanhar a recuperação da coluna de água após a retirada do tarugo, assim dar sequencias a outras repetições.

A medição manual da ascensão da água após retirada do tarugo foi realizada a cada 5 minutos até certificar-se da recuperação da coluna de água, tanto na elevação (inserção do tarugo-*Bail test*) como no rebaixamento (retirada do tarugo-*slug test*) de volta ao nível estático inicial.

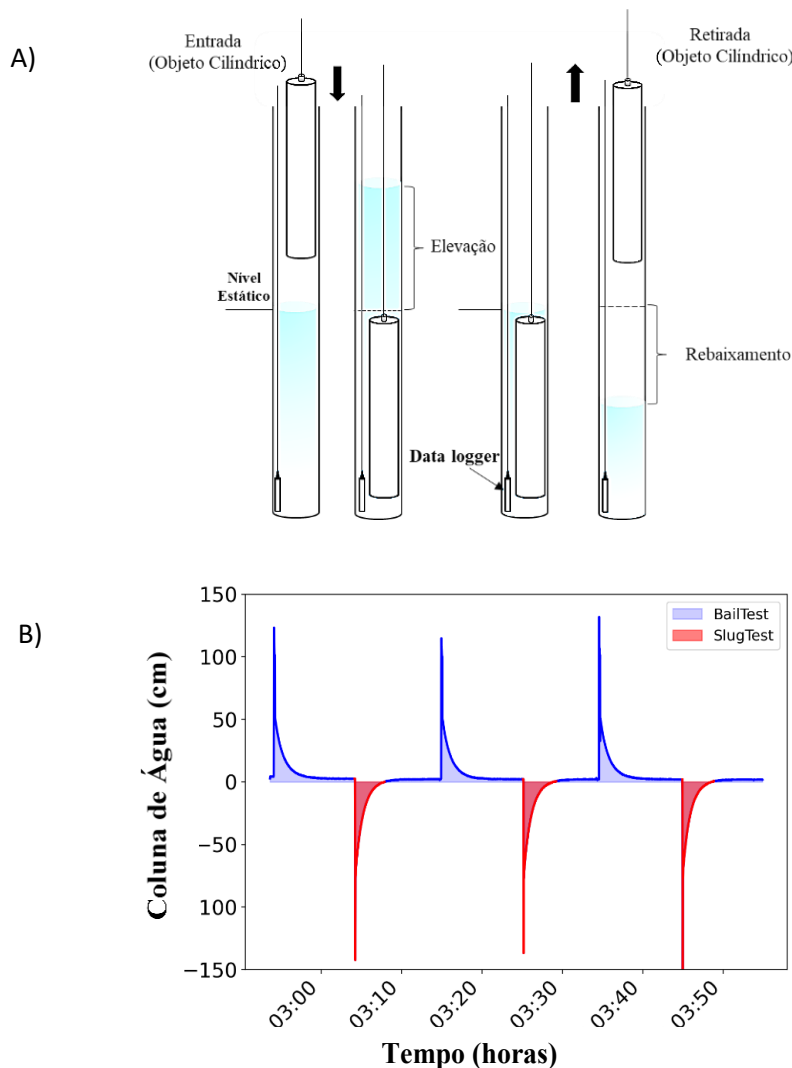


Figura 3: A) Demonstrativo ilustrado de Ensaios de “Slug test” e B) Variação gráfica da coluna de água registrado pelo sensor durante os ensaios.

O potencial hidráulico alcançado no interior do tubo decorre do processo de esvaziamento do fluxo de água para dentro do piezômetro, durante o tempo de recuperação, onde o volume de água é proporcional à condutividade hidráulica do solo (K), ao diâmetro do furo do filtro (D) e a fator F associado às características geométricas do piezômetro (Farjado et al., 2010) e ao T que é o tempo de retardo básico estipulado por Hvorslev (1956), como tempo necessário para igualar as diferenças de pressão exercidas nos piezômetros.

Segundo Butler (1997) é recomendado realizar três ensaios. Sendo assim, a Ksat foi determinada em 10 piezômetros, no total de 100 repetições, onde foi possível aplicar 10 ensaios por piezômetro, entre julho de 2018 a abril de 2019, para obter um valor representativo.

$$k_r = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_0} \quad (1)$$

Onde:

(K) Condutividade Hidráulica;

(RW) raio do revestimento em cm.

(Rc) raio do diâmetro do tubo cm;

(L=5) comprimento da seção filtrante de piezômetros parcialmente penetrantes, onde Rc=RW e o $T_0 = 0,37T$ tempo de 37% do rebaixamento/recuperação).

Estimativa do Fluxo de Base

Para determinar a velocidade do fluxo de água subterrânea foram coletados alguns parâmetros como: as cotas topográficas da superfície do solo dos piezômetros Tabela 1, por meio de uma estação total, a distância dos piezômetros *in situ* e, dados do nível estático para o cálculo da carga hidráulica, conforme a equação 2:

$$h = ES - Dw \quad (2)$$

Onde:

h: carga hidráulica;

ES: elevação da superfície;

Dw: nível do piezômetro.

Para a determinação do gradiente hidráulico, utilizou-se a equação 3:

$$I = \frac{h_1 - h_2}{dl} \quad (3)$$

Onde:

I: Gradiente Hidráulico;

dh: Carga h2- Carga h1;

dl: distância entre os pontos.

Com a carga hidráulica e a distância entre os piezômetros obtidos (Figura 4) calculou-se a velocidade de Darcy a partir da equação 4:

$$q = -K \cdot I \quad (4)$$

Onde:

q: velocidade de Darcy;

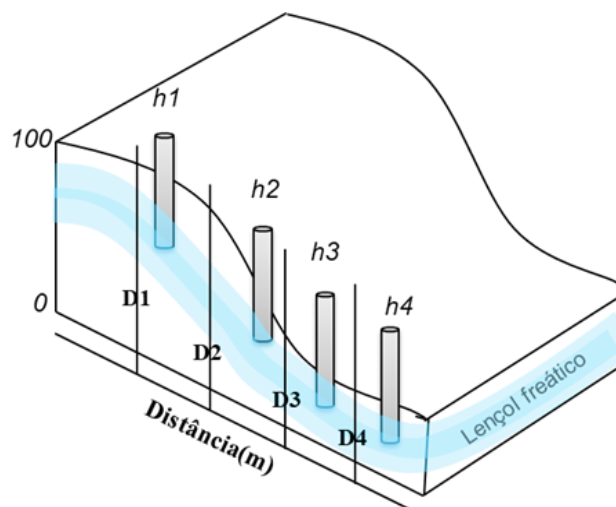


Figura 4: Esquema ilustrativo para o cálculo do gradiente hidráulico.

Resultados e discussão

Flutuações do Nível freático em topossequências

O comportamento dos níveis do lençol freático nos piezômetros instalados na microbacia do Igarapé Asú de 2002 a 2022 com valores médios mensais estão apresentados na Figura 5, exceto os anos de 2010 e 2011. Os meses do período chuvoso (dezembro a maio) estão indicados pela cor sombreada azul, e o seco (junho a novembro) pela cor laranja claro junto à precipitação.

A variação do nível d'água nos três poços profundos no platô (P1, P2 e P3) mostram a flutuação do nível ao longo dos anos oscilando de 37,23 m a 24,75 m de profundidade em relação ao nível do solo; na encosta o P4 e P5 de 4,91 m a 3,11 m e no baixio (P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12 e P13) entorno de 2,21 m a 0,100 m.

Registrou-se picos com elevações no baixio, nos piezômetros mais próximo do igarapé (P10, P11 e P12) entre 50 cm e 100 cm acima do solo, que indicou inundações na época chuvosa.

Em 2010, na Reserva Florestal Adolpho Duke (RDAD), próximo de Manaus, Farjado et al., (2010) notaram em piezômetros rasos níveis elevados adjacentes às margens do igarapé Bolívia,

suscetíveis à eventual sazonalidade pluviométrica regional, constatando, em todos os eventos, as variações do nível freático podem ter o mesmo comportamento em outras áreas estudadas.

A análise da série histórica, indicou alguns anos de eventos atípicos que afetaram a sazonalidade das chuvas na região. Como em 2004 e 2005, onde ocorreu a extrema seca provocada pelas anomalias no oceano Atlântico Norte tropical, com chuvas negativas na parte oeste e sudeste da Amazônia (Marengo et al., 2008).

A variabilidade interanual com chuvas excessivas e secas severas na Amazonia pode estar relacionada ao El Niño. Nas últimas décadas, o Brasil foi afetado por vários eventos de seca severa e inundações (Barros et al., 2021).

Como em 2009 e 2010 a seca foi mais severa que a de 2005. No início do verão austral, o fenômeno El Niño, intensificado pelo aquecimento do Atlântico Norte tropical, afetou cerca de 3,0 milhões de km² do território amazônico comparados com 1,9 milhões de km² em 2005.

O impacto negativo de precipitação causou o rebaixamento dos níveis de vários tributários dos principais rios da Bacia Amazônica (Marengo et al., 2010).

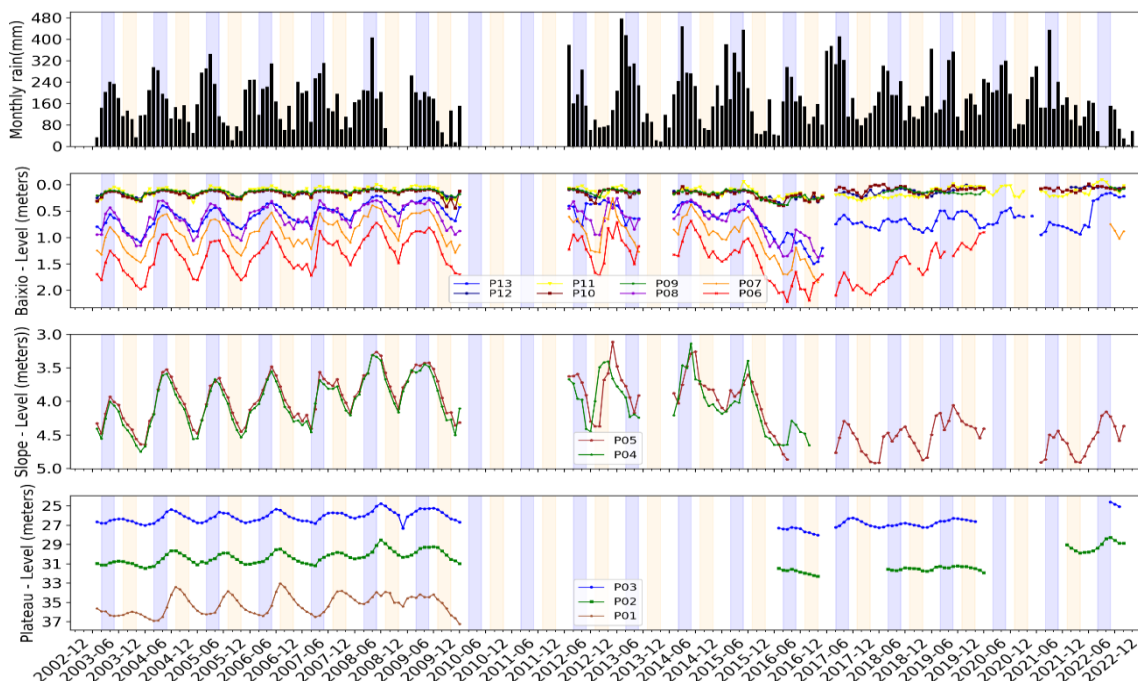


Figura 5: Variação sazonal e interanual do nível freático em relação a precipitação local entre 2003 a 2019.

Em 2015 e 2016 assinalou-se o fenômeno El Niño muito forte na escala $\geq 2,0$ e, forte entre 2009 e 2010 na escala 1,5 a 1,9 (ONI, 2021). À vista dos anos atípicos mencionados, o nível freático local não foi afetado em escala expressiva

na micro bacia do Igarapé Asú, entretanto, em 2015 e 2016, registrou-se maior rebaixamento de nível freático local no tocante a outros anos citados.

Entre 2020 e 2022, problemas técnicos em alguns piezômetros e perda de alguns sensores

interromperam a continuidade ao monitoramento do nível freático em todos os piezômetros. No entanto, na região, durante esse período, não se registrou rebaixamento expressivo de níveis dos piezômetros e do Igarapé Asú.

O nível do lençol freático e de corpos hídricos em épocas de seca podem rebaixar em escala significativa em muitas bacias hidrográficas. Contudo, em algumas áreas, os corpos hídricos mantêm-se perenes, o que se atribui às características de platôs em que o nível freático permanece contínuo mesmo ante rebaixamento. Isso se dá através da água armazenada no solo em camadas profundas de eventos anteriores, o que garante a sustentabilidade da vegetação, do nível do lençol freático e do Igarapé em eventos regulares ou extremos de seca.

A precipitação em anos de anomalias (2004 a 2005, 2009 a 2010 e 2015 a 2016) acusou índices pluviométricos anuais abaixo de 1600 mm na área de estudo. Em agosto de 2005 as chuvas foram reduzidas, porém, não implicaram na diminuição substancial da evapotranspiração da vegetação na Reserva biológica do Cuieiras, e exposição de estresse hídrico da vegetação (Meyer, 2016).

As oscilações de níveis em piezômetros refletem o ciclo de precipitação. Nos anos de anomalias analisados registrou-se maior rebaixamento da água subterrânea no baixo entre 0,1 m a 2,2 m de profundidade. Alguns piezômetros secaram no baixo entre dezembro de 2015 e dezembro de 2016, sob possível influência do El Niño alterando a pluviosidade regional.

Em pesquisa sobre recarga de águas subterrâneas em aquíferos freáticos, Nogueira & Gonçalves (2021) observaram que a variação nas taxas de precipitação, ao longo dos meses e anos, pode resultar em diferentes escalas de recarga de águas subterrâneas para o aquífero local. Com a diminuição de precipitação, menores volumes de água infiltram no solo e atingem a zona saturada.

Em vista à análise de dados dos piezômetros e dos eventos ocorrentes, notou-se que a tendência de recuperação do nível freático na microbacia do Cuieiras desdobra-se desde 2017, após a seca de 2015, em que acarretou o maior rebaixamento do nível freático até então registrado na área de estudo.

Condutividade Hidráulica da Zona Saturada do Solo (Ksat)

A Tabela 2 indica valores obtidos da Ksat nos piezômetros. Os resultados revelaram que os valores médios de baixa condutividade foram nos P9, P10 e P11 de 86,41 mm/h, 66,62 mm/h e 25,82

mm/h e os maiores nos P06, P07, P08, P12 e P13 foram 447,31 mm/h, 371,31 mm/h, 1175,25 mm/h, 121,10 mm/h e 369,50 mm/h.

Embora as profundidades dos piezômetros variem entre 2 m e 5 m, a Ksat é diferente, de modo provável consoante à topografia e à estrutura do solo onde foram instalados. O PZ8 apresentou maior valor de Ksat e o PZ11 menor.

Na encosta, os piezômetros P04 e P05 apontaram Ksat de 236,36 mm/h e 304,92 mm/h em profundidades de 5,5 m e 5,9 m. Na área de platô foi impraticável estimar a Ksat pela escassez de equipamentos adequados para poços de 25 m a 50 m de profundidade.

A Figura 6 ilustra a variabilidade espacial dos valores médios da Ksat em direção ao Igarapé.

Farjado et al (2010) registraram o mesmo resultado, diminuição de Ksat em piezômetros próximos do Igarapé e preconizaram que a condutividade hidráulica influencia na elevação dos níveis de água subterrânea nas proximidades do curso hídrico, dada sustentação gradual do fluxo de base subterrânea para corpos d'água superficiais.

De acordo com Almeida et al., (2021) latossolos de estrutura granular em perfis homogêneos, lixiviados, concentração de argila, capacidade de troca iônica, tamanho de partículas do solo são fatores que podem favorecer o aumento da condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica depende da forma e da continuidade do sistema poroso alterada conforme orientação do solo e dependente mais da estrutura do que da textura do solo Ferreira et al., (2022).

Os resultados de Ksat obtidos neste trabalho aproximaram-se aos seletos estudos realizados na região amazônica (Tabela 3).

Condizente ao estudo de caracterização da vulnerabilidade intrínseca do aquífero Alter do Chão, por Miranda (2017), em 56 poços distribuídos na cidade de Manaus, em profundidades entre 21 m e 228 m, a Ksat apresentou de 4 m/d a 12 m/d (170 mm/h e 500 mm/h) para diferentes camadas litológicas. Os valores abaixo de 4,1 m/dia (170 mm/h) indicaram índices de baixa vulnerabilidade de infiltrações de água natural ou contaminada do aquífero. Isso atesta a dificuldade de extração de água em determinados locais com baixa condutividade hidráulica saturada (Aguiar, 2002).

A Figura 7 exibe as curvas obtidas da variação de h/h_0 e $t(s)$ dos piezômetros. Destaca-se em vermelho a constante t_0 ($t_s=t_0=0,37$) que se refere ao tempo para 37% de recuperação da coluna de água ao nível estático, usado para o cálculo da condutividade hidráulica, conforme o método de

Hvovreslv (1956). Aqueles que apresentaram Ksat menor levaram mais tempo para atingir 37% de

recuperação da coluna d'água, peculiaridade da condição hidrodinâmica.

Tabela 2: Determinação da condutividade hidráulica do solo Saturada dos piezômetros.

Datas	Baixio (Ksat mm/h)					Encosta (Ksat mm/h)				
	P13	P12	P11	P10	P09	P08	P07	P06	P05	P04
jul/18	370,00	128,39	23,15	64,20	78,46	1176,91	353,07	441,34	307,73	240,86
ago/18	371,66	117,69	21,73	64,20	78,46	1174,74	353,07	470,76	282,09	240,86
set/18	370,53	117,69	28,82	70,61	83,08	1176,91	353,07	441,34	322,39	240,86
out/18	371,66	126,10	28,82	78,46	83,08	1170,80	415,38	441,34	307,73	258,07
nov/18	371,66	128,39	32,84	64,20	78,46	1176,91	415,38	441,34	282,09	249,17
dez/18	353,07	128,39	38,85	58,85	83,08	1176,91	392,30	470,76	338,51	240,86
jan/19	371,53	124,44	30,88	78,46	94,15	1174,70	392,30	353,07	322,39	212,53
fev/19	371,66	113,89	17,14	64,20	90,53	1176,91	344,09	470,76	270,81	206,46
mar/19	371,53	113,89	17,44	58,85	98,08	1170,80	380,31	470,70	307,73	233,09
abr/19	371,66	112,09	18,58	64,20	96,73	1176,91	314,17	470,76	307,73	240,86
MAXIMO	371,66	128,39	38,85	78,46	98,08	1176,91	415,38	470,76	338,51	258,07
MINIMO	353,07	112,09	17,14	58,85	78,46	1174,70	314,17	353,07	270,81	206,46

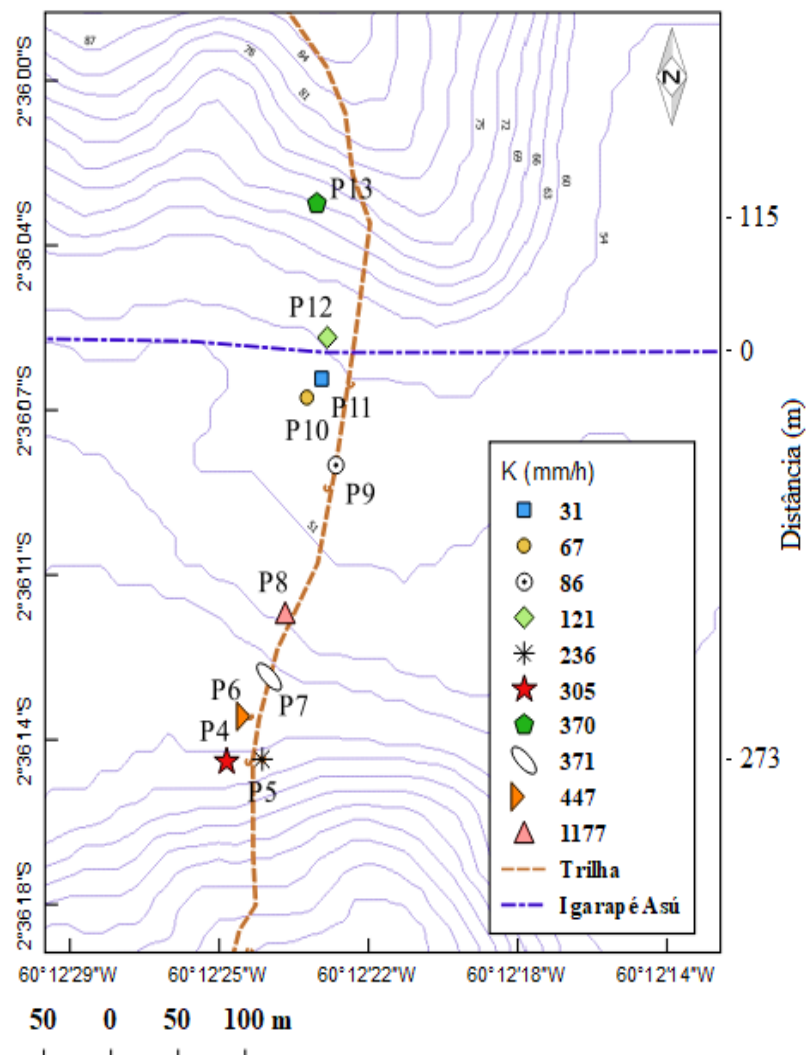
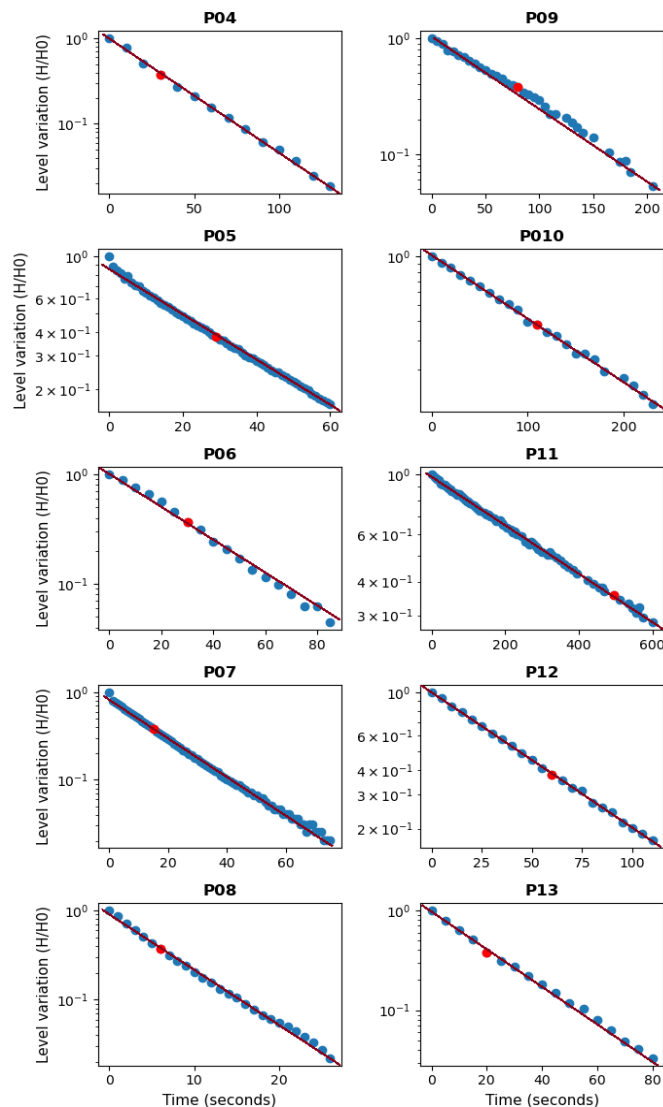


Figura 6: Condutividade hidráulica por piezômetro na Microbacia do Igarapé Açu

Tabela 3: Trabalhos relacionados a condutividade Hidráulica na Amazônia Central.

Autores	Local	Profundidades (cm)	K (mm/h)
Reichardt et al (1980)	Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA, Amazônia central	30	90
Tomasella & Hodnett (1996)	Fazenda Dimona à 100km de distância de Manaus, na Amazônia central	105	66 e 17
Farjado et al (2010)	Reserva Duke, igarapé Bolívia, na Amazônia Central	305 e 361	78 e 108,6
		304 e 386	217 e 277,5
Brito (2014)	Reserva Duke, igarapé Onça, na Amazônia Central	402 e 591	0,19 a 30,60


Figura 7: Curvas médias de referência dos ensaios do Slug teste.

Velocidade do fluxo subterrâneo

A Tabela 4 apresenta resultados do nível estático ($h^0 = e^a$), coeficiente de determinação (R^2) entre h/h_0 e Tempo (s), gradiente hidráulico, densidade do fluxo de água no solo e distância entre piezômetros e igarapé.

Os resultados de q , na zona saturada, mostraram que o P08 teve maior valor de $1,33E-05$ m/s e menores no P10 ($3,43E-07$ m/s) e P11 ($1,11E-07$ m/s). Nos demais piezômetros q seguiu-se a mesma ordem de magnitude.

Tabela 4: Dados estatísticos, regressão linear e cálculo do gradiente hidráulico (I) e a velocidade do fluxo de água subterrânea (q) em relação a distância do igarapé Açú.

Piezômetro	$h_0 = e^a$ (cm)	Tempo(s)	R ²	K(mm/h)	I: ($\Delta h/l$)	q:k. i (m/s)	Distância do Igarapé (m)
P13	36,4	18,8	0,998	370	0,052	5,39E-06	105
P12	18,8	111,1	0,998	121	0,038	1,27E-06	15
P11	28,3	476,2	0,997	31	0,013	1,11E-07	7
P10	76,5	87,0	0,998	67	0,018	3,43E-07	37
P09	25	61,3	0,992	86	0,044	1,04E-06	88
P08	50,1	7,1	0,997	1177	0,041	1,33E-05	175
P07	92,2	12,7	0,991	371	0,037	3,79E-06	220
P06	49,1	20,1	0,99	447	0,037	4,54E-06	249
P05	68,6	25,7	0,997	305	0,043	3,61E-06	273
P04	51,7	35,2	0,999	236	0,043	2,80E-06	273
Média	49,67	85,52	0,995	321,1	0,036	3,62E-06	

A densidade do fluxo dos piezômetros à margem esquerda (P12) e à direita (P11) do igarapé Açú mostrou ter menor velocidade, contingente a fatores fisiológicos, por se tratar de uma área de baixio com solos hidromórficos, passível de obstrução exercida pela resistência friccional entre área de declive e área plana. As propriedades hidráulicas e geológicas do solo moderam a velocidade do fluxo de água subterrânea em direção ao igarapé (Celligoi et al., 2001; Leão et al., 2006).

Oliveira et al. (2021) compreendeu que a Ksat é uma propriedade essencial no transporte de água em direção aos aquíferos, de extrema variabilidade mesmo considerando-se locais muito próximos. Alcançou-se a mesma observação dos resultados entre os piezômetros na microbacia do igarapé Asú.

Flutuações do fluxo de base

O nível do igarapé Açú variou de 0,2 m a 0,81 m entre 2002 e 2019 (Figura 8).

A recuperação do nível de águas superficiais e subsuperficiais inicia-se no começo da estação chuvosa, durante a recarga direta da precipitação para o aquífero, enquanto o rebaixamento do nível ocorre no período de menor precipitação.

Por conseguinte, a resposta das flutuações do nível na microbacia, diante da recarga, dependerá das condições iniciais de umidade no solo e precipitações acumuladas, e do efeito de memória no sistema de águas subterrâneas que transporta anomalias climáticas de um ano para o outro (Tomasella et al., 2008).

Notou-se que a velocidade do fluxo subterrâneo variou coincidente à sazonalidade da pluviosidade local, onde a velocidade de vazão média do igarapé atingiu média de 1,67E-01 m/s; e

a densidade de fluxo de água subterrânea de 2003 a 2019 foi de 3,62E-06 m/s.

Os resultados de q, na zona saturada, mostraram que o P08 teve maior valor de 1,33E-05 m/s e menores no P10 (3,43E-07 m/s) e P11 (1,11E-07 m/s). Nos demais piezômetros q seguiu-se a mesma ordem de magnitude.

Ademais, a dificuldade na estimativa do q reside na determinação da K, tanto saturado como não saturado, com a mudança na direção da água no solo (Pauleto et al., 1988). No baixio, os valores de Ksat e I foram menores (P12 e P11) e altos em áreas mais distantes ao igarapé Açú, esse fato se dá contingente ao fluxo escoar-se livre de altas a baixas altitudes e variáveis à velocidade.

Este resultado assemelha-se ao obtido por Brito (2014) no Igarapé da Onça, na Reserva Florestal Adolpho Duke, velocidade de 1,30E-7 m/s, sendo um valor baixo, esperado de fluxo subterrâneo em comparação à velocidade da água de sistemas hídricos superficiais. Tal característica auxilia na compreensão de como os rios e igarapés mantêm o fluxo de água perene em alguns ambientes, ou seja, com densidade de fluxo subterrâneo menor, o tempo de transporte de água é mais lento em direção à zona hiporréica (Boano et al, 2014).

O fluxo de base de 2003 a 2019 comparado ano a ano mostrou que não há mudanças significativas na velocidade de água subterrânea transportada da encosta ao baixio, mesmo em anos com eventos interanuais extremos. Quando de eventos sucessivos idênticos a estrutura do solo não se modifica, improvável ocorrência de mudanças elevadas da velocidade do fluxo subterrâneo.

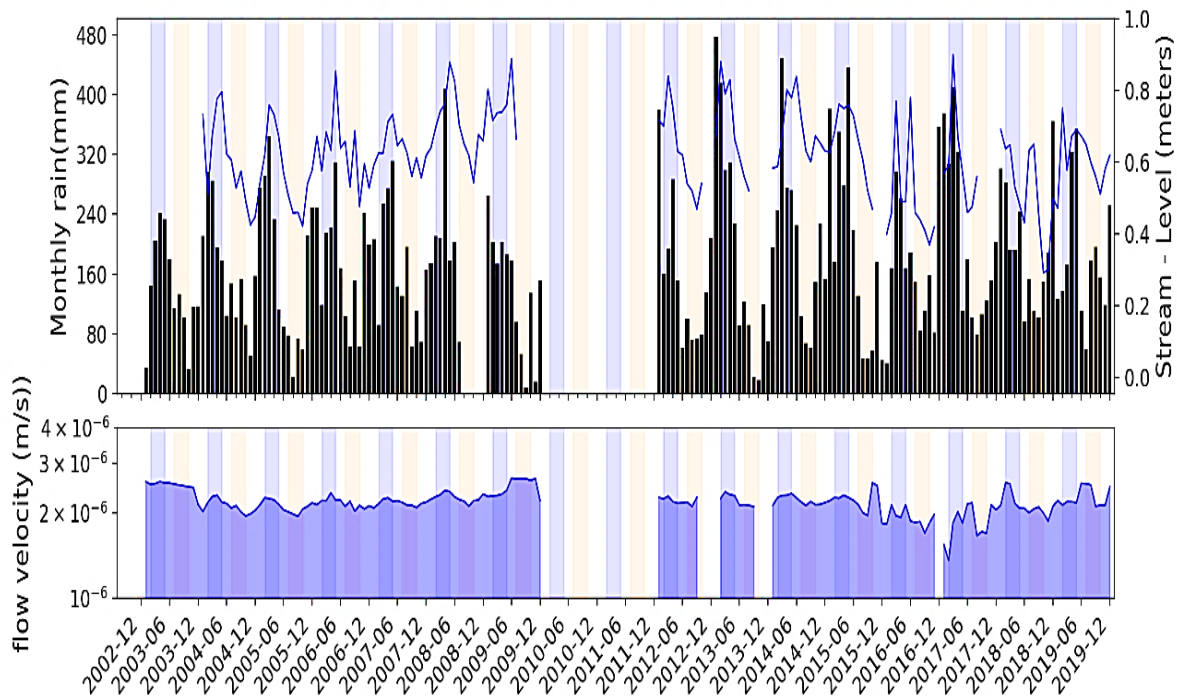


Figura 8: Fluxo de base para o período de 2003 a 2

Conclusão

O sistema de análise interanual da série histórica dos níveis de piezômetros, realizado em uma área transversal da microbacia do igarapé Asú, corresponde ao estudo do comportamento sazonal do fluxo subterrâneo, em que o nível piezométrico local, diante da sazonalidade pluviométrica em anos atípicos, demonstrou rebaixamento pouco expressivo, o que indica que podem existir áreas na Amazônia com alta capacidade de resistência às variações climáticas e manter o nível freático em eventos de seca de alta intensidade.

De acordo com as observações comparativas, em área de platô, encosta e baixio, entre os anos de 2002 e 2022, constatou-se que as flutuações do nível freático se comportam de natureza análoga às elevações e rebaixamentos de nível, a depender dos eventos pluviométricos. No entanto, ressalva-se que o nível freático no platô tende a ser mais lento, entre os níveis topográficos, o que permite conservar por mais tempo, o nível subterrâneo de alta a baixa altitude, e explorar água para o igarapé ao longo do ano.

Em relação às condições hidrogeológicas, a condutividade hidráulica auferida na Zona Saturada, novo parâmetro local experimental, em cada piezômetro monitorado, mostrou valores gradativos em direção ao igarapé, sendo maiores a condutividade saturada na encosta e menores no baixio.

A condutividade hidráulica saturada, como também o fluxo de base, são parâmetros essenciais para compreender o comportamento do nível freático referente ao tempo de circulação de água no solo. Ressalta-se que a densidade do fluxo de base local não demonstrou variação sazonal significativa no período de 2002 a 2019, e apresentou valores médios de 2×10^{-6} m/s a 3×10^{-6} m/s.

A escassez de informações sobre variação do nível freático, da pluviosidade e dado hidrogeológicos tem como implicações privação de conhecimentos da contribuição da água nos aquíferos a contaminação de poluentes pela infiltração e a capacidade de extração excessivo de água, que pode resultar no rebaixamento significativo do lençol freático, afetam corpos hídricos e a vegetação diante de fatores naturais e antropogênicos.

Para ampliar o conhecimento dos processos hidrogeológicos na Amazônia, em diferentes sub-regiões, em áreas naturais e urbanas, sugere-se implementar estudos continuados e permanentes que caracterizem sobretudo os processos hidrodinâmicas em ecossistema amazônico, alcancem parâmetros essenciais na elaboração de modelos hidrológicos e formentem pesquisas e projetos ambientais.

Agradecimentos

O artigo procedeu de fontes de dados extraídos da dissertação de mestrado realizado em 2019 pelo autor e pesquisador do INPA e dados atuais de

2020 a 2022 do banco de dados do INPA; do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&DI) "IETÉ", ora financiado pela Samsung em parceria com o INPA, sob recursos da Lei de Informática para a Amazônia Ocidental (Lei Federal nº 8.387/1991), editado no artigo 39.º do Decreto nº 10.521/2020".

Ao apoio recebido no âmbito do projeto "Influências Antrópicas em Compartimentos do Ciclo Hidrológico em Micro-Bacias da Amazônia Central – Uma Análise a partir do Uso de Múltiplos Traçadores", Programa FAPESP-FAPEAM, Edital: CHAMADA PÚBLICA N. 001/2020.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM pela oportunidade na qualificação científica, apoio logístico, material técnico e de consumo para o desenvolvimento das pesquisas.

Ao Programa de Grande Escala Biosfera-Atmosfera (LBA), coordenado pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), pela utilização e disponibilização de dados, apoio logístico e infraestrutura durante as atividades de campo.

A Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMMAS), por permitir a entrada no Refúgio da Vida Silvestre Sauim Castanheiras para coleta de amostras de água.

Ao apoio do projeto The Next Generation Ecosystem Experiments-Tropics (Ngee-Tropics), financiado pelo Departamento de Energia dos EUA, Escritório de Ciência, Escritório de Pesquisa Biológica e Ambiental pelo fornecimento de sensores automáticos de medições de nível freático.

Referências

Aguiar, C. J. B., 2002. Carta Hidrogeológica da cidade de Manaus. Manaus: CPRM. 8 p. Acesso: 20 set. 2022.

Almeida, A., Maciel, D. F., Souza, K. F., Nascimento, C. T. C., Koide, S., 2021. Vertical Electrical Sounding (VES) for Estimation of Hydraulic Parameters in the Porous Aquifer. *Water*, 13, 170. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w13020170>. Acesso: 15 jun. 2023.

Ameli, A. A., McDonnell, J. J., Bishop, K., 2016. The exponential decline in saturated hydraulic conductivity with depth: a novel method for exploring its effect on water flow paths and transit time distribution. *Hydrological processes*. Disponível: <https://doi.org/10.1002/hyp.10777>. Acesso: 25 ago. 2022.

Barros, V. S., Gomes, V. K. I., Júnior, I. B. S., Silva, A. S. V., Silva, A. S. A., Bejan, L. B., Stosic, T.,

2021. Análise de tendência do índice de precipitação padronizado em Recife-PE. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 8, e52310817458. Disponível: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17458>. Acesso: 12 jun. 2023.

Bravard, S. e Righi, D., 1989. Geochemical differences in Oxisol-Sopodsol toposequence of Amazônia, Brazil. *Catena*, 44: 29-42. Acesso: 25 ago. 2022.

Bravard, S. e Righi, D., 1990. Podzols in Amazonia. *Catena*. 17: 461- 475. Acesso: 25 ago. 2022.

Broedel, E., Tomasella, J., Cândido, L. A., Ranow, L. A., 2017. Deep soil water dynamics in an undisturbed primary forest in central Amazonia: Differences between normal years and the 2005 drought. *Hydrology Processes*. Vol. 31, Iss: 9, p. 1759. Disponível: <https://doi.org/10.1002/hyp.11143>. Acesso: 27 ago. 2022.

Brito, A. P., 2014. Elaboração de modelo numérico de fluxo de água subterrânea para uma microbacia de água clara na reserva florestal Adolpho Duke, Manaus-AM. Dissertação (Mestrado). Instituto de Ciências Exatas Programa de Pós-graduação em Geociências/Universidade Federal do Amazonas, Manaus-AM. 129pp. Disponível: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4673>. Acesso: 28 ago. 2022.

Brito, A. P., Wahnfried, I. D., Ferreira, S. J. F., Bastos, J. H. b., 2021. Análise comparativa entre métodos de estimativa de recarga para uma microbacia na Reserva Florestal Adolpho Ducke, Manaus-AM. *Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 5-73, setembro, 2021. Disponível: <https://doi.org/10.11606/issn.23169095.v21-154769>. Acesso: 8 jun. 2023.

Boano, F., Harvey, J.W., Marion, A., Packman, A.I., Revelli, R., Ridolfi, L., Worman, A., 2014. Hyporheicflow and transport processes: Mechanisms, models, and biogeochemical implications. *Geophys.*, v. 52, p. 603-679. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2012RG000417>. Acesso: 29 ago. 2022.

Butler, J. J., C. D. McElwee, and Z. Hyder., 1997. Slug tests in unconfined aquifers. Kansas Geological Survey, University of Kansas. Rpt. No. G2020-06. 67pp. Disponível: https://scholarworks.wmich.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1702&context=masters_theses. Acesso: 12 jun. 2023.

Carneiro, V. M. C., 2004. Composição florística e análise estrutural da floresta primária de terra firme na bacia do rio cuieiras, Manaus-AM. Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de

- Pesquisas da Amazônia/Universidade Estadual do Amazonas, Manaus-AM. Disponível: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/12736>. 77 pp. Acesso: 2 set. 2022.
- Carvalho, A. M., Freitas, L. G., Barbosa, A. M. Determining the hydraulic conductivity of a contaminated area in São Paulo using Slug Test Method. *Águas Subterrâneas* (2013) 27(3): 71-87. Disponível: <https://doi.org/10.14295/ras.v27i3.27394>. Acesso: 13 jun. 2023.
- Camargo, M.N. & Falesi, I.C., 1975. Soils of the Central Plateau and Transamazonica Highway of Brazil. *Soil Management in Tropical American* (eds. E. Bornemiza & A. Alvarado), pp.123-156. North Carolina State University, Raleigh. Disponível: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19766712804>. Acesso: 5 set. 2022.
- Celligoi, A., Santos, M. M., Viana, T. R., 2001. Análise e Interpretação do Gradiente Hidráulico do Aquífero Freático em uma Área na Região Sul de Londrina-Pr. *Geografia, Londrina*, v. 10, n. 1, p. 79-87, jan./jun. Disponível: <https://doi.org/10.5433/24471747.2001v10n1p79>. Acesso: 6 set. 2022.
- Chauvel, A., 1982. Os latossolos amarelos, álicos, argilosos dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha. Disponível: <https://doi.org/10.1590/180943921982123S047Acta Amazonica>, 12(3): 47-60. Acesso: 5 set. 2022.
- Chauvel, A., Lucas, Y., Boulet, R., 1987. On the genesis of the soilmantle of the region of Manaus-AM, Central Amazonia. Brazil. *Experientia*, 43:234241. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF0945546>. Acesso: 08 set. 2022.
- Correla, L. C. C., Júnior, G. C., 2021. Estimativa da recarga de água subterrânea utilizando o método WTF na porção continental da Bacia Sedimentar de Campos, Rio de Janeiro, Brasil. *Correia, L. C. et al. Águas Subterrâneas-Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas*. Disponível: <http://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30079>. Acesso: 9 jun. 2023.
- Farjado, J. D. V., Ferreira, S. J. F., Miranda, S. A., F., Filho, A. O. M., 2010. Características hidrológicas do solo saturado na reserva florestal Adolpho Ducke-Amazônia Central. *Árvore*, 34(4):677684. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S010067622010000400012>. Acesso: 12 set. 2022.
- Ferraz, F. M., Miyashiro, N. J., Riyis, M. T., Cunha, R. C. A., 2015. Study of hydraulic conductivity obtained in field tests: infiltration in percussion drills and slug test in monitoring wells. *InterfacEHS*, 10(1): 66-87. Disponível: <http://www3.sp.senac.br/hotsites/blogs/InterfacEHS/>. Acesso: 13 set. 2022.
- Ferreira, E. A., Maia, J. C. S., Bianchini, A., Vaz, B. K. M., Kerhoff, P. H. A., 2022. Condutividade hidráulica de um Latossolo em diferentes sistemas de uso e manejo do solo. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, e384111638010. Disponível: <http://dx.doi.org/10.33448/rsdv11i16.38010>. Acesso: 10 jun. 2023.
- Freeze, R. A & Cherry, J. A, 2017. Água subterrânea, a Terra e o Homem. Edição Instituto Água Sustentável. *Água Subterrânea*, Vol.2, p. 1-12. Acesso: 25 set. 2022.
- Galvão, P., Demétrio, J. G. A., Souza, E. L., Baessa, M. M., 2013. Modelagem Numérica do Sistema Aquífero Içá-Solimões para Fins de Disponibilidade e Demanda Hídrica da Província Petrolífera de Urucu, Amazonas, Brasil. *Águas Subterrâneas*, v. 37, n. 3, e30216. Disponível: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30216>. Acesso: 12 jun. 2023.
- Guillaumet, J. L., 1987. Some structural and floristic aspect of the forest. *Experientia*. 43(3): 241251. Disponível: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01945547.pdf>. Acesso: 25 set. 2022.
- Heath, Ralph C., 2004. Hidrologia básica das águas subterrâneas. Vol. 2220. US Geological Survey. Disponível: <https://doi.org/10.3133/wsp2220>. Acesso: 21 set. 2021.
- Higuchi, N., Santos, J. dos, Vieira, G., Ribeiro, R.J., Sakurai, S., Ishizuka, M., Sakai, T., Tanaka, N., Saito, S., 1998. Análise estrutural da floresta primária da bacia do rio Cuieiras, ZF2, Manaus-AM, Brasil. In: Higuchi, N., Campos, M. A. A., Sampaio, P. T. B., Santos, J. dos (Eds). *Pesquisas florestais para a conservação da floresta e reabilitação de áreas degradadas da Amazônia*. INPA, Manaus-AM. 5081. Disponível: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/34297>. Acesso: 26 set. 2022.
- Hvorslev, H. J., 1951. Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations. U.S. Army. Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Bulletin n. 36, 50 pp. Disponível: <https://health.hawaii.gov/heer/files/2021/07/Hvorslev1951.pdf>. Acesso: 27 set. 2022.
- IBGE., 2011. Amazônia concentra 45% da água subterrânea potável. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível: <https://www.globo.com>. Acesso: 20/6/2019.
- Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmes, M., 2007. Measuring methods for groundwater-surface

- water interactions: a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 873–887. Disponível: <https://doi.org/10.5194/hess-10-873-2006>. Acesso: 28 set. 2022.
- Leão, L. M. & Tancredi, A. C. F. N. S., 2006. Aspectos hidrodinâmicos do aquífero livre da microbacia do Cumaru, Igarapé–Açú/PA. *Águas Subterrâneas*. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterranea/s/article/view/22178>. Acesso: 20 nov. 2021.
- Lucas, Y, Chauvel, A., Boulet, R., Ranzani, G., Scatolini, F., 1984. Transição Latossolos–Podzóis sobre a formação barreira na Região de Manaus. *Revista Brasileira da Ciência do Solo*, Campinas. 8:325–335. Disponível: <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/23D00010.pdf>. Acesso: 2 out. 2022.
- Marengo, J. A and Tomasella, J., 2008. The Drought of Amazonia in 2005. *American Meteorological Society*, Vol.: 21, p. 22. Disponível: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/21/3/2007jcli1600.1.xml>. Acesso: 2 out. 2022.
- Marengo, J. A, Tomasella J, Alves LM, Soares WR, Rodriguez DA., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys Res Lett* 38: L12703. Disponível: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi.org/10.1029/2011GL047436>. Acesso: 4 out. 2022.
- Meyer, A. F., 2016. *The Elements of Hydrology*. USA: Parceiros de mídia criativa, LLC, 2016. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1919\)47<307a:EOH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1919)47<307a:EOH>2.0.CO;2), p.307. Acesso: 20 out. 2022.
- Miranda, J. S. N., 2017. *Caracterização da vulnerabilidade intrínseca do aquífero alter do chão na cidade de Manaus–AM*. Dissertação (Mestrado) em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, 130pp. Disponível: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/17638>. Acesso: 4 out. 2022.
- Nogueira, G. E. H., Gonçalves, R. D., 2021. Droundwater recharge in phreatic aquifers, a case study: modeling unsaturated zone and recharge rates of the Rio Claro aquifer usinghydrus1d. *Holos Environment*, 21 (3): 402422. Disponível: <http://doi.org/10.14295/holos.v21i3.12455>Acesso: 09 jun. 2023.
- Oliva, A., Kiang, C. H., Caetano-Chang, M. R., 2005. Determination of the hydraulic conductivity of the Rio Claro formation: comparative analysis through grain size analyses and Guelph permeameter and slug tests. *Águas Subterrâneas*, 19 (2): 1-17. Disponível: <https://www.researchgate.net/publication/276378514>. Acesso: 5 out. 2022.
- Oliveira, G. N. R., Campos, J. E. G., Gomes, A. W., Moura, F. G., 2021. Caracterização Hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 36700. Disponível: https://doi.org/10.11137/19823908_2021_44_36700 Acesso: 11 jun. 2023.
- Oliveira., J., D., Souza., C., A., Galbiati., C., Sousa., J., B., 2022. Componentes ambientais e hidrodinâmica na bacia hidrográfica do Rio Branco, contribuinte do Pantanal Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Geografia Física* v. 15, n. 01. *Revista Brasileira de Geografia Física* v. 15, n. 01 (2022) 465–486. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>. Acesso: 14 jun. 2023.
- Oliveira, M. E. D., G, D., Sacchi, M. D., Rocha, R. E., Lima, C., Santos, V., 2021. Determining a composite value for the saturated hydraulic conductivity in a recharge area of the Guarani Aquifer System, using pedotransfer functions. Disponível: <https://doi.org/10.1590/23180331.262120210045>. RBRH, Porto Alegre, v. 26, e35. Acesso: 09 de jun. 2023.
- ONI - El Niño and La Niña years intensities, 2021. Disponível: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso: 09 de jun. 2023.
- Pasini, F., Mancuso, M. A., Fortes, P. R., Breunig, F. M., Fritzen, R. R., 2022. Recarga de aquífero em Floresta Estacional Decidual nativa, Parque Estadual do Turvo (RS). *Ci. Fl.*, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 206232, jan./mar. Disponível: <https://doi.org/10.5902/1980509847112>. Acesso: 10 jun. 2023.
- Pauletto, E.A., Libardi, P.L., Manfron, P.A. & MORAES, S.O., 1988. Determinação da condutividade hidráulica a partir da curva de retenção de água. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:189–195. Disponível: <https://doi.org/10.11606/T.11.1986.tde-20210104-164928>. Acesso: 9 out. 2022.
- Petri, S., Fúlfaro, V. J., 1988. *Geologia do Brasil: Fanerozóico*. EDUSP, São Paulo: V. 9, 631pp. Disponível: <https://www.amazon.de/-/en/S-V-J-FULFARO-PETRI/dp/8585008814>.
- Pita, R. C. S. et al., 2018. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeológicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 27-296, março. Disponível: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-134253>. Acesso: 10 out. 2022.

- Richter, D. D. & Babbar, L. I., 1991. Soil diversity in the tropics. *Advances in Ecological Research* 21,315381. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60100-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60100-2). Acesso: 10 out. 2022.
- Saraiva, M. A., 2015. Evolução do nível de água do Aquífero Alter do Chão no município de Manaus, Amazonas, ao longo de quatro décadas. 1 v. TCC (Graduação) – Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus–AM. Acesso: 20 dez. 2021.
- Sanchez, P. A., 1976. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. Willey and Sons, New York. Disponível: <https://www.cambridge.org/core/books/properties-and-management-fsoils-inthetropics/1247CD9DA3CE918D8C364317617C1E87>. Acesso: 11 out. 2022.
- Silva, J. V. S., Santos, I. F. S., Botan, M. C. O., 2021. Caracterização dos poços de águas subterrâneas no triângulo mineiro: estudo dos aspectos construtivos, hidrodinâmicos e energéticos. *Ibero-American Journal of Environmental Sciences*. Disponível: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0023>. Acesso: 12 jun. 2023.
- Souza, A. M. P., Santos, I. I., Oliveira, L. L., 2021. A relação da chuva com a recarga de água em uma nascente urbana em Santarém–PA, Amazônia, Brasil. Disponível: <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2021.003.0007> – v. 14 – n. 3. Acesso: 07 jun. 2023.
- Souza, W. A. R., Pereira, S. A. S., Mendes, T. A., Costa, R. F., Junior, G. F. N. G., Rebolledo, J. F. R., 2022. Statistical evaluation of testing conditions on the saturated hydraulic conductivity of Brazilian lateritic soils using artificial intelligence approaches. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24779-1>. Scientific Reports. Acesso: 10 jun. 2023.
- Tomasella, J., Borma, L. S., Marengo, J. A., Rodriguez, D. A., Cuartas, L. A., Carlos, A. Prado, M. C. R., 2008. The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem, *Hydrological Processes*, 22, p. 2133–2147. Disponível: <https://doi.org/10.1002/hyp.7889>. Acesso: 18 out. 2022.
- Wakode, H. B., Baier, K., Jha, R., Azzam, R., 2018. Impact of urbanization on groundwater recharge and urban water balance for the city of Hyderabad, India. *International Soil and Water Conservation Research* 6, 51–62. Contents lists available at Science Direct. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.10.003>. Acesso: 1 nov. 2021.
- Zhao, Y., Wang, H., Lv, P., Dong, X., Huang, Y., Wang, j., Yang, Y., 2022. Theoretical Model and Experimental Research on Determining Aquifer Permeability Coefficients by Slug Test under the Influence of Positive Well–Skin Effect. *Water*. 14, 3089. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w14193089>. Acesso: 07 jun. 2023.
- Wahnfried, I. Soares, E. A. A., 2012. *Água Subterrânea na Amazônia: Importância, Estado Atual do Conhecimento e Estratégias de Pesquisa*. Disponível: <https://docplayer.com.br/16107992>. Acesso: 5 nov. 2021.