

TESTES DE BOMBEAMENTO E TRAÇADOR PARA DETERMINAR CONFINAMENTO E PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO AQUIFERO ALTER DO CHÃO EM MANAUS

PUMPING AND TRACER TESTS TO DETERMINE CONFINEMENT AND HYDRAULIC PARAMETERS OF THE ALTER DO CHÃO AQUIFER IN MANAUS

Yasmin Braga Barreto GIRARD, Ingo Daniel WAHNFRIED, Pedro Henrique Dias TRINDADE

Universidade Federal do Amazonas. Departamento de Geociências. Avenida General Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 1200 - Coroado I, Manaus – AM.

E-mails: yasminbragabarreto@gmail.com; iwahnfried@ufam.edu.br; pedro_henrique.trindade@hotmail.com

Introdução

Localização, contexto geológico e hidrogeológico

Materiais e métodos

Campo experimental de poços

Execução e interpretação do teste de bombeamento

Penetração total do poço de bombeamento na camada bombeada

Curvas derivativas

Teste com traçador

Execução do teste com traçador

Calibração e leitura de concentração de traçador nas amostras

Resultados e discussão

Tipo de aquífero

Teste de bombeamento com vazão constante

Teste com traçador

Conclusões

Agradecimentos

Referências

RESUMO - Em Manaus existem aproximadamente 27.000 poços. Não há números precisos sobre o uso da água subterrânea, visto que o processo de outorga de poços começou há apenas sete anos, mas o forte rebaixamento do nível de água em algumas áreas da cidade indica que ele é intenso. Em termos de vulnerabilidade à contaminação na região urbana do município, há predominância de vulnerabilidade intrínseca baixa a moderada leve, causada principalmente pela presença de argila nas zonas não-saturada e saturada. Apesar da importância destas litologias na definição da recarga, acesso de contaminantes e características hidráulicas do aquífero, não há dados de testes para definir o grau de confinamento que estas geram no AAC. Neste trabalho foram utilizados teste de bombeamento de vazão constante e teste com traçador para determinar os parâmetros hidráulicos deste aquífero. Os resultados mostram que o AAC é totalmente confinado no local do teste, possui condutividade hidráulica de $3,1 \times 10^{-5}$ m/s, coeficiente de armazenamento de $5,4 \times 10^{-5}$ (adimensional), transmissividade de $8,0 \times 10^{-4}$ m²/s, porosidade efetiva de 9,9%, dispersividade longitudinal de 1,2 m, e coeficiente de retardação de 1,2 (adimensional). A velocidade real média da água subterrânea foi de $1,3 \times 10^{-5}$ m/s, e a constante de decaimento do traçador de $1,3 \times 10^{-6}$ 1/s.

Palavras-chave: Aquífero confinado. Parâmetros hidráulicos. Teste de bombeamento. Teste com traçador.

ABSTRACT - In Manaus there are approximately 27.000 wells. There are no precise numbers on the use of groundwater, since the process of granting wells began only seven years ago, but the sharp lowering of the water level in some areas of the city indicates that it is intense. In terms of vulnerability to contamination in the urban region of the municipality, there is a predominance of low to moderate light intrinsic vulnerability, mainly caused by the presence of clay in the unsaturated and saturated zones. Despite the importance of these lithologies in defining recharge, contaminant access and hydraulic characteristics of the aquifer, there is no test data to define the degree of confinement they generate in the AAC. In this work, a constant flow pumping test and a tracer test were used to determine the hydraulic parameters of this aquifer. The results show that the AAC is completely confined in the test site, has a hydraulic conductivity of $3,1 \times 10^{-5}$ m/s, storage coefficient of $5,4 \times 10^{-5}$ (dimensionless), transmissivity of $8,0 \times 10^{-4}$ m²/s, effective porosity of 9,9%, longitudinal dispersivity of 1,2 m, and retardation coefficient of 1,2 (dimensionless). The average real groundwater velocity was $1,3 \times 10^{-5}$ m/s, and the tracer decay constant was $1,3 \times 10^{-6}$ 1/s.

Keywords: Confined aquifer. Hydraulic parameters. Pumping test. Test with tracer.

INTRODUÇÃO

O Aquífero Alter do Chão (AAC) é um elemento chave no abastecimento de água na cidade de Manaus. Levantamento feito em São José do Rio Preto, interior de São Paulo, indicou que do total de 2.000 poços existentes, apenas 360 (18%) estavam outorgados (Instituto Geológico, 2011). Considerando proporção semelhante

para Manaus, e o número de poços registrados de 4.793 (CPRM, 2022), o número total de poços existentes no município pode ser de aproximadamente 27.000 poços. ANA (2021) estima que o número de poços cadastrado no SIAGAS representa apenas 12,7% do número total, o que sugere a existência de 38.000 poços em Manaus.

Segundo informações verbais fornecidas pela empresa Águas de Manaus – AEGEA, atual concessionária de abastecimento público, indicam que aproximadamente 10% do volume captado vêm do AAC. Por outro lado, existe intensa pressão de contaminação no aquífero: poços com deficiência construtiva, poços abandonados, atividades potencialmente poluidoras sem o devido controle ambiental, falta de sistema de coleta e tratamento de efluentes líquidos e águas superficiais contaminadas são algumas das situações mais importantes.

Costa et al. (2004) avaliaram a qualidade da água de 120 poços em seis bairros da zona urbana de Manaus: em 60,5% havia coliformes termotolerantes, e em 75% foi detectada a presença de coliformes totais. Concentrações fora dos padrões de potabilidade foram encontradas para ferro, amônia e nitrato. Costa et al. (2004) relacionaram estas ocorrências com a falta de saneamento (apenas 21,4% das residências estavam ligadas à rede de esgoto), proximidade poço-fossa inferior a 20 m e má construção dos poços.

Vasconcelos (2006) estudou a qualidade da água de 30 poços tubulares, nas épocas chuvosa e seca, identificando evidências de contaminação antrópica em algumas áreas. Dentre as variáveis que estavam alteradas estão os coliformes totais, fecais, e bactérias heterotróficas, condutividade elétrica e nitrato, provavelmente devido à proximidade com as fossas, bem como a pequena profundidade dos poços tubulares.

Portanto, uma etapa fundamental na gestão dos recursos hídricos subterrâneos é a proteção do AAC. Mas para que isto seja possível, é necessário conhecer os seus parâmetros hidráulicos, como condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento, porosidade efetiva e seu grau de confinamento.

Soares et al. (2016) descrevem na região de Manaus duas unidades aflorantes: a unidade superior, de idade miocena, denominada informalmente de Formação Novo Remanso, constituída principalmente por arenitos com intercalações restritas de pelitos, sotoposta pela Formação Alter do Chão, constituída predominantemente por arenitos com intercalações regulares e variadas de pelitos (argilitos e siltitos) e mais raramente a ocorrência de conglomerados, que definem descontinuidades laterais de interdigitação e lenticularização. A espessura individual das lentes varia, na média, de 5 a 10 m, por vezes atingindo cerca de 30 a 40 m. Soares et al. (2016) também iden-

tificaram intercalações restritas e descontínuas de paleossolos reliquiais silicificados de coloração vermelha mais intensa, com gretas de contração, bioturbação e *slickensides*.

Os autores determinaram uma espessura total da Formação Alter do Chão na área variando entre 120 e 180 m, com média aproximada de 150 m. Abaixo desta sequência, os autores descrevem a ocorrência de Formação Nova Olinda, composta por folhelho cinza carbonático, com laminação plano-paralela.

O predomínio da presença de areia na unidade miocena faz com que a porção superior do Aquífero Alter do Chão seja preponderantemente livre, conforme descrito por Aguiar (2002). Já em profundidades intermediárias, a partir de 30 m, aumenta a ocorrência de lentes pelíticas, que podem transformar o AAC em um sistema hidráulicamente confinado. De fato, Pita et al. (2018) separam uma porção rasa e livre e outra profunda e provavelmente confinada para o AAC a oeste de Manaus, com base na análise hidroquímica e isotópica da água. A extensão vertical, lateral e presença de fraturas nas lentes pelíticas vai definir o grau de confinamento das camadas profundas. A ocorrência de fraturas, por exemplo, foi descrita em vários trabalhos na região de Manaus (Araújo, 2013; De Palma, 2014), o que torna necessário executar ensaios específicos com o objetivo de determinar o grau de confinamento hidráulico. Testes de bombeamento de vazão constante permitem determinar se um aquífero é semi-confinado ou totalmente confinado (Kruseman & De Ridder, 1994), mas o ensaio deve ser executado em poço que possua filtro somente na camada de interesse, impedindo que a água de camadas superiores, livres, influenciem no resultado do teste. Poços construídos com o intuito de extrair grandes volumes de água normalmente possuem vários filtros, fazendo com que testes executados neles não gerem resultados adequados para determinar o grau de confinamento. O uso de poços de produção para a realização de testes de bombeamento normalmente não inclui o monitoramento do nível de água dinâmico em um piezômetro, ou outro poço que não esteja sendo bombeado, inserindo nos dados perdas não lineares de carga que não podem ser quantificadas.

Neste trabalho são apresentados os resultados de testes realizados no Campo de Ensaios Hidráulicos da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), localizado no campus de Manaus (Figura 1), com vistas a obtenção dos parâmetros hidráulicos e o

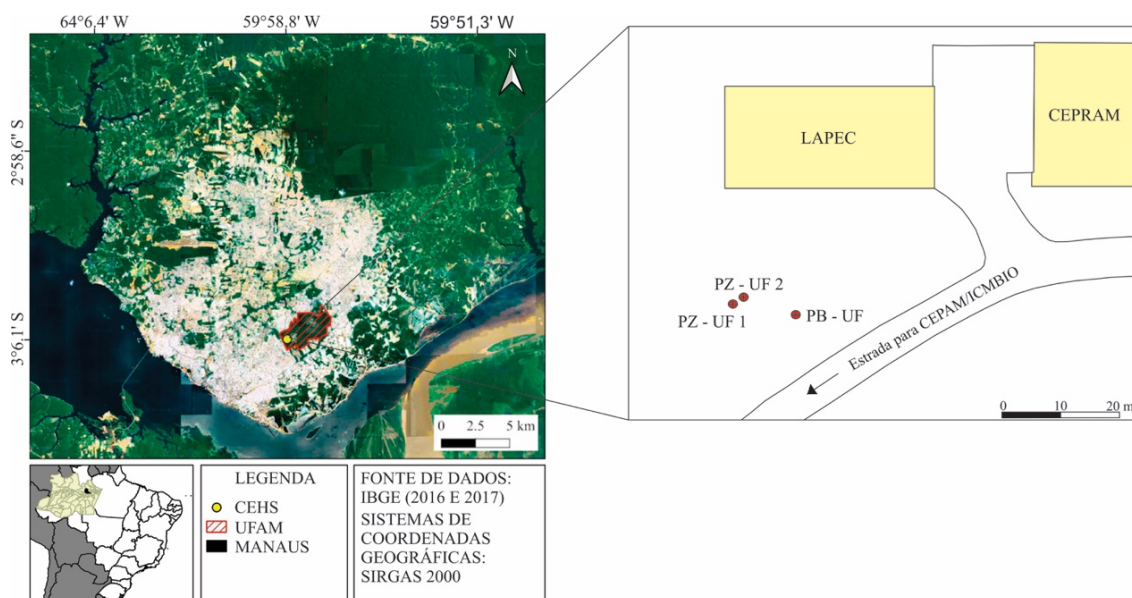


Figura 1 – Localização do poço de bombeamento (PB – UF) e piezômetros (PZ – UF 1 e PZ – UF 2) no Campo de Ensaios Hidráulicos Subterrâneos localizado no Setor Sul da Universidade Federal do Amazonas em Manaus/AM.

grau de confinamento de camadas aquíferas em profundidades intermediárias do AAC, buscando aprimorar informações para a gestão do abastecimento e da outorga na exploração do aquífero.

Localização, Contexto Geológico e Hidrogeológico

Na região compreendida entre Manaus e Itacoatiara Soares et al. (2016) descreveram a ocorrência de três unidades distintas que, pelos aspectos litológicos e posicionamento estratigráfico, foram associadas da base para o topo às formações Nova Olinda (Carbonífero Superior), Alter do Chão (Cretáceo) e Novo Remanso (Mioceno). A unidade inferior, que em geral ocorre a partir da cota de -130 m, é constituída principalmente por folhelhos. A unidade intermediária ocorre geralmente entre as cotas de 20 a -180 metros, sendo composta por intercalações de arenitos, pelitos e conglomerados. A unidade superior, presente na cota de -30 m até a superfície do terreno, é constituída principalmente por arenitos com intercalações restritas de pelitos. Na cidade de Manaus, a porção saturada e arenosa do AAC tem aproximadamente 160 m de extensão vertical, e ocupa toda a área da cidade, com aproximadamente 500 Km² (Aguiar, 2012). O Aquífero Alter do Chão ocupa área de aproximadamente 290.500 km (ANA, 2015), possui transmissividade igual a $1,3 \times 10^{-3}$ m²/s, condutividade hidráulica de $8,05 \times 10^{-6}$ m/s, porosidade efetiva 18%, inclinação (gradiente)

das águas da ordem de 0,002 e velocidade em torno de $2,31 \times 10^{-7}$ m/s (Aguiar, 2012).

De acordo com Aguiar (2012), o AAC possui reserva hídrica subterrânea estimada em 14,4 km³, no limite urbano, sendo a profundidade média do nível d'água de aproximadamente 30 metros. Segundo o autor, o AAC é predominantemente livre. As maiores profundidades estão nos setores sudeste e nordeste da cidade. Para oeste, o nível d'água torna-se mais raso, chegando a aflorar em alguns locais, como no setor noroeste, no bairro de Santa Etelvina. O fluxo principal das águas subterrâneas se dá de nordeste para sudoeste. A análise de transmissividade sugere que os maiores valores ocorrem nos setores sudoeste, norte e leste da cidade, e os menores na zona central (Aguiar, 2012). A taxa de recarga do aquífero é superior àquela observada em outras regiões do país, podendo ultrapassar 1500 mm por ano (Brito et al., 2021).

Utilizando o método DRASTIC (Aller et al., 1987), Miranda (2017) determinou que a vulnerabilidade intrínseca do AAC em Manaus é predominante baixa a moderada leve, determinada pelo nível de água com profundidades superiores a 15 m, presença de argila no solo e de camadas pelíticas na zona não saturada. Porém, mesmo com a baixa vulnerabilidade, o aquífero vem apresentando sinais preocupantes de contaminação (Aguiar, 2002; Costa et al., 2004; Vasconcelos, 2006; Santos, 2016).

MATERIAIS E MÉTODOS

Campo Experimental de Poços

Para a realização dos ensaios hidráulicos aqui

apresentados, foram construídos um poço de bombeamento (PB–UF1) e dois piezômetros (PZ–UF1

e PZ-UF2) (Figura 1), constituindo um Campo de Ensaio Hidráulicos Subterrâneos (CEHS), localizado no campus da UFAM – Universidade

Federal do Amazonas, em Manaus. As características construtivas do poço e piezômetros são apresentadas na tabela 1 e na figura 2.

Tabela 1 – Dados construtivos do poço de bombeamento e dos piezômetros. Todos os valores são apresentados em metros, e as profundidades usam como referência a superfície do terreno.

Poço/ Piezômetro	PB – UF	PZ – UF 1	PZ – UF 2
Prof. total	83	60	88
Prof. filtros	48 a 72	58 a 60	84 a 86
Extensão filtros	22	2	2
Ø furo	0,20	0,10	0,10
Ø revestimento	0,100	0,025	0,050
Prof. cimentação	0 a 20	0 a 20	0 a 20
Nível estático	26,0	26,0	59,5

PB – UF – Poço de bombeamento UFAM;

PZ – UF 1 – Piezômetro 1 UFAM;

PZ – UF 2 – Piezômetro 2 UFAM.

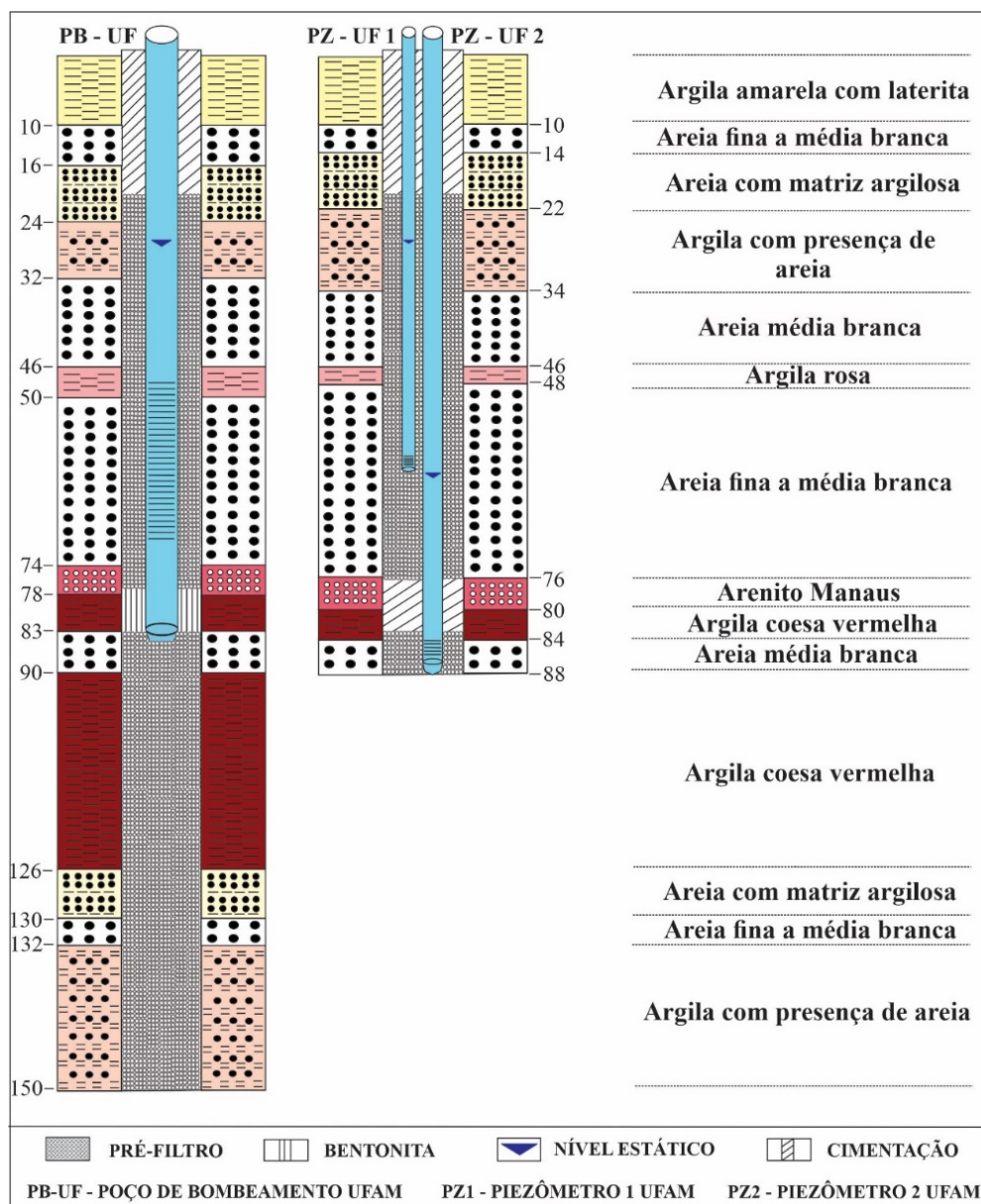


Figura 2 – Perfis construtivos e litológicos do PB-UF, PZ-UF1 e PZ-UF2. Todas as profundidades usam como referência a superfície do terreno, e se dão em metros.

Como o objetivo foi determinar os parâmetros hidráulicos e o grau de confinamento de camadas aquíferas em profundidades intermediárias do

AAC, o filtro do poço de bombeamento foi instalado em uma camada arenosa com espessura média de 22 m (49 a 71 m de profundidade), abaixo de

uma camada pelítica com espessura média de três metros. O filtro do piezômetro PZ-UF1 monitora a mesma camada arenosa bombeada pelo poço, com filtro instalado entre 58 e 60 m. O PZ-UF2 monitora uma camada arenosa existente abaixo de outra camada pelítica, para verificar a existência de renasça que pudesse ocorrer a partir da porção mais profunda do AAC (Figura 2). Houve a tentativa de instalar um piezômetro raso, mas o nível de água estático a 26 m estava muito profundo para ser alcançado com o trado mecanizado disponível.

Com filtros posicionados em camada arenosa presente na porção intermediária da Formação Alter do Chão (50 a 74 m de profundidade), sotoposta à camada de argila de 3 m de espessura média. Para verificar se a camada de argila permite a passagem vertical de água, e determinar os parâmetros hidráulicos da camada arenosa do AAC, foi realizado um teste de bombeamento com vazão constante e 180 h de duração.

Foi realizado monitoramento de nível de água no piezômetro PZ-UF1, com filtro a 60 m de profundidade, localizado a 9,6 m de distância horizontal do poço bombeado, PB-UF. Para determinar a velocidade real de um soluto na água, a porosidade efetiva e a dispersividade longitudinal, foi injetado o traçador fluorescente uranina no PZ-UF1, com coleta de amostras no poço PB-UF, em ensaio com duração total de 574 h.

Foi feito um levantamento bibliográfico para verificar a existência de testes com traçadores fluorescentes realizados na Amazônia brasileira, e nenhum foi encontrado (Apêndice 1). Ao todo, foram identificados dezenove trabalhos que utilizaram traçadores, dos quais dezoito foram realizados em aquíferos cársticos, e apenas um foi executado aquífero sedimentar, por Suhogusoff et al. (2005).

Execução e interpretação do teste de bombeamento

Foram realizados dois tipos de testes de bombeamento. O teste com vazão escalonada, com quatro etapas de vazões crescentes e duração de uma hora cada, totalizando quatro horas. Sua execução permitiu determinar a vazão ideal a ser utilizada no teste de vazão constante, e verificar o funcionamento de todos os equipamentos e procedimentos envolvidos.

Depois foi executado o teste de vazão constante, com duração de 180 horas. Em ambos foi utilizada uma bomba marca Ebara modelo BHS

232, com vazão mínima de 5 m³/h e máxima de 12 m³/h (respectivamente 1,4x10⁻³ a 3,3x10⁻³ m³/s), instalada 76 m de profundidade no poço PB-UF.

O tempo de bombeamento foi medido utilizando cronômetro digital simples, e o nível de água foi medido manualmente com um medidor elétrico da marca Hidrosuprimentos, modelo HSNA-100, que permite leituras com precisão de 2,5 mm. Para a medição de vazão foram utilizados três métodos: tambor com volume conhecido, tubo de orifício calibrado, e hidrômetro. Antes do início de ambos os testes, foi medido o nível de água estático do poço, obtido antes do acionamento, e pelo menos 12 h após o fim do teste anterior.

A interpretação dos dados do teste de vazão constante foi realizada em duas etapas: 1) determinação do tipo de aquífero (livre, semi-confinado ou confinado), para que seja então feita 2) a aplicação do método mais adequado para calcular os parâmetros hidráulicos. A etapa 1) foi feita plotando o rebaixamento em função de tempo, com o primeiro em escala linear e o segundo em escala logarítmica. A forma do gráfico resultante permite identificar o tipo de aquífero presente em termos de confinamento (Kruseman & de Ridder, 1994) (Figura 3). Com base nesta comparação, foi selecionado o método adequado de interpretação dos dados do teste de bombeamento com vazão constante. A interpretação do teste foi feita como o software AQTESOLV (HydroSOLVE, 1989).

O resultado é fundamental para selecionar o método a ser utilizado no cálculo dos parâmetros hidráulicos do aquífero.

Penetração Total do Poço de Bombeamento na Camada Bombeada

A camada bombeada possui espessura média de 24 m no local do poço de bombeamento P1, e 28 m no ponto onde está o poço de monitoramento PZ1. Os filtros do P1 se estendem por 22 metros dentro desta camada, o que permite assumir que o poço é totalmente penetrante, com fluxo de água predominantemente radial e horizontal, sem componente vertical significativo.

Curvas Derivativas

Dados de rebaixamento de água em função de tempo obtidos durante testes de bombeamento nem sempre permitem uma identificação inequívoca dos diferentes tipos de aquífero. As curvas derivativas, que utilizam os valores da derivada do rebaixamento e do logaritmo natural do tempo, apresentam diferenças significativas.

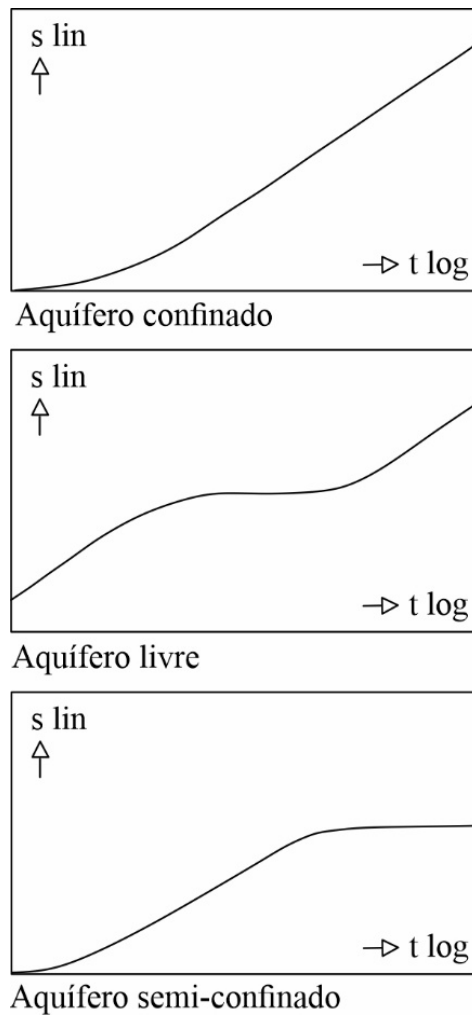


Figura 3 – Curvas diagnósticas para cada tipo de aquífero, termos de grau de confinamento. (Kruseman & de Ridder, 1994).

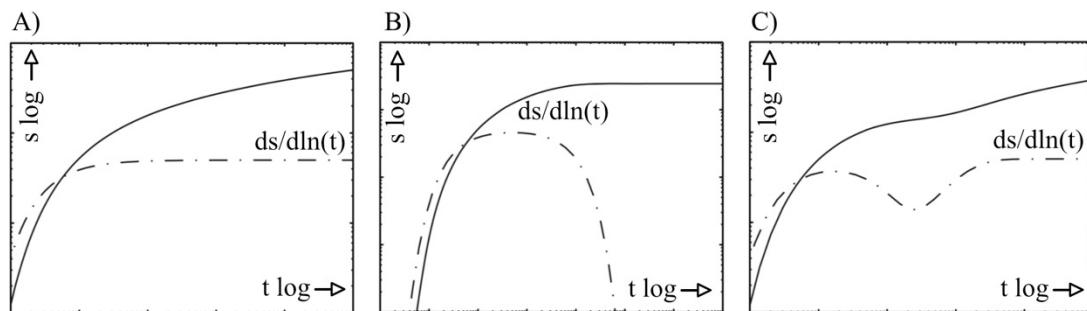


Figura 4 – Exemplos de gráficos compostos pelas curvas-tipo de rebaixamento (s) em função de tempo (t) em escala bilogarítmica (linhas contínuas) para aquífero confinado (A), aquífero semiconfinado (B) e aquífero livre (C), e respectivas curvas derivativas (linhas tracejadas) (Renard et al., 2009).

Na figura 4 são apresentados os gráficos de Renard et al (2009) para identificar graus de confinamento de aquíferos para aquífero confinado (A), aquífero semiconfinado (B) e aquífero livre (C). As respectivas curvas-tipo são projetadas nas linhas contínuas, e suas derivativas nas linhas tracejadas. Mesmo com dados reais, as diferenças entre tipos de aquíferos podem ser claramente visualizadas.

Teste com traçador

Traçadores são compostos ou energia utilizados para determinar a velocidade real da água,

porosidade, dispersividade hidráulica, coeficiente de retardamento e de degradação (Davis, 1980; Gutierrez et al., 2013). A interpretação de um teste com traçador consiste em deduzir parâmetros da evolução da sua concentração ao longo do tempo, em um ponto de observação localizado a certa distância do ponto de injeção no aquífero (Gutierrez et al., 2013). Entre os traçadores artificiais, os fluorescentes são relevantes por causa de seu manuseio relativamente fácil, da análise simples dos resultados, e da pequena quantidade de traçador necessária em expe-

rimentos de campo (Leibundgut et al., 2009).

O ensaio realizado consistiu na injeção instantânea do traçador uranina no piezômetro PZ-UF 1, enquanto uma vazão constante era bombeada no poço PB-1, com o nível de água quase estabilizado por conta de bombeamento prévio de 96 h. Dadas as condições do teste, o

modelo matemático usado tanto na simulação prévia do ensaio quanto na interpretação dos resultados foi o de fluxo radial convergente, em que o traçador é injetado em um ponto do aquífero enquanto água é extraída de um outro ponto, induzindo fluxo não natural, em estado estacionário ou pseudo-estacionário (Figura 5).

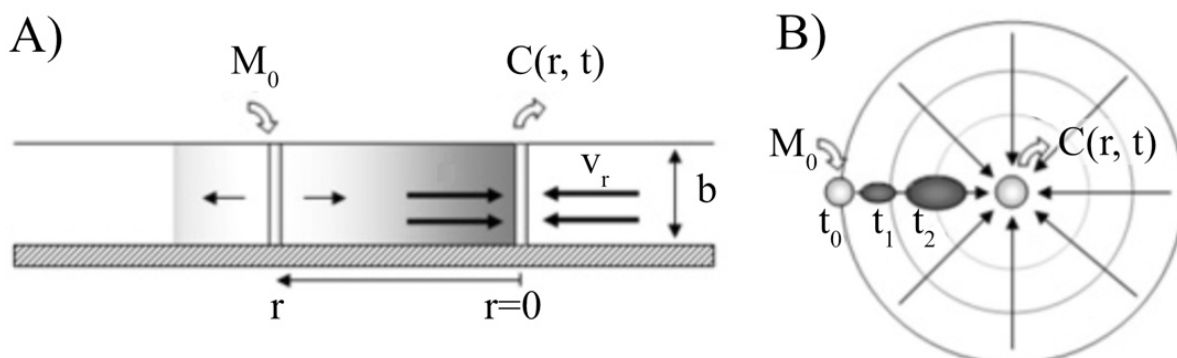


Figura 5 – Representação de execução de breve injeção de massa de traçador (M_0) em piezômetro localizado a uma distância r de poço em bombeamento, gerando fluxo convergente radial em aquífero de espessura b , e a concentração do traçador na água variando em função de distância e tempo, $C(r, t)$. Vista em seção (a) mostra a velocidade real do fluxo da água (v_r), e em planta (b) indica o espalhamento do pulso de traçador nos momentos t_1 e t_2 . Adaptada de: Gutierrez et al., 2013.

Embora até agora não exista solução analítica, uma solução aproximada é dada por:

$$C(x, t) = \frac{M_0 r}{2Qt^{3/2}\sqrt{\pi\alpha_L v_r}} \exp\left(-\frac{(r - v_r t)^2}{4D_L t}\right) \exp(-\lambda t)$$

O traçador é injetado em um poço de observação lateral localizado a uma distância r do poço de bombeamento. Os autores ressaltam que esta solução somente deve ser aplicada quando a relação entre a distância do ponto de injeção até o poço de bombeamento for pelo menos três vezes maior que a dispersividade longitudinal ($r > 3\alpha_L$), como é o caso do presente trabalho, em que a distância entre ponto de injeção (PZ-UF1) e o ponto de bombeamento (PB-UF) é de 9,6 m, e o coeficiente de dispersividade longitudinal é de 1,2 m.

Execução do Teste com Traçador

Para definir a quantidade e concentração do traçador a ser injetado no poço de monitoramento, o tempo aproximado de duração total do teste e a frequência de coleta das amostras, foi realizada uma simulação do ensaio, inserindo os valores de vazão utilizada, espessura do aquífero e distância ao piezômetro onde foi injetado o traçador (respectivamente $2,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, 24 m e 9,6 m). Esta simulação foi realizada utilizando o software TRAC, v. 1.7 (Gutierrez et al., 2013), gratuito, desenvolvido pelo serviço geológico francês (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières* – BRGM). O software foi

utilizado também para interpretar os resultados dos testes.

O traçador utilizado foi a uranina. A injeção foi feita no piezômetro PZ-UF1 (diâmetro de 0,025 m), após 96 h de bombeamento com vazão constante de $7,9 \text{ m}^3/\text{h}$ no poço PB-UF (diâmetro de 0,100 m), e nível de água quase estável. A concentração utilizada foi de 3 g/l, com um volume de 12 l de água do poço (massa total de uranina injetada de 36 g). Na sequência foram inseridos mais 40 l de água sem traçador, para forçar a saída da solução do piezômetro.

A partir da injeção, feita no ao meio dia de 17/04/2016, começaram a ser coletadas amostras de água extraída do poço de bombeamento quatro vezes ao dia às 8, 12, 16 e 20 h. Para a amostragem foram utilizados frascos de vidro âmbar de 60 ml, previamente enxaguados três vezes com água do poço para a remoção de eventuais resíduos que pudessem interferir na leitura da fluorescência do traçador. Após este procedimento, os frascos foram completamente encheidos, fechados com batoque e tampa de rosca, secos, etiquetados, envoltos em papel alumínio para impedir contato da amostra com a luz, uma vez que a uranina é foto degradável.

As amostras foram levadas ao Laboratório de Águas Subterrâneas do Departamento de Geociências da UFAM em período não superior a 8 horas, onde ficaram acondicionadas em local protegido da luz e com temperatura controlada. No dia 21/04/2016, por volta das 19:00 horas, o uma pane elétrica paralisou o bombeamento por 21 h. A última coleta foi feita no dia 12/05/2016, 573,5 horas após a injeção do traçador (ou 23,9 dias).

Calibração e Leitura de Concentração de Traçador nas Amostras

O fluorímetro utilizado para determinar a concentração de uranina nas amostras coletadas é o modelo TD-700 da marca Turner Designs, que permite medir concentrações mínimas da ordem de 10 ng/l, e máximas de alguns g/l. Por conta desta sensibilidade e amplitude de valores, o equipamento precisa ser calibrado para uma amplitude específica de leituras, definida pelo usuário, limitada a três ordens de magnitude de concentração.

Assim, o fluorímetro também precisa ser calibrado para a concentração esperada das amostras a serem lidas em uma mesma sequência de leituras. Foram realizadas calibrações antes da primeira semana de leituras, e nas duas sequências de leituras feitas após o fim o bombeamento. Foram feitas soluções de água destilada com várias concentrações conhecidas de uranina, que

variaram de 10^{-1} a 10^6 mg/l.

As leituras da concentração de uranina das amostras foram realizadas uma vez por dia, após a coleta da última amostra do dia, analisando somente as amostras do dia anterior, que já estavam em equilíbrio térmico com a temperatura do laboratório, para evitar que a variação da temperatura influenciasse nos resultados.

As leituras de concentração de uranina são sensíveis ao pH da amostra. Ao todo, cada amostra foi lida três vezes: na primeira vez sem adição de NaOH. Nas duas seguintes foi adicionado 0,1 ml de NaOH a 10% em 6 ml de amostra, para elevar o pH acima de 10.

A primeira leitura de cada amostra foi feita ao longo do bombeamento, conforme descrito acima. A segunda vez foi feita no dia em que o teste foi finalizado, e a terceira dois dias depois.

O procedimento de transferência da amostra do frasco âmbar, de coleta, para o tubo de ensaio limpo e seco, e leitura no fluorímetro, foi:

- Inserção de 0,1 ml de solução de NaOH a 10% no tubo de ensaio (somente segunda e terceira leituras);
- Adição de 6 ml de amostra, utilizando seringas descartáveis novas;
- Inserção do tubo de ensaio no fluorímetro;
- Medição da concentração de uranina pelo método da média.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tipo do aquífero

Os dados obtidos no poço de monitoramento PZ-UF1 da UFAM, quando plotados em gráfico de rebaixamento linear e tempo logarítmico, e

comparados com a curva-tipo de Theis, apresentam características de aquífero confinado (Figura 6), uma vez que na porção tardia do teste há clara continuidade da inclinação da reta.

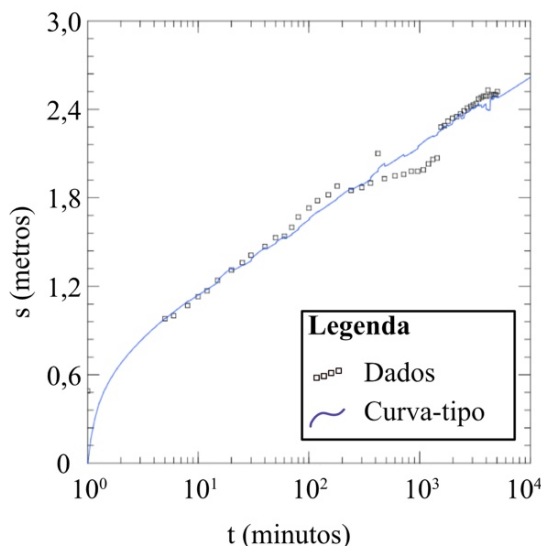


Figura 6 – Gráfico de rebaixamento (linear) versus tempo (logarítmico), com dados representado pelos quadrados pretos e a curva-tipo de Theis (1935) representada pela linha azul. A continuidade da inclinação da reta, mesmo com 84 h de bombeamento, indica claramente se tratar de aquífero confinado, no qual não ocorre a estabilização do nível de água.

Na figura 7 são apresentados, em escala bilogarítmica, os dados de rebaixamento em função de tempo e a respectiva curva-tipo gerada pelo software utilizando a vazão registrada ao longo do teste, no conjunto A. O conjunto B é composto pelas curvas derivativas dos dados e da curva-tipo de Theis. A curva-tipo se assemelha ao modelo de aquífero confinado, e sua derivativa apresenta clara característica deste tipo de

contexto hidráulico, com a linha horizontal em tempos intermediários e longos de bombeamento. Os dados não se alinham perfeitamente à curva tipo por causa de oscilações de vazão, que geram mudanças de nível de água não ajustáveis na curva-tipo. Para a derivativa da curva-tipo foi aplicada uma suavização de Bourdet com $L = 0,5$, limite superior admitido por Renard et al. (2009).

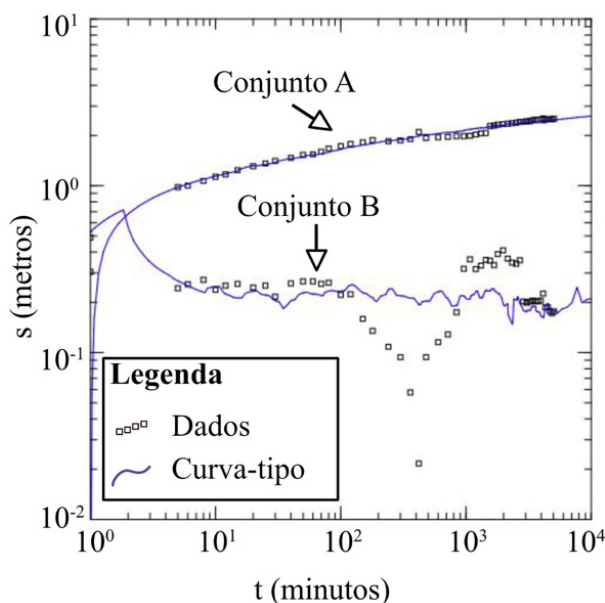


Figura 7 - Neste gráfico bi-logarítmico são apresentados, no conjunto A, os dados de rebaixamento em função de tempo (quadrados pretos) e a curva de Theis (1935) (linha azul). No conjunto B, são apresentadas as derivativas dos dados e da curva tipo, respectivamente. Em ambas há características de um contexto hidráulico de semi-confinamento do aquífero bombeado.

Teste de bombeamento com vazão constante

Ajustes de vazão executadas durante o bombeamento geraram variação entre $2,25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e $2,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, com média de $2,19 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Isso representa, respectivamente, uma variação em relação à média de 2,8% e -6,6%. Para compensar as variações, as vazões foram inseridas no software AQTESOLV em função de tempo, fazendo com que a curva-tipo seja ajustada para estas variações. Ao todo, 52 dados de vazão em função de tempo foram inseridos.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros hidráulicos obtidos com as interpretações dos testes de bombeamento com vazão constante, utilizando a curva-tipo de Theis (1935) que foi desenvolvida para aquíferos confinados. Foram obtidos os parâmetros: transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S) e condutividade hidráulica (K).

A condutividade hidráulica está dentro do esperado para arenitos de alta condutividade hidráulica (Freeze & Cherry, 1979). Arenitos, de forma geral, possuem condutividades entre 5×10^{-6}

a $5 \times 10^{-10} \text{ m/s}$. O valor do coeficiente de armazenamento está no limite inferior do que é considerado comum em aquíferos confinados (5×10^{-3} a 5×10^{-5}).

Tabela 2 - Parâmetros obtidos aplicando o método de Theis (1935).

Parâmetro	Bombeamento com vazão constante
T (m ² /s)	$8,0 \times 10^{-4}$
S (adim.)	$5,4 \times 10^{-5}$
K (m/s)	$3,1 \times 10^{-5}$

Teste com traçador

O ajuste de uma curva teórica de concentração em função de tempo aos dados de campo do traçador (Figura 8) feita utilizando o software TRAC, v. 1.7 (Gutierrez et al., 2013), permitiram determinar os seguintes parâmetros hidráulicos para a camada arenosa na qual estão instalados os filtros do PB-UF e PZ-UF1: porosidade efetiva de 9,9%; dispersividade longitudinal de 1,2 m; coeficiente de retardação de 1,2 (adimensional). A velocidade real da água subterrânea (v_r)

durante o teste foi de $1,3 \times 10^{-5}$ m/s. Este valor é coerente com a condutividade hidráulica determinada pelo método de Theis durante o teste de bombeamento; A constante de decaimento da

Uranina foi $1,3 \times 10^{-6}$ 1/s; O ajuste do modelo aos valores de concentração de Uranina nas amostras de água medida ao longo do bombeamento foi de 96%.

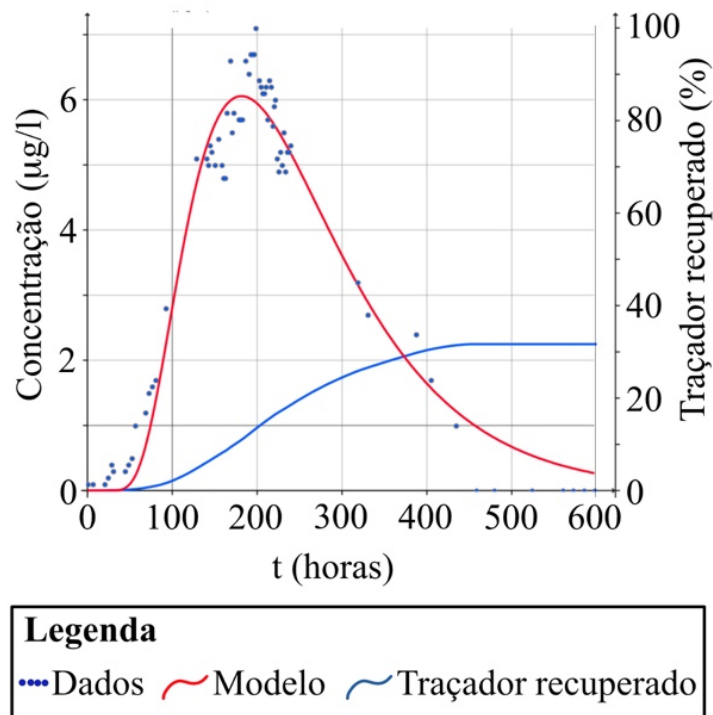


Figura 8 - Curva de concentração do traçador uranina em função de tempo (pontos); curva de concentração modelada pelo software TRAC (v.1.7), em vermelho; em azul, porcentagem da massa de traçador recuperada, baseada na soma das concentrações medidas.

CONCLUSÕES

Os resultados do teste de bombeamento de vazão constante indicam que a camada de areia localizada entre 48 e 76 m de profundidade no AAC está totalmente confinado no local do teste. A diferença de níveis estáticos entre esta camada e a camada de areia sotoposta é de 33 m, com potencial de fluxo descendente. Ambas estão separadas por uma lente de argila de 5 m e uma camada de arenito silicificado (Arenito Manaus) de 4 m de espessura. Isto demonstra o risco de deixar poços abertos com filtros que conectem várias camadas, principalmente em locais onde os primeiros filtros estejam em contato com níveis rasos e contaminados do AAC. A tendência de fluxo descendente fará com que os poços funcionem como uma ponte para os contaminantes descerem para as porções profundas do aquífero, que de outra forma

estariam protegidas. As propriedades hidráulicas da camada arenosa bombeada, de 49 a 71 m de profundidade média, interpretadas pelo método de Theis (1935) para aquíferos confinados, são transmissividade (T) de $8,0 \times 10^{-4}$ m²/s e coeficiente de armazenamento (S) de $5,4 \times 10^{-5}$ (adimensional) e condutividade hidráulica (K) de $3,1 \times 10^{-5}$ m/s.

O teste com traçador permitiu determinar os seguintes parâmetros hidráulicos para a porção arenosa do Aquífero Alter do chão em Manaus: porosidade efetiva de 9,9%; dispersividade longitudinal (α_L) de 1,2 m; coeficiente de retardação de 1,2 (adimensional). Durante o teste, a velocidade real média da água subterrânea foi de $1,3 \times 10^{-5}$ m/s. A constante de decaimento da Uranina determinada pelo modelo foi de $1,3 \times 10^{-6}$ 1/s.

AGRADECIMENTOS

A construção do campo de ensaios hidráulicos subterrâneos (CEHS) foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), por meio do Projeto de Desenvolvimento Científico Regional (DCR), no valor de R\$ 29.864,75, através da Decisão 090/2011 do seu Conselho Diretor. CAPES concedeu bolsa a primeira autora deste artigo por meio do PPGGEO, por um período

de 24 meses. FAPEAM e CNPq concederam bolsa ao segundo autor, no âmbito do projeto DCR por 36 meses. A Universidade Federal do Amazonas (UFAM) gentilmente permitiu a instalação do CEHS dentro do campus de Manaus/AM, e forneceu o suporte necessário para a execução dos testes.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C.J.B. **Carta Hidrogeológica da cidade de Manaus**. Manaus, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. (Relatório Interno), 2002.
- AGUIAR, C.J.B. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão no Estado do Amazonas**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, n. 6, p. 20. 2012.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J.; HACKETT, G. **DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings** [Report]. – Oklahoma, US EPA Report 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, 1987.
- ANA – Agência Nacional de Águas. 2021. **Conjuntura Brasil – Recursos Hídricos**. Disp. em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/quantitativo-quali>. Acesso em: 04 ago. 2022.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1000.000) e Cidade Pilotos (escala 1:50.000)**. Resumo Executivo, n. 15, p. 278, 2015.
- ARAUJO, T.P. **A Influência de fraturas no Arenito Manaus para o fluxo de água subterrânea do aquífero Alter do Chão**. Manaus, 47 p. 2013. Trabalho Final (Graduação), Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Geociências.
- BRITO, A.P.; WAHNFRIED, I.D.; FERREIRA, S.J.F.; BASTOS, J.H.B. Análise comparativa entre métodos de estimativa de recarga para uma microbacia na Reserva Florestal Adolpho Ducke, Manaus-AM. **Geologia USP. Série Científica**, v. 21, n. 3, p. 59-73, 2021.
- COSTA, A.M.R.; WAICHMAN, A.; SANTOS, E.E.A. Uso e qualidade da água subterrânea na cidade de Manaus. **Águas Subterrâneas**, v. 1, 2004
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS**. Disp. em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php. Acesso em: 03 ago. 2022.
- DAVIS, S.N.; THOMPSON G.M.; BENTLEY H.W. & STILES, G. Groundwater tracers – A short review. *Groundwater*, n. 18, p. 14 –22, 1980.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. **Groundwater**. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1979.
- GUTIERREZ, A.; KLINKA, T.; THIÉRY, D.; BUSCARLET, E.; BINET, S.; JOZJA, N.; DÉFARGE, C.; LECLERC, B.; FÉCAMP, C.; AHUMADA, Y.; ELSASS, J. TRAC, a Collaborative Computer Tool for Tracer-Test Interpretation. In: EPJ WEB OF CONFERENCES, 50, 2013. **Abstract**...Oslo, Noruega, 2013.
- HydroSOLVE. **Advanced Aquifer Test Analysis Software – AQT SOLVE**. Disp. em: <http://www.aqt-solv.com/> Acesso em: out/2022, 1989.
- KRUSEMAN, G.P. & DE RIDDER, N.A. **Analysis and Evaluation of Pumping Test Data**. ILRI Publ. 47, 2nd Ad., Wageningen, The Netherlands. 377 p. 1994.
- LEIBUNDGUT, C.; MALOSZEWSKI, P.; KULLS, C. **Traces in Hydrology**. Wiley-Blackwell, 415 p., 2009.
- MIRANDA, J.S.N. **Caracterização da vulnerabilidade intrínseca do Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus - AM**. Manaus, 2017. 130 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Amazonas.
- PALMA, K.A.L. **Gênese e distribuição das silicificações nos paleossolos e rochas sedimentares aflorantes em Manaus**. Manaus, 2014, 101p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Amazonas.
- PITA, R.C.S.; SILVA JÚNIOR, G.C.; ROSÁRIO, F.F.; SILVA, M.L. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, n. 18, v. 1, p. 27-296, 2018.
- RENARD, P., GLENZ D., MEJIAS M. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 589–600, 2009.
- SANTOS, J.M. **Distribuição das contaminações do Aquífero Alter do Chão na área urbana de Manaus - AM, com base em dados do Siagas**. Trabalho Final de Graduação (TFG), Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 42 p. 2016.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. IG; Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. DAEE. **Projeto São José do Rio Preto: restrição e controle do uso de água subterrânea**. São Paulo, 2011. 125p. (Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos, n. 4).
- SOARES, E.A.A.; WAHNFRIED, I.D.; DINO, R. Estratigrafia de subsuperfície da sequência sedimentar cretácea neógena das regiões de Manaus e Itacoatiara, Amazônia Central. *Revista do Instituto de Geociências*, v. 16, n. 1, p.: 2-41, 2016.
- SUHOGUSOFF, A.V.; HIRATA, R.; FERRARI, L.C. Adsorção do traçador fluorescente uranina em sedimentos quaternários da bacia de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 4, p. 551-558, 2005.
- THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 16, p. 519-524, 1935.
- VASCONCELOS, T.A. **Estudos físico-químicos e microbiológicos de águas de poços tubulares da cidade de Manaus**. Manaus, 2006. 114 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Amazonas,

*Submetido em 23 de fevereiro de 2023
Aceito para publicação em 3 de maio de 2023*