



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
BACHARELADO EM GEOLOGIA**

DANIELA ROQUE DE OLIVEIRA

**RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E A GEOLOGIA NA
HIDRODINÂMICA DO AQUÍFERO ALTER DO CHÃO NO ESTADO DO PARÁ**

**Santarém - PA
2022**

DANIELA ROQUE DE OLIVEIRA

**RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E A GEOLOGIA NA
HIDRODINÂMICA DO AQUÍFERO ALTER DO CHÃO NO ESTADO DO PARÁ**

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Engenharia e
Geociências da Universidade Federal do Oeste do
Pará, para obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Orientadora: Dra. Fernanda Souza do Nascimento

**Santarém - PA
2022**

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

O48r Oliveira, Daniela Roque
Relação entre a precipitação pluviométrica e a geologia na hidrodinâmica do aquífero Alter do Chão no Estado do Pará / Daniela Roque Oliveira – Santarém, 2022.
70 p. : il.
Inclui bibliografias.

Orientadora: Fernanda Souza do Nascimento
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará,
Instituto de Engenharia e Geociências, Curso de Bacharelado em Geologia.

1. nível hidrostático. 2. pluviosidade. 3. ferramentas matemáticas. 4. análise de séries-temporais. 5. aquífero Alter do Chão. I. Nascimento, Fernanda Souza do, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 551.5098115

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



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO BACHARELADO EM GEOLOGIA

ATA DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ata de aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Geologia, da discente Daniela Roque de Oliveira, matrícula N° 201300854. Aos 13° dia do mês de julho de 2022, às 10:00 horas, via videoconferência na plataforma Google Meet, link: <https://meet.google.com/dio-pvqm-igd>, realizou-se a reunião da Comissão Avaliadora do Trabalho de Conclusão de Curso do Bacharelado em Geologia, intitulado "Relação entre a Precipitação Pluviométrica e a Geologia na Hidrodinâmica do Aquífero Alter do Chão no Estado do Pará". Compuseram a banca examinadora o Dr. Homero Reis de Melo Júnior e o Prof. Dr. Norbert Fenzl, conduzida pela Profa. Dra. Fernanda Souza do Nascimento. Após a leitura e ciência dos Pareceres, anexos a esta ATA, decidiram aprovar com média 10 o referido TCC.

Profa. Dra. Fernanda Souza do Nascimento

Orientadora

Dr. Homero Reis de Melo Jr

Membro I

Prof. Dr. Norbert Fenzl

Membro II

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, determinação e direção na elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal do Oeste do Pará e ao Instituto de Engenharia e Geociências, pela oportunidade de ter obtido o grau de Bacharel em Geologia.

Aos professores do curso de Geologia, pela dedicação, pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências.

À professora Dra. Fernanda Souza do Nascimento, pela orientação, pelo seu conhecimento e por todo apoio nos momentos difíceis.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Homero Reis de Melo Júnior e professor Dr. Norbert Fenzl, pelas sugestões, contribuições e críticas que melhoraram este trabalho.

À Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e à Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), pela disponibilização dos dados de monitoramento da área de estudo.

Ao Centro Pedagógico de Apoio ao Desenvolvimento Científico – CPADC (Iced/Ufopa), pela oportunidade de ter sido aprendiz na busca pelo conhecimento científico, pela comunhão com os colegas estudantes e professores comprometidos em melhorar a educação na Mesorregião do Baixo Amazonas, tanto no nível básico como no nível superior.

Aos professores do Instituto de Ciências da Educação (Iced/Ufopa), colaboradores do CPADC, professora Dra. Nilzilene Gomes de Figueiredo, professor Dr. Marcos Gervânio de Azevedo Melo e professor Dr. Glauco Cohen Ferreira Pantoja, pelas inspirações e pelos ensinamentos sobre metodologia científica que foram válidos para elaboração deste trabalho.

À minha família, pelo apoio durante a elaboração deste trabalho e oportunidade de ter obtido esta graduação.

À “Deus é meu juiz”.

RESUMO

O Sistema Aquífero Alter do Chão (SAAC) ocorre no centro-norte da Amazônia brasileira e no Estado do Pará possui área estimada em 9.780 km², onde as condições climáticas marcadas por precipitação anual entre 1.500 mm e 3000 mm e dois períodos sazonais extremos, o período chuvoso de dezembro a junho e o período seco, de julho a novembro, em conjunto com geologia predominantemente sedimentar, foram avaliadas no presente trabalho para se compreender as suas relações e influências no fenômeno de recarga do aquífero. Essa abordagem foi baseada principalmente numa investigação sobre a relação dos níveis hidrostáticos do SAAC com a precipitação pluviométrica no período de 2013 a 2020, a partir das análises de dados de acesso livre na Internet, gerados de 6 poços tubulares da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS/CPRM) e de 5 estações pluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA) na região que abrange os municípios de Almeirim, Prainha, Monte Alegre, Oriximiná, Óbidos e Santarém. Em seguida, empregou-se a análise de séries temporais do período proposto das estações pluviométricas e de nível da água dos poços de monitoramento através da estatística descritiva e de modelagem, com uso da Correlação de Pearson e Função de Correlação Cruzada, além da análise de mapas temáticos e da litoestratigrafia dos poços. Os resultados das correlações entre a série temporal da precipitação pluviométrica e a de variação de nível hidrostático dos poços mostraram uma elevação tardia do nível de água dos poços, visto que é natural no período chuvoso ocorrer infiltração e posterior alcance da água no reservatório subterrâneo. Por conta disso, foi possível identificar que os níveis de água dos poços de monitoramento aumentam entre 2 e 5 meses após os eventos de precipitações pluviométricas. Os poços em que se observou a elevação dos níveis de água em menos tempo, são aqueles cujas seções litológicas areníticas são localizadas em relevo plano, e aqueles com seções litológicas predominantemente argilosas em relevo plano são suscetíveis à elevação mais lenta dos níveis de água, bem como o poço de seção arenítica localizada em relevo ondulado. Por outro lado, observou-se que o tipo de solo em que os poços se encontram, ao contrário do tipo da seção litoestratigráfica, não influenciam no tempo de resposta dos níveis de água aos eventos de precipitação. Os resultados obtidos possibilitaram compreender que a relação entre a precipitação pluviométrica e o SAAC não é um para um, pois os

níveis de água sobem apenas depois de ter ocorrido os eventos de precipitações, e a previsão da elevação dos níveis de água pode estar associada com as feições geomorfológicas e constituição geológica do terreno de localização dos poços de monitoramento. Este estudo se fez necessário para reforçar a ideia e importância do uso integrado de ferramentas estatísticas, dados físicos de monitoramento de águas subterrâneas, dados construtivos dos poços e uso do geoprocessamento para identificar a influência do meio físico natural, e suas relações, no processo de recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão.

Palavras-chave: Nível hidrostático. Pluviosidade. Ferramentas matemáticas. Análise de séries temporais. Aquífero Alter do Chão.

ABSTRACT

The Alter do Chão Aquifer System occurs in the center-north of the Brazilian Amazon in an estimated area of 9,780 km² in the State of Pará, a region where December to June is the rainy season and July to November is the dry season and the annual rainfall between 1,500 mm and 3,000 mm is one of the key terms for balancing the water level of the aquifers. Time and space are important factors to understand the relationship between rainfall and the Alter do Chão Aquifer. In this way, the present work focus investigation on the relationship of the hydrostatic levels of the Alter do Chão aquifer with rainfall during the years of 2013-2020, based on the analysis of free online access database of the 6 tubular wells available by the Integrated Network of Groundwater Monitoring (RIMAS/CPRM) and of the 5 rainfall stations of the National Water Agency (ANA) in the region covering the municipalities of Almeirim, Prainha, Monte Alegre, Oriximiná, Óbidos and Santarém. So, the proposed analysis has been based on the mathematical tools as descriptive statistics and modeling, using Pearson's Correlation and Cross-Correlation Function, in addition to the evaluation of thematic maps and the lithostratigraphy each well. The results of the correlations between the time series of rainfall and the variation of the hydrostatic level of the wells showed a late rise in the water level of the wells, since it is natural during the rainy season rainwater infiltration reaches the underground reservoir. Because of this, it was possible to identify that the water levels of the monitoring wells increase between 2 and 5 months after the rainfall events. The wells that raised their water levels in less time, present sandstone lithological sections located in flat relief, and those with predominantly clayey lithological sections in flat relief are susceptible to slower elevation of levels, as well as the sandstone section located in wavy relief. On the other hand, it was observed that the soil type where the wells are located, unlike their lithostratigraphic section type, does not influence the response time of the well water levels to precipitation events. The obtained results made it possible to understand that the relationship between rainfall and the Alter do Chão Aquifer is not one-to-one, as water levels rise only after the precipitation events have occurred, and the prediction of the elevation of water levels can be associated with the geomorphological and geological composition of the terrain where the monitoring wells are located. This study was necessary to reinforce the idea and importance of the integrated use of statistical tools, physical groundwater monitoring data,

constructive data from wells and the use of geoprocessing to identify the influence of the natural physical environment, and its relationships, in the process of recharge the Alter do Chão Aquifer System.

Keywords: Hydrostatic level. Rainfall. Mathematical tools. Time series analysis. Alter do Chão Aquifer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática geral do Ciclo Hidrológico.....	18
Figura 2 - Representação esquemática da água subterrânea no ciclo hidrológico. ..	21
Figura 3 - Perfil esquemático de infiltração da água.	22
Figura 4 - Representação esquemática de tipos de aquíferos.	24
Figura 5 - Esquema mostrando a superfície piezométrica e poço jorrante.	25
Figura 6 - Tipos de aquíferos quanto à geologia.	26
Figura 7 - Precipitação na região Amazônica.....	27
Figura 8 - Temperatura na região Amazônica.....	28
Figura 9 - Mapa de precipitação (mm) da América do Sul nos meses de janeiro e abril entre os anos de 1980 a 2010.	29
Figura 10 - Mapa de precipitação (mm) da América do Sul nos meses de julho e outubro entre os anos de 1980 a 2010.....	29
Figura 11 – Fluxograma da metodologia.....	33
Figura 12 – Distribuição amostral do estimador.	40
Figura 13 - Perfis litológicos dos poços de Oriximiná e Santarém.	53
Figura 14 - Perfis litológicos dos poços de Almeirim e Prainha.....	54
Figura 15 - Perfis litológicos de Monte Alegre e Óbidos.....	55

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Localização da área de estudo. Aquífero Alter do Chão, Amazônia brasileira.....	17
Mapa 2 – Mapa da litologia da área de estudo.....	31
Mapa 3 - Localização dos poços e estações pluviométricas.....	36
Mapa 4 - Mapa de solos da área de estudo.....	51
Mapa 5 - Mapa de declividade da área de estudo.....	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes das bases de dados utilizadas no presente trabalho.....	34
Quadro 2 - Identificação dos poços de monitoramento.	35
Quadro 3 - Identificação das estações pluviométricas.	36
Quadro 4 - Dados para elaboração dos mapas temáticos.	37
Quadro 5 - Classificação da declividade.	41
Quadro 6 - Descrição dos resultados das correlações simples entre precipitação e nível da água (NA)	42
Quadro 7 - Descrição da associação da correlação cruzada com os níveis de água dos poços.....	43
Quadro 8 - Teste de significância da correlação cruzada.	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráficos de dispersão entre as variáveis de nível da água dos poços de monitoramento e precipitação pluviométrica.	45
Gráfico 2 - Correlação Cruzada entre a precipitação pluviométrica e nível da água dos poços de monitoramento.	46
Gráfico 3 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Monte Alegre.	47
Gráfico 4 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Oriximiná.	48
Gráfico 5 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Óbidos.	48
Gráfico 6 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Prainha.	49
Gráfico 7 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Santarém.	49
Gráfico 8 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Almeirim.	50

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico

COSANPA - Companhia de Saneamento do Pará

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FCC - Função de Correlação Cruzada

GeoSGB - Sistema de Geociências do Serviço Geológico do Brasil

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

MDE - Modelo Digital de Elevação

PBEG - Projeto Brasileiro para o Ensino de Geografia

RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

USGS - United States Geological Survey

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	14
1.2	Objetivo Geral	14
1.2.1	Objetivos específicos.....	15
1.3	Área de estudo.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Ciclo Hidrológico.....	18
2.1.1	Precipitação pluviométrica.....	19
2.1.2	Água subterrânea.....	20
2.1.3	Aquíferos.....	22
2.2	Precipitação na bacia Amazônica	26
2.3	Sistema Aquífero Alter do Chão.....	30
2.4	Definição geral da análise de séries temporais na hidrologia	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Etapa 1: Revisão da literatura	34
3.2	Etapa 2: Transferência/coleta dos dados.....	34
3.2.1	Bases de séries temporais	34
3.2.1.1	Dados dos poços tubulares	35
3.2.1.2	Dados da pluviometria.....	35
3.2.2	Bases de dados temáticos	37
3.3	Etapa 3: Organização e tratamento dos dados.....	37
3.3.1	Dados das séries temporais	37
3.3.1.1	Correlação simples.....	38
3.3.1.2	Correlação cruzada	39
3.3.1.2.1	Teste de significância da correlação	40
3.3.2	Dados cartográficos e Sensoriamento Remoto	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Comportamento do Nível de Água relacionado à Precipitação Pluviométrica	42
4.2	Comportamento do Nível de Água em função do tipo de Solo e Relevo.....	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58

REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICES.....	66

1 INTRODUÇÃO

O abastecimento dos reservatórios hídricos subterrâneos é resultado de um complexo sistema de interações que envolvem os componentes físicos da Crosta terrestre constituintes do sistema climático, a atmosfera, criosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera, bem como a radiação solar e o movimento orbital da Terra em relação ao Sol que, em conjunto, influenciam naturalmente na hidrologia de uma região (MANABE, 1983).

Na Amazônia brasileira, no centro-norte, encontra-se um dos maiores reservatórios hídricos subterrâneos do mundo, o Sistema Aquífero Alter do Chão, cuja área de ocorrência no Estado do Pará é estimada em 9.780 km² (CPRM, 2012). A recarga do Alter do Chão se dá através de condição climática inerente a esta região, onde existem dois períodos sazonais extremos, o período chuvoso e o período seco. Mais precisamente na área de estudo deste trabalho, o período chuvoso compreende os meses de dezembro a junho, e o período seco, de julho a novembro (MORAES et al., 2005). Algumas razões básicas para que o clima nessa região ocorra dessa forma estão ligadas à sua proximidade com a linha do Equador, a de maior incidência de radiação solar do planeta; e a existência de floresta densa e grande volume de água na superfície, que contribuem para o processo de evapotranspiração de maneira mais intensa, gerando grandes volumes de chuvas quando chega época oportuna (MEIRELES; GOMES, 2012).

O Sistema Aquífero Alter do Chão é armazenado pela sequência litológica homônima, a Formação Alter do Chão, a qual é unidade litoestratigráfica que aflora na porção oriental da Bacia sedimentar do Amazonas (CUNHA et al., 2007). O Sistema Aquífero Alter do Chão na região de Santarém foi classificado como: aquífero livre, presente na parte superior com 50 m de espessura; e aquífero confinado, na parte inferior, com 430 m de espessura (TANCREDI, 1996).

O Aquífero Alter do Chão é a mais importante fonte provedora de água para a população do Baixo Amazonas (BENTES et al., 2020; MOLCH et al., 2019). O serviço de abastecimento público de água é prestado pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), que dispõe dos sistemas de captação, tratamento e rede de distribuição. No entanto, há áreas que não são contempladas pelo sistema COSANPA e há aquelas em que o serviço é deficiente e, dessa forma,

a população fica sujeita ao uso de poços artesianos e amazônicos, que geralmente são rasos (MESCHÉDE, 2018).

1.1 Justificativa

Há crescente uso privado doméstico da água subterrânea nessa região, propiciada, entre outros fatores, pela viabilidade econômica de captação sem os serviços de um profissional e de tratamento sanitário por meio de soluções, para outros fins, adquiridas em postos de saúde. Isso leva à instalação de um quadro de risco de contaminação sem controle. Pois, mesmo tratando-se de água subterrânea, essa água está sujeita à contaminação, seja de origem antrópica ou natural e que, conseqüentemente, pode gerar distúrbios na saúde da população (BENTES et al., 2020).

Diante disso, por se tratar de um recurso ambiental importante para a socioeconomia, é indispensável promover estudos que avaliam os níveis de água do Aquífero Alter do Chão relacionando-os com as precipitações pluviométricas que ocorrem na região, posto que a recarga do sistema aquífero esteja diretamente associada a este fenômeno meteorológico. Dessa forma, contribui-se com dados para as ações integradas de gestão das águas para evitar consequências negativas no meio ambiente, bem como no bem - estar da população.

Dada à importância das águas subterrâneas, o presente trabalho investiga a relação dos níveis hidrostáticos do Aquífero Alter do Chão com a pluviosidade, a partir das análises de dados gerados por estações de monitoramento da água subterrânea e precipitação na região que abrange os municípios de Almeirim, Prainha, Monte Alegre, Oriximiná, Óbidos e Santarém.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar a evolução do nível da água do Aquífero Alter do Chão no Estado do Pará, na perspectiva de compreender sua relação com a pluviosidade no período de 2013 a 2020, mediante uso dos dados de 6 poços de monitoramento da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS/CPRM), construídos entre março de 1998 a abril de 2012, e dados de precipitação pluviométrica

disponíveis na plataforma Hidroweb da Agência Nacional das Águas, todos de acesso livre na Internet.

1.2.1 Objetivos específicos

✓ Verificar a relação do nível da água no Aquífero Alter do Chão com as chuvas que ocorrem na região através de séries temporais, com duração de 8 anos compreendidas entre os anos de 2013 a 2020, de estações pluviométricas de precipitação administradas pela Agência Nacional das Águas, e de nível da água dos poços de monitoramento do projeto RIMAS / CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

✓ Identificar quanto tempo após os eventos de precipitação pluviométrica, os poços elevam seus níveis de água.

✓ Verificar a influência geológica no processo de recarga do aquífero, através da análise de mapas temáticos.

✓ Verificar/ Descrever as características dos solos, da litologia da área de estudo através da elaboração de mapas temáticos, bem como analisar suas influências na elevação dos níveis de água dos poços.

1.3 Área de estudo

A presente pesquisa se desenvolve no Sistema Aquífero Alter do Chão localizado no centro-oeste do Estado do Pará, com fronteira com o Estado do Amazonas a oeste e a leste com a borda da bacia hidrográfica do Marajó. Sua área de extensão é de aproximadamente 9.000 Km² e abrange os municípios de Oriximiná, Óbidos, Santarém, Prainha, Monte Alegre, Almeirim, Juruti, Faro, Terra Santa, Alenquer, Aveiro, Brasil Novo, Vitória do Xingu, Senador José Porfírio e Porto de Moz (ANA, 2007; CPRM, 2012; JOÃO; TEIXEIRA; FONSECA, 2013).

No contexto geotectônico, este aquífero está localizado na Bacia do Amazonas, delimitada ao norte pelos Escudos das Guianas e ao sul pelo Brasil Central, a leste separa-se da Bacia do Marajó através do Arco de Gurupá, e a oeste da Bacia do Solimões pelo Arco de Purus. O arcabouço estratigráfico desta bacia é constituído pelas megassequências (Paleozóica e Mesozóica- Cenozóica) de primeira ordem com períodos que variam do Ordoviciano ao Cretáceo, e agregam os

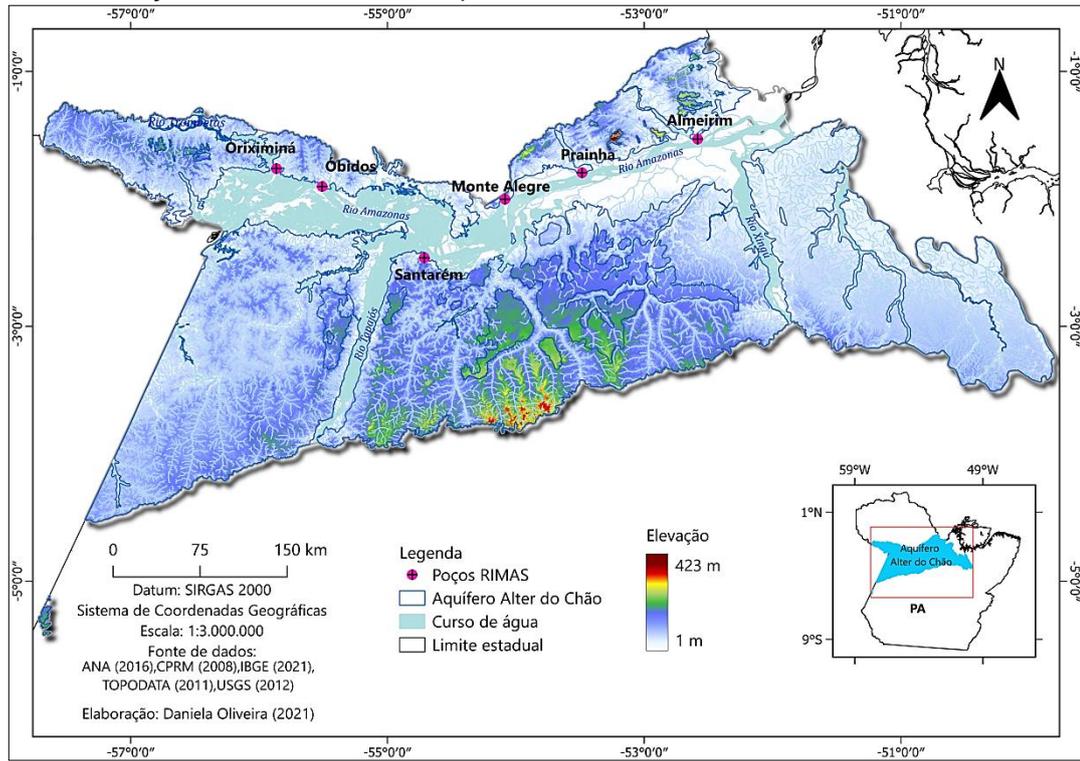
grupos: Trombetas, Curuá, Tapajós e Javari com suas respectivas formações. A Formação Alter do Chão compõe o grupo Javari juntamente com as formações Solimões e Marajó (CUNHA et al., 1994, 2007; MATSUDA et al., 2010).

Quanto à hidrografia, a área em estudo se localiza na bacia hidrográfica do rio Amazonas, a qual compreende uma área de 3,87 milhões de Km² no território brasileiro e inclui todos os estados da Região Norte. Com a exceção dos estados do Pará e Mato Grosso, cujos territórios estão parcialmente contidos na bacia, os demais estados têm todo o seu território dentro da área da bacia.

Além do Brasil, Peru, Bolívia, Venezuela, Equador, Colômbia e Guiana, são os demais países que fazem parte desta bacia hidrográfica correspondendo uma área de 2,2 milhões de km² (ANA, 2015; RIBEIRO NETO, 2006).

No Mapa 1 são apresentados os seis poços tubulares de monitoramento de água subterrânea em estudo, localizados nos municípios de Almeirim, Monte Alegre, Óbidos, Oriximiná, Prainha e Santarém. Estes municípios fazem parte da Mesorregião do Baixo Amazonas (o número de habitantes dos mesmos varia de 29.349 a 308.339), localizados na margem esquerda do rio Amazonas, exceto Oriximiná (localizado à margem esquerda do rio Trombetas) e Santarém (localizado à margem direita do rio Tapajós) (IBGE, 2017).

Mapa 1 - Localização da área de estudo. Aquífero Alter do Chão, Amazônia brasileira.



Fonte: Autora (2021).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ciclo Hidrológico

A radiação solar é essencial para o ciclo hidrológico (Figura 1) ao propiciar a evaporação da água nos corpos hídricos para a atmosfera, onde o ar úmido gerado se esfria à medida que se distancia da superfície até exceder seu limite de saturação e condensar em pequenas gotas de água e se transformar em nuvens. As gotas crescem por condensação do vapor da água e pela colisão umas com as outras e, quando se tornam grandes o suficiente a ponto de não se sustentarem no ar, geram a precipitação em forma de chuva, neve ou granizo (POETER et al., 2020).

A precipitação ao atingir a superfície pode se infiltrar nos solos e proporcionar às raízes das plantas a absorção da água para realizarem a evapotranspiração e, durante o percurso da infiltração, podem-se formar reservatórios de água subterrâneos alcançando as fraturas ou os poros das rochas favorecendo a formação de aquíferos. Bem como a deposição de gelo, o qual passa pelo processo de sublimação e quando chega ao estado líquido escoam pela superfície atingindo os diversos reservatórios hídricos até aos oceanos (GROTZINGER; JORDAN, 2013).

Figura 1 - Representação esquemática geral do Ciclo Hidrológico.



Fonte: Brown et al. (2016).

2.1.1 Precipitação pluviométrica

Segundo Barry e Chorley (2009); Meireles e Gomes (2012), a atmosfera, as nuvens e a superfície da Terra, refletem cerca de 30% da radiação solar de volta para o espaço, e cerca de 70% dessa radiação aquece a Terra. A superfície absorve parte da energia solar (onda eletromagnética) e provoca agitação molecular (mudança de temperatura), isto é, ocorre transferência de calor para a superfície (corpo de menor agitação molecular, mais frio), e assim emite radiação de onda longa (infravermelho), e o processo de irradiação possibilita a formação das nuvens.

Quando a energia de calor chega aos oceanos ou em qualquer superfície que tenha suprimento de umidade, a energia cinética (maior velocidade de vibração) entre as moléculas de água desses ambientes será maior. Posteriormente, as correntes de ar irão remover as moléculas para a camada superficial de ar e, assim realizar o processo que supera as atrações intermoleculares das partículas de água transformando a água líquida para gasosa através da aparente perda de calor (calor latente) e conseqüentemente queda na temperatura. Enfim, gerar a evaporação, o processo que contribui para que o vapor de água fique em suspensão na atmosfera. Além disso, a evapotranspiração também influencia na formação das nuvens. Dessa forma, o vapor de água será aquecido novamente e sofrerá dilatação térmica - seu volume será maior por conta do seu aumento de temperatura- logo sua densidade diminuirá, como resultado o vapor de água menos denso alcançará altas altitudes na atmosfera e o ar contido na atmosfera descenderá, em outras palavras, ocorrerão movimentos ascendentes e descendentes por conta da troca de calor (correntes de convecção) no ar (BARRY; CHORLEY, 2009; MEIRELES; GOMES, 2012).

Por outro lado, existe uma camada inferior da atmosfera (troposfera) onde os eventos climáticos são mais frequentes, a temperatura nessa camada tende a diminuir conforme maiores altitudes, em uma taxa média de 6,5°C/km. Nesse sentido, o vapor de água ascendente irá expandir e ser resfriado, pelo fato de a temperatura diminuir porque o ar é compressível e sua densidade é menor conforme avança em altitude. A troposfera possui um limite como nível de inversão térmica (tropopausa) em que a altura varia no tempo e no espaço. Esta é uma camada de ar relativamente quente acima de uma camada mais fria, pelo fato de se aproximar da estratosfera. Portanto, o vapor de água não avança para além da troposfera, apenas

realiza o processo de resfriamento adiabático, e como resultado formará nuvens (BARRY; CHORLEY, 2009).

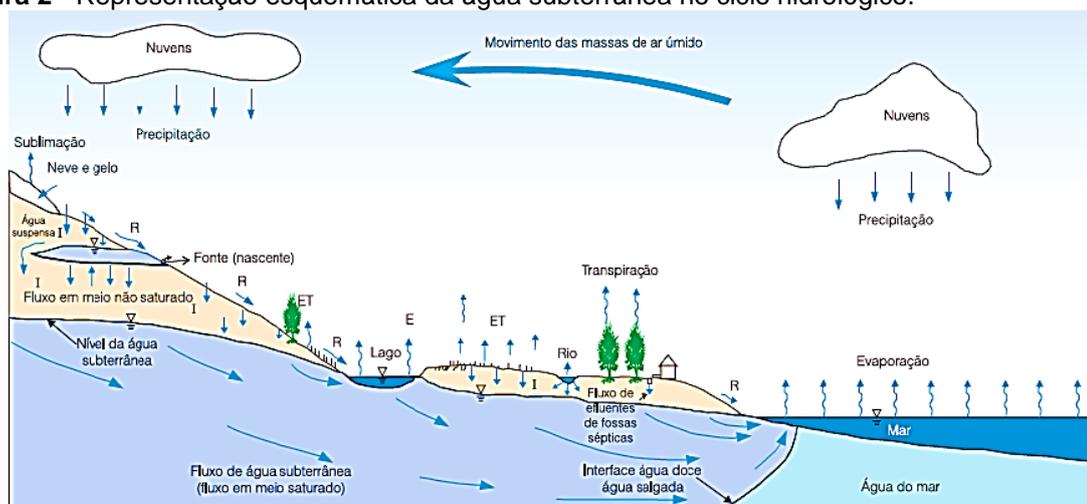
Dentre algumas nuvens que a meteorologia classifica favorável à precipitação, a principal delas é a cumulonimbus. Entretanto, para haver precipitação é necessário ocorrer o processo de condensação, o vapor de água muda do estado gasoso para o líquido. O qual é possibilitado quando uma determinada substância perde calor e assim diminua sua temperatura até ocorrer mudança do estado físico. Da mesma forma, o vapor de água presente nas nuvens cede calor para a atmosfera gerando pequenas gotas de água. As gotículas de água se agregam aos aerossóis para formar núcleos de condensação, ou seja, ocorre força de atração (tensão superficial) entre as partículas sólidas e as gotículas de água para formar as nuvens pesadas (YNOUE et al., 2017). Por fim, para ocorrer precipitação é preciso que haja quantidades suficientes de gotículas de água aglomeradas aos núcleos de condensação para formar uma gota e assim, por conta da força gravitacional entre a Terra e a gota que se formou, ela irá cair da nuvem. Logo, grandes quantidades de gotas de água causam as chuvas (MEIRELES; GOMES, 2012).

2.1.2 Água subterrânea

Manoel Filho (2008) define água subterrânea como um bem natural que ocorre nas formações geológicas aflorantes e que estejam saturadas de forma parcial, e nas formações geológicas profundas saturadas em sua totalidade, e que ocorrem abaixo do nível freático. Ela é parte do ciclo hidrológico (Figura 2) e desempenha um papel importante nos diversos processos geológicos.

A água subterrânea tem origem a partir da precipitação e por meio deste fenômeno a água pode ser infiltrada através dos solos, os quais possuem capacidades diferentes de absorção influenciadas pelas características físicas de cada tipo de solo. Além dos fatores como cobertura vegetal, tipo de relevo, considerações quanto à permeabilidade da rocha, são pertinentes no processo de recarga da água subterrânea (CARNEIRO; CAMPOS, 2013).

Figura 2 - Representação esquemática da água subterrânea no ciclo hidrológico.

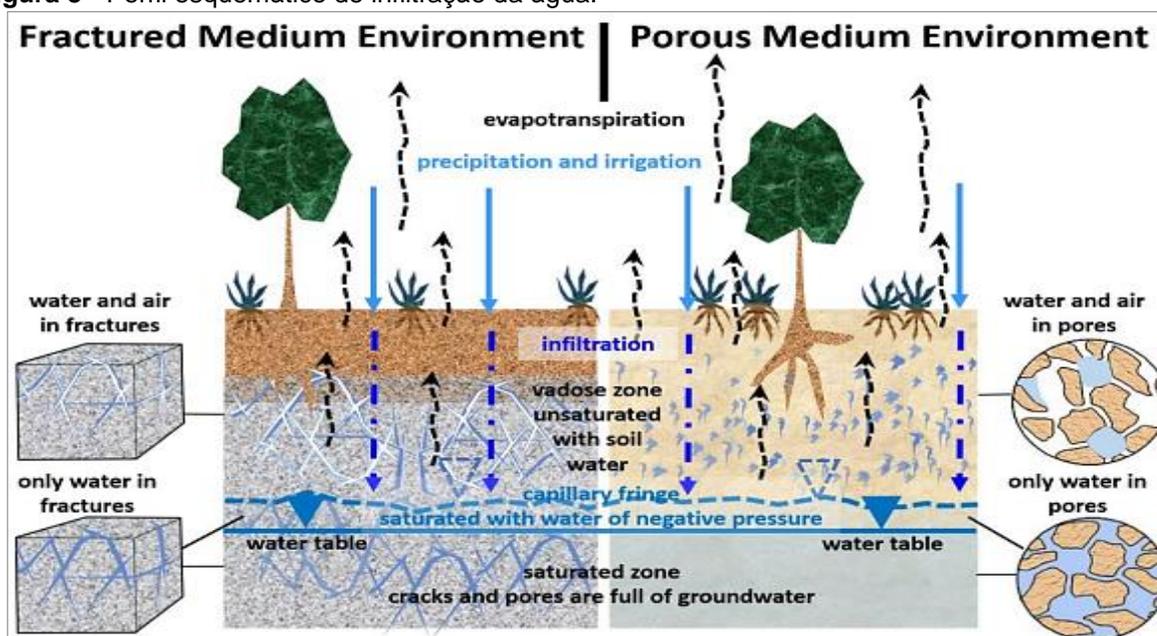


Fonte: Hirata et al. (2008).

A infiltração é a capacidade que um dado solo tem de absorver a água precipitada a uma taxa máxima. Mas, essa capacidade pode diminuir à medida que o solo satura e suas partículas de argila se expandem (HORTON, 1933). Para que ocorra a infiltração profunda, o evento de precipitação precisa ser longo. Mas, se for curto a infiltração será rasa e a água subterrânea é recarregada apenas quando houver excesso de água no solo e, assim haverá armazenamento de água que poderá fluir de forma lenta até aos locais de descarga (POETER et al., 2020).

O perfil de infiltração é constituído pela zona de aeração e zona saturada (Figura 3). A primeira, situada entre a superfície do terreno e a zona saturada, é delimitada em três estágios de infiltração: (i) zona de umidade do solo: preenchido parcialmente com água é o mesmo local das raízes das plantas, abaixo destas a água forma películas que são retidas por adesão nos grãos de solo, dependendo do tamanho destes grãos os solos podem reter mais ou menos umidade; (ii) zona intermediária: compreende a percolação da água para baixo quando todos os espaços entre os grãos da zona de umidade estão preenchidos com água; e (iii) franja de capilaridade: possui intensa umidade por conta da água que ascende capilarmente pelo contato com o nível freático. Na zona saturada a água preenche os poros e fraturas das rochas podendo mover-se lateralmente de forma lenta e livre devido à inclinação do nível freático, sendo assim aquíferos (CARNEIRO; CAMPOS, 2013; LISLE et. al., 2012).

Figura 3 - Perfil esquemático de infiltração da água.



Fonte: Poeter et al., (2020). Infiltração da água através da zona não saturada para a franja capilar e o nível freático, onde recarrega as águas subterrâneas. A água na zona não saturada geralmente se move para baixo conforme infiltração (setas azuis) ou para cima como evapotranspiração (setas pretas). Portanto, de um modo geral, o fluxo é frequentemente imaginado como unidimensional, embora haja áreas localizadas de movimento lateral da água.

Poeter et al. (2020) relatam que não é todo evento de precipitação que pode recarregar os reservatórios de água subterrânea, pois a maioria apenas molha a zona vadosa, causa acumulação de água no solo e depois é consumida pelas raízes da vegetação. A magnitude da recarga de água ao reservatório subterrâneo dependerá das propriedades do solo, da profundidade do perfil de infiltração, bem como da intensidade da precipitação. Assim, quando bem-sucedido o evento de precipitação, podem-se formar extensos depósitos de água denominados aquíferos, onde a água pode se mover através de fraturas rochosas ou de espaços entre os grãos sedimentares.

2.1.3 Aquíferos

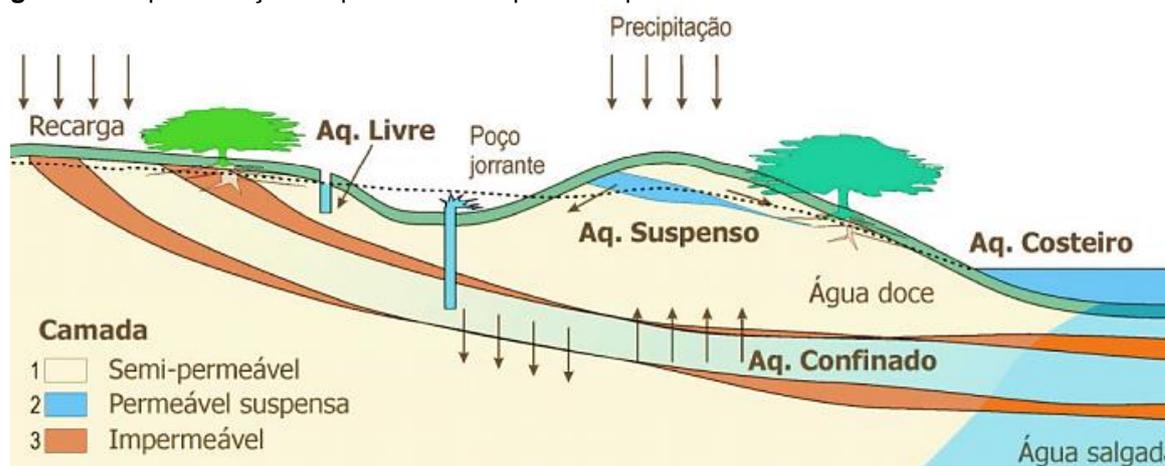
Os aquíferos são unidades geológicas permeáveis que possuem quantidades significativas de água que podem fluir sob condições naturais no subterrâneo possibilitando movimento em direção às áreas de descarga. As areias não consolidadas e cascalhos, rochas sedimentares permeáveis como arenitos e calcários, e rochas vulcânicas e cristalinas fortemente fraturadas, são formações geológicas exemplos de aquíferos. As características de um aquífero estão

relacionadas à sua espessura, extensão e geometria, as quais existem porque levam em consideração a geologia estrutural, estratigrafia e os parâmetros hidrodinâmicos do ambiente geológico que forma o aquífero (CARNEIRO; CAMPOS, 2013; FREEZE; CHERRY, 1979; POETER et al., 2020).

Conforme Carneiro e Campos (2013), os parâmetros hidrodinâmicos são classificados nas seguintes maneiras: (a) a capacidade que um aquífero tem de transmitir água é denominada de transmissividade, a qual é o resultado entre o produto da condutividade hidráulica e a espessura do aquífero, sendo que as unidades podem ser dadas em m^2/d ou cm^2/s ; (b) conforme diminui o nível piezométrico de um aquífero, este pode ter condições de diminuir ou manter sua capacidade de armazenamento de volume de água que é liberado por uma coluna igual à espessura da unidade do aquífero, nessa ocasião é definido o coeficiente de armazenamento; (c) a porosidade efetiva é a relação entre o volume de poros disponíveis para armazenar água e o volume total do solo ou da formação aquífera, este parâmetro é medido em porcentagem; (d) o nível da pressão hidrostática de um aquífero confinado ou semiconfinado é uma superfície contínua imaginária denominada de superfície piezométrica; e (f) a relação entre a vazão de uma captação de água e conseqüentemente o rebaixamento do nível da mesma no sistema aquífero, que é dado em $m^3/h/m$, é denominada de vazão específica.

Conforme Borghetti et al. (2004); Zimbres (2007), os aquíferos podem ser classificados respectivamente segundo a pressão da água e quanto às características hidráulicas, em: aquíferos livres, confinados, suspensos e costeiros (Figura 4); e segundo a geologia do corpo rochoso saturado e pela capacidade de armazenar e conduzir água, tais como os aquíferos porosos, fraturados e cársticos (Figura 6).

Figura 4 - Representação esquemática de tipos de aquíferos.



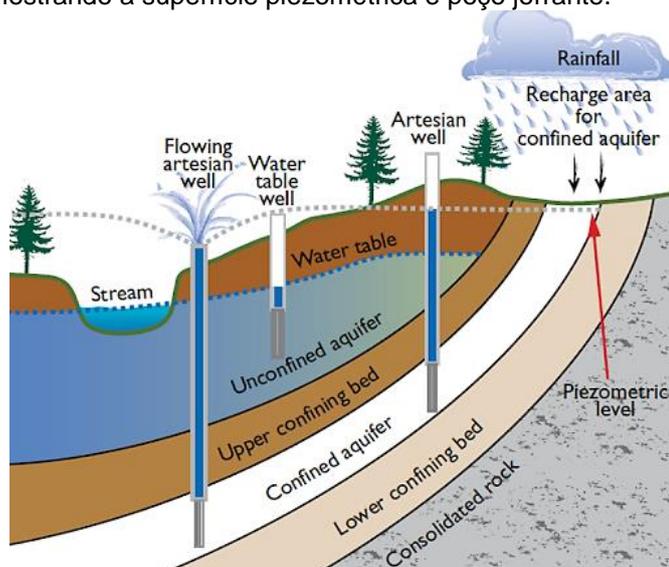
Fonte: PA-GEPEP, apud. Carneiro e Campos (2013).

Os aquíferos livres são os mais comuns, são os de fácil acesso para exploração da água, sendo os mais vulneráveis à contaminação. Estão logo abaixo da superfície da zona saturada, onde a pressão da água nesta zona apresenta equilíbrio com a pressão atmosférica possibilitando que a água neste sistema se movimente ao longo da rocha permeável de forma livre devido à inclinação do nível freático.

Os aquíferos confinados podem ser definidos como tal em duas possibilidades: quando há fluxos de água entrando e saindo do sistema por conta da existência de pelo menos uma camada semipermeável entre as suas camadas limites, pode ser denominado de aquífero drenante; e quando ele é denominado artesiano, em que a pressão da água é maior do que a pressão atmosférica no topo da zona saturada, neste ponto se encontra a rocha saturada sob confinamento entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. Se a pressão da água for bastante forte a ponto de subir no poço para além da superfície aquífera tem-se um poço jorrante (Figura 5).

Os aquíferos suspensos correspondem a uma área de extensão pequena localizada na zona não saturada, que acumula água acima de uma camada impermeável. Os aquíferos costeiros são os associados com a água do mar, localizados em regiões costeiras, nestes a água doce fica por cima da salgada por conta da diferença de densidade entre ambas, as quais são separadas pela interface salina ou cunha salina (CAMPOS; CARNEIRO, 2013; ZIMBRES, 2007).

Figura 5 - Esquema mostrando a superfície piezométrica e poço jorrante.



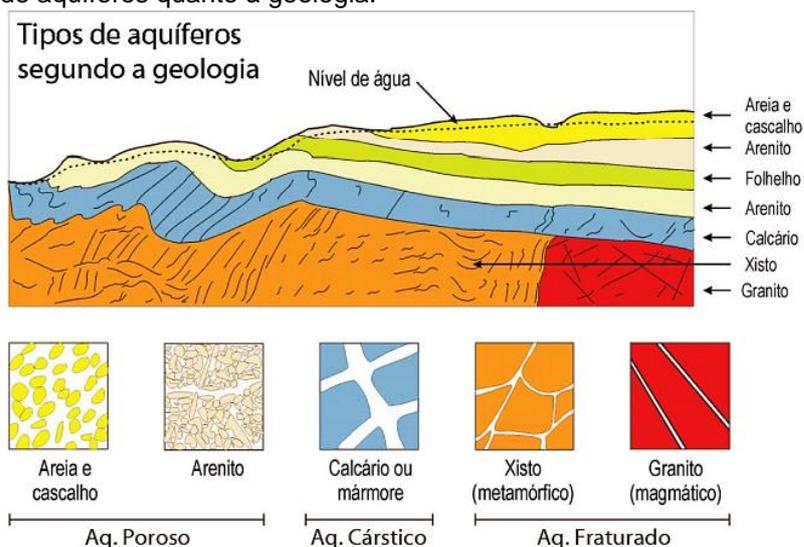
Fonte: Groundwater Project (2020).

Os aquíferos porosos são caracterizados pela porosidade de rochas sedimentares ou sedimentos inconsolidados e solos arenosos decompostos in situ. Apresentam isotropia, o que significa que possuem porosidade homogênea e bem distribuída possibilitando a circulação de água em qualquer direção, dependendo das diferenças de pressão hidrostática.

Os aquíferos fraturados ou fissurados ocorrem em rochas ígneas e metamórficas, as quais acumulam pouca ou muita água em suas fraturas e fissuras dependendo da quantidade dessas estruturas. São denominados aquíferos anisotrópicos, pois a água fluirá apenas onde houver fraturas. Nestes ambientes os poços são preferencialmente alocados onde há zonas muito fraturadas, as grandes zonas de falha e cinturões miloníticos são exemplos destes.

Os aquíferos cársticos compõem as rochas carbonáticas, possuem água em abundância por conta das grandes aberturas ocasionadas pela dissolução do carbonato em reação com a água, dessa forma podem apresentar rios subterrâneos (CAMPOS; CARNEIRO, 2013; ZIMBRES, 2007).

Figura 6 - Tipos de aquíferos quanto à geologia.



Fonte: PA-GEPEP apud Carneiro e Campos (2013).

2.2 Precipitação na bacia Amazônica

As zonas são as formas de distinguir o clima no Brasil, elas podem apresentar variedades nas regiões brasileiras, em função da distância entre áreas litorâneas, das cotas de altitude, das formas do relevo e dos biomas predominantes. Essas características também podem influenciar nas propriedades das massas de ar tropicais, equatoriais e polares, as quais são elementos no controle do clima no Brasil (PBEG, 1980).

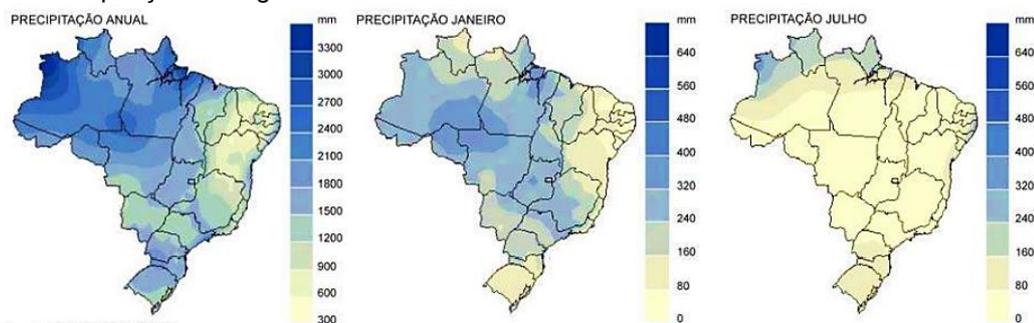
O clima Equatorial Úmido (quente e chuvoso) predomina na região Amazônica com temperaturas que variam entre 21°C e 42°C por ano, sendo a temperatura média anual de 28°C. Esse clima é regido pelas oscilações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o posicionamento deste sistema é modulado pela umidade proveniente dos oceanos pacífico e atlântico e transportada pelos ventos para a bacia Amazônica (ANA, 2015; SOUZA et al., 2005).

Nobre et al. (2009) relatam que a precipitação sazonal na bacia amazônica é distribuída de forma distinta e ressalta dois locais de alta precipitação, um ocorre em torno da foz do rio Amazonas e o outro no noroeste da bacia. A precipitação na região da foz do rio Amazonas é relacionada ZCIT e às linhas de instabilidade que ocorrem ao longo da costa (COHEN et al., 1989; HASTENRARTH; HELLER, 1977). Quanto ao noroeste da bacia a alta precipitação é resultado da flutuação dinâmica do centro de convecção que ocorre constantemente em conjunto

com a evapotranspiração condicionada pela densa floresta, além de sofrer influência da convergência de fluxo de umidade de leste em baixos níveis, por conta da presença dos Andes a oeste deste local de alta precipitação (MARENGO; HASTENRATH, 1993; NOBRE, 1983).

As precipitações abundantes que ocorrem na região Amazônica, entre 1.000 e 3.000 mm/ano, e as características do clima em geral, são provenientes do sistema ZCIT; das ações dos ventos alísios; dos doldrums (baixas pressões equatoriais) e também influenciados pela massa Equatorial continental (Ec) - esta é instável, quente e chuvosa. Na região de Manaus e no norte de Mato Grosso há uma pequena estação com diminuição do volume de chuvas e aumento da temperatura do clima entre julho e setembro. Na porção mais oriental, do Baixo Amazonas até o litoral atlântico no Pará (região de Belém), as ondulações da ZCIT e as influências oceânicas, representadas pelas ações da massa Equatorial atlântica (Ea), provocam diminuição da temperatura e ligeiro aumento da pluviosidade (Figuras 7 e 8) (ANA, 2015; LIMBERGER; SILVA, 2016; MEIRELES; GOMES, 2012; SOUZA et al., 2005). Em grande parte da bacia Amazônica o período chuvoso ocorre entre novembro e março, com pico em dezembro a fevereiro, e o período seco ocorre entre maio a setembro. Ao norte da bacia, o período chuvoso ocorre de maio a outubro e o período mais seco, de dezembro a fevereiro (NOBRE et al., 2009). No caso do Estado do Pará, conforme Moraes et al., (2005), a variabilidade sazonal da precipitação para a maioria do estado compreende os meses de dezembro a maio (estação chuvosa) e junho a novembro (estação seca).

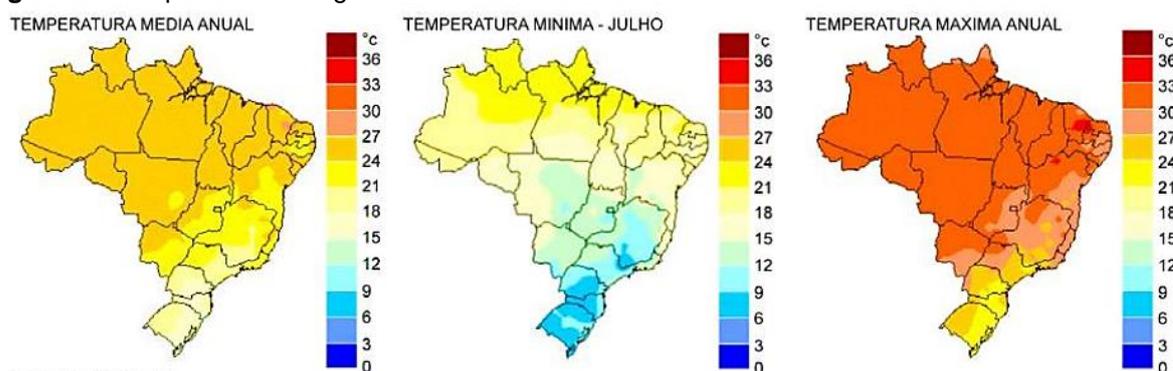
Figura 7 - Precipitação na região Amazônica.



Fonte: INMET 1931/1990

Fonte: INMET (2002).

Figura 8 - Temperatura na região Amazônica.

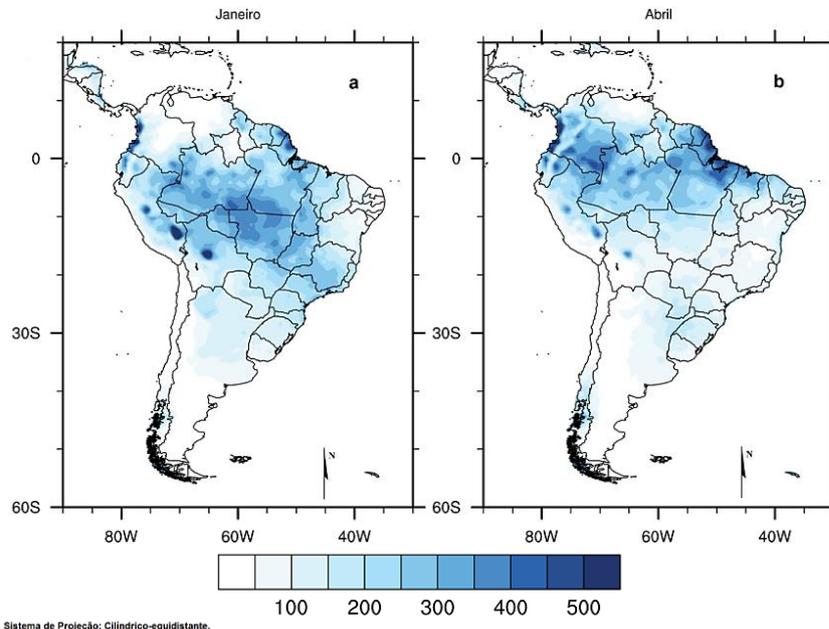


Fonte: INMET 1931/1990

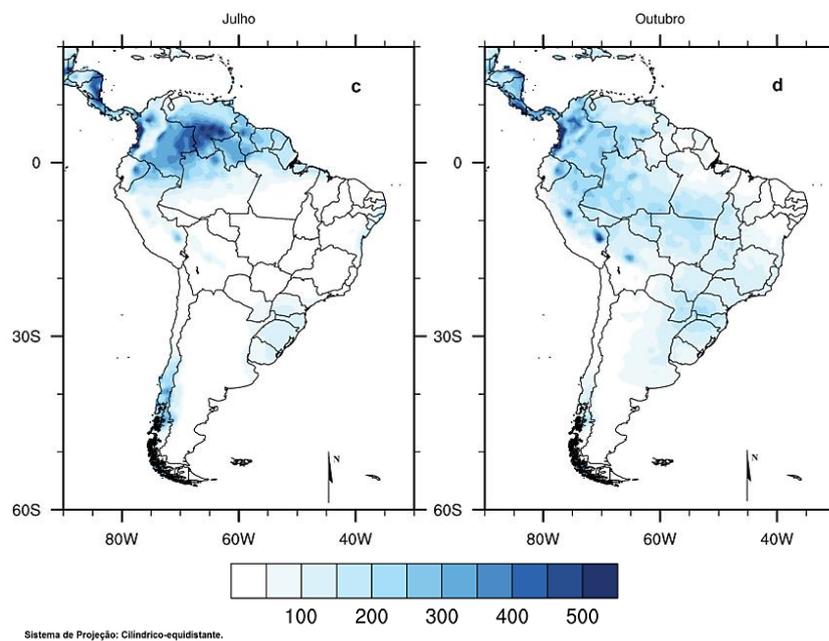
Fonte: INMET (2002).

A alta precipitação sobre a bacia Amazônica ocorre durante o verão austral (NOBRE et al., 2009). Nesta estação podem ser observadas anomalias de convergências do ar nos baixos níveis da atmosfera vinculadas com o aquecimento do continente enquanto a zona do cavado equatorial e a ZCIT se posicionam mais ao sul do Brasil durante os meses de dezembro a abril. Diante disso, uma banda de nebulosidade, caracterizada por convergência de ar na troposfera mais baixa, prolonga-se na direção noroeste-sudeste do Brasil abrangendo a Amazônia ao sudeste do país, formando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sob influência do Atlântico Sul Tropical. Em vista disso, ocorrerão altos índices pluviométricos, na região sudeste da bacia Amazônica (Figura 9) por causa da intensa atividade convectiva sobre ela. Mas, entre dezembro e março muda-se do setor sudeste, entre março e novembro para o setor noroeste, e para o leste do Pacífico Equatorial em maio (Figura 10) (CARVALHO et al., 2011).

Figura 9 - Mapa de precipitação (mm) da América do Sul nos meses de janeiro e abril entre os anos de 1980 a 2010.



Fonte: Global Precipitation Climatology Centre (2012).

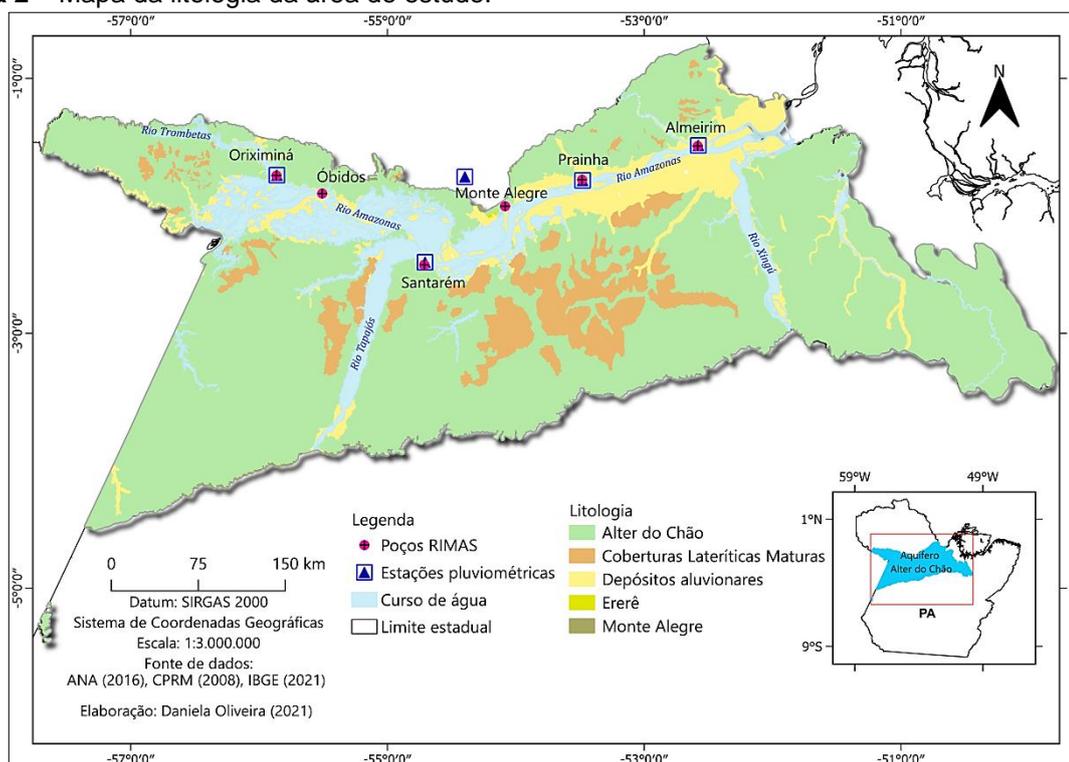


Fonte: Global Precipitation Climatology Centre (2012).

2.3 Sistema Aquífero Alter do Chão

Tancredi (1996) desenvolveu estudos sobre o Aquífero Alter do Chão que demonstraram ser um sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão (Mapa 2). Conforme Cunha et al. (2007), a Formação Alter do Chão juntamente com as formações Solimões e Marajó são constituintes do Grupo Javari, o qual inclui um conjunto de rochas representadas pelas sequências Cretáceas e Terciárias da Megasequência Mesozóico-Cenozóica. A Formação Alter do Chão possui idade que varia desde o Cretáceo Inferior, mais precisamente no Aptiano, até ao Cretáceo Superior correspondendo ao Maastrichtiano (DINO et al. 1999). Entretanto, segundo Cunha et al. (2007), estas idades são consideradas com relação a trabalhos palinológicos, devido a dificuldades com datações por conta do alto conteúdo arenoso desta unidade estratigráfica. Segundo Daemon (1975), o ambiente de deposição sedimentar da Formação Alter do Chão é fluvial de alta energia/lacustrino-deltáico. Esta unidade é constituída, conforme Tancredi (1996), por arenitos de granulometria fina a média, marrom-avermelhados com intercalações de pelitos e, em menores proporções, de conglomerados, além da presença de estrutura sedimentar, tal como estratificação cruzada. Cunha et al. (2007) relatam que há arenitos grossos, variegados, e presença de conglomerados de fácies de planície e leques aluviais e bandas ferruginosas lateríticas. Além disso, sobre a Formação Alter do Chão na porção oeste da Bacia do Amazonas, dispõe-se discordantemente a Formação Solimões representada por depósitos pelíticos com restos vegetais e conchas de moluscos. Os resultados obtidos por Tancredi (1996) demonstraram que o Aquífero Alter do Chão atinge uma espessura máxima em torno de 600 m, em sucessões de camadas arenosas e permeáveis separadas por aquicludes e aquitardes de pouca espessura. Este aquífero apresenta transmissividade que varia entre $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $9,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, indicando que é potencialmente produtivo; variação entre livre e completamente confinado, representado por coeficiente de armazenamento que varia entre $4,1 \times 10^{-1}$ e $3,3 \times 10^{-4}$; condutividade hidráulica com valores entre $2,7 \times 10^{-4}$ e $6,9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$; e potenciometria que varia em torno de 8 m até 60m de profundidade. As reservas reguladoras são estimadas em $226 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e as reservas permanentes em $86.550 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Mapa 2 – Mapa da litologia da área de estudo.



Fonte: Autora (2021).

2.4 Definição geral da análise de séries temporais na hidrologia

O principal objetivo da análise de séries temporais é a construção de modelos com propósito para compreender o mecanismo gerador da série, prever valores futuros, demonstrar o comportamento da série e revelar periodicidades relevantes nos dados (NOMELINI et al., 2016).

Os modelos numéricos são uma maneira de representar as propriedades analisadas de um fenômeno, sistema ou um objeto. Servem para entender, a partir das observações feitas, os resultados dos processos que estão sendo analisados na série de dados, ou deduzir efeitos nestes resultados (TUCCI, 2005). Estes modelos são de caráter determinístico ou caráter estocástico. O determinístico tem base nos conceitos matemáticos e leis da física associadas ao processo, ao fenômeno que está sendo estudado nas séries de dados para que seja possível descrevê-lo e obter resultados com soluções exatas. O estocástico é baseado na estatística, pelas leis da probabilidade, considera a aleatoriedade do processo que está sendo analisado, na expectativa de obter resultados de que possíveis valores sejam alcançados ou que eventos aconteçam (LUIZ PATRICIO et al., 2017; MANZIONE, 2018).

Luiz Patricio et al. (2018) ressaltam que as abordagens de análises estatísticas de previsão para os níveis de água subterrânea podem ser vantajosas, quando têm bom grau de confiança, nas estratégias para gestão das águas. Além disso, estudos sobre as variações dos níveis de água de um aquífero são importantes para estimar seus volumes hídricos de recarga e/ou descarga.

No estudo de série temporal utilizam - se de modelos de processos estocásticos. Na análise de série temporal associada à gestão de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, este tipo de modelagem reconhece a incerteza e a variabilidade relacionadas aos elementos hidrológicos. Dessa maneira, tais modelos têm sido úteis para compreender a natureza estocástica de variáveis hidrológicas como a precipitação e descargas fluviais e tem proporcionado avanços nas pesquisas de procedimentos de modelagem estocástica em hidrologia de forma a desenvolver novos métodos estatísticos, melhoras nas técnicas de estimativa de parâmetros e quantificação de incertezas e acurácia nas previsões (MANZIONE 2018; MORETTIN; TOLOI, 2006).

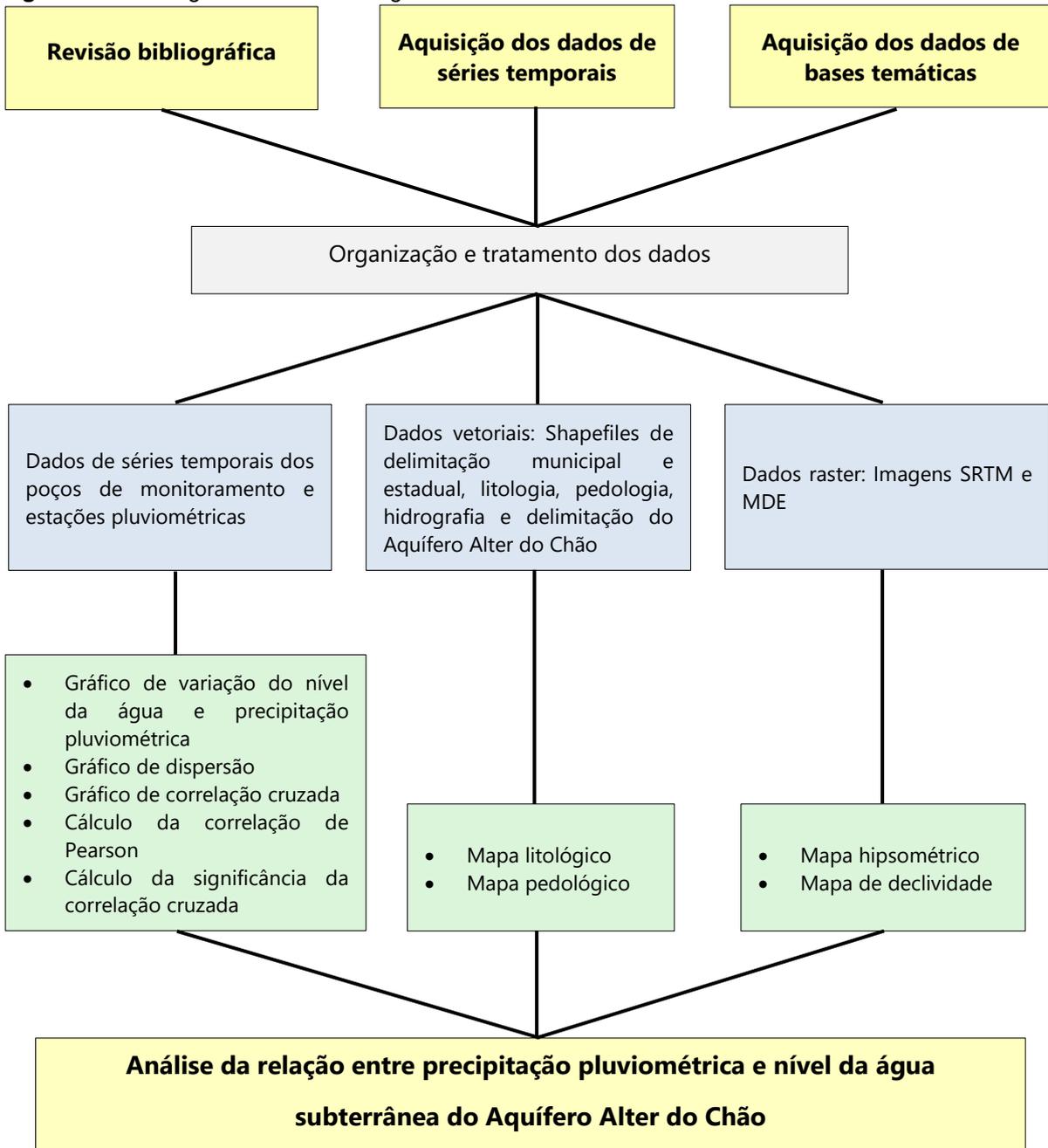
Os modelos para análise e previsão de séries temporais são classificados em dois grupos: os univariados, baseados em apenas uma única série temporal, consideram somente a informação contida na série que está sendo estudada no estabelecimento do modelo de previsão, ou seja, explicam o comportamento futuro de uma série através do seu próprio passado, e os bivariados, baseados na análise da relação entre duas séries, em que se supõe haver n observações de duas variáveis x e y , em intervalos de tempo de mesmo período (ECHEVESTE, 1988; SOUZA, 1981).

Em geral, as séries temporais em si são caracterizadas pelas componentes de tendência, sazonalidade, cíclica e de ruído. A série temporal irá apresentar tendência quando for visível o movimento de aumento ou decréscimo, linear ou não linear ao longo do tempo; a sazonalidade quando for identificado flutuações periódicas que aparecem especificamente em certos períodos anuais, mensais, semanal e assim por diante; a cíclica é similar a sazonal, mas seu comprimento é superior a um ano e não possui duração uniforme, senão possui movimentos oscilatórios e está vulnerável a influências de fatores externos; e a componente de ruído que é formada de movimentos instável e aleatório ascendente ou descendente que não são explicados pela variação cíclica ou pela tendência (SILVA, 2010).

3 METODOLOGIA

A elaboração deste trabalho ocorreu em três etapas descritas a seguir e esquematizadas no fluxograma da Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autora (2021).

3.1 Etapa 1: Revisão da literatura

Foi realizada a revisão bibliográfica em livros, periódicos, artigos e sites, referentes ao estudo sobre precipitações pluviométricas e associações com o clima, recarga de aquíferos e aspectos geológicos e hidrogeológicos do Aquífero Alter do Chão.

3.2 Etapa 2: Transferência/coleta dos dados

✓ Dados de série temporal do período de 2013 a 2020 das estações pluviométricas e de nível da água de poços tubulares pertencentes respectivamente, às plataformas de dados gerados pela Agência Nacional das Águas (ANA) e pelo Projeto de Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) do Serviço Geológico do Brasil – CPRM;

✓ Imagens de radar SRTM disponíveis no website da United States Geological Survey (USGS), MDE disponíveis no website do TOPODATA; arquivos shapefile gerados pelo projeto Geodiversidade da CPRM, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA).

3.2.1 Bases de séries temporais

Quadro 1 - Fontes das bases de dados utilizadas no presente trabalho.

Dados de séries temporais	Fonte de dados
Dados das estações pluviométricas	Hidroweb - Agência Nacional das Águas (ANA) (https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas)
Dados dos poços de monitoramento	Rede RIMAS – Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/index.php)

Fonte: Autora (2021).

3.2.1.1 Dados dos poços tubulares

Foram obtidos os seguintes dados de seis poços de monitoramento (RIMAS/CPRM):

- Localização;
- Data da perfuração;
- Profundidade dos poços;
- Perfil litológico;
- Medição diária do nível da água dos anos de 2013 a 2020.

Quadro 2 - Identificação dos poços de monitoramento.

Município	Código do poço (RIMAS) do respectivo município	Data da perfuração	Localização do poço (Latitude / Longitude) (GMMSS)
Almeirim	1500005621	08/04/2012	Lat.: -1°31'50"S Long.: -52°34'58"O
Óbidos	1500005602	10/04/2012	Lat.: -1°54'10"S Long.: -55°30'32"O
Oriximiná	1500005605	20/12/1998	Lat.: -1°45'46"S Long.: -55°51'54"O
Monte Alegre	1500003919	04/06/2002	Lat.: -2°00'14"S Long.: -54°05'02"O
Prainha	1500005620	19/04/2012	Lat.: -1°47'44"S Long.: -53°29'39"O
Santarém	1500002162	31/03/1998	Lat.: -2°27'46"S Long.: -54°42'50"O

Fonte: Autora (2021).

3.2.1.2 Dados da pluviometria

Foram obtidos os dados de cinco estações pluviométricas (ANA):

- Localização;
- Medições diárias da precipitação dos anos de 2013 a 2020.

Observação: Foram selecionadas quatro estações com um raio de distância de 2,3 km dos poços de monitoramento dos municípios de Almeirim, Oriximiná, Prainha e Santarém, e duas estações com aproximadamente 40 km de

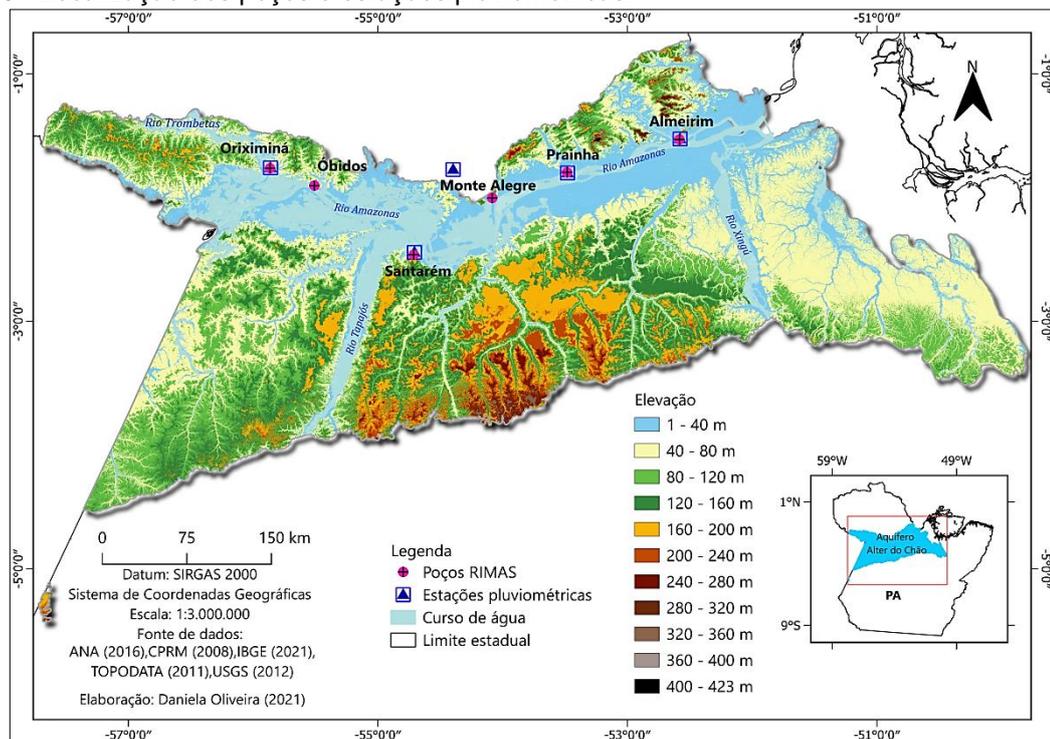
distância dos poços de Monte Alegre e de Óbidos, devido serem as mais próximas. A estação do município de Oriximiná foi utilizada para correlacionar com o poço de Óbidos, por conta de não haver estação neste município.

Quadro 3 - Identificação das estações pluviométricas.

Município	Código da estação pluviométrica (ANA) do respectivo município	Localização da estação pluviométrica (Latitude / Longitude) (GMMSS)
Almeirim	152005	Lat.: -1°31'32''S Long.: -52°34'40''O
Oriximiná	155000	Lat.: -1°45'36''S Long.: -55°51'38''O
Monte Alegre	154000	Lat.: -1°46'26''S Long.: -54°23'48''O
Prainha	153000	Lat.: -1°48'02''S Long.: -53°28'48''O
Santarém	254000	Lat.: -2°26'34''S Long.: -54°42'28''O

Fonte: Autora (2021).

Mapa 3 - Localização dos poços e estações pluviométricas.



Fonte: Autora (2021).

3.2.2 Bases de dados temáticos

Quadro 4 - Dados para elaboração dos mapas temáticos.

Dados temáticos	Fonte de dados
Shapefile de delimitação estadual e municipal, hidrográfico e pedológico.	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (https://www.ibge.gov.br/)
Shapefile de delimitação do Sistema Aquífero Alter do Chão	Catálogo de Metadados da ANA (https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90)
Shapefile da litologia	Geosgb – Banco de dados da CPRM (https://geosgb.cprm.gov.br/)
SRTM	United States Geological Survey (USGS) (http://earthexplorer.usgs.gov/)
MDE	TOPODATA- Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil (http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php)

Fonte: Autora (2021).

3.3 Etapa 3: Organização e tratamento dos dados

3.3.1 Dados das séries temporais

As duas séries temporais foram organizadas em tabelas no software *Excel* do pacote *Office – Microsoft versão 2010*. Para as séries de nível da água fizeram-se os cálculos das médias mensais, e para as séries de precipitação fizeram-se os cálculos das médias mensais e das somas totais para cada mês do ano. Os gráficos de dispersão, variação e as correlações simples foram feitos no *Excel*.

Para a elaboração dos gráficos de variação relativos às séries de precipitação pluviométricas adotaram-se os critérios de Moraes et al. (2005), que associa os meses de período chuvosos (dezembro a junho) e período seco (julho a novembro). Assim, foi calculada a soma total de chuvas correspondentes a esses períodos sazonais, depois foram organizadas em tabelas juntamente com os valores das médias mensais dos níveis de água para gerar os gráficos.

Segundo Manzione (2018), as séries temporais ou séries históricas são sequências de dados obtidos em ordem cronológica. Esses tipos de dados podem ser de caráter contínuo (dados gerados regularmente) ou discreto (dados gerados de forma espaçada, tais como ocorrem por horários, diários, quinzenais, mensais entre outros). Tais séries são usadas para estimar, inferir o comportamento temporal e formular uma teoria em relação ao mecanismo gerador do processo analisado, através de observações que ocorreram num tempo passado, e assim fazer previsões de possíveis valores dessa sequência de dados para o futuro.

“Isso pode incluir valores de altura do lençol freático em determinadas épocas, como por exemplo, o início da estação seca, ou mesmo probabilidades de que níveis críticos sejam excedidos em certas ocasiões [...]” (MANZIONE, 2018, p. 6).

3.3.1.1 Correlação simples

A correlação é usada para fazer a medição da força e da direção da relação entre duas variáveis, uma variável independente (eixo x) e a outra dependente (eixo y). Para este estudo foi escolhida a correlação de Pearson, a qual mede o grau da relação linear entre cada par de variáveis. Os valores de correlação são expressos pelo coeficiente de correlação (ρ ou r), e podem ser assumidos entre -1 e +1. Se as duas variáveis tendem a aumentar e diminuir simultaneamente elas serão diretamente proporcionais, o valor da correlação será positivo. Se uma variável aumenta à medida que a outra diminui, o valor de correlação é negativo, logo serão inversamente proporcionais. Se não houver correlação entre as variáveis o resultado será nulo, ou seja, 0 (MINITAB LLC,2021).

Fórmula do coeficiente de correlação de Pearson (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{(n - 1) s_x s_y}$$

A notação desta fórmula é a seguinte:

x_i e y_i : Valores das variáveis x e y

\bar{x} : Média da amostra para a primeira variável

s_x : Desvio padrão da amostra para a primeira variável

\bar{y} : Média da amostra para a segunda variável

s_y : Desvio padrão da amostra para a segunda variável

n : Número de observações

3.3.1.2 Correlação cruzada

A correlação cruzada demonstra através de cálculos e de gráficos as correlações entre duas séries temporais em diferentes períodos de tempo (ECHEVESTE, 1988). Estes gráficos auxiliam na interpretação - se uma série de dados manifesta uma direção em relação com a outra série, e até que ponto uma série é conduzida pela outra. Para este estudo utilizou-se a Função de Correlação Cruzada (FCC) do *Minitab Statistical Software versão 20.3.0* para compreender a relação entre as séries temporais de precipitação pluviométrica com as de nível da água. A FCC identifica valores atrasados (*lags*) de uma série de x_t que podem ser preditores da série y_t . Lag é o número de períodos de tempo que separa duas séries temporais. Esta função apresenta um conjunto de correlação entre a série x_{t+k} e a série y_t , em que o k (Lag)= $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm p$, e pode resultar k em valor negativo ou positivo. Se k for negativo significa que há correlação entre a série x_t , em um tempo antes de t , com a série y_t no tempo t , interpreta-se que x_{t+k} é preditor da série y_t , a série x_t lidera a y_t . Por outro lado, se o valor de k for positivo, há correlação entre a série x_t e a y_t em um tempo depois de t , logo, x_{t+k} é preditor de y_t , a série x_t atrasa a série y_t (FERRARI; KARMANN, 2008; MINITAB LLC, 2021).

Fórmula da Função de Correlação Cruzada:

$$\frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_{t+k} - \bar{X})(Y_t - \bar{Y})}{S_x S_y}$$

Notação da fórmula:

n : Número de observações

t : Número da linha

k : Lag

\bar{X} : Média de X

\bar{Y} : Média de Y

$$S_x : \sqrt{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2}$$

$$S_y : \sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}$$

3.3.1.2.1 Teste de significância da correlação

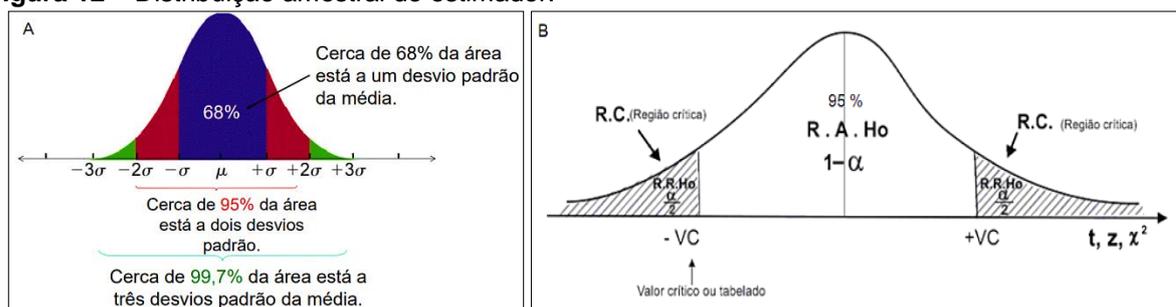
O teste de significância é utilizado para constatar se a correlação entre as séries é significativa. Para isso especifica-se o teste de hipótese bilateral:

$$H_0: r_{xy}(k) = 0$$

$$H_1: r_{xy}(k) \neq 0$$

Se a correlação cruzada da população de Lag k for igual a 0 ($r_{xy}(k) = 0$) para $k=1,2,3,\dots$, para n amostras grande, $r_{xy}(k)$ será aproximadamente distribuído normalmente na curva do teste, sendo a média (μ) igual a 0 e o desvio padrão (σ) igual a 1 (Figura 12-a), representado pela fórmula $\frac{1}{\sqrt{n-[k]}}$. Nesse estudo, define-se que o nível de significância é de $\alpha = 5\%$. Assim, existe uma probabilidade de até 5% que erroneamente haverá rejeição da hipótese nula, a qual representa que a correlação cruzada entre as séries não é significativa. Logo, pode-se também concluir que aproximadamente 95% da população normal está a 2 desvios padrão da média (Figura 12-b), representado pela fórmula $\frac{2}{\sqrt{n-[k]}}$, e dessa forma é possível testar a hipótese alternativa e identificar se a correlação entre as séries é significativa quando $r_{xy}(k)$ for maior que $\frac{2}{\sqrt{n-[k]}}$ (ECHEVESTE,1988; MINITAB LLC, 2021).

Figura 12 – Distribuição amostral do estimador.



Fonte: Larson; Farber (2004) – A: Regra da distribuição normal; Adaptado de Assis et al. (2020) – B: Curva do teste de hipótese bilateral mostrando as regiões críticas (R.C.) ou de rejeição de H_0 (R.R. H_0) e de aceitação de H_0 (R.A. H_0).

Desta forma, se:

$$r_{xy}(k) > t = \frac{2}{\sqrt{n-[k]}}, \text{ rejeita } H_0, \text{ a correlação é significativa.}$$

$$r_{xy}(k) < t = \frac{2}{\sqrt{n-[k]}}, \text{ aceita } H_0, \text{ a correlação não é significativa.}$$

3.3.2 Dados cartográficos e Sensoriamento Remoto

A partir dos dados cartográficos foram produzidos mapas temáticos da pedologia e litologia em escala 1:3.000.000, através do uso do software *Qgis versão 3.16 'Hannover'*. A projeção está no Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum SIRGAS 2000, sendo também este sistema de referência espacial e de coordenadas, e escala supracitada, para os mapas temáticos que utilizaram dados raster.

Utilizaram-se imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) para obter o Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros. Essas imagens de radar contribuíram na elaboração de mapas temáticos hipsométricos e declividade da área de estudo. Foram realizados os procedimentos do pré-processamento de 26 cenas SRTM para abranger todo Sistema Aquífero Alter do Chão no Estado do Pará, sendo necessário fazer um mosaico com estas cenas e depois recortar utilizando o polígono da área de estudo.

Na elaboração dos mapas hipsométricos foram definidas 11 classes de elevação com intervalos de 40 m. No mapa de declividade foi utilizado a ferramenta *r.reclass* para reclassificar a declividade gerada no MDE a partir da ferramenta *declive*, a reclassificação foi definida em graus e consistiu conforme Embrapa (1979) descrito no Quadro 5.

Quadro 5 - Classificação da declividade.

Declividade	Discriminação
0 a 3 graus	Relevo plano
3 a 8 graus	Relevo suavemente ondulado
8 a 20 graus	Relevo ondulado
20 a 45 graus	Relevo fortemente ondulado
45 a 75 graus	Relevo montanhoso
> 75 graus	Relevo fortemente montanhoso

Fonte: Embrapa (1979).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos das correlações Pearson e Cruzada, entre os dados da precipitação pluviométrica e nível de água do período de 2013 a 2020, e da análise de recarga e drenagem considerando-se os dados de localização, declividade, litoestratigrafia e tipo de solo, de acordo com a metodologia aqui proposta, serão mostrados e discutidos conforme se segue.

4.1 Comportamento do Nível de Água relacionado à Precipitação Pluviométrica

Nos Quadros 6 e 7 resumem-se, respectivamente, os resultados e interpretações das correlações simples e cruzada mostradas em imagens nos Gráficos 1 (dispersão) e 2 (correlação cruzada (FCC)) abaixo, em que se baseia a discussão do comportamento do nível de água dos poços em estudo, considerando-se as variáveis nível de água e precipitação pluviométrica.

Quadro 6 - Descrição dos resultados das correlações simples entre precipitação e nível da água (NA)

Municípios	Média do NA	Média da Precipitação Pluviométrica	Valor de Pearson	Interpretação da Correlação simples	Período sem dados do NA
Almeirim	2,47 m	172,80 mm	- 0,50	Negativa moderada	nov./2015 a jun./2016 abr. a dez./2020
Monte Alegre	9,97 m	141,76 mm	0,04	Positiva bem fraca	nov./2018 a fev./2019 set./2019 a dez./2020
Óbidos	13,06 m	199,09 mm	- 0,27	Negativa fraca	mar./2018
Oriximiná	49,08 m	199,09 mm	0,17	Positiva bem fraca	jul./2014 a jun./2016
Prainha	6,60 m	140,07 mm	- 0,36	Negativa fraca	jan. a jun./2014 nov./2015 a jun./2016 nov./2019 a set./2020
Santarém	21,20 m	204,44 mm	- 0,16	Negativa bem fraca	jan. e fev./2013 dez./2016 a mar./2017 nov./2019 a dez./2020

Fonte: Autora (2021).

Quadro 7 - Descrição da associação da correlação cruzada com os níveis de água dos poços.

Municípios	Correlação Cruzada (Gráfico 2)	Interpretação do tempo de resposta dos poços de monitoramento após os eventos de precipitação.
Almeirim	5 meses	Os níveis mínimos de água ocorrem no mês de maio com aumento significativo a partir do mês de setembro para atingir os níveis máximos com pico no mês de novembro (Gráfico 8).
Monte Alegre	3 meses	Os níveis mínimos de água ocorrem no mês de junho. Apenas em 2017 foi em maio. O aumento significativo dos níveis ocorre a partir de agosto (incluindo o ano de 2017) para atingir os níveis máximos que ocorrem entre dezembro e janeiro (Gráfico 3).
Óbidos	4 meses	Os níveis mínimos de água ocorrem no mês de maio entre 2013 a 2018, e no mês de junho em 2019 e 2020. O aumento significativo dos níveis ocorre a partir de: agosto em 2014, 2017 e 2018; setembro em 2013 e 2015; outubro em 2016, julho em 2019 e 2020. Os níveis máximos ocorrem entre outubro a dezembro (Gráfico 5).
Oriximiná	2 meses	Os níveis mínimos de água ocorrem nos meses de: junho em 2013, 2014, 2018, 2019 e 2020; maio e setembro em 2017; fevereiro e setembro em 2020, e abril em 2013. O aumento significativo dos níveis ocorre nos meses posteriores aos níveis mínimos. Os níveis máximos ocorrem entre dezembro e janeiro (Gráfico 4).
Prainha	4 meses	Os níveis mínimos de água ocorrem nos meses de: maio em 2013 e 2017; e junho em 2015, 2018 e 2019. O aumento significativo dos níveis ocorre a partir de: agosto em 2013, 2014, 2016 e 2017, e setembro em 2015, 2018 e 2019. Os níveis máximos ocorrem entre novembro e dezembro (Gráfico 6).
Santarém	3 meses	Os níveis mínimos de água ocorrem nos meses de: agosto em 2013 e 2016; julho em 2014; maio em 2015; abril em 2017, 2018 e 2019, e junho em 2017. O aumento significativo dos níveis ocorre no terceiro mês contando com os meses dos níveis mínimos. Os níveis máximos ocorrem entre novembro e janeiro (Gráfico 7).

Fonte: Autora (2021).

A dispersão visualizada no Gráfico 1 mostra:

(i) correlação positiva bem fraca para a série de dados de Monte Alegre e Oriximiná. Isto é detalhado, respectivamente, no comportamento dos níveis de água (Gráficos 3 e 4) em que a maioria desses níveis está abaixo da média de 9,97 m e totalmente abaixo da média de 49,08 m durante o período chuvoso de 2013 a 2015, mas a partir de 2016 os níveis estão mais acima da média durante o período de chuvas. Ambas as séries apresentam tempo de resposta significativa obtido na correlação cruzada, porém a série de Monte Alegre possui o pico mais alto do que a de Oriximiná (Gráfico 2). Isso ocorre por causa da variabilidade dos níveis mínimos

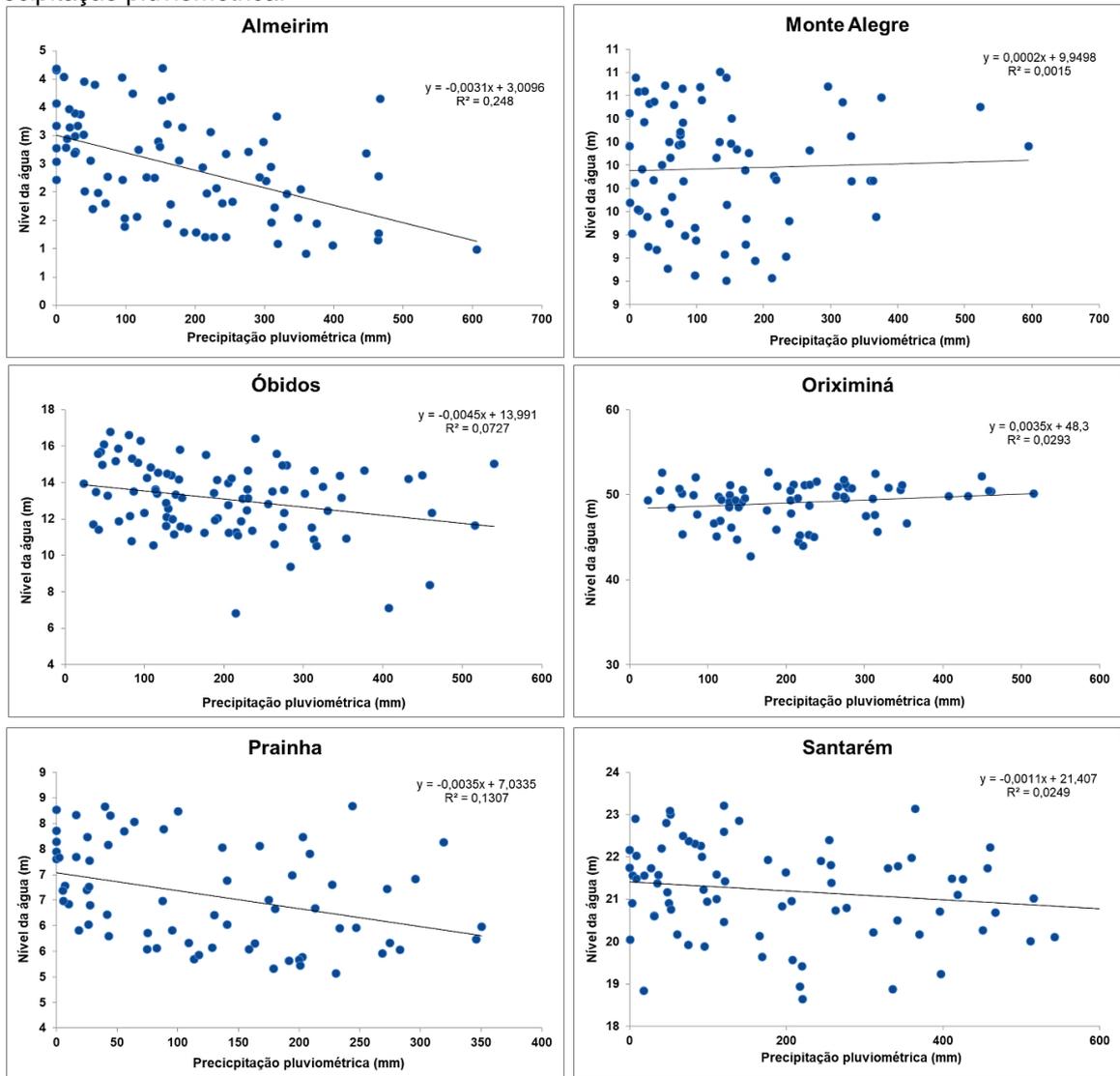
de água da série de dados de Oriximiná que, contudo, apresenta consistência com o tempo de resposta de aumento dos níveis d'água como descrito no Quadro 7;

(ii) Correlação negativa fraca para a série de Óbidos e Prainha (Gráfico 1): como pode ser observada nos Gráficos 5 e 6, há presença, respectivamente, de maiores quantidades de ocorrências de níveis d'água abaixo da média de 13,06 m e 6,60 m durante os momentos de intensas precipitações de 2013 a 2015, mas a partir de 2016 esses níveis tendem ser posicionados mais acima da média para a série de Prainha, e para Óbidos os níveis se mantêm acima da média entre 2016 a 2018, após esse período voltam apresentar maiores quantidades abaixo da média. Sob outra perspectiva o tempo de resposta obtido na correlação cruzada é significativo para as duas séries de dados, no entanto a série de Prainha apresenta pico mais alto (Gráfico 2). Nota-se que na série de dados de Óbidos o comportamento das curvas no gráfico de variações possui várias oscilações por causa da instabilidade dos níveis mínimos d'água e também no tempo de resposta de aumento desses níveis descrito no Quadro 7. No caso de Prainha, apesar de haver leves variabilidades dos níveis mínimos de água, estes correspondem ao tempo de resposta de aumento desses níveis;

(iii) A série de dados de Santarém possui correlação negativa bem fraca: seus níveis de água tendem estar mais acima da média de 21,20 m (Gráfico 7), porém os maiores picos estão abaixo desta. Além disso, nos anos de 2014 e 2018 os níveis que estão acima da média ao invés de se assemelharem ao volume de chuvas ocorrido nesses períodos, demonstram redução. Esta série apresenta correlação cruzada significativa, embora haja algumas oscilações dos níveis mínimos d'água, que mostra também que o tempo de resposta para aumento do nível da água é o mesmo (Gráfico 2);

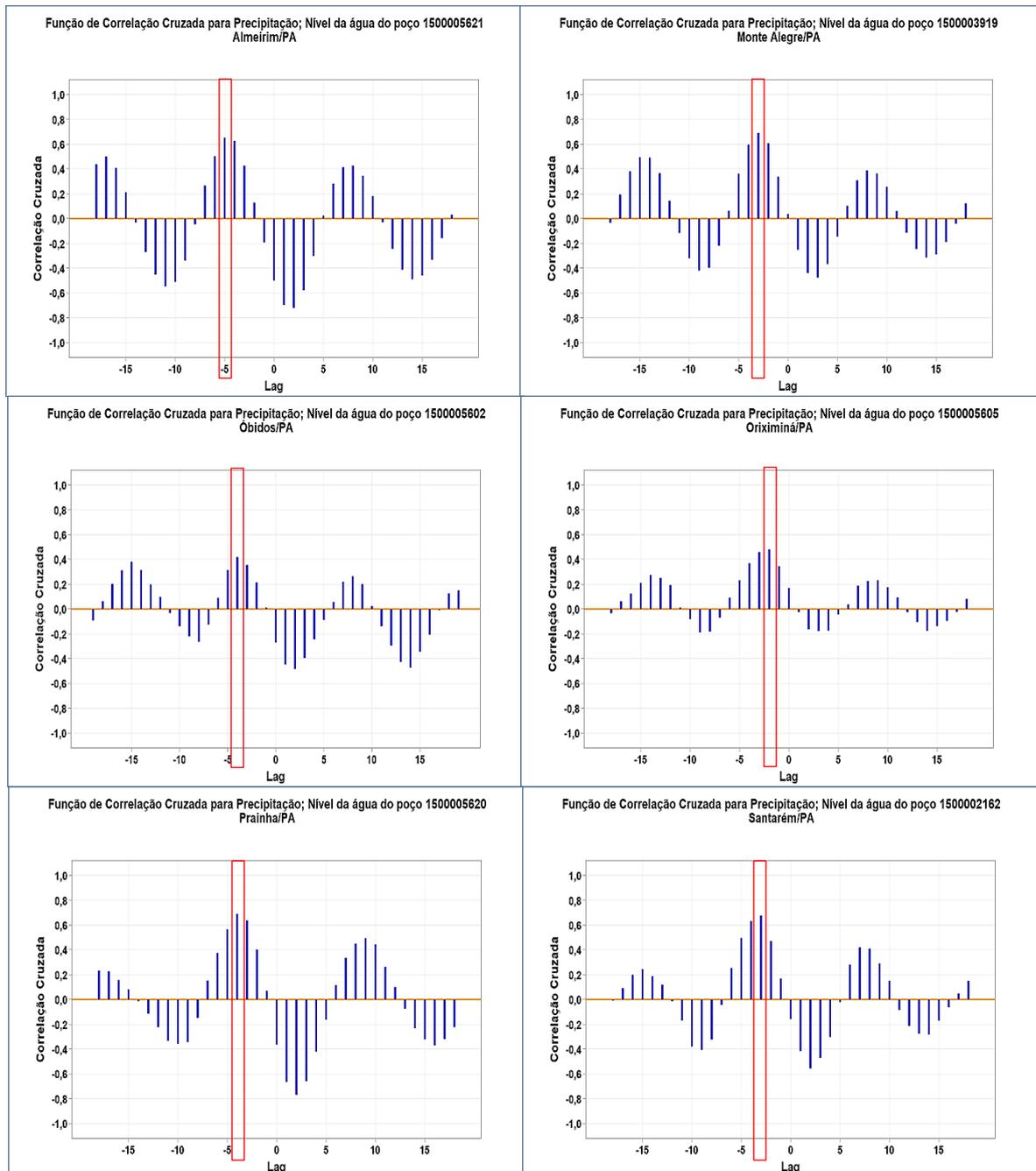
(iv) Correlação negativa moderada para série de dados de Almeirim: durante o período chuvoso entre 2013 e 2015 ocorre em maior número o registro de níveis de água abaixo da média de 2,47 m e estes níveis tendem estar mais acima da média a partir de 2016 (Gráfico 8). O tempo de resposta desta série é significativo, seus níveis mínimos de água ocorrem sempre no mesmo mês da série temporal, e o aumento dos níveis é de acordo com o resultado da correlação cruzada (Gráfico 2).

Gráfico 1 - Gráficos de dispersão entre as variáveis de nível da água dos poços de monitoramento e precipitação pluviométrica.



Fonte: Autora (2021).

Gráfico 2 - Correlação Cruzada entre a precipitação pluviométrica e nível da água dos poços de monitoramento.



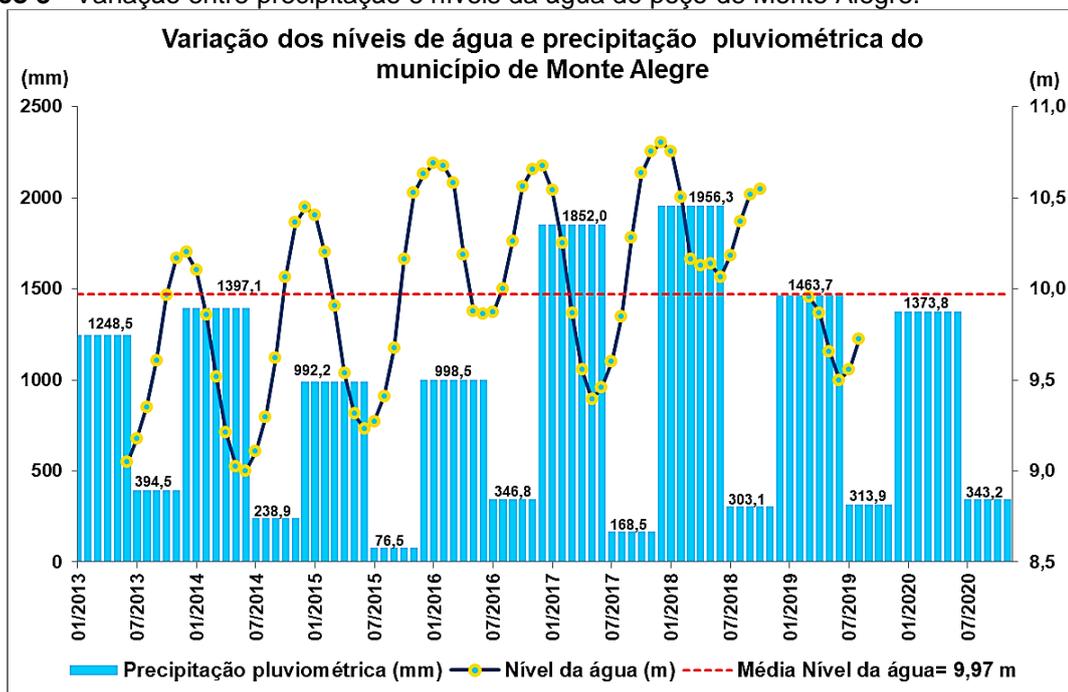
Fonte: Autora (2021).

No Quadro 8 são apresentados os cálculos que demonstram a significância da correlação entre a precipitação pluviométrica e o nível da água dos poços, comparando-se os resultados com os valores obtidos na Função de Correlação Cruzada (FCC) realizada mediante uso do *Minitab Statistical Software*.

Quadro 8 - Teste de significância da correlação cruzada.

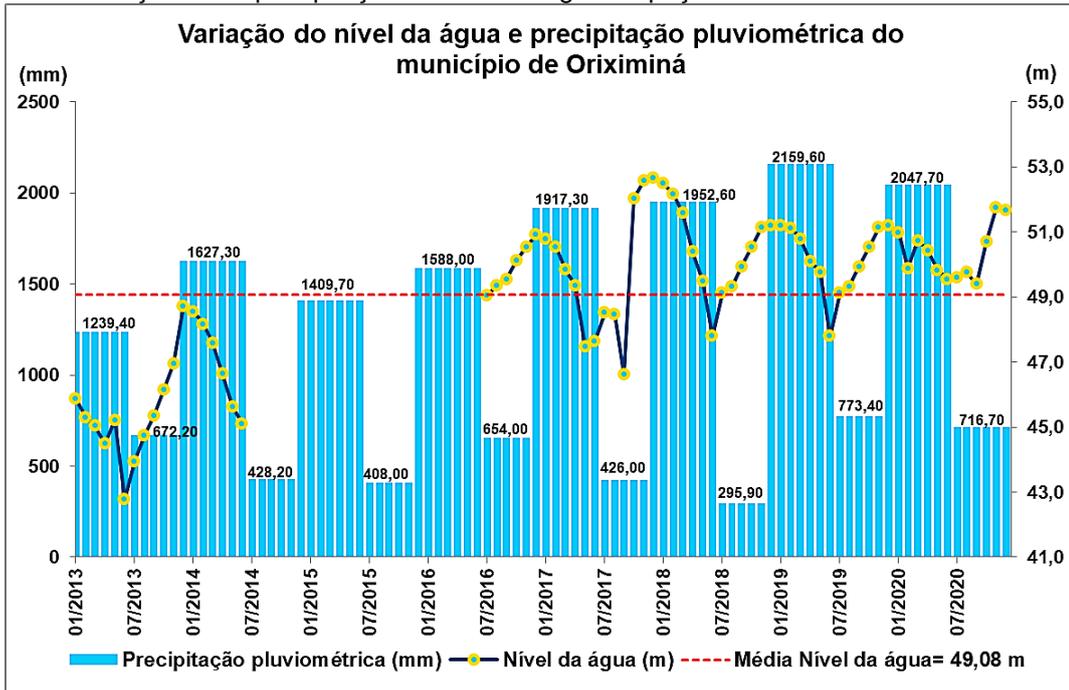
Municípios	Cálculo de significância da Correlação Cruzada: $t = \frac{2}{\sqrt{n - [k]}}$	Resultado da Função de Correlação Cruzada (FCC)
Almeirim	$\frac{2}{\sqrt{79 - [5]}} = \frac{2}{8,602325267} = 0,23$	0,653011
Monte Alegre	$\frac{2}{\sqrt{71 - [3]}} = \frac{2}{8,246211251} = 0,24$	0,691841
Óbidos	$\frac{2}{\sqrt{91 - [4]}} = \frac{2}{9,327379053} = 0,21$	0,419053
Oriximiná	$\frac{2}{\sqrt{68 - [2]}} = \frac{2}{8,124038405} = 0,25$	0,480781
Prainha	$\frac{2}{\sqrt{68 - [4]}} = \frac{2}{8} = 0,25$	0,690868
Santarém	$\frac{2}{\sqrt{76 - [3]}} = \frac{2}{8,544003745} = 0,23$	0,677816

Fonte: Autora (2021).

Gráfico 3 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Monte Alegre.

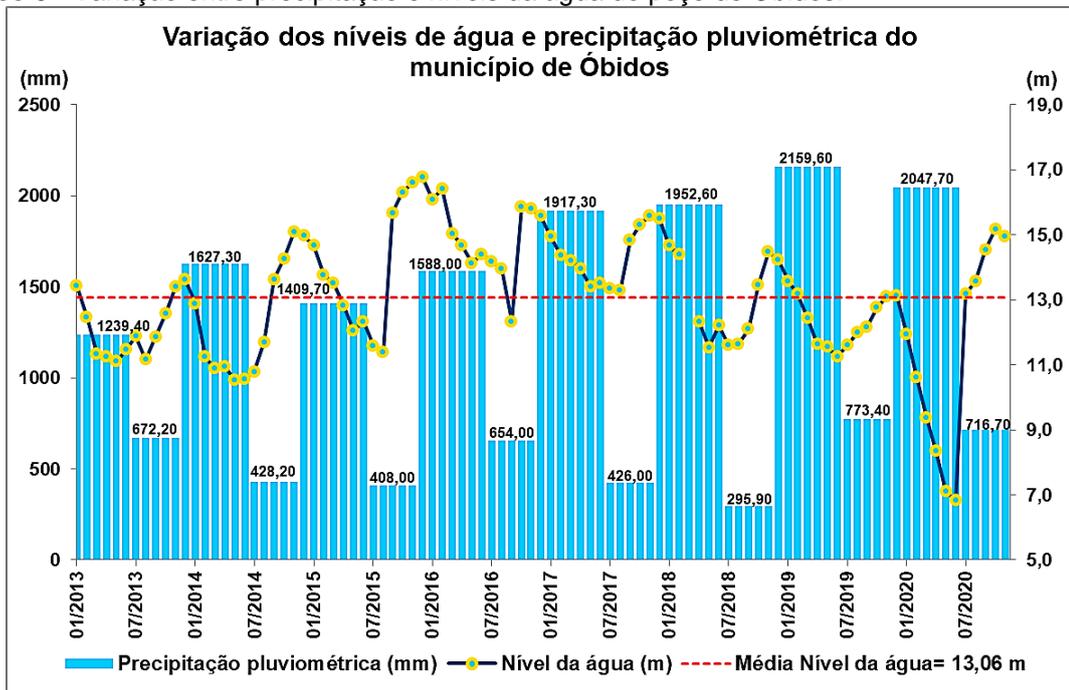
Fonte: Autora (2021).

Gráfico 4 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Oriximiná.



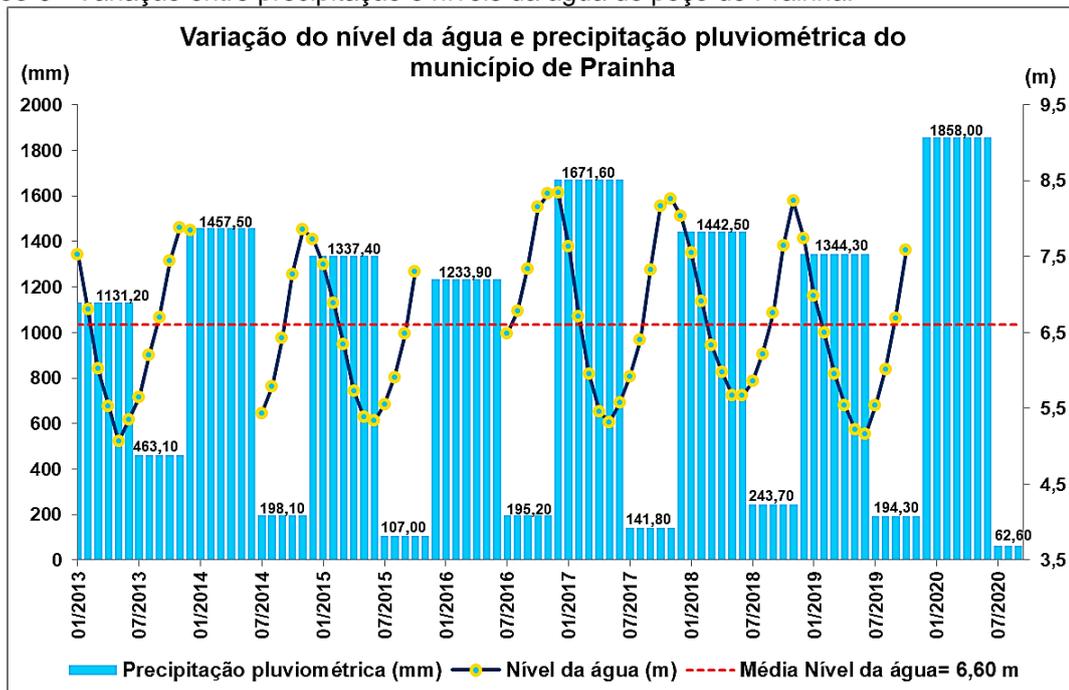
Fonte: Autora (2021).

Gráfico 5 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Óbidos.



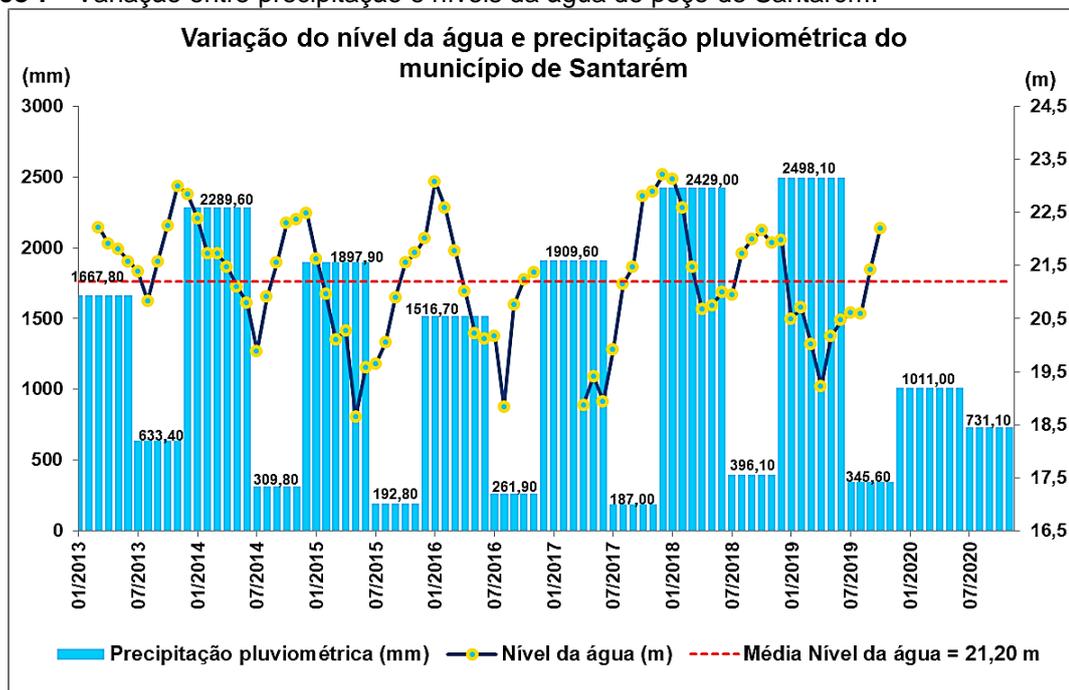
Fonte: Autora (2021).

Gráfico 6 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Prainha.

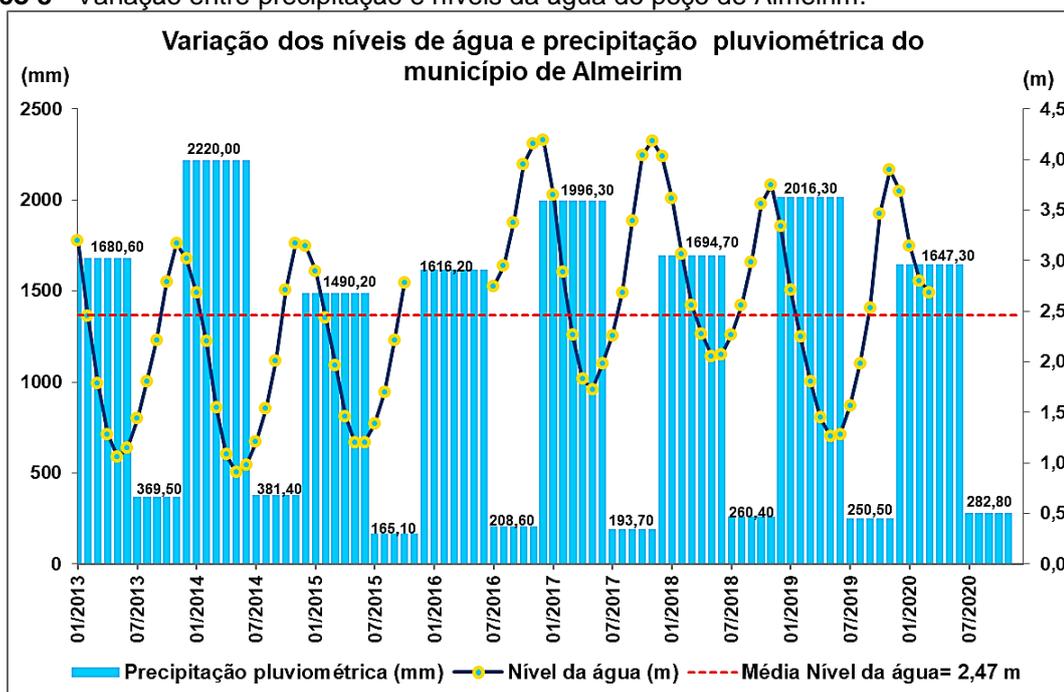


Fonte: Autora (2021).

Gráfico 7 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Santarém.



Fonte: Autora (2021).

Gráfico 8 - Variação entre precipitação e níveis da água do poço de Almeirim.

Fonte: Autora (2021).

4.2 Comportamento do Nível de Água em função do tipo de Solo e Relevo

No Mapa 4 é mostrada a localização dos poços com cada tipo de solo correspondente. Os poços de monitoramento dos municípios de Oriximiná, Óbidos e Monte Alegre estão localizados em áreas com solos do tipo latossolo amarelo. Estes solos se desenvolvem com forte processo de ferralitização, são muito intemperizados e, em geral, são profundos, porosos e permeáveis. São solos distróficos ou alumínicos, com fração argila que pode aumentar gradualmente conforme a profundidade ou ocorrer por todo o perfil, e assim apresentar textura que variam de média a muito argilosa. Também são solos típicos de relevo plano e suave ondulado, mas também podem estar presente em relevo montanhoso, e possuem drenagem forte a moderada.

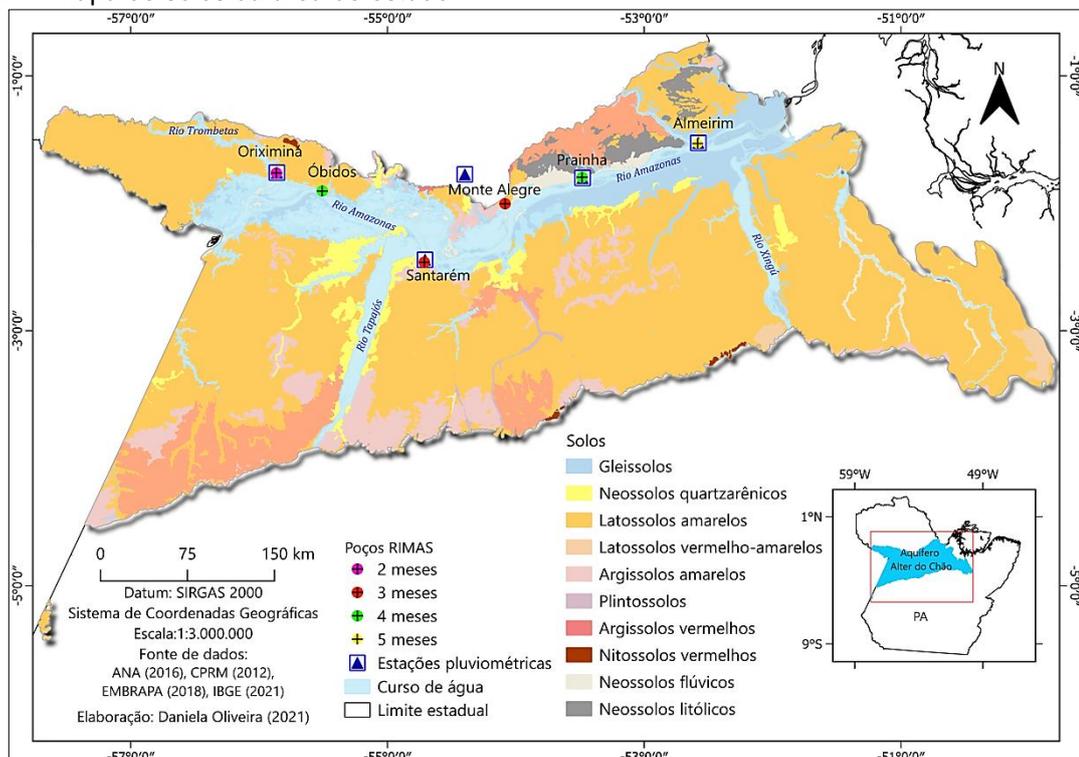
Já o solo onde está o poço de Almeirim é o tipo gleissolos que são solos caracterizados como solos minerais e hidromórficos. Tais solos sofrem grande influência do lençol freático refletida em seu perfil causando forte gleização em decorrência do regime de redução de compostos de ferro misturado com matéria orgânica. Isso se dá devido ao encharcamento do solo provocado pelo aumento do nível do lençol freático, por um longo período ou durante todo o ano. Os gleissolos são solos relativamente recentes, pouco profundos, de textura predominantemente

argilo-siltosa, permeabilidade lenta, mal drenados, com profundidade que varia em torno de 150 cm, desenvolvem-se próximo a cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais, podem estar em áreas de relevo plano de terraços fluviais, lacustres ou marinhos, e em materiais residuais em áreas de depressões. São solos que ocorrem sob vegetação hidrófila ou higrófila herbácea, arbustiva ou arbórea.

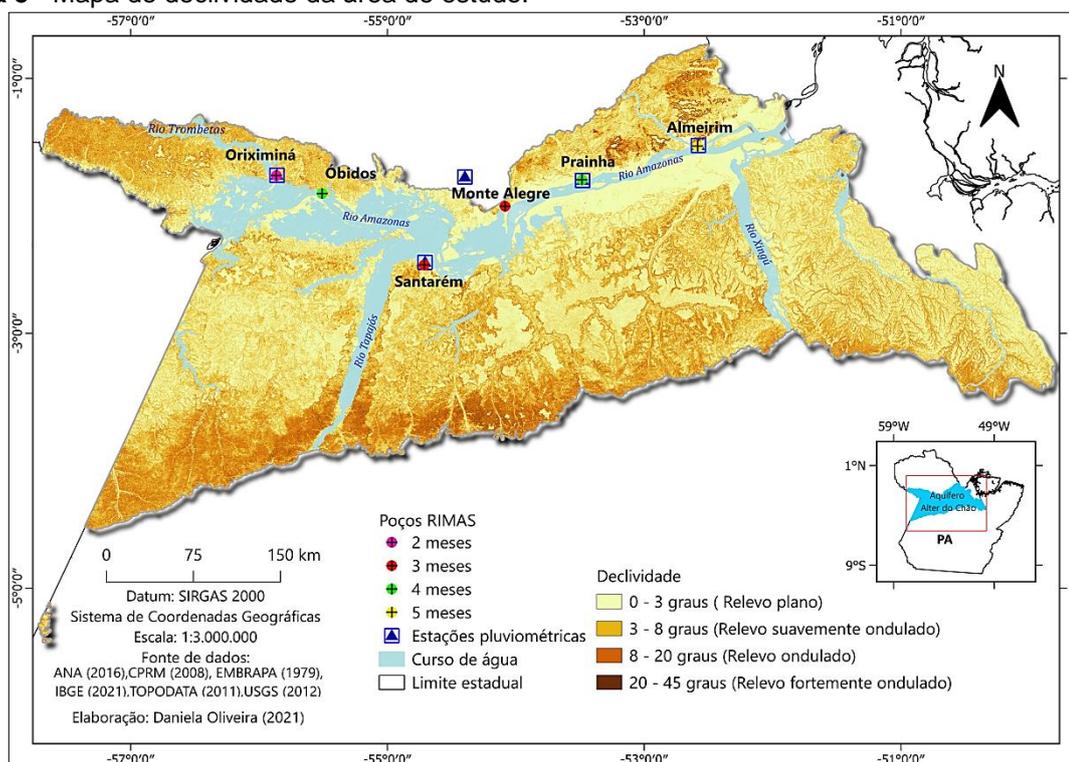
Em Prainha, o poço está localizado em área de solos pouco desenvolvidos conhecidos como neossolos litólicos. Estes solos são constituídos por material mineral ou orgânico, não possui fortes alterações em relação à rocha que lhe originou (pode ser resistente ao intemperismo ou a química-mineralógica resiste a alterações), pois os processos de formação do solo são de baixa intensidade, pode ser por conta do clima, tempo ou relevo.

O argissolo é o tipo de solo da área em que o poço de monitoramento de Santarém está localizado. Os argissolos são solos minerais, não hidromórficos, geralmente profundos, podem ser excessivamente ou mal drenados, com textura entre média arenosa e média argilosa e valores de silte relativamente altos. Podem ocorrer em relevo plano à forte ondulado (REGO et al., 1998; SANTOS et al., 2018).

Mapa 4 - Mapa de solos da área de estudo.



Mapa 5 - Mapa de declividade da área de estudo.



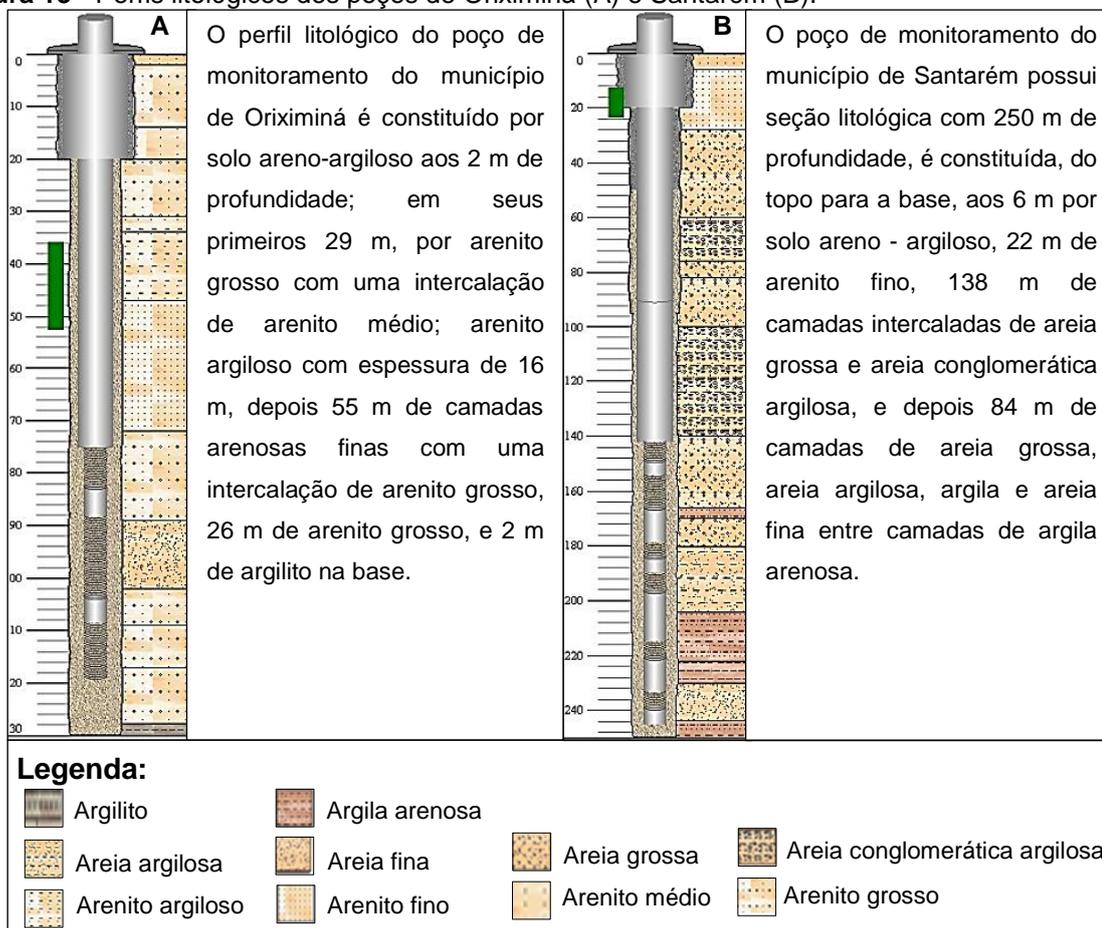
Fonte: Autora (2021).

O poço de monitoramento do município de Oriximiná foi o que apresentou o menor tempo de resposta, em comparação com os outros. Isto pode ser explicado pela distância de 500 m entre este e a estação pluviométrica com a qual foi correlacionada. O tipo de solo presente em seu terreno com relevo plano (Mapa 5) proporciona fortes condições de drenagem e sua seção litológica possui composição predominantemente arenítica.

O poço do município de Santarém apresenta seção arenosa, embora esteja a 2,3 km de distância de sua estação pluviométrica e localizado em terreno de relevo plano composto por argissolos, seu tempo de resposta é considerado satisfatório. Conclui-se que a percolação da água nestes perfis litológicos foi facilitada pela existência de camadas prevalecentes: de arenitos que variam entre fino, grosso e argiloso (poço de Oriximiná) e de areia grossa, conglomerática e argilosa (poço de Santarém) na zona não saturada, além de possuir camadas areníticas e arenosas grossas, e porções de argila arenosa na zona saturada próximo aos filtros, como pode ser observado na Figura 13. Naturalmente nos períodos chuvosos deve ocorrer maior infiltração da água para o aquífero, mas estes poços deixam em evidência que a composição da litologia pode afetar o tempo de

recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão em relação às chuvas, mesmo que o tipo de solo seja pouco poroso acima de um afloramento expressivamente arenítico.

Figura 13 - Perfis litológicos dos poços de Oriximiná (A) e Santarém (B).

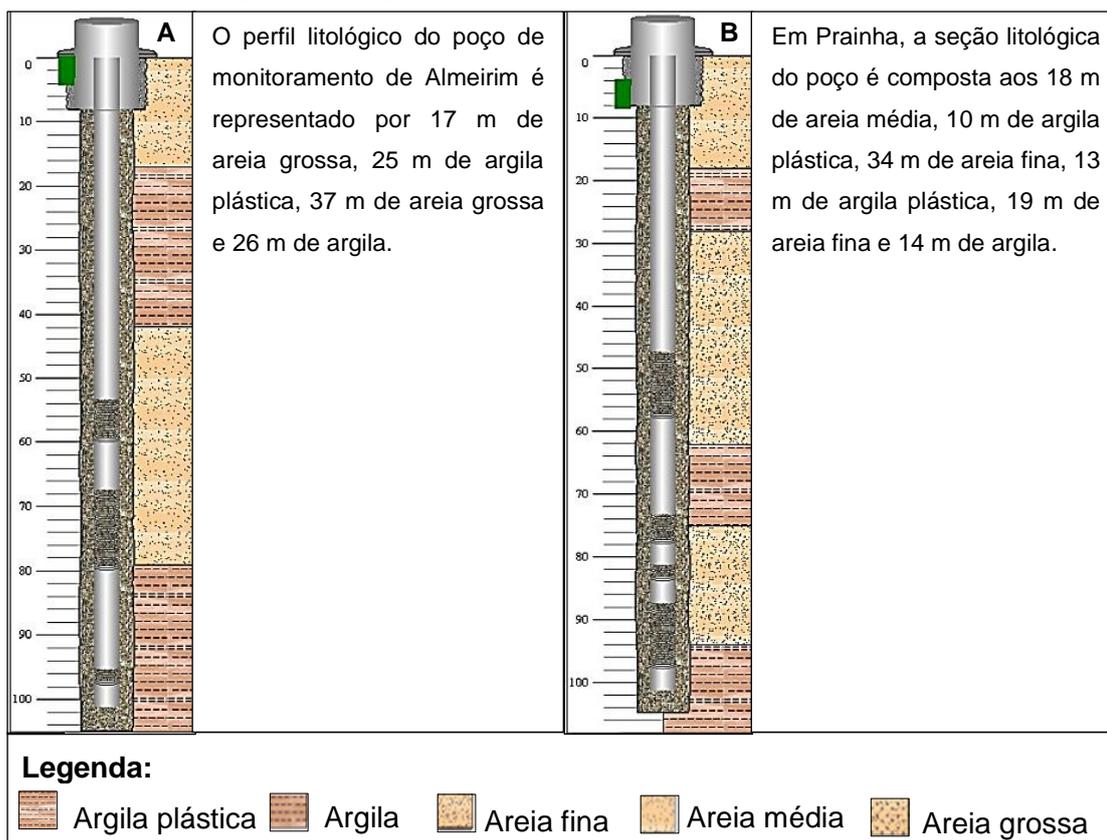


Fonte: Adaptado de RIMAS/CPRM (1998) – A: Oriximiná; B: Santarém.

O poço de monitoramento de Almeirim está a 800 m e o de Prainha a 700 m de distância da estação pluviométrica com as quais foram correlacionados, embora estejam próximos, foram os que apresentaram os maiores tempos de resposta aos eventos de precipitação. No caso de Almeirim, o poço se localiza em um terreno de relevo plano com tipo de solo que está sempre ou periodicamente saturado por água, e em Prainha, o solo é pouco evoluído em relevo plano. Ao analisar as descrições das seções litológicas (Figura 14), percebe-se que a percolação da água é de forma muito lenta, por conta da existência de camadas espessas de argila plástica na zona não saturada, bem como próximas aos filtros na zona saturada, que impossibilita que os poços apresentem níveis de água com médias superiores aos 2,47 e 6,60 m, estes níveis são os mais baixos em

comparação aos dos outros poços. Observa-se que as condições de chuvas e solos são favoráveis para infiltração da água, mas a composição da seção litológica dificulta um pouco a recarga do aquífero, uma vez que argila plástica é uma litologia com baixa permeabilidade e pouca porosidade.

Figura 14 - Perfis litológicos dos poços de Almeirim (A) e Prainha (B).



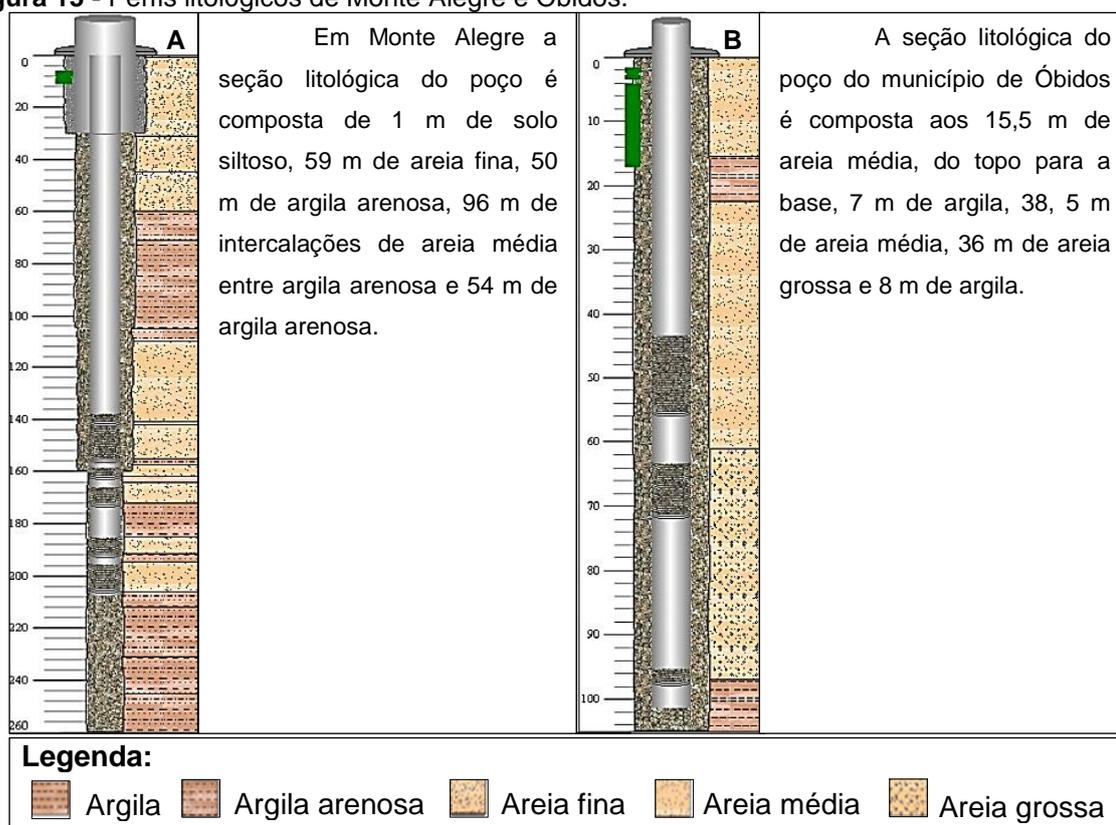
Fonte: Adaptado de RIMAS/CPRM (2012) – A: Almeirim; B: Prainha.

Já os poços de Monte Alegre e Óbidos estão respectivamente a 43,1 e 42,3 km de distância das estações pluviométricas com as quais foram correlacionados. O poço de Monte Alegre apresentou tempo satisfatório na elevação do seu nível de água, enquanto o poço de Óbidos teve maior tempo. Estes poços estão localizados em ambientes de latossolos amarelos, que são solos com forte a moderada drenagem.

A seção litológica de Monte Alegre possui mais intercalações de argila arenosa entre camadas arenosas em relação à seção de Óbidos, que possui uma camada pouco espessa de argila, em meio a camadas arenosas ao longo do perfil, na zona não saturada e outra no fim da seção na zona saturada (Figura 15). É possível perceber que o perfil litológico do poço de Óbidos tem condições propícias

para elevados níveis de água e menor tempo de resposta aos eventos de chuvas, a média de seu nível de água é 13,06 m enquanto o de Monte Alegre é 9,97 m, mas por estar localizado em terreno com relevo ondulado (Mapa 5), o tempo de resposta foi mais longo, enquanto o poço de Monte Alegre está em relevo plano pode elevar mais rápido seu nível de água, porém não mais do que em Óbidos, por conta de suas maiores quantidades de camadas de argila.

Figura 15 - Perfis litológicos de Monte Alegre e Óbidos.



Fonte: Adaptado de RIMAS/CPRM (2002, 2012) – A: Monte Alegre; B: Óbidos.

Percebeu-se que o comportamento da curva dos níveis de água dos poços de monitoramento reflete o sentido descendente durante o período chuvoso na região, e ascendente durante o período seco. Diante disso, foi possível compreender por meio das análises estatísticas que a correlação das variáveis de precipitação e nível da água é inversamente proporcional, o que significa que enquanto a precipitação pluviométrica (variável independente) apresenta aumento de volume por conta do período chuvoso, os níveis de água dos poços de monitoramento (variável dependente) tendem a diminuir, e no período seco os níveis

de água tendem a aumentar, embora em algumas ocasiões estas variáveis sejam diretamente proporcionais.

A partir disso, entende-se que as séries de dados analisadas apresentam aumento atrasado no nível da água dos poços, visto que é natural no período chuvoso ocorrer infiltração de forma que atinja o reservatório subterrâneo. Com base nisso a FCC identificou valores negativos para as *lags* das séries temporais analisadas. Isso significa que há correlação entre as séries x_{t+k} e as séries y_t em um tempo antes de t , isto é, o valor das *lags* de x_t (Gráfico 2) é a previsão de aumento do nível da água dos poços em resposta aos eventos de precipitações que ocorreram anteriormente. O x_{t+k} representa aumento das chuvas e consequente aumento do nível da água.

Pois, sabe-se que as precipitações geram recarga dos reservatórios subterrâneos, e os resultados como *lags* negativos para x_t o torna “líder” sobre y_t , uma vez que y_t representa eventos anteriores de precipitação causa variação do nível da água dos poços, ou seja, os eventos de chuvas que ocorreram anteriormente podem aumentar ou não o nível da água dos poços. E para as séries de dados analisadas, x_t indica que os eventos de precipitações pluviométricas anteriores aumentam os níveis da água dos poços de monitoramento em um tempo t que varia entre 2 e 5 meses.

A partir dos mapas temáticos foi possível realizar uma inferência entre o tempo de resposta aos eventos de precipitação e a composição dos tipos de solos, da geologia e a declividade do terreno onde os poços estão localizados, uma vez que os componentes físicos naturais são fatores que influenciam no escoamento da água precipitada até aos aquíferos.

Com base nisso, os poços que elevaram seus níveis de água mais rápido, em comparação com os outros, apresentam seções litológicas areníticas localizadas em relevo plano, e aqueles com seções litológicas predominantemente argilosas em relevo plano são suscetíveis à elevação mais lenta dos níveis. Em contrapartida, a seção litológica argilosa em relevo plano apresenta elevação dos níveis mais rápida do que a seção arenítica localizada em relevo ondulado.

Em relação aos tipos de solos identificados, infere-se que estes podem não influenciar no tempo de resposta dos níveis de água aos eventos de precipitação, porque os poços de Almeirim e Prainha estão localizados em relevos planos compostos por solos favoráveis a infiltração e com seções litológicas

argilosas. Com efeito, as elevações dos níveis de água são mais lentas, além de apresentarem as menores médias dos níveis de água, como também ocorre no poço de Monte Alegre.

Quanto ao nível de confiança dos resultados obtidos na correlação cruzada, conclui-se que a correlação entre todas as séries dos níveis de água dos poços de monitoramento e precipitação pluviométrica é significativa com 95% de confiança.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos possibilitaram compreender que a relação entre as precipitações pluviométricas e o Aquífero Alter do Chão não é um para um, pois os níveis de água sobem apenas depois de ter ocorrido os eventos de precipitações em um tempo que varia entre 2 e 5 meses.

Essa previsão da elevação dos níveis de água pode estar associada com a composição geomorfológica e geológica do terreno de localização dos poços de monitoramento. Foi identificado que os poços em terrenos planos com litologias de predominância arenítica são suscetíveis à elevação mais rápida dos níveis de água, em comparação aos poços em terrenos planos com espessas litologias argilosas e ao terreno ondulado com litologia arenítica.

As características dos solos podem não influenciar no tempo de elevação dos níveis de água, mas provavelmente podem influenciar no volume de água retido pelos poços dependendo da litologia. Por exemplo, este pode ser o caso dos poços de Oriximiná e Óbidos onde as maiores médias dos níveis de água podem ser resultantes tanto da localização em latossolos amarelos como da seção litológica predominante arenítica. Este tipo de solo possui forte condição de drenagem e a seção litológica dos poços apresenta alta porosidade. Mas, é necessário realizar estudos mais abrangentes, considerando-se maior número de poços com monitoramento contínuo, com a finalidade de verificar se a recarga do Aquífero Alter do Chão é associada apenas aos eventos de precipitações pluviométricas articulando à capacidade de volume de água dos poços considerando o tipo de solo, litologia e relevo.

Os perfis litológicos dos poços de monitoramento apresentam condição de aquífero livre para o poço de Óbidos e de aquíferos confinados para os demais poços. No presente trabalho, estas condições do Aquífero Alter do Chão não são correlacionadas entre as séries de dados de precipitação pluviométrica e as séries de nível da água, apenas consideraram-se os aspectos litoestratigráficos destes aquíferos para as diferentes explicações em conformidade com os resultados das correlações estatísticas. Em vista disso, pretende-se realizar futuros estudos com uso de ferramentas mais sofisticadas para correlacionar estes tipos de aquíferos (livre, confinados e também os semiconfinados) com o tempo de resposta de elevação dos níveis estáticos. Pois, provavelmente, esta correlação pode constatar

se os níveis estáticos dos aquíferos confinados, por exemplo, estão diretamente associados aos eventos de precipitações locais e/ou aos que ocorrem a quilômetros de distância de suas áreas de recarga.

Este estudo realizado no Aquífero Alter do Chão se fez necessário para reforçar a ideia e importância do uso integrado de ferramentas estatísticas, dados físicos de monitoramento de águas subterrâneas, dados construtivos dos poços e uso do geoprocessamento para identificar a influência do meio físico natural, e suas relações, no processo de recarga, e assim contribuir para o gerenciamento, gestão integrada e uso sustentável deste aquífero. Além de ser uma proposta de um importante instrumento para o planejamento no ato de distribuição de água para a população do Baixo Amazonas, de modo que as ferramentas estatísticas de previsões sejam utilizadas para identificar qual o momento ideal para explorar água do Aquífero Alter do Chão, e assim minimizar as consequências negativas que parte da população sofre com a falta de água.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. **Origem e evolução da plataforma brasileira**. Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia, Rio de Janeiro, n. 241, p. 36, 1967.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. In: MANTESSO-NETO, Virginio; BARTORELLI, Andrea; CARNEIRO, Celso Dal Ré; BRITO-NEVES, Benjamin Bley. (Org.). **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 43-60.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000). V. I: Balanço Hídrico da Província Hidrogeológica Amazonas**. Brasília: ANA, 2015. p. 306.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000). V. II: Geologia da Província Hidrogeológica Amazonas**. Brasília: ANA, 2015. p. 130.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil, e, Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Coordenação geral: João Gilberto Lotufo Conejo; Coordenação executiva: Marcelo Pires da Costa, José Luiz Gomes Zoby. Brasília: ANA, 2007. p. 124.

ASSIS, Janilson Pinheiro de; SOUSA, Roberto Pequeno de; LINHARES, Paulo César Ferreira. **Testes de hipóteses estatísticas**. Mossoró: EdUFERSA, 2020. E-book Disponível em: <https://livraria.ufersa.edu.br/>. Acesso em: 22 agosto 2021.

BARBOSA, Marcela Barcelos. **Aplicação do geoprocessamento na análise dos fatores condicionantes das variações do nível de água subterrânea do Sistema Aquífero Bauru**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

BARRY, Graham Roger; CHORLEY, Richard John. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

BENTES, Valéria de Sousa; ALMEIDA NETO, Geraldo Walter de; MESCHÉDE, Marina Smidt Celere. Qualidade da água utilizada para consumo humano proveniente do Aquífero Alter do Chão em Santarém (Oeste do Pará) e sua relação com a saúde pública. **Geochimica Brasiliensis**. v. 34, n.1, p. 101 - 109, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2020341101>. Acesso em: 14 abril 2022.

BORGHETTI, Nadia Rita Boscardin; BORGHETTI, José Roberto; ROSA FILHO, Ernani Francisco. **Aquífero Guaraní a Verdadeira Integração dos Países do Mercosul**. Curitiba: Os Autores. 2004.

BROWN, Theodore Lawrence; LEMAY, H. Eugene; BURSTEN, Bruce Edward. **Química: A Ciência Central**. 13. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2016.

CARVALHO, Leila Maria Vespoli de; SILVA, Ana Elizabethe da; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant; DIAS, Pedro Leite da Silva. Moisture transport and intraseasonal variability in the South America monsoon system. **Springer**, v. 36, p. 1865–1880, 2011.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-010-0806-2#Sec1>. Acesso em: 23 julho 2021.

CARNEIRO Celso Dal Re; CAMPOS, Heraldo Cavalheiro Navajas Sampaio. Recursos Hídricos Subterrâneos. In: HASUI, Yociteru; CARNEIRO, Celso Dal Re; ALMEIDA, Fernando Flavio Marques de; BARTORELLI, Andrea (Org.). **Geologia do Brasil**. 1. ed. São Paulo: Beca, 2013.p. 797 – 813.

CAPUTO, Mário Vicente. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 1984. 583 f. Tese (Doutorado) - College of Letters and Science, Universidade da Califórnia, Santa Bárbara, 1984.

COHEN, Júlia Clarinda Paiva; SILVA DIAS, Maria Assunção Faus da; NOBRE, Carlos Afonso. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia (Climatological features of squall lines over Amazonia). **Climanálise**, v. 4, n. 11, p. 34–40, 1989. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GTiGB?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR>. Acesso em: 20 março 2022.

CUNHA, Paulo Roberto da Cruz; MELO, João Henrique Gonçalves de; SILVA, Osvaldo Braga da. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n.2, p. 227-251, 2007.

CUNHA, Paulo Roberto da Cruz; GONZAGA, Flávio Giotto; COUTINHO, L. F. C. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**. v. 8, n.1, p.47-55, 1994.

DAEMON, Roberto Ferreira. Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, bacia do Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 5, n.2, p.58-84. 1975.

DINO, Rodolfo; SILVA, Osvaldo Braga da; ABRAHÃO, Daniela. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 1999, Rio Claro. **Anais [...]**: Sociedade Brasileira de Geociências, 1999. p. 557-565.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Súmula. In: X REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS. **Súmula**. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

ECHEVESTE; Marcia Elisa Soares. **Relação bivariada entre séries temporais: a correlação cruzada**. 1988. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Estatística) - Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/128058>. Acesso em: 18 setembro 2021.

FEITOSA, Fernando Antônio Carneiro; MANOEL-FILHO, João. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2. ed. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2000.

FERRARI, José Antonio; KARMANN, Ivo. Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na bacia do rio Betari, Município de Iporanga – SP. **Geologia USP. Série Científica**, v. 8, n. 1, p. 1 – 13, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1519-874x2008000100001>. Acesso em: 13 setembro 2021.

FISCH, Gilberto; MARENGO, José Antonio Orsini; NOBRE, Carlos Afonso. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, Manaus, v.28, n.2, p. 101-126, 1998. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/NVRbNSn7P5z4hjtFNmMjLjx/abstract/?lang=pt> . Acesso em: 15 julho 2021.

FREEZE, R. Allan; CHERRY, John A. **Água Subterrânea**. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall: 1979. Tradução de Everton de Oliveira et al. Everton de Oliveira (Cord.). São Paulo: Everton de Oliveira, 2017. Disponível em: https://materiais.aguasustentavel.org.br/aguasub_completo. Acesso em: 19 agosto 2021.

GPCC: Global Precipitation Climatology Centre. **The Climate Data Guide**. Boulder. Disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>. Acesso em: 14 junho 2021.

GROTZINGER, John; JORDAN, Thomas. **Para Entender a Terra**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

HASTENRATH, Stefan; HELLER, Leon. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.103, n.435, p. 77- 92, 1977. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49710343505>. Acesso em: 29 março 2022.

HORTON, Robert Elmer. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**. v. 14, n. 1, p. 446 – 460, 1933. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/TR014i001p00446>. Acesso: 27 março 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Conheça cidades e estados do Brasil**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 16 março 2022.

JOÃO, Xafi da Silva Jorge; TEIXEIRA, Sheila Gatinho; FONSECA, Dianne Danielle Farias. **Geodiversidade do Estado do Pará**. Belém: CPRM, 2013.

JUNIOR, Homero Reis de Melo; MOURÃO, Maria Antonieta Alcântara. (Coord.). **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão, Bacia Sedimentar do Amazonas**. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, v. 7, 2012.

LARSON, Roland Edwin; FARBER, Betsy. **Estatística Aplicada**. 2. Ed. São Paulo: Pearson, 2004.

LIMBERGER, Leila; SILVA, Maria Elisa Siqueira. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura e da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 20, n. 3, p. 657 - 675, 2016. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/105393>. Acesso em: 27 julho 2021.

LISLE, Richard; BRABHAM, Peter; BARNES, John. **Mapeamento Geológico Básico: Guia Geológico de Campo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

MANABE, Syukuro. Carbon dioxide and climatic change. **Advances in Geophysics**. v. 25, p. 39 - 82, 1983. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60171-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60171-5). Acesso em: 23 julho 2021.

MANOEL FILHO, João. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, Fernando Antônio Carneiro; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, Edilton Carneiro; DEMETRIO, José Geilson Alves (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.p. 53 – 73.

MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Análise de séries temporais e mapeamento de características das águas subterrâneas a partir de dados de monitoramento**. 1. ed. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2018. Disponível em: https://materiais.aguasustentavel.org.br/series_temporais. Acesso em: 8 dezembro 2021.

MARENGO, José Antônio; HASTENRATH, Stefan. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin, **Journal of Climate**, v. 6, p. 617- 627, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0617:CSOECE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0617:CSOECE>2.0.CO;2). Acesso em: 29 março 2022.

MATSUDA, Nilo Siguehiko; WINTER, Wilson Rubem; WANDERLEY FILHO, Joaquim Ribeiro; CACELA, Alessandra Suzely Moda. O Paleozoico da borda sul da Bacia do Amazonas, Rio Tapajós - Estado do Pará. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 123 – 152, 2009.

MESCHEDE, Marina Smidt Celere. **Implicações para a saúde de escolares a partir Consumo de água e material particulado atmosférico Inalado em escolas de Santarém e Mojuí dos Campos, Pará, Amazônia**. 2018. 183 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/handle/123456789/64>. Acesso em: 12 abril 2022.

MEIRELES, Graciane Castro; GOMES, Nilzilene Ferreira (Org.). FEITOSA, João Roberto Pinto; NASCIMENTO, Rosy Ellem Rodrigues do; RODRIGUES, Paulina Moreira. **Chuvas**. Santarém: As Autoras. 2012, 39 p.

INTERPRETAR os principais resultados para correlação cruzada. **Suporte ao Minitab 18 – Minitab LLC**, 2021. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/time-series/how-to/cross-correlation/interpret-the-results/key-results/>. Acesso em: 20 agosto 2021.

MOLCH, Cristiano de Oliveira; SIMPLÍCIO, Luane Castro; PINHEIRO, Antônio do Socorro Ferreira. Aspecto do saneamento básico do Baixo Amazonas. **DELLOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 12, n. 35, p. 2 - 11, 2019. Disponível em: <https://www.eumed.net/rev/dellos/35/saneamento-baixo-amazonas.html>. Acesso em: 12 abril 2022.

MORAES, Bergson Cavalcanti de; COSTA, José Maria Nogueira da; COSTA, Antonio Carlos Lôla da; COSTA, Marcos Heil. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 207–214, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/3598>. Acesso em: 20 agosto 2021.

MORETTIN, Pedro Alberto; TOLOI, Clélia Maria de Castro. **Análise de séries temporais**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2006.

NOBRE, Carlos Afonso; OBREGÓN, Guillermo Oswaldo Párraga; MARENGO, José Antônio **Características do clima Amazônico: aspectos principais**. Amazon and Global Change, p. 149-162, 2009. Disponível em: https://daac.ornl.gov/LBA/lbaconferencia/amazonia_global_change/10_Caracteristicas_Nobre.pdf. Acesso em: 14 abril 2022.

NOBRE, Carlos Afonso. **The Amazon and climate, paper presented at climate Conference for Latin America and The Caribbean**, WMO, Paipa, Colombia.1983.

NOMELINI, Quintiliano Siqueira Schroden; FERREIRA, Eric Batista; NOGUEIRA, Denismar Alves; GOLYNSKI, Anselmo Afonso; GOLYNSKI, Adelmo; VILLA, Thacyo Euqueres de. Uso de modelagem univariada e multivariada com séries temporais como ferramenta de gestão do agronegócio na cultura de soja do Brasil. **Revista Espacios**. v. 38, n. 8, 2016. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n08/a17v38n08p04.pdf>. Acesso em: 7 junho 2022.

PATRICIO LUIZ, Thiago Boeno; SCHRÖDER, Thomas; SILVA, José Luiz Silvério da. Simulação dos níveis freáticos em poço tubular localizado em aquífero livre: uma comparação de técnicas preditivas. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v. 41, n. 3, p. 227-238, 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_227_238. Acesso em: 8 junho 2022.

PATRICIO LUIZ, Thiago Boeno; SCHRÖDER, Thomas; SILVA, José Luiz Silvério da. Previsão de níveis estáticos de água subterrânea em poço de monitoramento utilizando metodologia estocástica. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v. 40, n. 2, p. 53 – 60, 2017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2017_2_53_60. Acesso em: 7 junho 2022.

POETER, Eileen; FAN, Ying; CHERRY, John; WOOD, Warren; MACKAY, Douglas. **Groundwater in our water cycle – getting to know Earth’s most important fresh water source**. Guelph, Ontario, Canada: The Groundwater Project, 2020. E-book. Disponível em: <https://gw-project.org/books/groundwater-in-our-water-cycle/>. Acesso em: 19 agosto 2021.

PBEG - Projeto Brasileiro para o Ensino de Geografia. **O tempo e o clima**. São Paulo: Edart/Funbec, 1980.

REGO, Raimundo Silva; ROLLIN, Pedro Alberto Moura; RODRIGUES, Tarcísio Ewerton; CARVALHO, Eduardo Jorge Maklouf; GAMA, José Raimundo Natividade Ferreira; SILVA, João Marcos Lima da; PERES, Augusto Sérgio Gomes; PEREIRA, Isabel Cristina Bergh. **Zoneamento agroecológico das terras do município de Uruará, estado do Pará**. Belém: Embrapa-CPATU, 1998. 57p. (Embrapa - CPATU. Documentos,132).

RIBEIRO NETO, Alfredo. **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira**. 2006. 178 f. Tese (Doutorado) – Programa: Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/150-2006/1062-alfredo-ribeiro-neto>. Acesso em: 25 março 2022.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos; JACOMINE, Paulo Klinger Tito; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos; OLIVEIRA, Virlei Álvaro de; LUMBRERAS, José Francisco; COELHO, Maurício Rizzato; ALMEIDA, Jaime Antonio de; FILHO, José Coelho de Araújo; OLIVEIRA, João Bertoldo de; CUNHA, Tony Jarbas Ferreira. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 10 dezembro 2021.

SILVA, Ilitch Vitali Gomes da. **Previsão de vento para geração de energia elétrica**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, Celia Regina de Gouveia; SUGUIO, Kenitiro; OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; OLIVEIRA, Paulo Eduardo de. (Ed.). **Quaternário do Brasil**. 2. ed. Ribeirão Preto: Holos, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326518956_Quaternario_do_Brasil_2Ed. Acesso em: 12 julho 2021.

SOUZA, R. C. Metodologias para a análise e previsão de séries temporais univariadas e multivariadas. **Revista de Econometria**. v. 1, n. 2, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.12660/bre.v1n21981.3167>. Acesso em: 7 junho 2022.

TANCREDI, Antônio Carlos Felice Nicola Savério. **Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: Fundamentos para uso e proteção**. 1996. 153 f. Tese (Doutorado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/7884>. Acesso em: 30 agosto 2021.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2005.

WHAT Causes the Seasons? **Nasa Space Place**. Washington, 22 Julho 2021. Disponível em: <https://spaceplace.nasa.gov/seasons/en/>. Acesso em: 19 setembro 2021.

WHY Do We Have Seasons? **National Weather Service**. Louisville, 1999. Disponível em: <https://www.weather.gov/lmk/seasons>. Acesso em: 17 setembro 2021.

YNOUE, Rita Yuri; REBOITA, Michelle Simões; AMBRIZZI, Tércio; SILVA, Gyrlene Aparecida Mendes da. **Meteorologia: Noções básicas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

ZALAN, Pedro Victor. Evolução Fanerozóica das Bacias Sedimentares Brasileiras. In: MANTESSO-NETO, Virginio; BARTORELLI, Andrea; CARNEIRO, Celso Dal Ré; BRITONEVES, Benjamin Bley. (Org.). **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 595-612.

ZIMBRES, Eurico. **Guia avançado sobre água subterrânea**, 2007. Yumpu. [Diepoldsau, Suíça]. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/12938241/guia-avancado-sobre-agua-subterranea-883-kb-pdf>. Acesso: 22 setembro 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE I - Resultados da FCC do município de Almeirim.

Chuva_152005;NA_1500005621

FCC:Chuva_152005(t) e NA_1500005621(t+k)

Número de observações: 79

Correlações Cruzadas

Lag	FCC
-18	0,438157
-17	0,500419
-16	0,410267
-15	0,212122
-14	-0,031299
-13	-0,268577
-12	-0,451001
-11	-0,546607
-10	-0,509374
-9	-0,337557
-8	-0,045819
-7	0,267174
-6	0,504615
-5	0,653011
-4	0,626187
-3	0,428517
-2	0,129344
-1	-0,190121
0	-0,497979
1	-0,696337
2	-0,718913
3	-0,575491
4	-0,300088
5	0,025414
6	0,281996
7	0,415927
8	0,428528
9	0,345133
10	0,181882
11	-0,028454
12	-0,242330
13	-0,410128
14	-0,488588
15	-0,458295
16	-0,331532
17	-0,157823
18	0,032642

APÊNDICE II - Resultados da FCC do município de Santarém.

Chuva_254000;NA_1500002162

FCC:Chuva_254000(t) e NA_1500002162(t+k)

Número de observações: 76

Correlações Cruzadas

Lag	FCC
-18	-0,007821
-17	0,092416
-16	0,199323
-15	0,245829
-14	0,188142
-13	0,119265
-12	-0,013835
-11	-0,167012
-10	-0,378523
-9	-0,403976
-8	-0,321668
-7	-0,041776
-6	0,254838
-5	0,497039
-4	0,632334
-3	0,677816
-2	0,472119
-1	0,168133
0	-0,157687
1	-0,414861
2	-0,554572
3	-0,470236
4	-0,302751
5	-0,020437
6	0,281043
7	0,421052
8	0,411096
9	0,291682
10	0,153084
11	-0,083313
12	-0,212025
13	-0,274862
14	-0,281384
15	-0,168759
16	-0,062579
17	0,048920
18	0,151545

APÊNDICE III - Resultados da FCC do município de Óbidos.

Chuva_156000;NA_1500005602

FCC:Chuva_156000(t) e NA_1500005602(t+k)

Número de observações: 91

Correlações Cruzadas

Lag	FCC
-19	-0,090737
-18	0,064442
-17	0,204007
-16	0,312070
-15	0,380974
-14	0,315749
-13	0,198468
-12	0,098122
-11	-0,032187
-10	-0,138519
-9	-0,219594
-8	-0,263348
-7	-0,122510
-6	0,091537
-5	0,315535
-4	0,419053
-3	0,356238
-2	0,215544
-1	0,013187
0	-0,269694
1	-0,446221
2	-0,483162
3	-0,394074
4	-0,243348
5	-0,086661
6	0,058006
7	0,221625
8	0,265967
9	0,203346
10	0,024308
11	-0,138147
12	-0,292357
13	-0,423539
14	-0,471886
15	-0,342075
16	-0,205454
17	-0,007823
18	0,127007
19	0,152307

APÊNDICE IV - Resultados da FCC do município de Prainha.

Chuva_153000;NA_1500005620

FCC:Chuva_153000(t) e NA_1500005620(t+k)

Número de observações: 68

Correlações Cruzadas

Lag	FCC
-18	0,233904
-17	0,228047
-16	0,158844
-15	0,082611
-14	-0,013281
-13	-0,113949
-12	-0,221574
-11	-0,332658
-10	-0,356174
-9	-0,341090
-8	-0,146610
-7	0,153219
-6	0,375363
-5	0,567059
-4	0,690868
-3	0,637878
-2	0,404145
-1	0,071763
0	-0,361507
1	-0,662275
2	-0,767506
3	-0,656600
4	-0,418860
5	-0,161659
6	0,116628
7	0,336254
8	0,450572
9	0,494358
10	0,444550
11	0,265638
12	0,100215
13	-0,072785
14	-0,228982
15	-0,321136
16	-0,368858
17	-0,316711
18	-0,221597

APÊNDICE V - Resultados da FCC do município de Monte Alegre.

Chuva_154000;NA_1500003919

FCC:Chuva_154000(t) e NA_1500003919(t+k)

Número de observações: 71

Correlações Cruzadas

Lag	FCC
-18	-0,033321
-17	0,195750
-16	0,381858
-15	0,494695
-14	0,493132
-13	0,367864
-12	0,144544
-11	-0,114252
-10	-0,319957
-9	-0,417101
-8	-0,395658
-7	-0,217156
-6	0,064042
-5	0,361974
-4	0,597838
-3	0,691841
-2	0,608778
-1	0,338577
0	0,039237
1	-0,250357
2	-0,438230
3	-0,473520
4	-0,365757
5	-0,144458
6	0,104082
7	0,310112
8	0,389141
9	0,365962
10	0,257558
11	0,061533
12	-0,113888
13	-0,244030
14	-0,313055
15	-0,286515
16	-0,187017
17	-0,039850
18	0,123215

APÊNDICE VI - Resultados da FCC do município de Oriximiná.

Chuva_156000;NA_1500005605

FCC:Chuva_156000(t) e NA_1500005605(t+k)

Número de observações: 68

Correlações Cruzadas

Lag	FCC
-18	-0,032614
-17	0,061908
-16	0,126583
-15	0,211004
-14	0,274019
-13	0,251526
-12	0,193335
-11	0,013333
-10	-0,081093
-9	-0,186193
-8	-0,180844
-7	-0,068866
-6	0,092615
-5	0,232178
-4	0,369906
-3	0,461037
-2	0,480781
-1	0,347036
0	0,171289
1	-0,024334
2	-0,162226
3	-0,177104
4	-0,172259
5	-0,044222
6	0,038491
7	0,190237
8	0,226585
9	0,234253
10	0,177252
11	0,093441
12	-0,023765
13	-0,102604
14	-0,175402
15	-0,136556
16	-0,095591
17	-0,021502
18	0,083141