



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS DO
AMBIENTE**

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA DAS ÁGUAS
SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NO ENTORNO DA LAGOA DA CONFUSÃO,
TOCANTINS, BRASIL**

ERLAN SILVA DE SOUSA

**PALMAS - TO
2018**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ERLAN SILVA DE SOUSA

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA DAS ÁGUAS
SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NO ENTORNO DA LAGOA DA CONFUSÃO,
TOCANTINS, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências do Ambiente da Fundação Universidade Federal do Tocantins, como pré-requisito para obtenção do grau de Mestre em Ciências do Ambiente.

Orientador: Fernando de Moraes

Linha de pesquisa: Biodiversidade e Recursos Naturais

PALMAS - TO
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S725c Sousa, Erlan Silva de.

Caracterização hidroquímica e isotópica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil. / Erlan Silva de Sousa. – Palmas, TO, 2018.

100 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Ciências do Ambiente, 2018.

Orientador: Fernando de Moraes

1. Hidroquímica. 2. Isótopos Estáveis. 3. Águas Superficiais. 4. Águas Subterrâneas. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA DAS ÁGUAS
SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NO ENTORNO DA LAGOA DA
CONFUSÃO, TOCANTINS, BRASIL**

Erlan Silva de Sousa

Erlan Silva de Sousa

Orientador Presidente

Fernando de Moraes

Prof. Dr. Fernando de Moraes

Banca:

Magale Rambo

Profa. Dr. Magale Karine Diel Rambo (Interno)

Emerson Adriano Guarda
Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda (Externo)

Palmas, TO 23 / 05 / 2018

*Dedico este trabalho aos meus pais que
sempre me incentivaram a sonhar
alto.....*

AGRADECIMENTOS

A Deus, poderosa força que rege a natureza, por ter me dado a graça de alcançar esse objetivo tão almejado.

Ao meu orientador e inspiração profissional Prof. Dr. Fernando de Moraes, pela amizade, orientação e conselhos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor, apoio e incentivo aos estudos, por acreditarem em mim, por compreenderem os momentos de ausência e pela base familiar dada para a construção de meu futuro profissional.

A equipe do Laboratório de Saneamento do IFTO - Campus de Paraíso composta por Fernanda Alves Costa, Karine Beraldo e Giovani.

Aos meus avós paternos Maria Maciel e Raimundo Maciel (in memoriam), pelo carinho, apoio e suporte durante os anos de graduação e na pós-graduação.

Aos meus avós maternos Maria Deuvani e Jose Pereira, pelas palavras de apoio.

Ao meu irmão Willas Silva de Sousa, pelo carinho e torcida mesmo sem demonstrar.

A Universidade Federal do Tocantins e ao colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Ambiente pela oportunidade de estudo e aprendizagem.

Aos todos tios, tias e familiares, pelo incentivo e torcida.

Aos Amigos, pela contribuição e apoio durante os anos de estudos e em especial ao grande amigo de estudos guerreiro Rones Gomes Nunes.

Ao Instituto Federal do Pará pela oportunidade de trabalhar como Professor durante a realização do Mestrado.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

“Façam com que o amor e o perdão e não o ressentimento norteie a sua vida”

RESUMO

Análises hidroquímicas e isotópicas de oxigênio-18, deutério e carbono inorgânico dissolvido foram utilizados para a caracterização dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no entorno da Lagoa da Confusão - Tocantins. O objetivo principal do trabalho é caracterizar e compreender a dinâmica dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos da região a partir de suas características geoquímicas e isotópicas. Para isso, foi realizada a caracterização hidroquímica e avaliação da qualidade das águas, englobando conhecimentos da geoquímica do aquífero para entender a dinâmica das águas, ter um diagnóstico da área e auxiliar a gestão dos recursos hídricos da região. A dissertação apresenta os resultados do artigo intitulado “Caracterização hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil”. Nesse estudo, análises hidroquímicas foram aplicadas para determinar as características das águas superficiais e subterrâneas e suas relações com o meio, na região da Lagoa da Confusão. O estudo permitiu identificar os tipos hidrogeoquímicos predominantes, que contemplam águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, sendo constatado a dominância de espécies iônicas de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} . Os resultados demonstram que as águas da área são influenciadas pelas formações geológicas e pelo uso e ocupação dos solos, sendo o estudo da hidroquímica uma importante ferramenta para conhecimento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos da região. Apresenta-se também nesse estudo, os resultados do artigo intitulado “Isótopos Estáveis Aplicados ao Estudo dos Fluxos Hídricos no Entorno da Lagoa da Confusão, TO, Brasil”. Por meio desse trabalho, verificou-se que a dinâmica de fluxo e o pouco tempo de confinamento indicado pela composição isotópica das águas subterrâneas estão intimamente relacionados às características ambientais e geológicas da área. Os resultados das análises de $\delta^{18}\text{O}$ e δD evidenciam a existência do sistema cárstico que favorece uma rápida circulação dos fluxos hídricos, e determina as características hidroquímicas da água. Para as águas superficiais obteve-se para as amostras analisadas no rio Urubu e na Lagoa da Confusão valores superiores às águas subterrâneas. Verificou-se uma interação entre as águas superficiais e subterrâneas da área, sendo os recursos hídricos superficiais abastecidos em períodos de estiagem por águas subterrâneas. Os valores da razão isotópica de carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) foram predominantemente negativos, indicando uma maior contribuição de processos de dissolução de carbonatos por H_2CO_3 . Os resultados das análises isotópicas caracterizam a presença de um aquífero cárstico na área de estudo, na qual a composição química da água é alterada pela interação água-rocha e dissolução das rochas carbonáticas, esse sistema ainda evidenciado pela ocorrência de cavernas e dolinas na área estudada. De forma geral, o estudo mostrou que a dinâmica e composição das águas superficiais e subterrâneas do entorno da Lagoa da Confusão são determinadas pelas características geológicas e pelo uso e ocupação dos solos, sendo o estudo uma importante ferramenta para conhecimento e monitoramento dos recursos hídricos da região.

Palavras chaves: Hidroquímica; Isótopos Estáveis; Águas Superficial; Águas Subterrâneas; Lagoa da Confusão.

ABSTRACT

Hydrochemical and isotopic analyzes of oxygen-18, deuterium and dissolved inorganic carbon were used to characterize surface water and groundwater resources near Lagoa da Confusão - Tocantins. The study main objective is to characterize and understand the dynamics of the superficial and groundwater resources of the region based on their geochemical and isotopic characteristics. To perform the study, it was carried out a hydrochemical characterization and water quality assessment. Both analyzes took into consideration the geochemistry of the aquifer to understand water dynamics as well as to get a more detailed overview of the study area and to help with water management resources in the region. The dissertation presents the results of the article entitled "Hydrochemical characterization of surface and groundwater in the surroundings of Lagoa da Confusão, Tocantins, Brazil". In that study, hydrochemical analyzes were applied to determine surface and groundwater characteristics likewise their interactions with the nearby environment in the Lagoa da Confusão region. The study identified the predominant hydrogeochemical types that can be found in calcic or magnesian bicarbonate water; as such, it observed the dominance of ionic species of HCO_3^- , Ca^{2+} and Mg^{2+} . The results show that the water in the study area is influenced by the local geological formations as well as the land use and occupation of it; therefore, the study of hydrochemistry is an important tool for the study, management and monitoring of water resources in the region. The results of the article entitled "Stable Isotopes Applied to the Study of Water Flows in the Confusion Lagoon Environment, TO, Brazil" are also presented in this study. The research verified that the dynamic flow and the short time confinement, which it was indicated by the isotopic composition of the groundwater, are closely related to the environmental and geological characteristics of the study area. The results of the $\delta^{18}\text{O}$ and δD analyzes show the existence of a karstic system that contribute to a fast water flow, and it determines the hydrochemical characteristics of the water. For surface water, it was obtained higher values than those from groundwater samples from the Urubu river and Lagoa da Confusão. There was an interaction between surface and groundwater of the study area, since it noticed that surface water resources have been supplied by groundwater sources during drought periods. The values of the isotopic ratio of dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{CCID}$) were predominantly negative, indicating a greater contribution of carbonate dissolution processes by H_2CO_3 . The results of the isotopic analyzes characterize the presence of a karst aquifer in the study area, in which the chemical composition of the water is altered by the water-rock interaction and the dissolution of the carbonate rocks; besides that, the occurrence of caves and dolines in the study area evidences of those processes. Therefore, the study showed that the dynamics and composition of the surface and groundwater surrounding the Confusion Lagoon are determined by the geological characteristics and the land use and occupation; thus, the result of the study are an important tool for understanding and monitoring the water resources in that region.

Keywords: Hydrochemistry; Stable Isotopes; Surface Water; Groundwater; Lagoa da Confusão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Reta das águas meteóricas (Global Meteoric Water Line, GMWL), adaptado de Craig (1961).	32
Figura 2 - Localização geográfica do município de Lagoa da Confusão-TO.	34
Figura 3 - Análises físico-química das amostras de águas superficiais e subterrâneas coletadas no entorno da Lagoa da Confusão – LABSAN-IFTO.....	38
Figura 4 - Localização dos pontos de coleta de águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão.	47
Figura 5 - Diagrama de Piper mostrando o comportamento químico das águas coletadas nos períodos seco e chuvoso.	55
Figura 6 - Diagrama de Schoeller das amostras de água coletadas nos períodos seco e chuvoso.	56
Figura 7 - Localização geográfica da área de estudo.....	69
Figura 8 - Localização dos pontos de amostragem no entorno da Lagoa da Confusão.	71
Figura 9 - Diagrama de Piper e classificação das águas amostradas.	76
Figura 10 - Variação do sinal isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ e δD no entorno da Lagoa da Confusão.....	78
Figura 11 - Comparações entre a linha de água local e sinal de razão isotópica da correlação entre $\delta^{18}\text{O}$ e δD do entorno da Lagoa da Confusão.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimentos analíticos para determinação dos parâmetros.	37
Tabela 2 - Descrição e coordenadas geográficas dos pontos de coleta águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão.	46
Tabela 3 - Procedimentos analíticos para determinação dos parâmetros.	49
Tabela 4 - Resultados dos parâmetros físico-químicos das águas coletadas no período seco (s) e chuvoso (c) no entorno da Lagoa da Confusão.	50
Tabela 5 - Concentrações de elementos químicos nas águas subterrâneas amostradas.	51
Tabela 6 - Razões iônicas das amostras coletadas nos períodos seco e chuvoso.	57
Tabela 7 - Resultados dos índices de saturação de calcita, dolomita e aragonita nos períodos seco e chuvoso.	58
Tabela 8 - Resultados parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas (P1 a P6) e superficiais (P7 a P9) no entorno da Lagoa da Confusão.	74
Tabela 9 - Concentrações de elementos químicos em mg/L principais das águas subterrâneas (P1 a P6) e superficiais (P7 a P9) no entorno da Lagoa da Confusão.	74
Tabela 10 - Resultados das análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$, δD , d e $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ das amostras de águas superficial e subterrânea no entorno da Lagoa da Confusão.	77

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APHA	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
Ca ²⁺	Íon Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CE	Condutividade Elétrica
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₃ ²⁻	Íon Carbonato
CPGeo	Centro de Pesquisas Geocronológicas
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
D	Deutério
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	Íon Ferro
HCO ₃ ⁻	Íon Bicarbonato
IAEA	International Atomic Energy Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
mg/L	Miligramas por Litro
Mg ²⁺	Íon Magnésio
Na ⁺	Íon Sódio
Naturatins	Instituto Natureza do Tocantins
NO ₃	Nitrato
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
°C	Graus Celsius
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
SEPLAN	Secretaria de Planejamento do Estado do Tocantins
SMOW	Standard Mean Ocean Water
SO ₄ ²⁻	Íon Sulfato
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
TO	Tocantins
USP	Universidade de São Paulo

VSMOW	Viena Standard Mean Ocean Water
$\mu\text{S}/\text{cm}$	Micro Siemens por Centímetro
δ	Notação Delta
‰	Por Mil
$\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$	Razão Isotópica do Carbono Inorgânico Dissolvido
δD	Isótopo de Deutério
$\delta^{18}\text{O}$	Isótopo de Oxigênio
r	Razão Iônica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1. Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivos Gerais	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1. Aquíferos	18
2.2. Os Aquíferos Cársticos	20
2.3. Importância das águas subterrâneas	21
2.4. Hidroquímica	24
2.6. Geoquímica de isótopos ambientais e suas aplicações	29
3. METODOLOGIA GERAL	34
3.1. Área de estudo	34
3.2. Pesquisa Bibliográfica	36
3.3. Amostragem de águas para análise físico-química.....	36
3.4 Amostragem de águas para análise isotópica	38
3.5. Avaliação dos dados: Análise estatística	40
4. RESULTADOS	42
4.1. Caracterização hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil	42
4.1.1. Resumo	42
4.1.2. Abstract.....	43
4.1.3. Introdução.....	43
4.1.4. Material e Métodos.....	45
4.1.4.1. Amostragem de águas para análise físico-química.....	48
4.1.4.2. Avaliação dos dados: Análise estatística	49
4.1.5. Resultados e Discussões	50
4.1.6. Conclusões.....	59
4.1.7. Agradecimentos	60
4.1.8. Referências	60
4.2. Caracterização hidroquímica e isotópica para entendimento da dinâmica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil	65
4.2.1. Resumo	66
4.2.2. Abstract.....	67

4.2.3. Introdução	67
4.2.4. Área de estudo	69
4.2.5. Metodologia.....	71
4.2.6. Resultados e Discussões	74
4.2.7. Conclusões.....	81
4.2.8. Agradecimentos	82
4.2.9. Referências	82
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS.....	88
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1. INTRODUÇÃO GERAL

A região da Lagoa da Confusão é uma área economicamente estratégica para o agronegócio e meio ambiente do Estado do Tocantins, por apresentar extensas áreas aptas à exploração agrícola e por abrigar uma grande quantidade de lagos e lagoas, além de inúmeras nascentes de córregos afluentes do rio Urubu, e por sua localização na porção média da bacia hidrográfica do rio Araguaia.

Os recursos hídricos superficiais e subterrâneos da área são amplamente explorados, e as previsões futuras são de escassez devido principalmente a má gestão dos recursos hídricos, larga utilização de água para irrigação, sobre-exploração das águas subterrâneas e a contínua perda da qualidade da água dos rios, córregos e lagoas da região.

Estudos foram realizados na área por Martins et al. (2002), Martins et al. (2006), Brito et al. (2008), Pontalti (2010), Pereira e Morais (2012), Oliveira e Morais (2013) e Oliveira (2014), na tentativa de entender a exploração dos recursos naturais, características geológicas e geomorfológicas e as interações do uso e cobertura do solo com as características das águas. No entanto ainda existem lacunas sobre o conhecimento das características do aquífero, interação entre as águas superficiais e subterrâneas e os riscos de contaminação antropogênica que alteram a qualidade das águas.

A composição química e isotópica da água é basicamente resultado das características geológicas, solubilidade dos minerais do aquífero, dos meios por onde a água percola, fontes de recarga, fases do ciclo hidrológico e o uso e cobertura do solo (MIZUNO, 2012; REGINATO et al., 2013; MOHAMMADI et al., 2018). Assim, para determinar as características hidroquímicas e isotópicas da água é essencial para compreender os diversos fatores que influenciam a composição, qualidade e disponibilidade de água na região da Lagoa da Confusão.

Adicionalmente, por estar localizada sobre um carste encoberto oriundo da dissolução de rochas calcárias, em um ecótono com características de Cerrado e Amazônia, Lagoa da Confusão é uma área vulnerável a degradação ambiental, e entender as relações dos compartimentos ambientais e os recursos hídricos da região é essencial para uma melhor conservação e manejo dos recursos naturais. Regiões cársticas, são áreas de enorme interesse econômico e hidrogeológico, pois apresentam solos férteis sem drenagem superficial, exibem relevo plano e possuem valiosas reservas de água (GASSER et al., 2018).

Diante disso, o objetivo principal do trabalho é compreender a dinâmica dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do entorno da Lagoa da Confusão no Estado do Tocantins a partir de suas características geoquímicas e isotópicas.

Para alcançar este objetivo, foi realizado a caracterização hidroquímica e avaliação da qualidade das águas, englobando conhecimentos da geoquímica do aquífero e análises de isótopos estáveis para entender a dinâmica das águas a fim de realizar um prognóstico da área e contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos.

Estudo das características hidroquímicas e isotópicas tem sido utilizado para a entendimento da dinâmica dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (CHAFOUQ et al., 2018; MONTALVÁN et al., 2017; SACCHI et al., 2017; HE et al., 2018), sendo também amplamente aplicados para a avaliação das características de aquíferos cársticos (EINSIEDL et al., 2009; DELBART et al., 2014; MANCE et al., 2014; OZYURT et al., 2014; PU et al., 2014; VILLANUEVA, 2014).

Os resultados deste estudo estão apresentados nesta dissertação na qual foi contextualizado os usos da água, as características físicas e suas influencias sobre as características dos recursos hídricos da região da Lagoa da Confusão. O estudo foi dividido em capítulos, sendo o capítulo I composto por esta introdução, revisão bibliográfica e metodologia, capítulo II e III, com a apresentação dos resultados do estudo em dois artigos científicos e por fim o capítulo das conclusões gerais do estudo. O capítulo II, intitulado “Caracterização hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil” apresenta uma caracterização hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, com o propósito de determinar as concentrações dos compostos químicos presentes nas águas, suas relações com os compartimentos ambientais e as características peculiares da área.

O capítulo III, intitulado “Isótopos estáveis aplicados para entendimento da dinâmica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil” apresenta uma caracterização hidroquímica e isotópica da área, no qual foram utilizados isótopos estáveis de oxigênio-18, deutério e carbono inorgânico dissolvido para compreender a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas, realizar um prognóstico da área e contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos da região.

Os resultados do estudo subsidiarão ações de proteção ao meio ambiente para garantir o uso racional dos recursos hídricos e contribuirá para o avanço do conhecimento da aplicação da hidroquímica, isótopos estáveis e monitoramento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos da região.

A pesquisa fez parte do projeto “Estudo da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos na região de Lagoa da Confusão” financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Tocantins, através do Programa de Pesquisa em Recursos Hídricos, processo nº 2014.20300.000009.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo compreender a dinâmica dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do entorno da Lagoa da Confusão no Estado do Tocantins a partir de suas características geoquímicas e isotópicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a qualidade da água na área através de análises físico-químicas em amostras de águas superficiais e subterrâneas;
- Caracterizar fontes de recarga, os processos de evaporação e as interações água-rocha, por meio de análises isotópicas de oxigênio-18, deutério e carbono inorgânico dissolvido;
- Avaliar a circulação da água com base na interpretação de características hidroquímicas e isotópicas;
- Identificar interação entre as águas superficiais e subterrâneas, disponibilizando informações e conhecimentos para o entendimento da dinâmica das águas da área.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Aquíferos

Um aquífero é uma formação geológica formada por rochas permeáveis, que armazenam água em seus poros ou fraturas permitindo que a água acumulada seja transmitida entre as suas falhas geológicas ou migre para aquíferos vizinhos (REBOUÇAS et al., 2002; HEINEN et al., 2003).

Segundo Pinto (2007), existem algumas constituições geológicas que apresentam espaços vazios, o que facilita o escoamento e retenção da água. No entanto, nestas constituições existem camadas menos permeáveis que dificultam o fluxo da água, formando zonas saturadas que recebem o nome de lençóis subterrâneos. Quando há o armazenamento de uma grande quantidade de água nestes interstícios, de forma que a mesma possa escoar em condições específicas, recebem o nome de aquíferos.

Para Guerra (1986) pode se definir um aquífero como:

(...) todo corpo rochoso ou formação capaz de armazenar e transmitir água. Esta capacidade é própria de cada tipo litológico, ou seja, a capacidade de armazenar (porosidade) e transmitir água (permeabilidade); é o resultado da interação de fatores geológicos com o corpo rochoso, desde a sua formação. Dessa maneira, cada tipo litológico traz, ao se formar, sua própria característica hidrogeológica, e por sua vez, reagem de maneira própria aos fatores atuantes.

Desta forma, desempenham a tarefa de armazenar e transmitir a água, sendo um reservatório e condutor subterrâneo. Assim são importantes reservatórios de água subterrânea, podendo ter as suas variações de volume acompanhadas a partir da medida dos níveis do lençol freático em poços ou por sondagem piezométrica entre outras técnicas.

Os Aquíferos são alimentados pelas precipitações atmosféricas, as quais captam e lançam sobre o continente a água dos mares, que por sua vez adentram nos aquíferos através do mecanismo de infiltração (PINTO-COELHO; HAVENS, 2015).

A capacidade de um aquífero armazenar água depende do tamanho e largura das camadas das rochas permeáveis ou material não consolidado, como seixos, areia e silte (PINTO-COELHO; HAVENS, 2015).

Os aquíferos podem ser divididos em confinados, semi-confinados e livres. Os aquíferos confinados possuem menor condutividade, podendo ser definidos como: drenantes e não drenantes, geralmente são recarregados pelos aquíferos livres. No caso dos aquíferos confinados drenantes apresenta no mínimo uma de suas camadas permeáveis, o que permite a

entrada e saída de fluxos pelo topo, já os aquíferos confinados não drenantes são caracterizados pela impermeabilidade de suas camadas superiores e inferiores, o que impede o fluxo da água, os aquíferos livres por sua vez, tem como o seu limite superior o lençol freático e os aquíferos semi-confinados é a situação intermediária entre os dois (LINHARES, 2009; PINTO-COELHO; HAVENS, 2015).

Feitosa (2008) classifica os aquíferos em: aquíferos porosos, fraturados e cársticos. Os aquíferos porosos são meios isotrópicos caracterizados pelo estado homogêneo do fluxo da água, funcionando como esponjas em espaços vazios ocupados por água. São formados por rochas sedimentares (MMA, 2007).

Os aquíferos fraturados por sua vez, encontra-se meio anisotrópico, distribuindo-se a água de forma homogênea, movimentando-se entre as fraturas existentes na rocha, são formados, geralmente em virtude das falhas tectônicas que ocasionaram fraturas na rocha. Quanto maior a fratura da rocha, maior é a sua capacidade de armazenar água, podendo variar ainda em virtude da frequência, posição e tipo de fissuras (FEITOSA, 2008).

Os aquíferos cársticos são formados por rochas calcáreas ou carbonáticas, desta forma a água circula entre as fendas que surgem a partir da dissolução do carbonato em virtude da ação da água, podem atingir grandes dimensões, tornando-se rios subterrâneos.

Os aquíferos em sua maioria são constantemente reabastecidos pelas águas da chuva, este processo é denominado como recarga. Além do regime pluviométrico, a topografia, o tipo de solo e a situação da cobertura vegetal, interferem diretamente na recarga dos aquíferos.

O reabastecimento dos aquíferos ocorre por meio de infiltração direta. Nos aquíferos livres esta infiltração ocorre em toda a superfície, já nos aquíferos confinados a infiltração ocorre por meios das áreas aonde as rochas aparecem na superfície (altos topográficos ou locais com afloramento de rochas sedimentares), por isso, é importante que estas áreas sejam protegidas a fim de evitar o uso incorreto do solo com a inserção de práticas possivelmente poluidoras, que podem interferir no fluxo da recarga e na qualidade da água dos aquíferos (MMA, 2007).

Os aquíferos ao absorver as águas superficiais oriundas das chuvas contribuem na minimização de possíveis transbordamentos. Desta forma, segundo Rebouças et al. (2000), os aquíferos possuem as seguintes funções:

- Função de produção: são produtores de água essenciais para a vida na terra;
- Função de estocagem e regularização: serve para estocar o excedente de água oriundas de possíveis enchentes, regulando assim o contingente de água na superfície;

- Função de filtro: os aquíferos funcionam também como filtro e depurador da água;
- Função ambiental: exerce papel ambiental na disponibilidade e qualidade da água;
- Função energética: os aquíferos podem ser geradores de energia elétrica ou termal;
- Função mantenedora: sustenta o curso de apoio dos rios.

Em virtude de sua importância, faz-se necessário o desenvolvimento de ações que potencializam a exploração sustentável dos aquíferos no Brasil. Uma das maiores problemáticas da atualidade é a sobreexploração dos aquíferos brasileiros. Para Campos e Souza (2017, p.339):

A sobreexploração de aquíferos isotrópicos, anisotrópicos, livres, confinados, cársticos e demais classes pode ser conceituada como os casos em que o bombeamento de longo período (através de uma bateria de poços profundos) supera a recarga total dos aquíferos, isto é, a descarga supera a recarga natural do aquífero. Entre os problemas ambientais e sociais causados pela sobreexploração dos aquíferos destacam-se: esgotamento ou desaparecimento local de nascentes, inversão do fluxo de água no aquífero, colapso nos sistemas de abastecimento, intrusão salina em aquíferos costeiros com conseqüente diminuição das reservas hídricas subterrâneas. Em associação com a contaminação das águas subterrâneas e impermeabilização da superfície (ex.: em áreas altamente urbanizadas), a sobreexploração representa um grande desafio para a gestão da quantidade e da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

Portanto, é necessário a busca por ações mediadoras e potencializadoras que contribuam para a exploração consciente dos aquíferos garantindo a sua viabilidade e recarga, de modo que o mesmo permaneça exercendo regularmente as suas funções.

2.2. Os Aquíferos Cársticos

Conforme cita Travassos (2010), pode-se caracterizar a carstificação como o resultado do intemperismo químico do ácido carbônico sobre as rochas carbonáticas. Este processo ocorre a partir da reação da água da chuva em contato com o gás carbônico existente no solo, ocasionando a formação de uma solução ácida, a qual penetra por entre as fendas e fraturas das rochas produzindo o bicarbonato de cálcio.

Logo, os aquíferos cársticos são formações constituídas por rochas carbonáticas, que sofreram a ação citada acima ocasionando a abertura de fraturas através da dissolução do calcário, o que contribuiu para a formação de condutos cársticos de diferentes tamanhos, que podem conter uma quantidade significativa de água subterrânea (OLIVEIRA, 2014). Tais fatos contribuem na atualidade para o aumento de pesquisas acerca das particularidades geológicas do carste (WILLIAMS, 2007).

A rede de condutos dos aquíferos cársticos ainda é desconhecida em virtude da sua distribuição espacial, o que coopera para que a condutividade dos aquíferos cársticos seja,

geralmente, anisotrópica e heterogênea; logo, o movimento das águas subterrâneas depende da estrutura tectônica, pelos processos de esculturação do aquífero e pela situação de descarga e recarga dos mesmos. Em virtude desses fatores as águas dos aquíferos cársticos estão em constante processo químico, alterando-se em decorrência da dissolução, o que torna o entendimento do seu sistema hidráulico, muitas vezes difícil, sendo que, embora existam inúmeras pesquisas em todo mundo acerca das regiões cársticas, os seus resultados não podem ser extrapolados, isto porque os aquíferos cársticos diferenciam-se de uma região para outra (TURK, 2010 apud OLIVEIRA, 2014)

Estes fatores cooperam para o aumento dos riscos de degradação dos aquíferos cársticos. Desta forma, segundo Terra et al. (2016), a qualidade da água disponível nos terrenos cársticos, depende da composição da rocha, das intempéries climáticas, características estruturais e pela ação do homem sobre o meio ambiente.

Um dos maiores problemas dos aquíferos cársticos é a vulnerabilidade a contaminação, pois sua capacidade de recarga é rápida, enquanto a sua capacidade de autodepuração é baixa, logo, os mesmos são facilmente suscetíveis à contaminação, em virtude da rapidez com que um material contaminado se propaga neste meio (RAVBAR, 2007; TERRA, 2016).

2.3. Importância das águas subterrâneas

Água subterrânea é toda a água que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os espaços vazios existentes entre as fissuras das rochas. É uma confiável e estável fonte de água doce, que tem contribuído para a segurança e sustentabilidade de diversas atividades humanas (GOETTEN, 2015; ALLEN, 2016).

Segundo Rebouças (2006, p.118):

As águas subterrâneas são de longe as mais importantes, em termos práticos, à medida que constituem cerca de 97% dos estoques de água doce que ocorrem no estado líquido nas terras emersas continentais e ilhas. A origem meteórica significa que essas águas são naturalmente recarregadas pela infiltração de uma fração das precipitações chuvas, neves e neblinas, principalmente que caem nos domínios emersos da terra (REBOUÇAS, 2006 p. 118).

As águas subterrâneas fazem parte do sistema circulatório da água na terra e tem acompanhado a evolução do homem, sendo fundamental para a sobrevivência humana. Conforme dados de Rebouças (2006) 97% da água doce existente no planeta são subterrâneas, embora, por serem visíveis tenhamos o hábito de acreditar que as águas superficiais sejam a maior fonte de água própria para o consumo (LINHARES, 2009).

As águas subterrâneas abastecem quase a metade da população mundial, e a sua ampla disponibilidade permite que as pessoas possam viver em locais onde as águas superficiais ou as chuvas não são suficientes para o abastecimento e demais necessidades da população. (MATTIUZI et al., 2016, ONU, 2016)

Segundo Rebouças (2006), a incidência das águas subterrâneas, está ligada diretamente a três fatores:

- **Meteórica:** a água armazenada durante um longo período nos poros, fissuras e/ou fendas das camadas rochosas, formam os aquíferos a partir da unidade de hidrogeologia;
- **Conatas:** são chamadas de águas de formação, isto porque, estão retidas nas rochas sedimentais desde o início da formação dos depósitos de águas;
- **Juvenis:** o seu surgimento está ligado diretamente aos processos magmáticos da terra.

Em regiões com escassez e ausência de águas superficiais, as águas subterrâneas possuem um valor estratégico por ser o único recurso hídrico disponível para abastecimento da população (SANTOS, 2010; LEITE, 2016).

Segundo Newman et al. (2016), o consumo mundial das águas subterrâneas tendem a aumentar, devido ao aumento das atividades agrícolas e industriais para suprir as necessidades da população que cresce cada vez mais.

No Brasil, estima-se que a reserva de água subterrânea é de 11.430 m³, número esse consideravelmente inferior à disponibilidade superficial que é de 91.300 m³ (ANA, 2015).

Segundo Borba (2016), a utilização da água subterrânea no abastecimento das cidades, é vista como uma das soluções para o problema da falta de água de locais que sofrem com a escassez hídrica ou tem seus corpos hídricos superficiais contaminados, no entanto, é importante enfatizar que uma grande exploração e má gestão desses recursos podem gerar sérios problemas ambientais.

As águas subterrâneas sofrem a influência dos aspectos geológicos, que interferem diretamente no seu percurso, podendo a transmissão da água ser maior ou menor conforme o tipo de solo no qual se encontra. Assim, em áreas cujo solo é formado principalmente por cascalho e arenito o escoamento da água tende a ser rápido; em áreas formadas pelo arenito silteoso o escoamento é moderado; em solos caracterizados argilito o escoamento é lento e em solos gnaisse o fluxo das águas subterrâneas é impermeável (PALMIER, 2006).

A água subterrânea, como um componente do ciclo hidrológico, está em constante circulação e flui, de modo geral, lentamente, pelos poros da rocha. Os aquíferos contêm, ao mesmo tempo, rochas com características porosas e permeáveis e

impermeáveis que formam estruturas geológicas capazes de armazenar e ceder água. Um dos parâmetros que influenciam o fluxo da água subterrânea é a permeabilidade. Já a porosidade é a propriedade que determina a quantidade de água que pode ser armazenada em uma rocha. A porosidade é determinada pelo volume de poros vazios em relação ao volume total da rocha (PINTO-COELHO; HAVENS, 2015, p.90).

Desta forma as águas subterrâneas podem ser encontradas nas camadas permeáveis e impermeáveis dos aquíferos, sendo a porosidade a determinante para a quantidade de água e controladora de seu fluxo.

Para Kiffer (2012, p.46), o fluxo das águas subterrâneas “se propaga de um ponto de maior energia para outro ponto de menor energia, neste caso representado, respectivamente, pela maior e menor carga hidráulica”. Assim, os fluxos das águas são representados por uma linha imaginária, cujo objetivo é reproduzir o caminho de uma partícula de água subterrânea através de um aquífero, mostrando o escoamento e a velocidade da água no local pesquisado.

Com relação aos aspectos legais que regem a utilização das águas subterrâneas, nota-se que o Código das águas, instituído pelo Decreto 24.643 de 1934, atribui à mesma o aspecto de bem privado. Com a sanção da Constituição Federal em 1988, o Código das águas é modificado e as águas subterrâneas passam a ser consideradas como propriedades públicas que devem ser gerenciadas pelos Estados e Distrito Federal, salvo no caso de fontes minerais, quando a gestão deverá ser da União.

Com a criação da Lei Federal Nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, as águas subterrâneas deixaram de ser consideradas propriedades públicas. No entanto, as águas minerais, ganham tratamento especial e a exploração das águas subterrâneas passa a ser regulamentada por normas que visam proibir qualquer tipo de poluição e minimizar a ocorrência da exploração desenfreada dos aquíferos.

Em 17 de julho de 2000 foi sancionada a Lei Federal 9.984, criando a Agência Nacional de Águas – ANA, a qual tem como diretriz criar e executar a Política Nacional de Recursos Hídricos a partir da inter-relação com outros órgãos públicos.

No entanto, conforme Linhares (2009) nas últimas décadas, com as fortes alterações ocorridas nos sistemas de produção e avanço dos centros urbanos, as águas subterrâneas têm sofrido graves impactos através da contaminação por agentes poluidores.

O mau uso e gestão das águas subterrâneas podem causar uma série de problemas ambientais e hidrológicos, como à redução da água das nascentes, mudança nas condições de recarga e descarga, deterioração da qualidade das águas e até a sua escassez (IBRAHIM, 2016),

atingindo assim a população que necessita desse recurso para o desenvolvimento de suas atividades.

Todos estes fatores contribuem para a escassez dos recursos hídricos, o que é preocupante, uma vez que a água é um recurso natural essencial para a vida humana. A superexploração das águas subterrâneas ocorre quando a extração da água do aquífero supera a sua capacidade de recomposição, reduzindo as reservas hídricas subterrâneas (HIRATA, 2003; MENEZES, 2007, MARTINS et al., 2017).

As águas subterrâneas sofrem inúmeras ameaças, destacando principalmente as atividades antrópicas, a construção descontrolada de poços e a crescente quantidade de lixo depositada sobre o solo. Assim, o uso descontrolado das águas subterrâneas associado a poluição coopera para a sua degradação, causando transtornos para as comunidades que dependem destas para o seu consumo e preocupação para os órgãos e entidades governamentais (IRITANI; EZAKI, 2009).

Linhares (2009) cita como problemas decorrentes da má gestão das águas subterrâneas:

- Redução das fontes de águas existentes;
- Salinização das águas subterrâneas próximas a áreas marítimas;
- Infiltração de águas subterrâneas de baixa qualidade, oriundas de regiões superficiais;
- Diminuição dos níveis de águas dos aquíferos;
- Afundamento do solo, ocasionando danos as edificações e rede de esgoto.

De acordo com Heller (2006), as principais fontes de poluição das águas subterrâneas são: os resíduos sólidos, atividades agrícolas e mineração. Desta forma a preservação das águas subterrâneas depende da conscientização da população, acerca da sua importância para a sobrevivência humana, e da necessidade de se diminuir as ações poluentes e racionalizar o seu uso.

2.4. Hidroquímica

As águas subterrâneas são constituídas de uma série de particularidades físicas e químicas as quais variam de acordo com o espaço geográfico e o tempo. Com relação às características geoquímicas os elementos componentes da água estão intrinsecamente relacionados a geologia e hidrogeologia (BORTOLIN, 2014).

Além do arcabouço químico-mineralógico, a composição físico-química das águas subterrâneas também depende da composição das águas de recarga, tendo origem na pluviometria ou águas superficiais, além de suas evoluções químicas, que são influenciadas diretamente pela interação água-rocha (CAJAZEIRAS, 2007; GASTMANS et al., 2010).

Segundo Azevedo (2012), embora os padrões hidroquímicos constituam o principal instrumento para a classificação e caracterização da qualidade das águas subterrâneas, eles representam o resultado das interações entre a água e os ambientes de circulação e tais padrões podem ser entendidos como a assinatura geoquímica do meio sobre o fluído que percola entre as fissuras e vazios do aquífero.

Terra et al. (2016) comenta que em virtude de algumas variações químicas, decorrente da ampla variação litológica, as águas subterrâneas podem ser impróprias para o consumo humano, podendo apresentar níveis elevados de sais minerais, fluoreto, ferro e manganês. Assim, existe uma constante preocupação com a sua contaminação, que pode ter origem nas atividades domésticas, industriais e exploração agrícola, que pode colocar em risco a saúde e o bem-estar da população.

Nesse sentido, o entendimento da hidroquímica de uma determinada região torna-se necessário para uma melhor gestão dos recursos hídricos e direcionamento das formas de uso da água (FREITAS et al., 2012), que tem sua a composição físico-química alterada pela constituição do aquífero ou contaminações provenientes das atividades antrópicas.

O estudo das características hidroquímicas têm sido aplicado para fins de monitoramento ambiental (MOHAMMADI et al., 2018), avaliação da qualidade da água (CENTENO; CECCONELLO, 2017), definição e distribuição dos tipos químicos da água e suas características hidrodinâmicas (TAVARES et al, 2016) e na avaliação da qualidade da água em áreas de irrigação (CARVALHO et al., 2017).

No Brasil, o uso da hidroquímica foi relatado em estudos realizados por Stallard e Edmond (1983), que avaliaram as relações entre a composição química da água dos principais rios da bacia Amazônica e a geologia da região.

Karmann (1994) em um outro estudo pioneiro sobre a caracterização hidroquímica de sistemas cársticos, identificou os tipos hidroquímicos, a evolução geoquímica das águas e identificou espécies químicas que controlam a dinâmica das águas do sistema cárstico.

Um estudo recente realizado por Pu et al. (2014), utilizou dados hidroquímicos para avaliar a influências das atividades humanas nas águas subterrâneas de ambientes cársticos em Chongqing na China, permitindo identificar as principais alterações na composição química e auxiliar a determinação de áreas vulneráveis a contaminação.

Oliveira (2014) em um estudo pioneiro na região da Lagoa da Confusão, avaliou a hidroquímica para entender os fluxos hídricos e determinar áreas vulneráveis a contaminação das águas subterrâneas, identificando também os tipos hidroquímicos predominantes das águas e suas relações com a geologia da região.

Segundo Foster e Gomes (1989), para avaliar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, em relação aos seus constituintes naturais ou antropogênicos, é necessário a realização de um monitoramento para avaliar a ocorrência de contaminantes e identificar medidas mitigadoras, para assim evitar danos ambientais irreversíveis e para a saúde pública (FOSTER & GOMES, 1989).

Os principais parâmetros físicos avaliados são a cor, turbidez e condutividade. Em relação aos parâmetros químicos são avaliados os cátions dissolvidos de sódio, potássio, cálcio e magnésio, enquanto os principais ânions são os cloretos, sulfatos e bicarbonatos. A escolha dos parâmetros hidroquímicos deve ser baseada no conhecimento prévio da geologia da região, das formas de uso e ocupação e, ainda, na premissa de que os padrões de qualidade das águas subterrâneas são produtos da interação com o meio (AZEVEDO, 2012).

Esses parâmetros físico-químicos das águas podem variar conforme a quantidade de sais minerais presentes, dependendo ainda, dos seguintes fatores: arranjo inicial da água, natureza da rocha armazenadora de água, intercâmbio entre as águas de aquíferos diferentes, fluxo de circulação da água, profundidade, volume da precipitação pluviométrica e o tipo de cobertura vegetal do solo (MIZUNO, 2012).

A cor da água é um parâmetro que depende da quantidade e dos tipos de componentes químicos e matéria orgânica dissolvida, pode ser classificada em cor aparente quando medida com a presença de sólidos em suspensão e cor verdadeira quando analisada após a retirada dos sólidos suspenso.

O principal problema relacionado a cor da água é a sua estética, pois colorações diferentes do normal podem causar desconfiança dos usuários em relação a qualidade da água (MIRANDA, 2007). De forma geral, a coloração da água não apresenta riscos aos consumidores, mas é um parâmetro que deve ser monitorado na caracterização de água de abastecimento (VON SPERLING, 2005), pois pode indicar de forma preliminar a presença de outros constituintes que podem comprometer a qualidade sanitária da água.

A cor da água pode representar também as características ambientais de uma área, em ambientes protegido e quando pura, a água tem a coloração azulada, quando em terrenos ricos em ferro apresenta cor avermelhada, quando rica em ácidos húmicos pode apresentar coloração escura ou amarelada (ALVES, 2010) e quando coloração negra quando rica em manganês

(OLIVEIRA, 2014). Em relação a interferência e correlação com outros parâmetros, a cor da água está relacionada ao potencial hidrogeniônico (pH), aumentando seus valores em consonância com o aumento do pH (LENZI; FAVERO; LUCHESE, 2009), tendo o mesmo comportamento em relação a turbidez.

A turbidez é o resultado principalmente da interferência das partículas sólidas em suspensão na água que podem produzir sabor e odor, geralmente incomum em águas subterrâneas, podendo ocorrer em aquíferos que possui uma quantidade significativa de minerais. A turbidez é medida por meio da avaliação da capacidade de obstrução da dispersão de feixe de luz por fragmentos suspensos, como mineral, coloides, organismos microscópio, óleo emulsificador entre outros (BARBOSA, 2015), medida em laboratório por um aparelho chamado turbidímetro.

Em termos de aplicação na avaliação da qualidade da água, o parâmetro turbidez encontra duas aplicações principais, indicando tanto a remoção de protozoários por meio de processos de filtração, quanto o bom condicionamento da água após o tratamento, pois a turbidez associada a partículas em suspensão diminui os efeitos das substâncias utilizadas durante as diversas etapas do tratamento de água e dos agentes desinfetantes de organismos patogênicos (WHO, 2004).

A turbidez da água é uma variável influenciada pelo uso e cobertura do solo, principalmente em áreas com desenvolvimento de intensas atividades agrícolas. Arcova e Cicco (1999), verificou mudanças na qualidade da água de microbacias com diferentes usos do solo, constatando maiores valores de turbidez em microbacias agrícolas em relação a áreas conservadas. Segundo Nogueira et al. (2012), uma das principais causas da turbidez é a matéria sólida em suspensão, orgânicas e inorgânicas, oriundas de áreas com desmatamento da vegetação nativa para inserção de atividades agrícolas.

Em relação a capacidade da água de conduzir a corrente elétrica pela presença de íons, tem-se o parâmetro condutividade, resultado da dissolução de sólidos em suspensão. A condutividade elétrica está relacionada aos sais e íons dissolvidos na água e pode ser um indicador de contaminação de efluentes domésticos e industriais (BOLLMANN, 2003), o aparelho que mede esse parâmetro é chamado de condutivímetro.

Geralmente as águas naturais têm condutividade entre 10 e 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$, ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem variar de 100 a 10.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. (CETESB, 1995).

O Sódio é um dos elementos mais abundantes na água, é um metal alcalino de extrema importância, é o responsável pelo aumento da salinidade das águas naturais, ocorrendo

principalmente em forma de cloreto de sódio nas águas subterrâneas. Sua ocorrência varia entre 0,1 e 100 mg/L.

O sódio possui ampla distribuição nos minerais fontes, baixa estabilidade química dos minerais que o contêm, solubilidade elevada e difícil precipitação quando em solução (SILVA; MIGLIORINI, 2014) É um elemento que facilmente solubiliza-se em água, sendo sempre encontrado em grandes quantidades nas águas subterrâneas, e em menores concentrações nas águas superficiais (CASALI, 2010). A principal fonte de sódio para as águas subterrâneas geralmente tem origem em rochas ricas em feldspatos (KEMERICH et al., 2012).

O potássio (K^+) é um elemento abundante na crosta terrestre, mas é pouco identificado nas águas subterrâneas devido a sua intensa atividade em processos de troca iônica, além de ser facilmente adsorvidos pelos minerais de argila e bastante utilizados pelos vegetais (FEITOSA et al., 2008). Sua presença nas águas subterrâneas varia de 0,1 a 5mg/L.

Seus principais minerais fontes são: Feldspato potássico e a biotita, pouco resistentes aos intemperismo físico e químico (KEMERICH et al., 2012). O potássio é um mineral indispensável para as plantas e bastante utilizado nos fertilizantes agrícolas.

O íon cálcio é um dos cátions mais abundante encontrados nas águas subterrâneas e o principal responsável por sua dureza, geralmente apresenta-se na forma de bicarbonato, podendo, também se manifestar na forma de carbonatos. As concentrações de cálcio na água variam entre 10 e 100 mg/L (VON SPERLING, 2005).

Um dos principais problemas relacionados as elevadas concentrações de cálcio na água são as incrustações das tubulações, pode causar problemas no abastecimento de água e na irrigação. No entanto, o cálcio é um elemento benéfico na agricultura, sendo essencial para o crescimento dos vegetais e sua abundância em águas para irrigação tende a favorecer a redução dos perigos da alta concentração de sódio nos solos (OLIVEIRA, 2014).

O magnésio é um elemento que apresenta comportamento semelhante ao cálcio, sendo responsável pela dureza e sabor salobro das águas. Sua concentração varia entre 1,0 e 40 mg/L (VON SPERLING, 2005).

O íon cloreto é considerado o principal responsável pela salinização das águas, sendo encontrado com valores de concentração que variam de 10 a 250 mg/L. Nas águas subterrâneas o cloreto é encontrado em quantidades inferiores a 100 mg/L e altas concentrações são indicadores de contaminação antrópicas (VON SPERLING, 2005). Em altas concentrações, o cloreto confere sabor salgado à água ou propriedades laxativas (FUNASA, 2014).

Os íons sulfato são largamente distribuídos na natureza e “podem estar presentes em águas naturais e em minerais (APHA, 1985), podendo ter origem na geologia, contaminação por lançamento de águas residuárias ou agroquímicos. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2008), o teor recomendável para a concentração de sulfato em água potável deve ser inferior a 500 mg/L.

O consumo de água contaminada com sulfato em níveis elevados deve ser evitado principalmente por crianças e gestantes, pois ainda não são completamente conhecidos os riscos à saúde humana decorrentes do consumo (SILVA, 2012).

Em relação aos íons carbonato e bicarbonato, são calculados a partir da determinação da alcalinidade. Alcalinidade é um parâmetro que estima a capacidade de tamponamento do sistema água/constituintes iônicos, principalmente sais de ácidos fracos e bases fortes, frente a mudanças de pH, sendo as principais espécies responsáveis pela alcalinidade em corpos d'água o bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}) (TELES et al., 2014). As concentrações de bicarbonato e carbonato na água variam numa faixa entre 10 e 500 mg/L.

Segundo Batista (2007), as águas que percolam rochas calcárias (calcita = CaCO_3) geralmente possuem alcalinidade elevada e águas que circulam por granitos e gnaisses, possuem poucos minerais que contribuem para a alcalinidade das águas subterrâneas, sendo a alcalinidade total de uma água é expressa em mg/L de CaCO_3 .

2.6. Geoquímica de isótopos ambientais e suas aplicações

São definidos como isótopos, os elementos químicos que apresentam o mesmo número de prótons e diferentes massas atômicas. São fracionados durante as reações termodinâmicas (fusão, solidificação, evaporação e condensação) e reações químicas que resultam em diferentes razões isotópicas (VARGAS, 2016).

Nos estudos hidrogeológicos, os isótopos de oxigênio (^{16}O e ^{18}O) e hidrogênio (^1H e ^2H - deutério) contribuem para delimitação de aquíferos e servem para determinar e diferenciar fontes de águas subterrâneas e classificá-las em águas antigas e jovens, bem como águas de precipitação e águas subterrâneas (HOSONO et al., 2011).

Segundo Crespi (2013), a aplicação de isótopos em estudos hidrológicos só é possível devido à capacidade dos mesmos apresentarem variação das composições (isotópicas) de oxigênio e hidrogênio na água, sendo essas variações, resultado de processos de fracionamento isotópico acompanhados de fases de transição e processos de transporte no ciclo hidrológico.

Diversos traçadores isotópicos têm sido estudados e correlacionados a dados de geologia e hidrologia, suas aplicações estão principalmente relacionadas ao entendimento de fluxos superficiais e subterrâneos e a modelagem paleoclimática. Segundo Milanovic (1981), estes métodos têm uma vantagem sobre as demais alternativas de traçadores pelo fato de guardarem melhor as condições de interação das partículas de água com as rochas ocorrida durante o intervalo da recarga até a descarga.

Segundo Minardi e Bomtempo (2000), coexistem na água pequenas quantidades de moléculas dos tipos $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ associadas com moléculas mais abundantes do tipo $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$. Como esses três tipos de moléculas têm pressão de vapor diferente, em toda troca de estado da água (evaporação, condensação) ocorre um fracionamento isotópico, fazendo com que as composições isotópicas das diversas fases sejam diferentes entre si. Isso possibilita identificar a origem e os processos de mudança de fase ocorridos em amostras de água ao longo do ciclo hidrológico (MINARDI; BOMTEMPO, 2000).

Análises da variação dos isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ (oxigênio-18), ^{13}C (carbono-13) e δD (deutério) têm sido utilizadas para identificar a interação entre corpos hídricos superficiais e subterrâneos, interação entre aquíferos, determinação da idade das águas subterrâneas, determinação da taxa de infiltração e evaporação de açudes, identificação de área de recarga e tempo de residência, entre outras aplicações.

No Brasil, os primeiros estudos com isótopos ambientais em uso hidrológico foram realizados no final da década de 1960 e início da década de 1970 e tiveram como alvos principais o Nordeste, Amazônia e posteriormente a região Sudeste (SILVEIRA; SILVA, 2002).

Santiago et al. (2001) utilizaram isótopos de δD e $\delta^{18}\text{O}$ para identificação da área fonte das águas utilizadas em projetos de irrigação na bacia do rio Jaguaribe na região do Cariri, estado do Ceará. Os mesmos autores observaram que a recarga dos aquíferos daquela região se dá em áreas variadas com diferentes condições geológicas.

No tocante à aplicação de isótopos ambientais estáveis em estudos do carste no Brasil, uma obra de referência constituiu-se na utilização $\delta^{18}\text{O}$, δD e δT por Bedmar e Silva (1980) para o entendimento da interação das águas superficiais e subterrâneas da região do Jaíba, no norte do estado de Minas Gerais. A partir da comparação da composição das águas de precipitação e de poços profundos, os autores puderam concluir que as águas subterrâneas explotadas para os projetos de irrigação daquela região são provenientes de precipitações locais. Tal conclusão pode ser elaborada a partir da observação de uma irregularidade na composição

das águas de poço para poço na área estudada. Assim os autores afirmam que variações locais na quantidade de chuva interferiram na composição dos aquíferos.

A utilização dos isótopos estáveis na atualidade vem aumentando em virtude da importância de sua aplicação em campos como a ecologia, ciência forense, agronomia, arqueologia e geologia. Os isótopos mais usados são: carbono, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, enxofre e o estrôncio. (GONZALVEZ et al. 2009; SILVA et al. 2014).

Os isótopos estáveis são classificados como aqueles típicos da natureza, ao contrário dos demais tipos de isótopos, não se deterioram com facilidade, em virtude do equilíbrio existente entre os nêutrons e os prótons, ou seja, são estáveis. Sua utilização permite a investigação de fatores relativos à ecologia e ciências ambientais, sendo considerada uma técnica que sobressai sobre as outras técnicas. (CAXITO; SILVA, 2015).

Os isótopos de δD e $\delta^{18}O$ são os mais utilizados em estudos hidrológicos, esses isótopos registram as diversas fases do ciclo hidrológico, como "impressões digitais", permitindo assim conhecer a história da água (MINARDI, 2008). Nos estudos hidrogeológicos, os isótopos de oxigênio (^{16}O e ^{18}O) e hidrogênio (1H e 2H) contribuem para delimitação de aquíferos e servem para determinar e diferenciar fontes de águas subterrâneas e classifica-las em águas antigas e jovens ou águas de precipitação e águas subterrâneas (HOSONO et al., 2011), além de fornecer informações sobre a interação de águas superficiais e subterrâneas (SANTOS et al., 2010), determinação da evaporação e balanço hídrico de águas superficiais (REBOUÇAS, 2015), e identificação de fontes de recarga de aquíferos (QIN, 2011; SILVA, 2016).

Geralmente, as determinações de δD e $\delta^{18}O$ são feitas em espectrômetro de massa, onde a amostra e um padrão são medidos alternadamente. A composição isotópica de hidrogênio é representada pela razão D/H, e a composição isotópica de oxigênio pela razão ($^{18}O/^{16}O$), utilizando os dois isótopos de oxigênio mais abundantes ^{16}O (99,796%) e ^{18}O (0,204%) (BORTOLIN, 2014).

A variação da razão isotópica (respectivamente $^{18}O/^{16}O$ e D/H) da amostra em relação ao padrão é expressa como diferença relativa em delta por mil (δ°/oo), definido segundo Craig (1961b), por (Equação 1):

$$\delta^{\circ}/\text{oo} = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \times 10^3 \quad \text{Equação 1}$$

Após determinados os valores, as fontes de águas são classificadas e diferenciadas, através da comparação entre a razão medida na amostra e a razão observada do padrão de

referência internacional VSMOW - Viena Standard Mean Ocean Water e descritos por Clark e Fritz (1997).

O histórico das águas é avaliado por meio do fracionamento isotópico. O fracionamento isotópico é o enriquecimento ou empobrecimento de um isótopo em relação a outro, provocado por processos físicos, químicos e biológicos, sendo as diferentes propriedades físicas e químicas entre isótopos leves e isótopos pesados, a causa da variabilidade natural da abundância isotópica (DIAS, 2016).

Craig (1961) constatou que existe uma correlação linear entre valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. Essa conclusão foi verificada após a análise de aproximadamente 400 amostras de águas de rios, lagos e águas de chuva em diversas localidades do planeta, sendo esta relação expressa pela equação 2:

$$\delta^2\text{H} = 8,13 * \delta^{18}\text{O} + 10,8 \quad \text{Equação 2}$$

Esta equação chamada de “Global Meteoric Water Line” (GMWL), mostra a relação da composição isotópica das águas meteóricas a nível do globo (Figura 1).

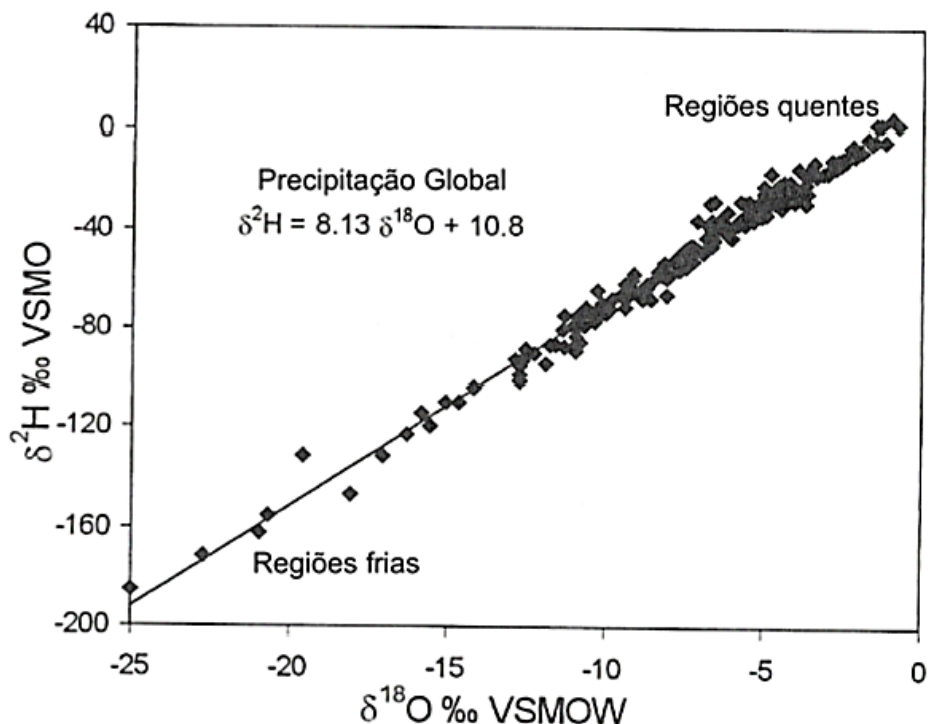


Figura 1- Reta das águas meteóricas (Global Meteoric Water Line, GMWL), adaptado de Craig (1961).

A definição dessa equação para a área de estudo permite, por exemplo, o estabelecimento de relações entre as águas dos aquíferos e dos corpos superficiais sujeitos a um regime intenso de evaporação (MINARDI; BOMTEMPO, 2000). Segundo Dias (2016),

amostras de águas que não sofreram evaporação, terão um comportamento semelhante a reta meteórica global, e a reta de águas que tenha sido submetida a evaporação terão um comportamento diferente da GMWL.

Sabe-se que a composição isotópica do Carbono em aquíferos carsticos está relacionado a presença do carbono presente neste ambiente, como o carbonato, próprio da composição das rochas carsticas, podendo, ainda, em virtude da sua grande quantidade disponibilizada ser liberada no solo ou partir da decomposição de vegetais e pela respiração das raízes das plantas. (CAXITO; VIEIRA, 2015 apud CLARK; FRITZ, 1997).

O isótopo de carbono tem sua origem a partir da influência mútua de radiação cósmica nas camadas superiores da estratosfera com os átomos de azoto, e uma origem artificial derivado das atividades nucleares desenvolvidas pelo homem.

3. METODOLOGIA GERAL

3.1. Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido no município de Lagoa da Confusão, região centro-oeste do Estado do Tocantins (Figura 2). O município possui uma área de 10.564,661 km², e a população estimada de 12.184 habitantes (IBGE, 2015). A altitude média da sede do município é de 184 m, sua distância de Palmas, capital do estado, é de, aproximadamente, 220 km. Limita-se ao norte com o município de Pium e Cristalândia; ao sul com o município de Formoso do Araguaia; ao leste com os municípios de Santa Rita do Tocantins e Dueré e oeste com o Estado do Mato Grosso através do rio Araguaia (SEPLAN, 2015).

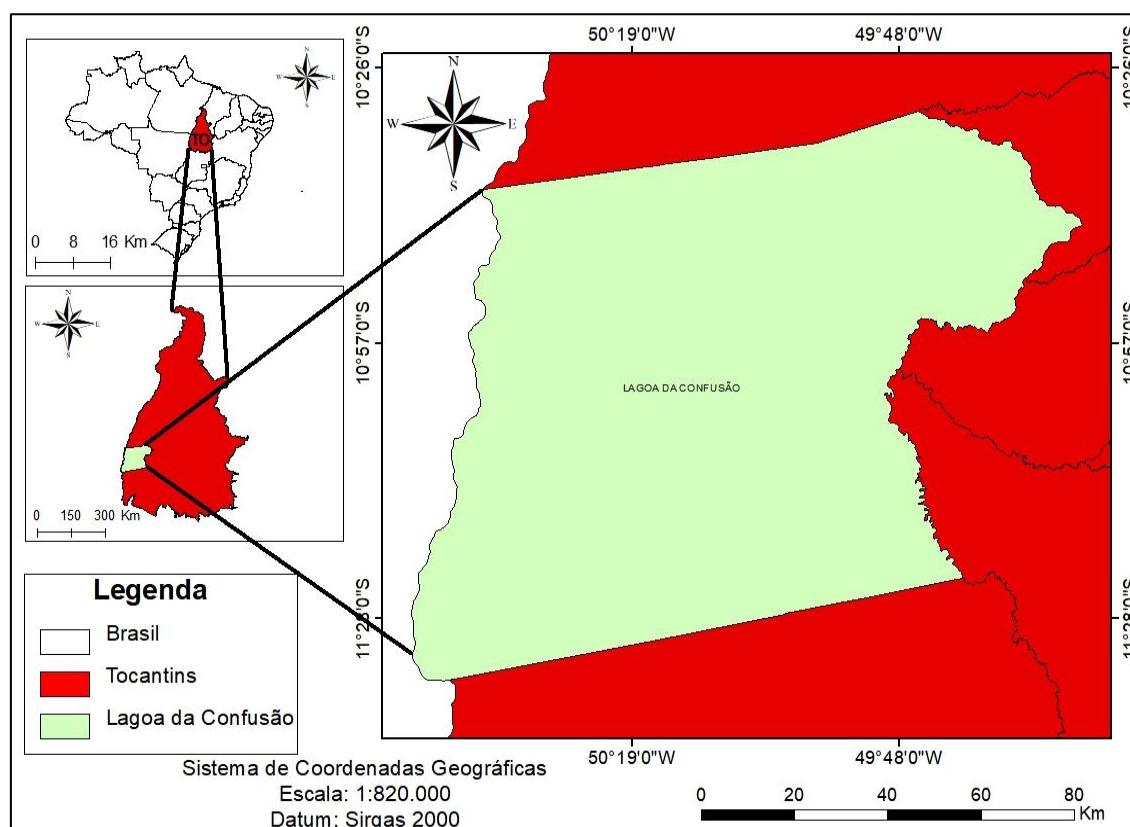


Figura 2 - Localização geográfica do município de Lagoa da Confusão-TO.

A área localiza-se sobre o Cinturão Araguaia e Cobertura Sedimentar do Bananal. A formação geológica é de cobertura cenozóica, com um relevo desenvolvido pela

acumulação de terraços fluviais, planícies fluviais e áreas de acumulação inundáveis (MARTINS, 2004; OLIVEIRA, 2014).

A Bacia Sedimentar do Bananal tem sua geologia composta por embasamento neoproterozóico do Supergrupo Baixo Araguaia – com afloramentos calcários da Formação Couto Magalhães, que além dos calcários apresenta filitos, ardósia, metargilito, metarenito e quartzitos subordinados (PEREIRA; MORAIS, 2012).

Lagoa da Confusão encontra-se nas unidades geomorfológicas da Planície do Bananal e Depressão do Araguaia.

A Planície do Bananal constitui uma faixa de deposição caracterizada pela combinação de áreas planas com baixa altitude e a ocorrência de sedimentação causada pelas inundações, devido à grande quantidade de chuvas, apresenta cobertura superficial com predominância de solo argiloso de baixa permeabilidade e existência de drenagem anastomótica, marcas de paleodrenagem, canais abandonados e lagoas circulares (BRASIL, 1981).

A Depressão do Araguaia é caracterizada por uma vasta superfície rebaixada, constituída por relevo suavemente dissecado, prevalecendo o domínio de formas suavemente convexas e a forte presença de interflúvios tabulares (MARTINS et al., 2005).

Como a maioria dos municípios do estado do Tocantins, a área de estudo apresenta duas estações climáticas distintas durante o ano, estação seca e chuvosa. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima pertence à Classe B1wA'a', úmido com moderada deficiência hídrica no inverno, precipitação média anual de 1.750 mm e temperatura média anual de 28°C (SEPLAN, 2008). De acordo com Martins (2005), as características típicas climáticas da região estão relacionadas ao efeito da continentalidade e o afastamento da costa e das massas de ar quente e úmida, associadas à zona de convergência intertropical.

Por apresentar, água em abundância e solos férteis, as principais atividades da região estão concentradas na área rural (OLIVEIRA, 2014; MARTINS, 2005).

As áreas agrícolas do município são caracterizadas como de alto potencial para produção agropecuária. Nele foi implantado o sub-projeto de agricultura irrigada Lagoa, que constitui parte do projeto de irrigação Javaés, cujo objetivo é permitir o cultivo de duas safras por ano (safra e entressafra), através da construção de barramentos para a

subirrigação, que drena a água do rio e elevar o lençol freático da área produtiva (OLIVEIRA, 2014; NOLÊTO JÚNIOR, 2005).

As principais culturas plantadas nos solos da região são arroz, soja, feijão, milho e melancia (NOLÊTO JÚNIOR, 2005).

3.2. Pesquisa Bibliográfica

Inicialmente foi realizado um levantamento de dados, com uma revisão bibliográfica de trabalhos já executados na área, incluindo pesquisas em livros, dados cartográficos, artigos, dissertações e teses, bem como textos que contemplassem informações sobre áreas próximas, como forma de subsidiar a análise dos dados obtidos em campo.

3.3. Amostragem de águas para análise físico-química

As coletas foram realizadas nos períodos seco (outubro-2016) e chuvoso (abril-2017), a fim de se obterem resultados que demonstrem as variações sazonais dos parâmetros analisados, e adotou-se a metodologia estabelecida para coleta e armazenamento de água da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011).

Para a coleta de água superficial e subterrânea, foram selecionados 9 pontos, utilizando como critério de escolha, a obtenção de autorização para coleta, facilidade de acesso, existência de perfis litológicos e construtivos dos poços, sendo 6 pontos de coleta de águas subterrâneas (P1-P6) e 3 pontos de coleta de águas superficiais (P7-P9).

Para a coleta de águas subterrâneas é necessário que a porção a ser amostrada seja coletada diretamente do aquífero, pois águas estagnadas dentro dos poços podem sofrer interferências das tubulações. Assim, é necessário a purga da água a ser coletada por cerca de 15 minutos com o bombeamento para a troca da água residente no poço, por água do aquífero.

Após a renovação da água, foram coletadas amostras para as análises físico-químicas em frascos de polietileno de 1000 mL. A amostragem foi precedida de ambientação dos frascos, sendo realizada a lavagem com a amostra a ser coletada

Em campo foram medidas a temperatura, condutividade, sólidos totais dissolvidos (STD) e pH. Em laboratório realizaram-se medidas de turbidez, cor, concentração de cloretos, nitratos, cálcio, magnésio, bicarbonato, ferro, dureza total, dureza cálcica, dureza do magnésio e alcalinidade, potássio, sulfato e sódio (Figura 3). As análises seguiram os métodos estabelecidos pelo “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005) descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Procedimentos analíticos para determinação dos parâmetros.

Parâmetros	Unidade	Técnica	Método
Cor	UC	Fotocolorimétrico	APHA (2005)
Turbidez	UNT	Nefelométrico	APHA (2005)
STD	mg/L	Leitura direta	APHA (2005)
Dureza Total	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Alcalinidade	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Bicarbonato	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Cálcio	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Magnésio	mg/L	Calculo matemático	APHA (2005)
Cloreto	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Sódio	mg/L	Espectrometria de emissão de plasma	APHA (2005)
Potássio	mg/L	Espectrometria de emissão de plasma	APHA (2005)
Sulfato	mg/L	Espectrofometria	APHA (2005)
Nitrato	mg/L	Espectrofometria	APHA (2005)
Ferro	mg/L	Espectrofometria	APHA (2005)



Figura 3 - Análises físico-química das amostras de águas superficiais e subterrâneas coletadas no entorno da Lagoa da Confusão – LABSAN-IFTO.

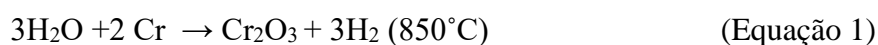
Foto: Fernanda Alves Costa.

3.4 Amostragem de águas para análise isotópica

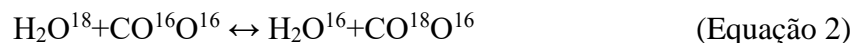
A amostragem para as análises isotópicas de oxigênio-18, deutério e carbono inorgânico dissolvido nas águas superficiais e subterrâneas foi realizada utilizando os procedimentos preconizados pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002). As amostras foram coletadas em recipientes de vidro cor âmbar para evitar a penetração da luz e lacrados com batoque para impedir a evaporação e entrada de gases que causam o fracionamento isotópico. As análises isotópicas foram executadas em um espectrômetro de cavidade ressonante do tipo Ringdown-CRDS da marca PICARRO, modelo L2130i, e processadas com uso do software LIMS for Lasers, realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade de São Paulo (CPGeo-USP).

Os procedimentos das análises laboratoriais seguiram os seguintes métodos: *Razão deutério-hidrogênio D/H* (Brand et al., 2000); *Razão O18/O16* (Epstein & Mayeda 1953); *Razão C13/C12 do Carbono inorgânico dissolvido - DIC* (Craig, 1957).

As análises de isótopos de hidrogênio seguiram o método proposto por Brand (2000), com a obtenção do hidrogênio que constitui a água, em uma reação da água com cromo metálico a 850°C, a vácuo, gerando gás H₂. Na determinação da razão deutério-hidrogênio, alíquotas de 1,0 µl foram injetadas em um reator, na qual ocorre a reação de oxidação do cromo e liberação do H₂. A reação de oxidação pode ser visualizada na equação 1:



Após a reação, o H₂ foi inserido no espectrômetro de massa e analisado para determinação das razões isotópicas H/D e referenciado a um gás padrão do próprio H₂. Para determinar a razão O¹⁸/O¹⁶ utilizou-se a técnica de equilíbrio da reação CO₂-H₂O, descrita por Epstein e Mayeda (1953), dada pela equação 2:



A reação ocorre a uma temperatura de 25,0 ± 0,1 °C por pelo menos 8 h. Após a reação, o CO₂ produzido no equilíbrio da reação é extraído e analisado em espectrômetro de massa, onde é feita a leitura para determinar as razões O¹⁸/O¹⁶.

Os valores da razão D/H e O¹⁸/O¹⁶ foram obtidos utilizando-se padrões secundários de referência internacional com composição isotópica conhecida VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water), preparados pela Agencia Internacional de Energia Atômica em Viena, Áustria.

A variação da razão isotópica das amostras em relação ao padrão é expressa como diferença entre a razão medida na amostra e a razão do padrão, utilizando a notação delta (δ) por mil (‰).

$$\delta \text{ ‰} = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \times 10^3 \quad (\text{Equação 3})$$

Para interpretação do comportamento da composição isotópica das águas superficiais e subterrâneas, foi obtida a curva meteórica local por meio da interpolação das curvas obtidas por Honório (2010) e Pacheco (2012).

Para determinação da razão isotópica do carbono inorgânico dissolvido $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$, foi utilizado um sistema Gas Bench II acoplado a um espectrômetro de massa em fase gasosa. A preparação da amostra consiste em inserir 7 gotas de ácido ortofosfórico em um frasco do tipo Exetainer ventilado com hélio (100 mL/min durante 5 min).

Em seguida, foram introduzidos 5 mL de água para a conversão do carbono inorgânico dissolvido-DIC em CO_2 dissolvido e gasoso. Para a obtenção do equilíbrio isotópico entre CO_2 dissolvido e CO_2 gasoso foram necessárias aproximadamente 18 horas.

Por fim, extraiu-se o CO_2 por meio de um sistema cromatográfico composto, no qual o gás é introduzido no espectrômetro de massa para determinação da razão isotópica $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ em relação ao padrão de referência internacional V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

A variação da razão isotópica das amostras é calculada em relação ao padrão e expressa em $\delta^{13}\text{C}$ (‰), como pode ser visualizado na equação 4, e o erro analítico das medidas é da ordem de 0,05 ‰.

$$\Delta^{13}\text{C}^{\circ}/\text{‰} = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \times 10^3 \quad (\text{Equação 4})$$

3.5. Avaliação dos dados: Análise estatística

Os resultados obtidos foram compilados em tabelas e planilhas tipo Excel. Para a classificação do tipo químico das águas de acordo com o conteúdo iônico dominante, resultante da interação água-rocha, foi elaborado o diagrama triangular de Piper (1944) e para identificação dos grupos através da análise de cátions e ânions foi elaborado o diagrama de Schoeller (1935), utilizando o software QualiGraf.

Para a determinação dos tipos de reações químicas associadas aos processos hidroquímicos, foram calculadas as razões iônicas de acordo com Hem (1985) que podem indicar um relacionamento entre o litotipo e a água. As variações das razões iônicas são indicativas da preponderância de determinado elemento sobre os outros elementos, em

função, por exemplo, da composição mineralógica das rochas do sistema aquífero (BORTOLIN et al., 2014).

Para os cálculos dos índices de saturação dos minerais calcita, dolomita e aragonita foi utilizado o software PHREEQC (PARKHURST, 1999). O índice de saturação é calculado pela equação $IS = \log(PAI)/K_{ps}$, onde PAI é o “Produto da Atividade Iônica” dos íons presentes num dado mineral reativo e K_{ps} é o produto da solubilidade, o qual é uma constante de um dado mineral reativo (MARQUES et al., 2011).

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil

Erlan Silva de Sousa

Programa de Mestrado em Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Tocantins
UFT, Rua 03, Q. 17, s/n, Jardim dos Ipês, CEP: 77500-000, Porto Nacional / TO / Brasil

erlan@uft.edu.br

Fernando Morais

Departamento de Geografia, Universidade Federal do Tocantins
UFT, Rua 03, Q. 17, s/n, Jardim dos Ipês, CEP: 77500-000, Porto Nacional / TO / Brasil

morais@uft.edu.br

Luis de Almeida Prado Bacellar

Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita 35.400-000, Ouro Preto/ MG / Brasil

luisapbacellar@gmail.com

4.1.1. Resumo

O comportamento hidroquímico de uma determinada região é influenciado por elementos naturais e antrópicos que determinam e restringem os usos da água. Características geológicas, litológicas, topográficas, tempo de residência, recarga do aquífero e o uso e cobertura do solo são alguns dos fatores que influenciam as características das águas e alteram sua qualidade ao longo do ciclo hidrológico. Nesse contexto, este artigo avalia a hidroquímica da região da Lagoa da Confusão (Tocantins), que se localiza em um sistema cárstico parcialmente encoberto, oriundo da dissolução de rochas calcárias, no qual ocorre

uma série de lagoas, dolinas e são desenvolvidas intensas atividades agrícolas. A avaliação das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, permitiu identificar os tipos hidrogeoquímicos predominantes, que contemplam águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, sendo constada a dominância de espécies iônicas de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} . Os resultados demonstram que as águas da área são influenciadas pelas formações geológicas e pelo uso e ocupação dos solos, sendo o estudo da hidroquímica uma importante ferramenta para conhecimento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos da região.

Palavras-chave: Hidroquímica, Aquífero Cárstico, Águas superficial, Água Subterrânea, Lagoa da Confusão.

4.1.2. Abstract

The hydrochemical of a region is influenced by natural and human factors that determine and restrict the uses of water. Geological, lithological, topographic, water residence time, aquifer recharge and soil use are some of the factors that influence water characteristics and change their quality in the hydrological cycle. In this context, this paper evaluates the hydrochemistry of the Lagoa da Confusão (Tocantins) region, located in a partially covered karst system, originating from the dissolution of limestone rocks in which ponds, dolines and intense agricultural activities are developed. The evaluation of surface and groundwater around the Lagoa da Confusão, allowed to identify the predominant hydrogeochemical types, that contemplate calcican or magnesian bicornornat waters, with the dominance of ionic species of HCO_3^- , Ca^{2+} and Mg^{2+} . The results of the study indicate that the waters of the area are influenced by the geological formations and the use of the soils, being the study of hydrochemistry an important tool for knowledge, management and monitoring of the water resources of the region.

Key words: Hydrochemistry, Karstic Aquifer, Surface Water, Groundwater, Lagoa da Confusão.

4.1.3. Introdução

A água é um elemento indispensável para a existência de vida no planeta e essencial para desenvolvimento humano (COSWOSK et al., 2013). A água em boa qualidade e em abundância é um elemento estratégico e condicionador para o desenvolvimento de uma determinada região, não só nos aspectos econômicos, mas também nos aspectos sociais e ambientais, que são intensamente impactados pela sua disponibilidade (RODRIGUES, 2013).

A falta de água tem desafiado os gestores dos recursos hídricos a procurar soluções para manter a exploração de reservas para consumo humano sem comprometer sua disponibilidade e qualidade, tendo a gestão dos recursos hídricos um papel importante para o desenvolvimento sustentável das atividades econômicas de uma região (LUIZ et al., 2018).

Atividades antropogênicas, como a agricultura, têm o potencial de causar impactos e alterar a quantidade e qualidade das águas e torná-las inadequadas para usos mais exigentes (VANZELA et al., 2010), sendo necessária a adoção de políticas que visem à proteção e conservação dos mananciais que suprem as necessidades da população.

Assim, para uma boa gestão dos recursos hídricos, é essencial compreender a dinâmica de fluxo das águas subterrâneas e sua interação com as águas superficiais, para a identificação das causas de contaminação e demais impactos (GONÇALVES et al., 2018).

Quando a disponibilidade de água superficial é restrita ou encontra-se contaminada, o uso da água subterrânea pode ser uma alternativa para suprir as demandas da sociedade. Santos e Leite (2016) citam que, em locais de escassez e ausência de águas em superfície, as águas subterrâneas possuem um valor estratégico por ser o único recurso hídrico disponível para as atividades humanas.

No entanto, as águas subterrâneas também são susceptíveis e vulneráveis à contaminação, pois apesar de estar protegida em aquíferos, sua qualidade depende das atividades que são desenvolvidas na superfície das áreas de recarga.

Para Herrero-Hernández et al. (2013), as águas subterrâneas localizadas em áreas de intensas atividades agrícolas são as mais vulneráveis à contaminação, pois é grande a utilização de agrotóxicos nas plantações. Segundo Ribeiro e Viera (2010), a água é o principal meio pelo qual os agrotóxicos são conduzidos das áreas onde foram aplicados, até atingirem seu destino final, sendo que esses contaminantes podem atingir as águas subterrâneas através da lixiviação e percolação no solo.

O município de Lagoa da Confusão, onde foi desenvolvido o presente estudo, está localizado em uma das regiões mais promissoras para a expansão da agricultura brasileira, que é planície sedimentar da bacia hidrográfica do Araguaia. Segundo Martins et al. (2006), a Planície do Araguaia por suas condições de relevo e solos, apresenta grande extensão de várzeas, aptas à exploração agrícola, principalmente de arroz irrigado.

Atualmente o município de Lagoa da Confusão responde por 60% do arroz irrigado do estado do Tocantins (39.000 ha), sendo ainda o maior produtor de melancia irrigada do Brasil, com um total de 4.000 ha de área. Nessas áreas são cultivadas arroz, soja, melão, feijão, milho, centeio, algodão bem como outros produtos (SEPLAN, 2011).

Como consequência das intensas atividades agrícolas em Lagoa da Confusão, tem-se principalmente a grande utilização de água para irrigação e a vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos devido à utilização de agrotóxicos, que podem alterar a qualidade da água e causar impactos ambientais na região (NOLÊTO JÚNIOR, 2005).

Além disso, estudos realizados Pereira e Morais (2012) identificaram que a área de estudo localiza-se sobre feições cársticas encobertas parcialmente. Devido a essas características, é necessária uma atenção especial quanto à preservação dessas áreas, pois, terrenos cársticos são vulneráveis e impactados pelas atividades agrícolas. Segundo Santos (2010), a qualidade da água em aquíferos cársticos é resultado principalmente da composição das rochas e das atividades humanas desenvolvidas sobre suas áreas.

Diante das características particulares da área de estudo, e a larga utilização dos recursos hídricos para o sustento das atividades desenvolvidas no entorno da Lagoa da Confusão e, tendo em vista que os recursos hídricos subterrâneos são susceptíveis a serem impactados por essas atividades. Este estudo tem como objetivo avaliar as características hidroquímicas das águas superficiais e subterrâneas do entorno da Lagoa da Confusão e relacionar águas com as características geológicas e as atividades antrópicas desenvolvidas na área.

4.1.4. Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido no município de Lagoa da Confusão, localizado na porção centro-oeste do Estado do Tocantins, com área geográfica de 10.800km². Foram coletadas 9 amostras de águas superficiais e subterrâneas, sendo os pontos de coleta de águas subterrâneas (P1 a P6) e pontos de coleta de águas superficiais (P7 a P9).

Os pontos de amostragem localizam-se na área urbana e rural do município e foram escolhidos em função da obtenção de autorização para coleta, fácil acesso, existência de perfis litológicos e construtivos dos poços e a distribuição geográfica na área de estudo, cuja descrição e coordenadas geográficas estão apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 - Descrição e coordenadas geográficas dos pontos de coleta águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão.

	Ponto	Descrição	Coordenadas
Água subterrânea	P1	Poço de captação	S 10 ° 43' 54,4'' e W 40 ° 22' 24,7''
	P2	Poço de captação	S 10 ° 45' 31,6'' e W 40 ° 24' 29,0''
	P3	Poço de captação	S 10 ° 47' 3,3'' e W 43 ° 33' 13,0''
	P4	Poço de captação	S 10 ° 46' 12,9'' e W 46 ° 23' 49,0''
	P5	Poço de captação	S 10 ° 45' 36,3'' e W 43 ° 38' 38,2''
	P6	Poço de captação	S 10 ° 48' 58,7'' e W 46 ° 20' 42,0''
Água superficial	P7	Córrego Urubu	S 10 ° 51' 30,4'' e W 40 ° 23' 46,6''
	P8	Córrego Urubu	S 10 ° 50' 27,6'' e W 43 ° 42' 22,1''
	P9	Lagoa da Confusão	S 10 ° 47' 42,0'' e W 40 ° 22' 36,2''

A Figura 4 apresenta a localização geográfica dos pontos amostrados no município de Lagoa da Confusão, no Estado do Tocantins.

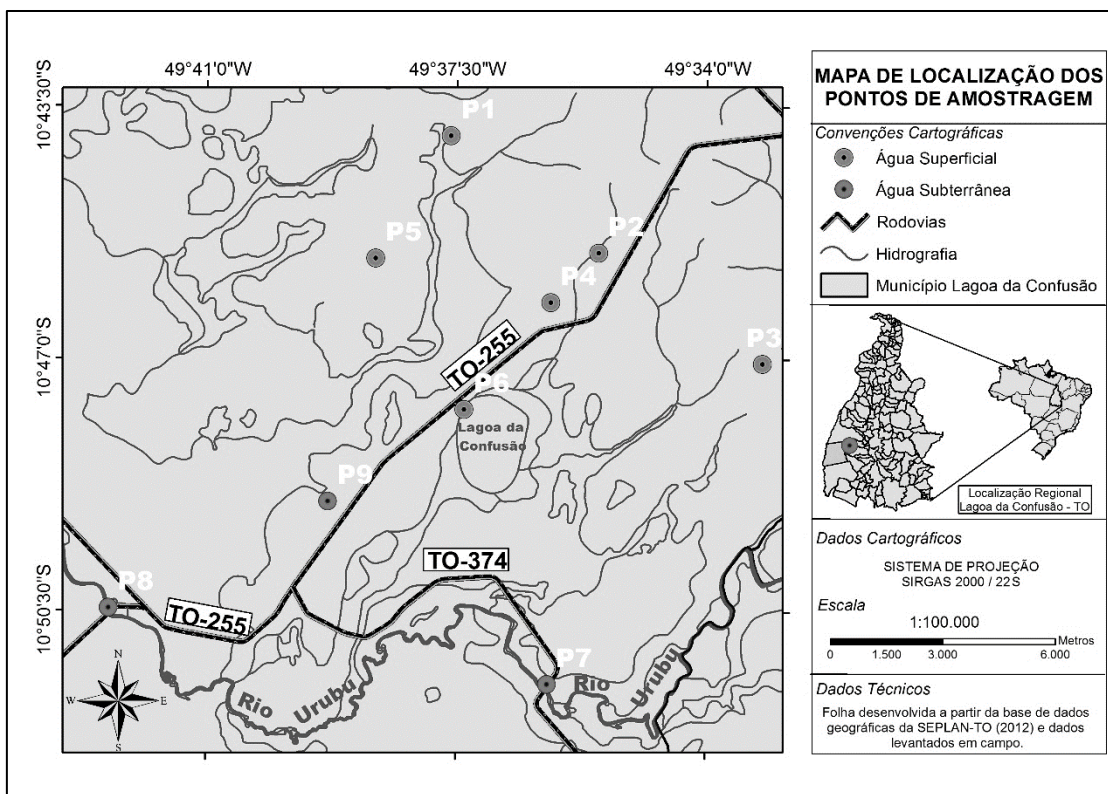


Figura 4 - Localização dos pontos de coleta de águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão.

A área está inserida em uma região que compõe uma extensa planície, inundada pelas cheias dos rios no período chuvoso (BRASIL, 2001), em uma das regiões mais promissoras para a expansão da agricultura e, principalmente, da orizicultura brasileira, na Planície do Araguaia.

Lagoa da Confusão pertence à Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia, fazendo parte da bacia do rio Formoso e da sub-bacia do rio Urubu (SEPLAN, 2011), na porção média da bacia hidrográfica do rio Araguaia. A área abriga uma grande quantidade lagos e lagoas, destacando-se a Lagoa da Confusão, além de inúmeras nascentes de córregos afluentes do rio Urubu.

A vegetação predominante é do bioma Cerrado, estando a área inserida em um ecótono com a presença também de vegetação do bioma Amazônia. Uma característica peculiar da vegetação da região é a presença de “ipucas”, que constituem fragmentos florestais naturais, sazonalmente alagadas, inseridas nas fitofisionomias vegetais de campos limpos ou várzeas do Bioma Cerrado (TOCANTINS, 2008). As ipucas, segundo Nascimento e Moraes (2012) apresentam feições geomorfológicas semelhantes às dolinas,

típicas de paisagem cárstica, que pela sua composição material e pelo seu contexto hidrológico são suscetíveis a sofrerem colapsos.

O carste na região é caracterizado pela presença de afloramentos isolados de rochas calcárias (PAULA et al., 2014). Geologicamente, a área é composta por embasamento neoproterozóico do Supergrupo Baixo Araguaia – com afloramentos calcários da Formação Couto Magalhães, que além dos calcários apresenta filitos, ardósias, metargilitos, metarenitos e quartzitos subordinados (PEREIRA; MORAIS, 2012).

O clima predominante é o tropical, com dois períodos distintos, uma estação seca, entre maio e setembro, e uma estação chuvosa, entre outubro e abril. A classificação climática da área segundo Koppen é AW, e segundo Thornthwaite sub-úmido tropical (NOLETO JÚNIOR, 2005).

A região apresenta aspectos característicos, como topografia plana e baixa altitude, nível do lençol freático superficial pouco profundo, predominância de Plintossolos e Gleissolos, ambos com impedimento de drenagem e periodicidade de inundação (MARTINS, 2006).

4.1.4.1. Amostragem de águas para análise físico-química

As coletas foram realizadas nos períodos seco e chuvoso, a fim de se obterem resultados que demonstrem as variações sazonais dos parâmetros analisados, e adotou-se a metodologia estabelecida para coleta e armazenamento de água da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011).

Para a coleta de águas subterrâneas é necessário que a porção a ser amostrada seja coletada diretamente do aquífero, pois águas estagnadas dentro dos poços podem sofrer interferências das tubulações. Assim, é necessário a purga da água a ser coletada por cerca de 15 minutos com o bombeamento para a troca da água residente no poço, por água do aquífero.

Foram coletadas amostras para as análises físico-químicas em frascos de polietileno de 1000 mL. A amostragem foi precedida de ambientação dos frascos, sendo realizada a lavagem com a amostra a ser coletada

Em campo foram medidas a temperatura, condutividade, sólidos totais dissolvidos (STD) e pH. Em laboratório realizaram-se medidas de turbidez, cor, concentração de cloretos, nitratos, cálcio, magnésio, bicarbonato, ferro, dureza total, dureza cálcica,

dureza do magnésio e alcalinidade, potássio, sulfato e sódio. As análises seguiram os métodos estabelecidos pelo “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005) descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Procedimentos analíticos para determinação dos parâmetros.

Parâmetros	Unidade	Técnica	Método
Cor	UC	Fotocolorimétrico	APHA (2005)
Turbidez	UNT	Nefelométrico	APHA (2005)
Dureza Total	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Alcalinidade	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Bicarbonato	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Cálcio	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Magnésio	mg/L	Calculo matemático	APHA (2005)
Cloreto	mg/L	Titulométrico	APHA (2005)
Sódio	mg/L	Espectrometria de emissão de plasma	APHA (2005)
Potássio	mg/L	Espectrometria de emissão de plasma	APHA (2005)
Sulfato	mg/L	Espectrofometria	APHA (2005)
Nitrato	mg/L	Espectrofometria	APHA (2005)
Ferro	mg/L	Espectrofometria	APHA (2005)

4.1.4.2. Avaliação dos dados

Os resultados obtidos foram compilados em tabelas e planilhas tipo Excel com elaboração de gráficos e tratamento. Para a classificação do tipo químico das águas de acordo com o conteúdo iônico dominante, resultante da interação água-rocha, foi elaborado o diagrama triangular de Piper (1944) e para identificação dos grupos através da análise de cátions e ânions foi elaborado o digrama de Schoeller (1935), utilizando o software QualiGraf.

Para a determinação dos tipos de reações químicas associadas aos processos hidroquímicos, foram calculadas as razões iônicas de acordo com Hem (1985) que podem indicar um relacionamento entre o litotipo e a água. As variações das razões iônicas são indicativas da preponderância de determinado elemento sobre os outros elementos, em função, por exemplo, da composição mineralógica das rochas do sistema aquífero (BORTOLIN et al., 2014).

Para os cálculos dos índices de saturação dos minerais calcita, dolomita e aragonita foi utilizado o software PHREEQC (PARKHUSRST, 1999). O índice de saturação é calculado pela equação $IS = \log(\text{PAI})/K_{ps}$, onde PAI é o “Produto da Atividade Iônica” dos íons presentes num dado mineral reativo e K_{ps} é o produto da solubilidade, o qual é uma constante de um dado mineral reativo (MARQUES et al., 2011).

4.1.5. Resultados e Discussões

O estudo da hidroquímica das águas no entorno da Lagoa da Confusão permitiu identificar e quantificar as propriedades e os constituintes químicos das águas e suas relações com o meio físico. Os resultados das análises hidroquímicas das amostras coletadas nos períodos chuvoso e seco podem ser visualizados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Resultados dos parâmetros físico-químicos das águas coletadas no período seco (s) e chuvoso (c) no entorno da Lagoa da Confusão.

Pontos	Período	pH	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	STD (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Dureza Total (mg/L de CaCO_3)
P1	S	7,13	3,70	5,42	31,00	113,20	17,00
	C	4,90	1,70	0,41	14,00	49,80	10,00
P2	S	8,10	1,40	2,31	141,00	275,00	80,00
	C	6,48	102,00	71,00	64,00	167,90	172,70
P3	S	7,45	0,80	2,05	60,00	126,60	28,00
	C	4,92	15,80	2,44	65,00	0,20	78,30
P4	S	5,97	0,20	2,10	9,00	20,60	20,00
	C	5,10	1,10	0,58	2,00	17,00	40,30
P5	S	7,12	1,70	4,36	81,00	252,00	81,30
	C	6,72	15,90	13,18	91,00	0,29	81,30
P6	S	7,08	4,30	3,42	7,00	27,90	10,00
	C	6,71	16,80	2,18	6,00	24,80	10,00
P7	S	7,46	4,70	5,49	34,00	71,40	10,00
	C	6,12	75,10	4,14	10,00	35,20	10,00
P8	S	7,18	6,90	1,35	6,00	14,40	10,00

	C	6,03	77,00	5,37	9,00	34,90	11,80
P9	S	5,93	0,20	1,88	3,00	7,90	12,00
	C	5,47	2,20	0,44	6,00	25,00	13,20

Tabela 5 - Concentrações de elementos químicos nas águas subterrâneas amostradas.

Pontos	Período	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	Fe (mg/L)
P1	S	5,88	2,70	0,86	1,16	34,60	2,62	<1,0	0,50	0,04
	C	2,50	1,82	0,63	0,93	8,00	3,19	<1,0	0,30	0,01
P2	S	24,28	13,54	2,07	4,46	165,40	3,83	<1,0	0,20	0,60
	C	54,00	28,84	2,38	5,13	64,00	2,77	<1,0	0,30	0,41
P3	S	9,60	4,47	1,58	6,11	68,00	1,55	<1,0	0,10	0,20
	C	17,50	8,23	1,24	6,03	86,00	3,40	<1,0	0,30	0,04
P4	S	2,80	4,18	0,33	0,46	14,00	3,47	<1,0	0,50	<0,01
	C	4,20	3,77	0,33	0,01	8,00	5,74	<1,0	0,30	0,40
P5	S	27,20	13,15	0,87	2,72	94,00	3,62	<1,0	0,10	<0,01
	C	25,50	5,56	0,62	0,85	112,00	5,96	<1,0	0,40	0,02
P6	S	2,02	1,94	0,76	1,05	46,00	1,17	<1,0	0,40	0,05
	C	0,32	2,35	0,51	1,07	10,00	2,34	<1,0	0,30	0,07
P7	S	1,84	1,98	1,04	2,01	38,60	1,28	<1,0	0,10	0,01
	C	0,28	2,36	0,74	1,30	16,00	2,55	<1,0	0,40	1,07
P8	S	1,04	2,18	0,74	1,09	5,40	1,06	<1,0	0,10	0,18
	C	0,22	2,81	0,68	1,27	16,00	2,55	<1,0	0,60	1,06
P9	S	1,60	2,53	0,47	0,46	2,00	2,13	<1,0	0,20	<0,01
	C	0,58	0,23	0,27	0,56	10,00	3,19	<1,0	0,50	0,02

Os resultados analíticos do pH para águas da área de estudo indicam que as mesmas apresentam pH próximo a neutralidade na estação seca, com valores que variam de 5,93 a 8,10 e tendem a ser levemente ácidas na estação chuvosa, com valores de 4,90 a 6,62.

A tendência a acidez apresentada na estação chuvosa indica que as águas têm seu pH alterado pela água da precipitação que dissolve as rochas calcárias já identificadas na região por (OLIVEIRA, 2014; PONTALTI, 2010), na qual durante sua dissolução gera ácido carbônico. Segundo Vasconcelos (2011), o pH da água é atenuado principalmente

pelas concentrações de íons H^+ originados da dissociação do ácido carbônico presente nas rochas calcárias.

A cor apresentou valores que variaram de 0,20 UH a 6,90 UH, com média de 2,66 UH na estação seca e 1,10 UH a 102,0 UH, com média de 34,15 UH na estação chuvosa, sendo verificado padrões de cor mais elevados os pontos de coleta de águas superficiais, por apresentar uma maior concentração de sólidos suspensos e dissolvidos que aumentam a cor da água. Para o parâmetro turbidez o valor máximo identificado foi de 71,0 UNT na estação chuvosa, com média de 11,08 UNT. Na estação seca os valores oscilaram de 1,35 UNT a 5,49 UNT com média de 2,66 UNT. Verifica-se que a cor e a turbidez tendem a aumentar na estação chuvosa pela dissolução das rochas e presenças de sólidos em suspensão (MACIEL et al., 2014).

Os valores de STD, que representa a soma de todos os constituintes minerais na água, apresentaram média de 41,33 mg/L na estação seca e 29,67 mg/L na estação chuvosa. Verifica-se que valores mais elevados de STD ocorrem na estação seca, devido ao maior tempo de residência da água no aquífero, ausência de recarga pelas águas das chuvas e o processo de evapotranspiração.

A condutividade elétrica no período seco variou de 7,90 $\mu S/cm$ a 275,0 $\mu S/cm$, com valor médio de 101,0 $\mu S/cm$ e na estação chuvosa de 0,20 $\mu S/cm$ a 167,90 $\mu S/cm$, com médio de 39,45 $\mu S/cm$. Os valores de condutividade foram baixos indicando uma pequena concentração de sais dissolvidos presentes, tendo as águas da área de estudo a característica de serem pouco mineralizadas e com baixa salinidade.

Os valores de dureza expresso pelo teor de carbonato de cálcio (mg/L de $CaCO_3$), variaram de 10,0 mg/L a 81,30 mg/L, com média de 29,81 mg/L na estação seca e de 10,0 mg/L a 172,70 mg/L, com média de 47,51 mg/L na estação chuvosa. Verifica-se que os valores de dureza nas águas subterrâneas são mais elevados que nas águas superficiais. Isso ocorre devido ao maior contato das águas subterrâneas com as formações geológicas do aquífero, o que aumenta a quantidade de cálcio e magnésio. Os valores permitem classificar as águas subterrâneas da região como mole ou de dureza moderada.

Nas águas amostradas as concentrações de cálcio variaram de 1,04 mg/L a 27,20 mg/L, com média de 8,47 mg/L na estação seca e de 0,22 mg/L a 54,0 mg/L, com média de 11,68 mg/L na estação chuvosa. Destacaram-se por apresentar os valores mais elevadas de cálcio os pontos P2 e P5, com concentrações de 24,28 mg/L e 27,20 mg/L na estação seca e 54,0 mg/L e 25,50 mg/L na estação chuvosa, respectivamente. Esses poços estão localizados próximos ao alinhamento entre Lagoa da Confusão e os mogotes

calcários, evidenciando os fenômenos de carstificação ocorrentes nesta área. De forma geral as concentrações de cálcio foram relativamente baixas, sendo seus valores mais elevados influenciados pelas características geológicas da área de estudo.

As concentrações de magnésio oscilaram de 1,94 mg/L a 13,54 mg/L, com média de 5,19 mg/L na estação seca e de 0,23 mg/L a 28,84 mg/L, com média de 6,22 mg/L na estação chuvosa. O magnésio é um elemento que apresenta dinâmica similar ao cálcio com diferenças na facilidade de precipitação, sendo os dois, elementos determinantes para a dureza da água.

Os valores de potássio variaram de 0,33 mg/L a 2,07 mg/L para a estação seca e de 0,33 mg/L a 2,38 mg/L na estação chuvosa. Apesar do potássio ser um elemento muito abundante na natureza, na água suas concentrações são geralmente baixas. Isso ocorre, segundo Antunes et al. (2013), devido ao potássio ser facilmente fixado pelas argilas e ser intensivamente consumido pelos vegetais. No entorno da área de estudo são desenvolvidas intensas atividades agrícolas o que colabora para a absorção do potássio pelas culturas, no entanto por ser um mineral bastante utilizado nos fertilizantes deve ter suas concentrações na água monitorada para o estudo de possíveis contaminações.

As concentrações do íon sódio nas águas analisadas variaram de 0,46 mg/L a 6,11 mg/L, com média de 2,17 mg/L na estação seca e de 0,01 mg/L a 6,03 mg/L, com média de 1,91 mg/L para a estação chuvosa. Oliveira (2014) identificou no entorno da Lagoa da Confusão resultados similares para as águas subterrâneas, verificando que a distribuição de sódio na área de estudo se dá no sentido do fluxo, aumentando a partir da área de recarga em direção a jusante no rio Urubu. As baixas concentrações de sódio indicam uma baixa salinidade das águas estudadas, podendo as mesmas serem utilizadas na irrigação de culturas agrícolas por apresentar baixo potencial de salinizar os solos.

O parâmetro bicarbonato apesar de não apresentar implicações à saúde e não ter valores máximos permitidos determinados pelas normas vigentes, foi analisado em função da geologia da área caracterizada pela abrangência litológica regional dos afloramentos calcários, correspondentes à Formação Couto Magalhães do Grupo Tocantins. Na área, as concentrações de bicarbonato nas águas foram de 2,0 mg/L a 165,40 mg/L, com média de 52,0 mg/L na estação seca e de 8,0 mg/L a 112,0 mg/L, com média de 36,67 mg/L na estação chuvosa. A alta concentração de bicarbonato na área de estudo, está relacionada a esta formação geológica.

Quando utilizadas para a irrigação, águas com alto teor de bicarbonato e sódio podem promover a precipitação de cálcio na forma de carbonato de cálcio, aumentando a

probabilidade do desenvolvimento do processo de sodificação do solo (AYERS; WESTCOT, 1985), fato que pode ocorrer no entorno da área de estudo em função da larga utilização da água para a irrigação nos projetos hidroagrícolas.

Os teores de cloretos para as águas analisadas variaram de 1,06 mg/L a 3,83 mg/L, com valor médio de 2,30 mg/L na estação seca e de 2,34 mg/L a 5,96 mg/L com média de 3,52 mg/L na estação chuvosa. Verifica-se que a variabilidade das concentrações de cloretos não é elevada, no entanto é um parâmetro que deve ser constantemente avaliado em virtude da área estar localizada em uma zona de intensa atividade agrícola e criação de gado, atividades que utilizam insumos ricos em cloretos.

Com relação ao parâmetro sulfato não foram encontrados valores dentro do limite de detecção do método analítico utilizado nos dois períodos analisados. Em relação as concentrações de nitrato, verificou-se pequenas concentrações variando de 0,10 mg/L a 0,50 mg/L, com média de 0,24 mg/L para a estação seca e 0,30 mg/L a 0,60 mg/L, com média de 0,38 mg/L para a estação chuvosa.

Os valores das concentrações de ferro variaram de 0,01 mg/L a 0,60 mg/L, com média de 0,18 mg/L na estação seca e de 0,01 mg/L a 1,07 mg/L, com média de 0,34 mg/L na estação chuvosa. Os resultados mostram uma alta concentração de ferro nas águas analisadas, sendo verificado nos pontos P2, P4, P7 e P8 valores superiores ao máximo permitido pelo padrão brasileiro de água para consumo humano. As altas concentrações de ferro estão relacionadas à ocorrência de ferrobactérias e condições físico-químicas, estrutura física dos poços, bem como a geologia da área, com presença de áreas de extração e beneficiamento de minério de ferro

Concentrações elevadas de ferro na água geralmente são encontradas em ambientes com características geológicas semelhantes à do entorno da Lagoa da Confusão, como aponta Carmo et al. (2014), que verificou altos teores de ferro em águas subterrâneas de aquíferos cársticos no estado da Bahia e que essas concentrações elevadas de ferro têm limitado o uso das águas para importantes fins, especialmente para o consumo doméstico.

Os resultados das análises nas duas estações apontam uma uniformidade na qualidade das águas analisadas. O comportamento hidroquímico das águas do entorno da Lagoa da Confusão apresenta de forma geral as características genéricas dos aquíferos globais e são influenciados diretamente pela geologia e hidrogeologia, podendo também serem influenciadas pelas atividades agrícolas que exercem controle na evolução da composição hidroquímica das águas. Fatores como clima, composição da área de recarga,

tempo de contato da água com o meio físico, litologias atravessadas e contaminação causada pelo homem (FENZL, 1986; REGINATO et al., 2013) também podem alterar a composição química das águas.

A classificação das águas subterrâneas para as amostragens realizadas, com base no Diagrama de Piper (Figura 5), identificou a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas tanto na estação seca como na chuvosa. Verifica-se pela análise de cátions, que as águas são na maioria cálcicas, mistas e magnesianas.

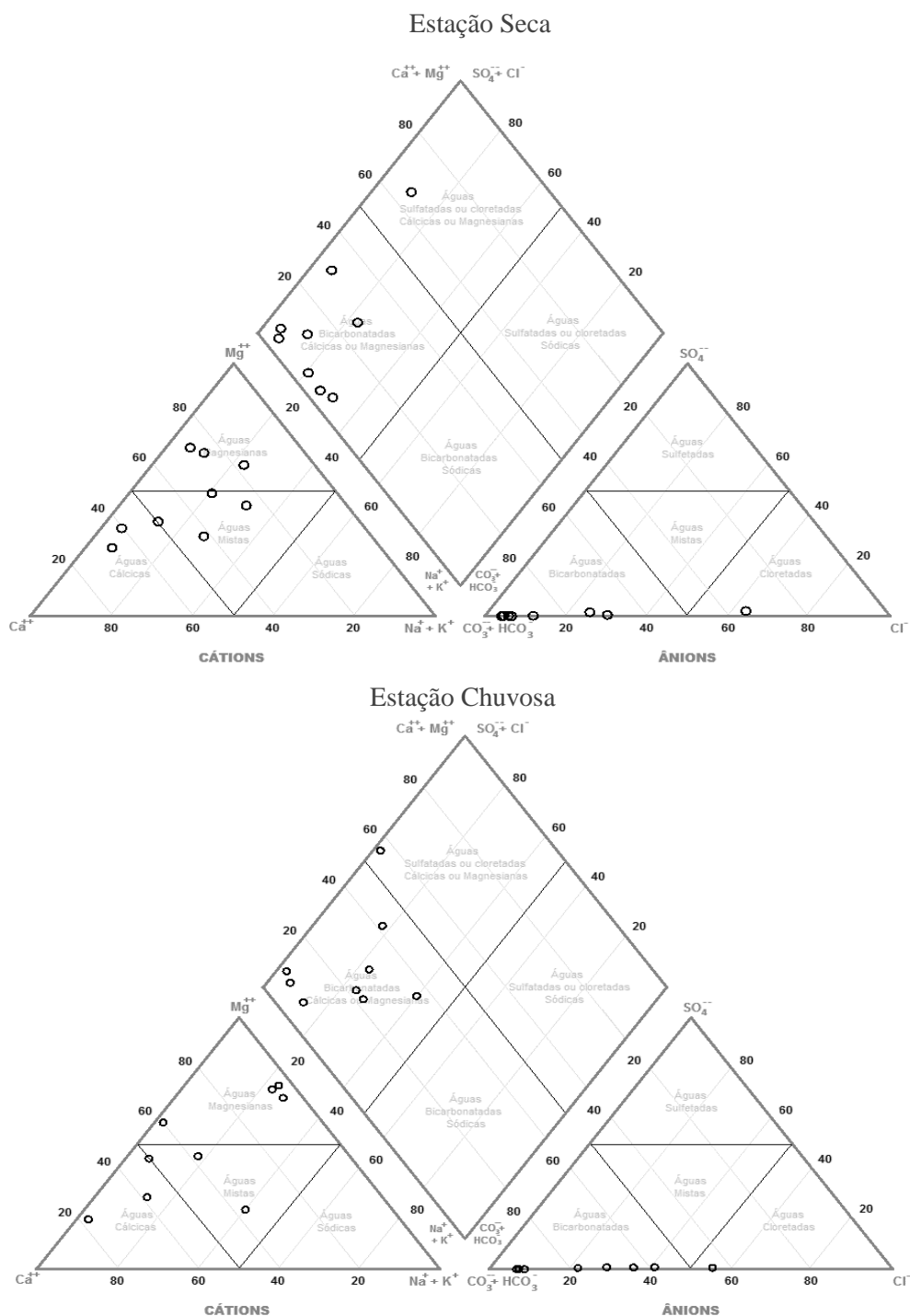


Figura 5 - Diagrama de Piper mostrando o comportamento químico das águas coletadas nos períodos seco e chuvoso.

Observa-se no diagrama que as águas têm concentrações de bicarbonatos próximas, sendo constatada a dominância de espécies iônicas de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} na hidroquímica da área de estudo. A concentração de cálcio e magnésio nas águas analisadas está relacionada à geologia e à ocorrência de calcário na área.

Os resultados dos grupos de amostras através da análise de cátions e ânions utilizando o diagrama de Schoeller (Figura 6) indicam a existência de um comportamento hidroquímico aproximado com pequenas variações dos íons analisados.

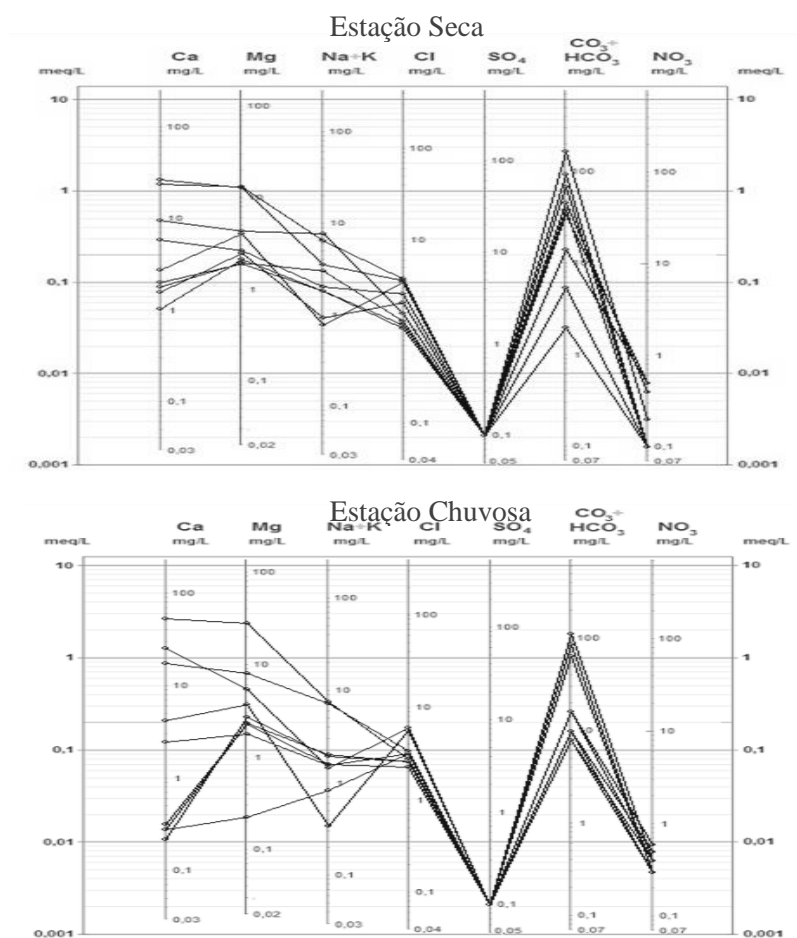


Figura 6 - Diagrama de Schoeller das amostras de água coletadas nos períodos seco e chuvoso.

As oscilações mais significativas estão relacionadas às concentrações de cálcio, magnésio, sódio e potássio e podem estar ligadas às características de entrada de água na recarga do aquífero, profundidade dos poços bem com sua a localização.

Os resultados dos diagramas de Piper e Schoeller corroboram os dados das análises hidroquímicas obtidas para a estação seca e chuvosa e confirma o apresentado nas análises dos parâmetros físico-químicos, indicando que existem ligações e interação entre as águas da região.

Para determinar as relações entre as litologias constituintes dos aquíferos da área de estudo e as características químicas das águas, foram calculadas as razões iônicas ou índices hidrogeoquímicos, que podem indicar um certo relacionamento entre o litotipo e a água (CUSTODIO; LAMAS, 1983).

A Tabela 6 apresenta os valores das principais razões iônicas encontradas para as duas amostragens realizadas. Verifica-se pela razão rMg^{2+}/Ca^{2+} que a maioria dos pontos analisados no período seco e chuvoso, contém águas continentais em contato com rochas dolomíticas. Podemos observar que a razão iônica rMg^{2+}/Ca^{2+} é constante nos dois períodos, no entanto em alguns pontos percebe-se que a razão iônica rMg^{2+}/Ca^{2+} é maior no período seco do que no período chuvoso, uma vez que no período chuvoso há um aumento da dissolução de calcita por influência da precipitação que conseqüentemente aumenta a concentração de Ca^{2+} e diminui esta razão para as águas do aquífero.

Tabela 6 - Razões iônicas das amostras coletadas nos períodos seco e chuvoso.

Pontos	Período Seco			Período Chuvoso		
	rMg^{2+}/Ca^{2+}	rNa^+/Cl^-	Cl^-/HCO_3^-	rMg^{2+}/Ca^{2+}	rNa^+/Cl^-	rCl^-/HCO_3^-
P1	0,46	0,44	0,08	0,73	0,29	0,40
P2	0,56	1,16	0,02	0,53	1,86	0,04
P3	0,47	3,94	0,02	0,47	1,77	0,04
P4	1,49	0,13	0,25	0,90	0,00	0,72
P5	0,48	0,75	0,04	0,22	0,14	0,05
P6	0,96	0,90	0,03	7,35	0,46	0,23
P7	1,08	1,57	0,03	8,44	0,51	0,16
P8	2,09	1,02	0,20	12,62	0,50	0,16
P9	1,58	0,22	1,06	0,40	0,18	0,32

Os resultados indicados por meio da razão rMg^{2+}/Ca^{2+} também foram evidenciados por Oliveira (2014), que identificou a ocorrência da Formação Couto Magalhães, a qual é constituída por rochas carbonáticas, como o dolomito.

A razão dos íons Na^+/Cl^- permite identificar um maior fluxo de água por rochas vulcânicas no período seco uma vez que a razão Na^+/Cl^- foi maior que 0,7, como classificado por Hem (1985). No período chuvoso a razão rNa^+/Cl^- indica na maioria dos pontos analisados precipitação de sais de Na^+ .

Os valores da razão iônica $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ variaram de 0,02 a 1,06 na estação seca de 0,04 a 0,72 na estação chuvosa. Verifica-se que a razão $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ não sofreu grandes variações e apresentou valores baixos durante as duas amostragens. Segundo Bortolin (2014), os valores para esta razão são geralmente baixos, em função da própria característica da água, que tem como ânion principal o bicarbonato e reduzidas concentrações de cloreto.

Os resultados do índice de saturação de calcita, dolomita e aragonita estão demonstrados na tabela 7. Os valores mostram que as águas em estudo se apresentam em soluções insaturadas em relação aos minerais dissolvidos, com propriedades corrosivas, uma vez que apresentou valores negativos em todos os pontos amostrados.

Tabela 7 - Resultados dos índices de saturação de calcita, dolomita e aragonita nos períodos seco e chuvoso.

Pontos	Período Seco			Período Chuvoso		
	IS _{CALCITA}	IS _{DOLOMITA}	IS _{ARAGONITA}	IS _{CALCITA}	IS _{DOLOMITA}	IS _{ARAGONITA}
P1	-1,75	-3,45	-1,89	-4,97	-9,73	-5,11
P2	-1,18	-2,24	-1,32	-1,32	2,56	-1,46
P3	-0,95	-1,86	-1,10	-3,18	-6,34	-3,32
P4	-3,61	-6,67	-3,75	-4,57	-8,84	-4,71
P5	-0,73	-1,40	-0,87	-1,12	-2,54	-1,26
P6	-2,14	-3,91	-2,28	-2,68	-5,47	-2,82
P7	-1,87	-3,30	-2,01	-4,44	-7,60	-4,58
P8	-3,23	-5,76	-3,38	-1,61	-1,99	-1,76
P9	-4,71	-8,84	-4,85	-4,95	-9,95	-5,09

Os resultados demonstram pequena variação obtida entre os índices de saturação médios dos minerais analisados na estação seca ($\text{IS}_{\text{CALCITA}} = -2,24$, $\text{IS}_{\text{DOLOMITA}} = -4,16$ e $\text{IS}_{\text{ARAGONITA}} = -2,38$) e na estação chuvosa ($\text{IS}_{\text{CALCITA}} = -3,20$, $\text{IS}_{\text{DOLOMITA}} = -5,50$ e $\text{IS}_{\text{ARAGONITA}} = -3,35$).

Na estação seca os índices de saturação variaram de $\text{IS}_{\text{CALCITA}}$ (-4,71 a -0,73); $\text{IS}_{\text{DOLOMITA}}$ (-8,84 a -1,40) e $\text{IS}_{\text{ARAGONITA}}$ (-4,85 a 0,87). Na estação chuvosa os índices de saturação variaram de $\text{IS}_{\text{CALCITA}}$ (-4,97 a -1,12); $\text{IS}_{\text{DOLOMITA}}$ (-9,95 a -1,99) e $\text{IS}_{\text{ARAGONITA}}$ (-5,11 a 1,26). Verifica-se que na estação seca os índices de saturação de calcita, dolomita e aragonita foram maiores que na estação chuvosa.

Os valores dos índices de saturação negativos obtidos nas duas campanhas indicam que as águas subterrâneas da área têm a tendência de dissolver as rochas do aquífero pois encontram-se insaturadas. Segundo Nossa (2011), quanto menor for o índice de saturação maior será a dissolução das rochas do aquífero, fato esse intensificado na estação chuvosa da área estudada pelo aumento da precipitação.

Os resultados corroboram a teoria do carste para área de estudo, pois a dissolução das rochas indica um processo de carstificação ativa (FORD; WILLIAMS, 2007), com ocorrências mais comuns de dissolução de rochas calcárias e dolomíticas (HARDT; PINTO, 2009).

De acordo com Oliveira (2014), durante a estação chuvosa os condutos subterrâneos do entorno da Lagoa da Confusão, formados por calcário, sofrem processo de dissolução rochosa, que diminui o pH das águas subterrâneas, por meio da ação neutralizante do Ca^{2+} e Mg^{2+} dissolvidos na água.

De forma geral, os resultados das análises físico-químicas das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, demonstram que as mesmas são influenciadas pelas formações geológicas e podem ser alteradas pelo uso e ocupação dos solos.

O conhecimento da composição química das águas é imprescindível para se determinar os usos adequados dos recursos hídricos, bem como para previsão da qualidade da água e identificação das causas para as diferenciações hidroquímicas (STRADIOTO; KIANG, 2010) e verificação de indícios de poluição ou contaminação das águas (ASSUNÇÃO, 2016).

4.1.6. Conclusões

O estudo da hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão permitiu identificar e quantificar as propriedades e os constituintes químicos das águas e suas relações com o meio físico. As águas estudadas caracterizaram-se predominantemente como bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, sendo constatado a dominância de espécies iônicas de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} na hidroquímica.

Os resultados dos grupos de amostras através da análise de cátions e ânions permitiu identificar a existência de um comportamento hidroquímico aproximado com pequenas variações dos íons analisados. Os índices de saturação de calcita, dolomita e aragonita, mostraram que as águas em estudo se apresentam em soluções insaturadas em

relação aos minerais dissolvidos, sendo tendentes a corrosão, uma vez foram identificados valores negativos em todos os pontos amostrados.

O comportamento hidroquímico das águas do entorno da Lagoa da Confusão são controlados diretamente pela geologia e hidrogeologia. O estudo da hidroquímica mostrou-se uma importante ferramenta para conhecimento e monitoramento, podendo vir a auxiliar na gestão dos recursos hídricos da região.

As características ambientais, geológicas, hidrogeológicas e o uso das águas superficiais e subterrâneas do entorno da Lagoa da Confusão evidenciam a necessidade de serem adotadas medidas de controle das atividades econômicas desenvolvidas na área, bem como, a promoção de ações de educação e conscientização ambiental para preservação dos recursos hídricos e desenvolvimentos sustentável da região.

4.1.7. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Tocantins, através do Programa de Pesquisa em Recursos Hídricos, processo nº 2014.20300.000009. Ao Laboratório de Geoanálise Ambiental da Universidade Federal do Tocantins – Campus Porto Nacional e ao Laboratório de Saneamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Paraíso.

4.1.8. Referências

APHA, American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st. Centennial Edition, Washington, 2005.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. Water quality for agriculture. 1985. 174 f. Irrigation and Drainage Paper, Roma: FAO, 1985.

ANTUNES, A.; DIAS, J.; FERREIRA, J.; HERMÍNIO, J.; SILVA, M. Caracterização da Qualidade para Rega e da Piezometria da Água Subterrânea do Jardim Botânico da Universidade de Lisboa. 2013. 93 f. Monografia (Graduação em Geologia). Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

ASSUNÇÃO, A. L. C. Hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Dunas-Barreriras na Região de Parnamirim, RN. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Plano de manejo do Parque Nacional do Araguaia - TO. Brasília, 2001. 96p.

BORTOLIN, T. A. Padrões hidroquímicos e isotópicos do sistema aquífero Serra Geral no município de Carlos Barbosa, Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEÃO, M. I.; SCHNEIDER, V. E. Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 9, n. 1, p. 55-67, 2014.

CARMO, J. C. C.; OLIVEIRA, I. B.; OLIVEIRA, D. L. A presença de ferro na água subterrânea do Estado da Bahia. *Águas Subterrâneas*, v. 23, n. 2, p. 1-15, 2014.

COSWOSK, R.C. Estudo da potabilidade da água para consumo humano na cidade de Colorado do Oeste. *Revista Brasileira de Ciências da Amazônia*, v. 2, n. 1, p. 58-54, 2013.

CETESB. Guia Nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos / Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. BRANDÃO, C. J. et al. (Orgs.). São Paulo: CETESB; Brasília; ANA, 2011. 326 p.

CUSTÓDIO, E; LLAMAS, M.R. Hidrologia Subterrânea 2ª Edición. Barcelona: Ediciones Omega, 1983.

FENZL, N. Introdução à Hidrogeoquímica. Belém: EDUFPA, 1986.

FLOREA, L. J. Carbon flux and landscape evolution in epigenic karst aquifers modeled from geochemical mass balance. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 40, n. 8, p. 1072-1087, 2015.

FORD, D.; WILLIAMS, P. W. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. London: John Wiley & Sons Ltd., 2007.

GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucua para o Rio São Francisco, Brasil. *Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2018.

HARDT, R.; PINTO, S. A. F. Carste em litologias não carbonática. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, n. 2, p. 99-105, 2009

HEM, J. D. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. U.S Geological Survey. Water-Supply Paper. v. 3. 1985. 2254 f.

HERRERO-HERNÁNDEZ, M. S.; ANDRADES, A.; ÁLVAREZ-MARTÍN, E.; POSE-JUAN, M. S.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. J.; SÁNCHEZ-MARTÍN. Occurrence of pesticides and some of their degradation products in waters in a Spanish wine region. *Journal of Hydrology*, v. 486, p 234-245, 2013.

LUIZ, T. B. P.; GAIARDO, G. F.; SILVA, J. L. S. Utilização de máquina de vetor de suporte para previsão de níveis de água subterrânea. *Águas Subterrâneas*, v. 32, n. 1, p. 25-34, 2018.

MACIEL, A. C.; YONEKUBO, F.; FILHO, P. C. O.; RIOS, E. M. Gerenciamento espacial do monitoramento da qualidade da água para abastecimento público da cidade de Irati/PR. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 6, n. 1, p. 92-101, 2014.

MARTINS, A. K. E.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SILVA, E.; SOARES, V. P.; CÔRREA, G. R.; MENDONÇA, B. A. F. Relações solo-geoambiente em áreas de ipucas na planície

do médio Araguaia, Estado do Tocantins. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 297-310, 2006.

NASCIMENTO, P. F. O.; MORAIS, F. Análise morfométrica em ipucas em carste encoberto na Depressão do Médio Araguaia, Estado do Tocantins. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9., 2012, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: SINAGEO, 2012.

NOLETO JÚNIOR, S. Avaliação ambiental estratégica do conjunto de projetos hidroagrícolas localizados na planície do Araguaia, Estado do Tocantins. 2005, 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) - Universidade Federal do Tocantins - Palmas, 2005.

NOSSA, T. C. B. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análise hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP. 2011. 226 f. Tese (doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 2011.

OLIVEIRA, K. B. M.; MORAIS, F.; BACELLAR, L. A. P. Distribuição de parâmetros hidroquímicos das águas subterrâneas na região da Lagoa da Confusão - TO - Brasil. *Ambiência*, v. 10, n. 1, p. 281-302, 2014.

PAULA, M.; AKAMA, A.; OLIVEIRA, E.; MORAES, F. Ictiofauna epígea e subterrânea da área cárstica de Lagoa da Confusão, estado do Tocantins. *Revista da Biologia*, v. 12, n. 2, p. 29-35, 2014.

PEREIRA, G. C.; MORAIS, F. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão – TO. *Revista Geonorte*, v. 2, n. 4, p.1475-1483, 2012.

PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 25, p. 914-928, 1944.

PONTALTI, A. L. Evolução Espeleogenética da Gruta Casa de Pedra, Lagoa da Confusão-TO, Brasil. 2010. 74f. Monografia (Graduação em Geografia). Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional, 2010.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT S.; SCHNEIDER, V. E.; Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, v. 27 n. 1 p. 67-78, 2013.

RIBEIRO, D. H. B.; VIEIRA, E. Avaliação do potencial de impacto dos agrotóxicos no meio ambiente. Infobibos, São Paulo, 2010.

RODRIGUES, C. A. O. Desafio de garantir acesso à água para todos e as estratégias para dirimir conflitos de usos dos recursos hídricos: um estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental e Desenvolvimento Sustentável), Centro Universitário de Brasília, Brasília. 2013.

SALLES, L. D. Q.; BASTOS LEAL, L. R.; PEREIRA, R. G. F. DE A.; LAUREANO, F. V.; GONÇALVES, T. D. S. Influência dos aspectos hidrogeológicos de aquíferos cársticos na evolução do relevo: porção central da Chapada da Diamantina, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 1, 2018.

SANTOS, J. L. O.; LEITE, O. Avaliação do Risco de Contaminação de Águas Subterrâneas na Região Oeste da Bahia pelo Inseticida Carbofuran, Empregando os Modelos Attenuation Factor (AF) e Retardation Factor (RF). *Orbital - The Electronic Journal Of Chemistry*. v. 8, n. 1, p.28-35, fev. 2016.

SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M.; NASCIMENTO, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Cadernos de Geociências*, v. 7, n. 1, p. 1-9, 2010.

SCHOELLER, H. Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparasion des eaux souterraines. *Société Géologie Comptes Rendus Sommaire et Bulletin*. v. 5, p. 651-657, 1935.

SEPLAN. Secretaria de Planejamento do Estado do Tocantins. Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos. Palmas: SEPLAN, 2012.

SEPLAN. Secretaria de Planejamento do Estado do Tocantins. Perfil socioeconômico dos municípios. Diretoria de Pesquisa e Informações Econômicas. Disponível em: <http://central3.to.gov.br/arquivo/250033>. Acesso em: 13 jan. 2018.

STRADIOTO, M. R.; KIANG, C. H. Caracterização hidroquímica e isotópica das águas superficiais, pluviais e subterrâneas do município de Rio Claro/SP. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, p. 1-9. São Luís, 2010.

TOCANTINS, Instituto Natureza do Tocantins-Naturatins. Portaria N°. 483, de 04 de abril de 2008. Estabelece os procedimentos e critérios de licenciamento e gestão ambiental nas áreas de Ipucas e seu entorno, localizadas nas várzeas do vale do rio Araguaia e seus afluentes tributários. Diário Oficial do Tocantins, Palmas, 14 de maio de 2008, Seção 1, 2008. p.225-280.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 14, n.1, p.55-64, 2010.

VASCONCELOS, V. M. M.; SOUZA, C. F. Caracterização dos parâmetros de qualidade da água do manancial Utinga, Belém, PA, Brasil. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 6, n. 2, p. 305-324, 2011.

4.2. Isótopos estáveis aplicados para entendimento da dinâmica das águas superficiais e subterrâneas no entorno da lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil

Erlan Silva de Sousa

Programa de Mestrado em Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Tocantins
UFT, Rua 03, Q. 17, s/n, Jardim dos Ipês, CEP: 77500-000, Porto Nacional / TO / Brasil

erlan@uft.edu.br

Fernando Morais

Departamento de Geografia, Universidade Federal do Tocantins
UFT, Rua 03, Q. 17, s/n, Jardim dos Ipês, CEP: 77500-000, Porto Nacional / TO / Brasil

morais@uft.edu.br

Luis de Almeida Prado Bacellar

Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita 35.400-000, Ouro Preto/ MG / Brasil

luisapbacellar@gmail.com

4.2.1. Resumo

Isótopos estáveis e análises de dados hidroquímicos foram utilizados para o entendimento da dinâmica dos fluxos hídricos e conhecimento das características das águas superficiais e subterrâneas do entorno da Lagoa da Confusão com o objetivo de realizar um prognóstico e contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos da área pressuposta como um carste encoberto e subsidiar ações de proteção ao meio ambiente, visando contribuir para o uso racional dos recursos hídricos da região. A área de estudo está situada na porção média da bacia hidrográfica do rio Araguaia, sendo uma área periamazônica com grande pressão de uso agrícola. Os resultados das análises isotópicas e hidroquímicas indicam a ocorrência do processo de carstificação na área de estudo, na qual a composição química e isotópica da água é alterada pela interação água-rocha e dissolução das rochas carbonáticas, o que é ainda evidenciado pela ocorrência de cavernas e dolinas.

Palavras chave: Isótopos estáveis, Fluxos Hídricos, Recarga, Lagoa da Confusão.

4.2.2. Abstract

Stable isotopes and hydrochemical data were used to understand the dynamics of water flows and knowledge of surface and groundwater characteristics around the Lagoa da Confusão with the objective of realizing a prognosis and contributing to a better management of the water resources of the area presumed as a covert karst and subsidize actions to protect the environment, aiming to contribute to the rational use of water resources. The study area is located in the middle portion of the Araguaia river basin, in a periamazonic area with intense agricultural activities. The results of the isotopic and hydrochemical analyzes indicate the occurrence of the karsification process in the study area, in which the chemical and isotopic composition of water is altered by the water-rock interaction and dissolution of the carbonate rocks, this process is still evidenced by the occurrence of caves and dolines.

Keywords: Stable Isotopes, Water Flow, Recharge, Lagoa da Confusão.

4.2.3. Introdução

A água em boa qualidade e em abundância é um elemento estratégico para o desenvolvimento econômico, ambiental e social de qualquer região. Conhecer os mecanismos que influenciam as mudanças temporais e de distribuição da água é fundamental para uma gestão eficaz desse recurso (Binet et al., 2017).

No norte do Brasil, em uma das regiões mais promissoras para a expansão da agricultura, ocorre uma série de lagoas associadas ao sistema fluvial da planície do médio curso do rio Araguaia (Pereira & Morais, 2012), na região hidrográfica Tocantins-Araguaia, a maior bacia hidrográfica totalmente brasileira.

Nessa área, destaca-se um sistema flúvio-lacustre no município de Lagoa da Confusão, composto por diversas lagoas originadas da dissolução de rochas calcárias que compõem um sistema cárstico encoberto (Morais, 2017).

A disponibilidade de água em abundância e solos férteis torna o município de Lagoa da Confusão uma área com alto potencial para a agricultura. O desenvolvimento das atividades agrícolas nas últimas décadas tem aumentado a demanda por águas

subterrâneas para atender às necessidades de irrigação e conseqüentemente desencadeiam diversos problemas ambientais podem deteriorar a qualidade dos aquíferos.

As atividades agrícolas além de utilizar uma grande quantidade de água têm o potencial de contaminá-las. Nesse sentido, entender os mecanismos de recarga e do fluxo da água é de fundamental importância para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos (Melo et al., 2017).

Para o entendimento da dinâmica de aquíferos cársticos, como o pressuposto neste trabalho, várias metodologias com uso de isótopos estáveis de oxigênio, deutério e carbono têm sido aplicadas em diversas partes do mundo, apresentando resultados significativos para o entendimento dos processos de fluxos e recarga de águas subterrâneas (Einsiedl et al., 2009; Delbart et al., 2014; Mance et al., 2014; Ozyurt et al., 2014).

A utilização de isótopos ambientais estáveis tem contribuído para o entendimento e solução de problemas hidrogeológicos, tais como a determinação de fontes de poluição, identificação de mecanismos de salinização em águas subterrâneas, a definição de áreas de recarga, a determinação da interação de aquíferos e a determinação da velocidade e direção dos fluxos hídricos (Dias, 2016).

A proteção de aquíferos cársticos é um grande desafio, pois os mesmos representam uma importante fonte de água potável, no entanto, são aquíferos considerados como um dos mais vulneráveis à contaminação (Zhang et al., 2014; Chemseddine et al., 2015; Galvão et al., 2017). Suas estruturas complexas de porosidade e a heterogeneidade das características hidrogeológicas são os principais motivos que dificultam a avaliação da vulnerabilidade de contaminação dos recursos hídricos cársticos e o desenvolvimento de estudos de modelagem e controle da poluição (Guo et al., 2016).

Diante das características particulares da área de estudo, e a larga utilização dos recursos hídricos para o sustento das atividades desenvolvidas no entorno da Lagoa da Confusão e, tendo em vista que os recursos hídricos são susceptíveis a serem impactados por essas atividades, o presente trabalho tem como objetivo estudar as características dos recursos hídricos da área, utilizando análises hidroquímicas e isotópicas para entender a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas a fim de realizar um prognóstico da área e contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos.

Os resultados do estudo poderão subsidiar ações de proteção ao meio ambiente para garantir o uso racional dos recursos hídricos, além de contribuir para o avanço do

conhecimento da aplicação de isótopos estáveis na caracterização hidrogeológica e monitoramento dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

4.2.4. Área de estudo

A área de estudo está situada na porção média da bacia hidrográfica do rio Araguaia, fazendo parte da sub-bacia do rio Urubu no município de Lagoa da Confusão, coordenadas $10^{\circ} 48' 08''$ de latitude sul e $49^{\circ} 3' 59''$ de longitude oeste, região centro-oeste do Estado do Tocantins (Figura 7). O município possui uma área de $10.564,66 \text{ km}^2$ e população estimada de 12.501 habitantes (IBGE, 2017).

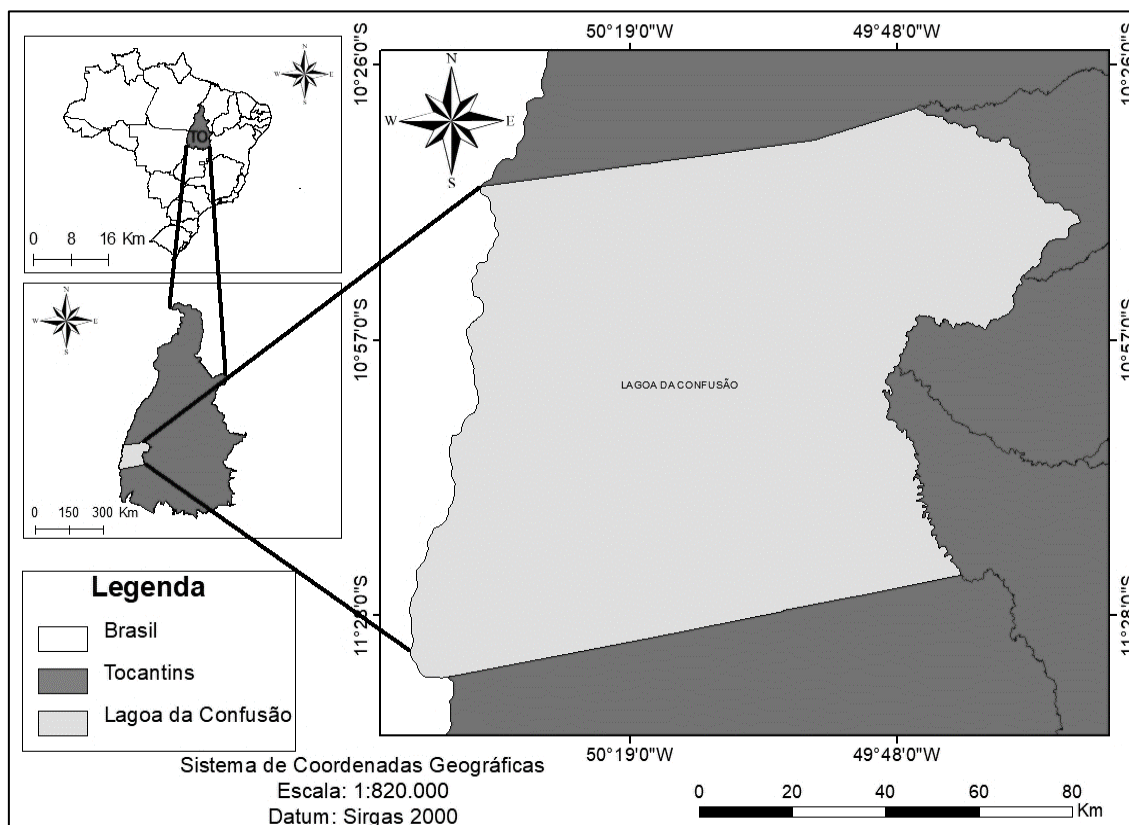


Figura 7 - Localização geográfica da área de estudo.

A altitude média da sede do município é de 184 m, sua distância de Palmas, capital do estado, é de aproximadamente 220 km.

A área apresenta clima úmido com moderada deficiência hídrica no período seco (maio-outubro), precipitação média anual de 1.750 mm e temperatura média anual de 28°C . Os solos da região são em sua maioria Plintossolos e Gleissolos. As condições

climáticas e solos férteis fazem da região um dos principais produtores agrícolas do Estado do Tocantins.

A geologia da área é composta por embasamento neoproterozóico do Supergrupo Baixo Araguaia – com afloramentos calcários da Formação Couto Magalhães, que além dos calcários apresenta filitos, ardósia, metargilito, metarenito e quartzitos subordinados (Pereira & Moraes, 2012). No entorno da Lagoa da Confusão estão presentes três morrotes de calcário alinhados na direção SO-NE, destacados topograficamente na planície quaternária circundante.

Supõem-se na área, a existência de um sistema cárstico, evidenciada pela abrangência litológica regional dos afloramentos calcários, correspondentes ao Grupo Tocantins, e pela presença de drenagem subterrânea no interior de cavidades encontradas no local além de evidências de dissolução/erosão do calcário (Oliveira, 2014), sendo a Lagoa da Confusão e diversas dolinas da região feições oriundas da dissolução da rocha calcária.

Lagoa da Confusão encontra-se nas unidades geomorfológicas da Planície do Bananal e Depressão do Araguaia. A Planície do Bananal constitui uma faixa de deposição caracterizada pela combinação de áreas planas com baixa altitude e a ocorrência de sedimentação causada pelas inundações periódicas, apresentando cobertura superficial com predominância de solo argiloso de baixa permeabilidade e existência de drenagem anastomótica, marcas de paleodrenagem, canais abandonados e lagoas circulares (Brasil, 1981).

A Depressão do Araguaia é caracterizada por uma vasta superfície rebaixada, constituída por relevo suavemente dissecado, prevalecendo o domínio de formas suavemente convexas e a forte presença de interflúvios tabulares (Martins et al. 2006).

No município foi implantado o sub-projeto de agricultura irrigada Lagoa, que constitui parte do projeto de irrigação Javaés, cujo objetivo é permitir o cultivo de duas safras por ano (safra e entressafra), através da construção de barramentos para a subirrigação, que drena a água do rio e eleva o lençol freático da área produtiva (Nolêto Júnior 2005; Oliveira 2014).

Lagoa da Confusão está localizada em uma área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, apresentando principalmente fitofisionomias do Cerrado, que segundo Simon e Pennington (2012), representa um dos tipos mais importantes de savana em termos de biodiversidade e endemismo.

4.2.5. Metodologia

Foram coletadas amostras de águas subterrâneas em poços de exploração (P1-P6) e águas superficiais à jusante (P7-P9), na Lagoa da Confusão e no rio Urubu, totalizando 9 pontos (Figura 8). A seleção dos pontos de coleta levou em consideração a obtenção de autorização para coleta, facilidade de acesso, existência de perfis litológicos e construtivos dos poços e a distribuição geográfica na área de estudo.

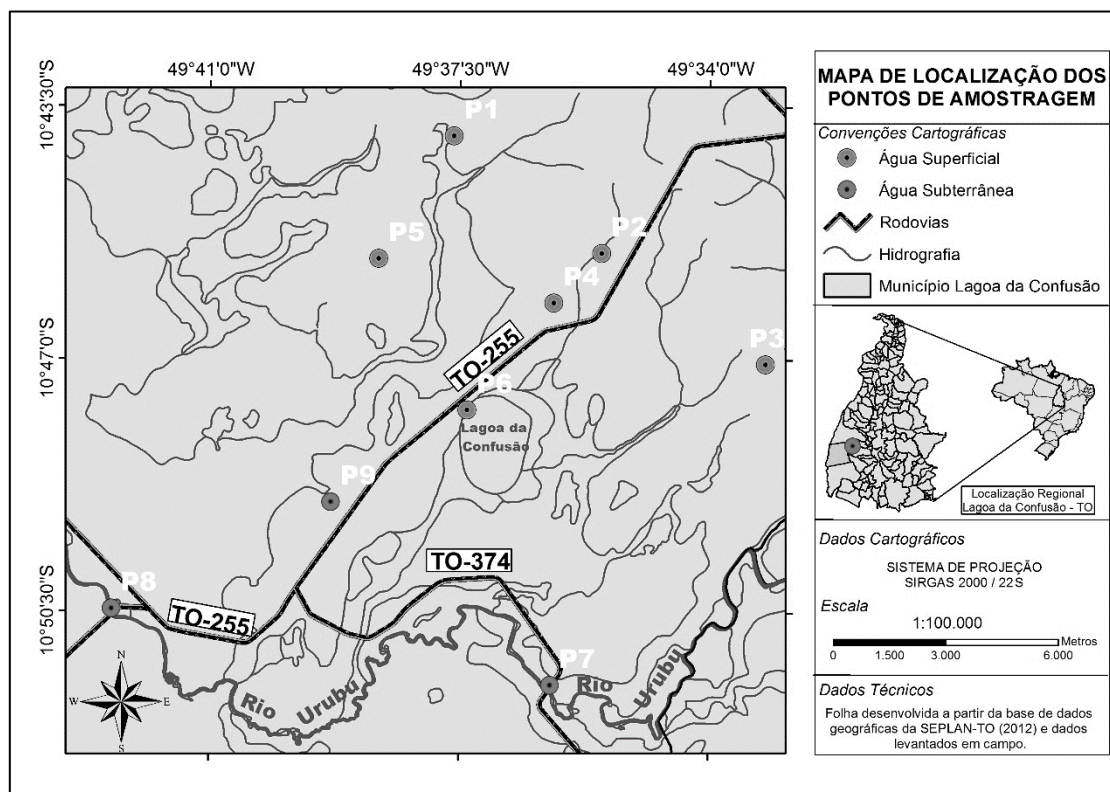


Figura 8 - Localização dos pontos de amostragem no entorno da Lagoa da Confusão.

A amostragem foi realizada utilizando a metodologia estabelecida para coleta e armazenamento de água da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011), e contemplou apenas amostras coletadas no período seco (outubro-2016), quando não há conexão direta das águas superficiais com as subterrâneas por dolinas, em função das inundações sazonais na área estudada.

Em campo foram medidas a temperatura, condutividade, sólidos totais dissolvidos (STD) e pH. Em laboratório realizaram-se medidas de turbidez, cor, concentração de cloretos, carbonatos, nitritos, nitratos, cálcio, magnésio, manganês, ferro, dureza total, dureza cálcica, dureza do magnésio e alcalinidade, potássio, sulfato e sódio. As análises

seguiram as metodologias estabelecidas pelo “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, 2005).

Para a classificação do tipo químico das águas subterrâneas de acordo com o conteúdo iônico dominante, resultante da interação água-rocha, foi elaborado o diagrama triangular de Piper, utilizando o software QualiGraf (FUNCEME, 2016).

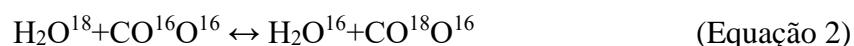
A amostragem para as análises isotópicas de oxigênio-18, deutério e carbono inorgânico dissolvido nas águas superficiais e subterrâneas foi realizada utilizando os procedimentos preconizados pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002). As amostras foram coletadas em recipientes de vidro cor âmbar para evitar a penetração da luz e lacrados com batoque para impedir a evaporação e entrada de gases que causam o fracionamento isotópico. As análises isotópicas foram executadas em um espectrômetro de cavidade ressonante do tipo Ringdown-CRDS da marca PICARRO, modelo L2130i, e processadas com uso do software LIMS for Lasers, realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade de São Paulo (CPGeo-USP).

Os procedimentos das análises laboratoriais seguiram os seguintes métodos: *Razão deutério-hidrogênio D/H* (Brand et al., 2000); *Razão O18/O16* (Epstein & Mayeda 1953); *Razão C13/C12 do Carbono inorgânico dissolvido - DIC* (Craig, 1957).

As análises de isótopos de hidrogênio seguiram o método proposto por Brand (2000), com a obtenção do hidrogênio que constitui a água, em uma reação da água com cromo metálico a 850°C, a vácuo, gerando gás H₂. Na determinação da razão deutério-hidrogênio, alíquotas de 1,0 µl foram injetadas em um reator, na qual ocorre a reação de oxidação do cromo e liberação do H². A reação de oxidação pode ser visualizada na equação 1:



Após a reação, o H₂ foi inserido no espectrômetro de massa e analisado para determinação das razões isotópicas H/D e referenciado a um gás padrão do próprio H₂. Para determinar a razão O¹⁸/O¹⁶ utilizou-se a técnica de equilíbrio da reação CO₂-H₂O, descrita por Epstein e Mayeda (1953), dada pela equação 2:



A reação ocorre a uma temperatura de $25,0 \pm 0,1$ °C por pelo menos 8 h. Após a reação, o CO₂ produzido no equilíbrio da reação é extraído e analisado em espectrômetro de massa, onde é feita a leitura para determinar as razões O¹⁸/O¹⁶.

Os valores da razão D/H e O¹⁸/O¹⁶ foram obtidos utilizando-se padrões secundários de referência internacional com composição isotópica conhecida VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), preparados pela Agencia Internacional de Energia Atômica em Viena, Áustria.

A variação da razão isotópica das amostras em relação ao padrão é expressa como diferença entre a razão medida na amostra e a razão do padrão, utilizando a notação delta (δ) por mil (‰).

$$\delta \text{ ‰} = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \times 10^3 \quad (\text{Equação 3})$$

Para interpretação do comportamento da composição isotópica das águas superficiais e subterrâneas, foi obtida a curva meteórica local por meio da interpolação das curvas obtidas por Honório (2010) e Pacheco (2012).

Para determinação da razão isotópica do carbono inorgânico dissolvido $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$, foi utilizado um sistema Gas Bench II acoplado a um espectrômetro de massa em fase gasosa. A preparação da amostra consiste em inserir 7 gotas de ácido ortofosfórico em um frasco do tipo Exetainer ventilado com hélio (100 mL/min durante 5 min).

Em seguida, foram introduzidos 05 mL de água para a conversão do carbono inorgânico dissolvido-DIC em CO₂ dissolvido e gasoso. Para a obtenção do equilíbrio isotópico entre CO₂ dissolvido e CO₂ gasoso foram necessárias aproximadamente 18 horas.

Por fim, extraiu-se o CO₂ por meio de um sistema cromatográfico composto, no qual o gás é introduzido no espectrômetro de massa para determinação da razão isotópica $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ em relação ao padrão de referência internacional V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

A variação da razão isotópica das amostras é calculada em relação ao padrão e expressa em $\delta^{13}\text{C}$ (‰), como pode ser visualizado na equação 4, e o erro analítico das medidas é da ordem de 0,05 ‰.

$$\Delta^{13}\text{C}^{\circ}/_{\text{o.o}} = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \times 10^3 \quad (\text{Equação 4})$$

4.2.6. Resultados e Discussões

Os resultados das análises hidroquímicas das amostras coletadas no entorno da Lagoa da Confusão podem ser visualizados nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Resultados parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas (P1 a P6) e superficiais (P7 a P9) no entorno da Lagoa da Confusão.

Pontos	pH	Cor (UH)	Turbidez (UNT)	STD (mg/L)	CE (µS/cm)	Dureza Total (mg/L de CaCO ₃)
P1	7,13	3,70	5,42	31,00	113,20	17,00
P2	8,10	1,40	2,31	141,00	275,00	80,00
P3	7,45	0,80	2,05	60,00	126,60	28,00
P4	5,97	0,20	2,10	9,00	20,60	20,00
P5	7,12	1,70	4,36	81,00	252,00	81,30
P6	7,08	4,30	3,42	7,00	27,90	10,00
P7	7,46	4,70	5,49	34,00	71,40	10,00
P8	7,18	6,90	1,35	6,00	14,40	10,00
P9	5,93	0,20	1,88	3,00	7,90	12,00

Tabela 9 - Concentrações de elementos químicos em mg/L principais das águas subterrâneas (P1 a P6) e superficiais (P7 a P9) no entorno da Lagoa da Confusão.

Pontos	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃	Fe
P1	5,88	2,70	0,86	1,16	34,60	2,62	<1,0	0,50	0,04
P2	24,28	13,54	2,07	4,46	165,40	3,83	<1,0	0,20	0,60
P3	9,60	4,47	1,58	6,11	68,00	1,55	<1,0	0,10	0,20
P4	2,80	4,18	0,33	0,46	14,00	3,47	<1,0	0,50	<0,01
P5	27,20	13,15	0,87	2,72	94,00	3,62	<1,0	0,10	<0,01
P6	2,02	1,94	0,76	1,05	46,00	1,17	<1,0	0,40	0,05
P7	1,84	1,98	1,04	2,01	38,60	1,28	<1,0	0,10	0,01
P8	1,04	2,18	0,74	1,09	5,40	1,06	<10,0	0,10	0,18

P9	1,60	2,53	0,47	0,46	2,00	2,13	<1,0	0,20	<0,01
----	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

A condutividade elétrica apresentou uma média de 101,0 $\mu\text{S.cm}$, variando de 7,90 a 275,0 $\mu\text{S.cm}$ (Tabela 8). Os resultados mostram que as águas da área de estudo são pouco mineralizadas, sendo as águas superficiais menos condutivas que as águas subterrâneas por apresentarem uma maior quantidade de íons dissolvidos.

A soma dos teores de todos os constituintes minerais presentes água dada pela medida dos sólidos totais dissolvidos (STD), apresentou valor médio de 41,33 mg/L, o que classifica as águas da área como doces. Em relação ao potencial hidrogeniônico, as águas tendem a ser pouco ácidas, apresentando pH próximo a neutralidade, com valores que variam de 5,93 a 8,10, com média de 7,05 para os pontos analisados.

Os valores de dureza expresso pelo teor de carbonato de cálcio (mg/L de CaCO_3), variou de 10,0 a 81,30, classificando as águas da região como mole ou de dureza moderada. Estes valores representam características de águas com pouco tempo de residência com recarga relacionada às precipitações pluviométricas através do manto de intemperismo (HAUSMANN, 1966; LISBOA, 1996). Geralmente em aquíferos cársticos, a dureza total é função das concentrações dos íons Ca^{++} e Mg^{++} em solução (NOSSA, 2011), elementos esses abundantes no entorno da Lagoa da Confusão em função dos afloramentos calcários da Formação Couto Magalhães. Para as águas superficiais os valores de dureza para os três pontos analisados foram da ordem de 10 mg/L.

Em geral as águas do entorno da Lagoa da Confusão apresentam concentrações variadas de cálcio, magnésio, sódio e bicarbonato e, pequenas concentrações de potássio, cloretos, sulfatos, nitritos e ferro (Tabela 9). As concentrações de cálcio para as águas subterrâneas variaram de 1,60 a 27,20 mg/L e estão relacionadas diretamente às características químicas-mineralógicas da região. Para as águas superficiais as concentrações de cálcio variaram de 2,02 a 1,04 mg/L. As concentrações de magnésio oscilaram de 1,94 a 13,54 mg/L, sendo o magnésio um elemento que apresenta dinâmica similar ao cálcio com diferenças na facilidade de precipitação.

O principal elemento presente nas águas amostradas da área de estudo é íon bicarbonato, que tem como origem a dissolução de CO_2 presente nas rochas do aquífero ou nas águas da chuva, apresentando variação de 2,00 a 165,40 mg/L. As concentrações de bicarbonato nas águas subterrâneas do entorno da Lagoa da Confusão estão

diretamente relacionadas aos processos de carstificação que envolvem a dissolução das rochas carbonáticas na área.

Verificou-se ainda em relação as características hidroquímicas por meio do diagrama de Piper (Figura 9) a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas.

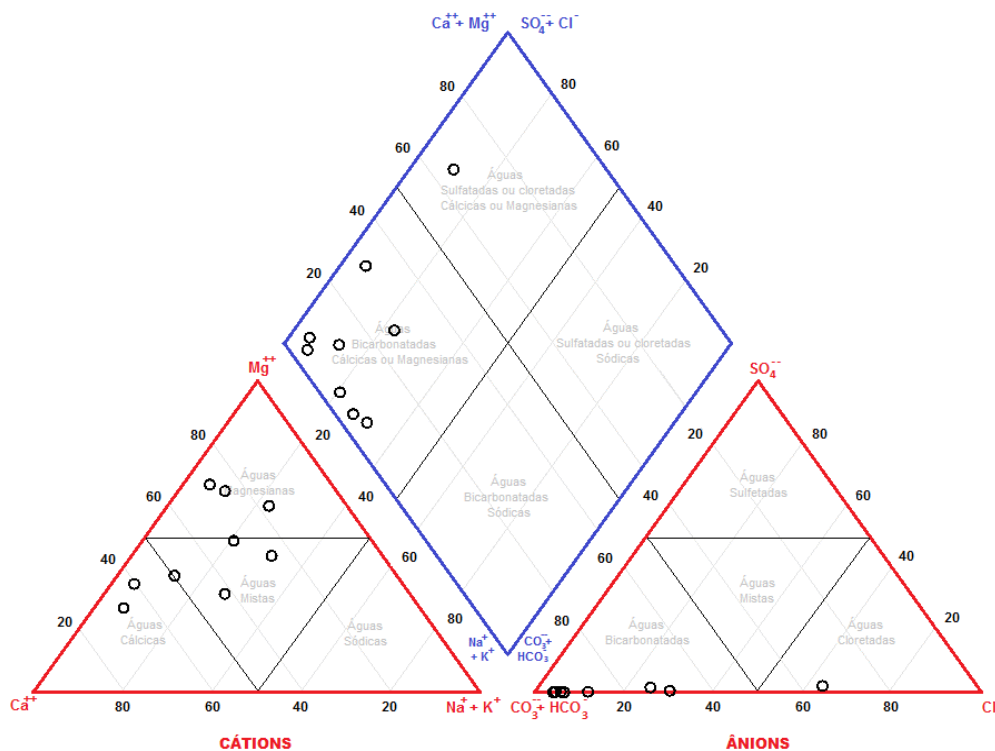


Figura 9 - Diagrama de Piper e classificação das águas amostradas.

Observa-se no diagrama que as águas têm concentrações de bicarbonatos próximas, sendo constatado o predomínio de espécies iônicas de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} na hidroquímica das águas da área. A concentração de cálcio e magnésio nas águas analisadas está relacionada à geologia e a ocorrência de calcário na área. Os resultados corroboram os estudos de Oliveira (2014), que identificou a Formação Couto Magalhaes do Grupo Tocantins nas proximidades dos pontos de coleta.

Com o objetivo de obter uma caracterização isotópica das águas superficiais e subterrâneas do entorno da Lagoa da Confusão, foram analisadas as razões isotópicas $\delta^{18}\text{O}$, δD e $\delta^{13}\text{C}_{\text{CD}}$ (Tabela 10).

Tabela 10 - Resultados das análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$, δD , d e $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ das amostras de águas superficial e subterrânea no entorno da Lagoa da Confusão.

Pontos	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$
P1	-3,00	-14,6	9,4	-15,55
P2	-3,70	-19,4	10,2	-13,70
P3	-3,98	-21,2	10,6	-18,85
P4	-3,51	-18,3	9,8	-16,69
P5	-3,75	-19,3	10,7	-13,45
P6	5,33	27,5	-15,1	-18,22
P7	0,16	0,3	-1,0	-12,52
P8	0,50	2,1	-1,9	-20,55
P9	-3,09	-16,1	8,6	-18,69

Os valores de δD das amostras de águas subterrâneas analisadas no entorno da Lagoa da Confusão variaram entre -14,6‰ (P1) e -21,2‰ (P3) e os valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -3,0‰ (P1) e -3,98‰ (P3). O predomínio de valores isotópicos negativos de δD e $\delta^{18}\text{O}$ no aquífero indica que as águas são empobrecidas de isótopos pesados em relação ao padrão VSMOW, indicando um processo de progressiva depleção dos isótopos pesados pelo efeito continental (Gat 1971).

As menores concentrações de $\delta^{18}\text{O}$ e δD identificadas nas águas subterrâneas foram de -21,27‰ e -3,98‰, respectivamente, na amostra P3, valores esses relativamente baixos. Os resultados apresentados nas amostras de águas subterrâneas se enquadram no padrão menos negativo de Kimmelman et al. (1986), indicando que estão presentes no aquífero, águas com pouco tempo de residência.

A dinâmica de fluxo e o tempo de residência indicados pela composição isotópica das águas subterrâneas estão intimamente relacionados às características ambientais e geológicas da área. Como informado anteriormente, a área da Lagoa da Confusão localiza-se em um sistema cárstico encoberto.

Os resultados das análises de $\delta^{18}\text{O}$ e δD evidenciam a existência do sistema cárstico que favorece uma rápida circulação dos fluxos hídricos, e determina as características hidroquímicas da água. Geralmente aquíferos cársticos têm um curto

tempo de residência e alta frequência de conteúdo químico e isotópico nas águas subterrâneas (El-Hakim and Bakalowicz 2007).

A relação entre as características da água e o sistema cárstico da área de estudo também foi observada por Oliveira et al. (2014), que verificaram que a hidroquímica na área está marcada pela ocorrência de carste, que determina a dinâmica dos fluxos subterrâneos. Os resultados indicam que há uma boa conexão entre as águas superficiais e subterrâneas na área.

A partir da análise dos resultados δD e $\delta^{18}O$, pode-se elaborar a linha de tendência dos resultados isotópicos da área de estudo (Figura 10).

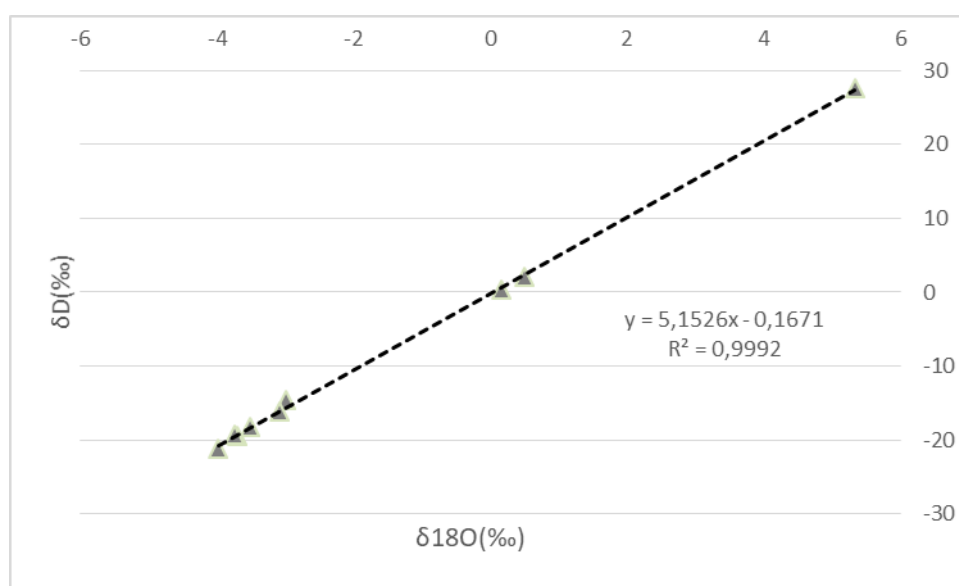


Figura 10 - Variação do sinal isotópico de $\delta^{18}O$ e δD no entorno da Lagoa da Confusão.

O coeficiente angular da linha de tendência isotópica do entorno da Lagoa da Confusão foi de 5,15, esse resultado indica que as águas subterrâneas não sofreram evaporação significativa durante o processo de infiltração, sendo as mesmas originadas da infiltração da precipitação nas áreas de recarga.

A correlação entre $\delta^{18}O$ e δD é comum em águas de aquíferos cársticos e sugere a recarga rápida (processo rápido de percolação) da precipitação para as águas subterrâneas através substrato carbonático carstificado e indica que as águas subterrâneas são de origem meteórica (Araguas & Diaz Teijeiro 2005; Al-Charideh 2012; Qibo et al. 2015).

A dinâmica de recarga das águas subterrâneas no entorno da Lagoa da Confusão, assemelha-se aos resultados obtidos por Santos et al. (2016), que verificaram eventos de

recarga associados a precipitação na qual ocorre atenuação do sinal isotópico durante o processo de recarga.

Os resultados das análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e δD das águas subterrâneas da área de estudo evidenciam que a recarga do aquífero é homogênea. Essa homogeneidade indica que a área é susceptível a contaminação hídrica difusa, pois há ligação entre as águas e o aquífero tem sua recarga em águas de chuva que escoam superficialmente sobre as áreas agrícolas do entorno da Lagoa da Confusão.

Segundo Clark e Fritz (1997), a recarga de um aquífero é feita através da água de precipitação, e a sua composição isotópica é semelhante à composição isotópica das águas meteóricas. A recarga das águas na região da Lagoa da Confusão tem suas origens nas águas meteóricas, mas, as chuvas da região podem sofrer influências do vapor d'água provenientes da Floresta Amazônica bem como da região do atlântico subtropical e região sul do Brasil.

Comparou-se o comportamento da curva local de variação da composição δD e $\delta^{18}\text{O}$ em relação aos dados de sinal isotópico obtidos no entorno da Lagoa da Confusão (Figura 11).

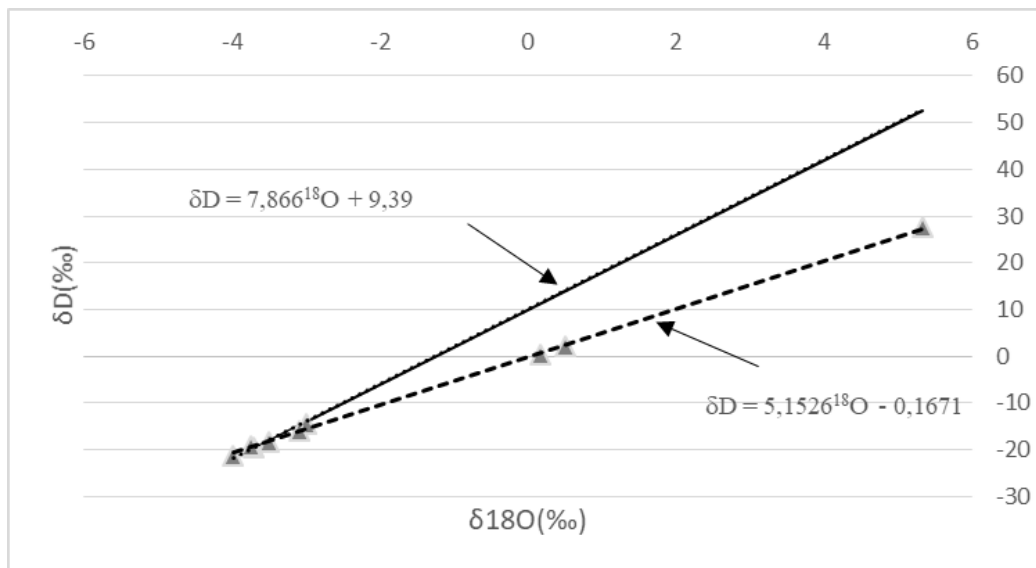


Figura 11 - Comparações entre a linha de água local e sinal de razão isotópica da correlação entre $\delta^{18}\text{O}$ e δD do entorno da Lagoa da Confusão.

Verifica-se uma tendência de acompanhamento do comportamento dos dados obtidos na área de estudo em relação a curva local e a mesma assemelha-se a Linha meteórica Global de Craig (1967). Em alguns casos, podem ocorrer diferenças na

tendência de comportamento da composição isotópica das águas subterrâneas em relação à LMG. Segundo Clark e Fritz (1997), diferenças significativas da composição isotópica das águas subterrâneas locais em relação à LMG estão relacionadas principalmente a processos de evaporação.

Os valores isotópicos obtidos para as águas superficiais foram superiores aos das águas subterrâneas. Para essas águas, obtiveram-se para as amostras analisadas no rio Urubu, valores de 0,16‰ $\delta^{18}\text{O}$ e 0,3‰ δD (P6) e de 0,5‰ $\delta^{18}\text{O}$ e 2,21‰ δD (P7). Na Lagoa da Confusão (P6), obteve-se valores de 5,33‰ $\delta^{18}\text{O}$ e 27,5‰ δD .

As proximidades e os valores baixos observados nas análises isotópicas dos dois pontos no rio Urubu indicam uma interação entre as águas superficiais e subterrâneas da região, sendo os recursos hídricos superficiais abastecidos em períodos de estiagem por águas subterrâneas que imprimem suas características nas águas dos rios e lagos da região.

Verificou-se que os valores isotópicos obtidos na Lagoa da Confusão evidenciam o grau de exposição da Lagoa ao processo de evaporação. Fontes et al. (2015) explicam que esse fato está relacionado às características que os traçadores de evaporação $\delta^{18}\text{O}$ e δD tendem a aumentar quando sofrem evaporação.

Os valores de excesso de deutério (Tabela 10) variaram de 9,4‰ a 10,7‰ para as águas subterrâneas e de -15,1‰ a -1,0‰ para as águas superficiais. Os valores obtidos para as águas subterrâneas da área indicam que as águas de recarga do aquífero têm origem em precipitações formadas por vapores de água atmosféricos que não sofreram sucessivos processos de evaporação (Antunes 2016).

Os valores da razão isotópica de carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) no entorno da Lagoa da Confusão foram predominantemente negativos e variaram entre -20,5‰ e -13,4‰, com média de -16,5‰. Segundo Villaneuva et al. (2016), valores negativos de carbono inorgânico dissolvido indicam uma maior contribuição de processos de dissolução de carbonatos por H_2CO_3 .

Estudos utilizando o carbono inorgânico dissolvido na água têm sido amplamente utilizados na caracterização de ambiente cársticos (Delbart, 2014; Pu et al. 2014; Cao et al. 2016; Qingyu et al. 2016). Os resultados das análises de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ no entorno da Lagoa da Confusão, corroboram os estudos realizados por Martins (2005), Pontalti (2010), Nascimento e Morais (2012), Pereira e Morais (2012) e Oliveira (2014), que verificaram a presença de carste parcialmente encoberto na área, sendo os valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$

encontrados nas águas provenientes da dissolução de minerais carbonáticos como a calcita e dolomita encontradas na região.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$ evidenciam a ocorrência de calcário em subsuperfície, que segundo com Oliveira (2014), é marcada pela abrangência litológica regional dos afloramentos da Formação Couto Magalhães, Grupo Tocantins.

A formação calcária também representada pelo sinal isotópico de $\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$, está fortemente relacionada com o sistema hidrogeológico da Lagoa da Confusão que tem as suas águas de recarga alteradas na sua composição química pela interação água-rocha e dissolução das rochas carbonáticas, evidenciada ainda pela ocorrência de cavernas e dolinas na área.

As características hidroquímicas e isotópicas indicam a área como vulnerável a contaminação, pois a formação calcária do aquífero contribui para uma rápida recarga pela infiltração de águas da chuva, contribuindo para uma rápida distribuição da água através dos condutos com uma alta velocidade de fluxo e baixo tempo de residência sem muito tempo para a filtração e autodepuração de possíveis contaminantes.

4.2.7. Conclusões

O estudo da hidroquímica identificou que o principal elemento presente nas águas amostradas no entorno da Lagoa da Confusão, área fortemente pressionada pelo avanço da agricultura irrigada, é íon bicarbonato, que tem como origem a dissolução de CO_2 presente nos solos das áreas de recarga ou nas águas da chuva, sendo constatado a dominância de espécies iônicas de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

O estudo dos isótopos estáveis permitiu identificar as características cársticas pressuposta da área e entender a dinâmica dos fluxos hídricos por meio do conhecimento das características isotópicas das águas superficiais e subterrâneas da região.

A dinâmica de fluxo e o tempo de residência indicado pela composição isotópica das águas estão intimamente relacionados às características cársticas da região. Os valores da razão isotópica de carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) foram predominantemente negativos e indicam uma maior contribuição de processos de dissolução de carbonatos por H_2CO_3 .

O estudo mostrou-se válido por contribuir com a caracterização hidrogeológica da área e verificar que a composição química das águas é alterada pela interação água-rocha e dissolução das rochas carbonáticas. Os resultados evidenciam a vulnerabilidade da área,

pois as águas do aquífero tem uma rápida recarga tendo sua dinâmica controlada pela formação calcária que contribui para uma rápida percolação com alta velocidade de fluxo sem muito tempo para filtração, podendo facilitar o transporte e diminuir a autodepuração de poluentes.

4.2.8. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Tocantins, através do Programa de Pesquisa em Recursos Hídricos, processo nº 2014.20300.000009. Ao Laboratório de Geoanálise Ambiental da Universidade Federal do Tocantins – Campus Porto Nacional e ao Laboratório de Saneamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Paraíso.

4.2.9. Referências

AL-CHARIDEH, A. Recharge rate estimation in the Mountain karst aquifer system of Fige spring, Syria. *Environmental Earth Sciences*, v. 65, n. 4, p. 1169-1178, 2012.

ANTUNES, A. L. G. Caracterização química e isotópica das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do Rio Almonda. Lisboa, 2016. 78 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Aplicada) – Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa.

ARAGUAS, L.J. & DIAZ TEJEIRO, M.F. Isotope composition of precipitation and water vapour in the Iberian Peninsula: first results of the Spanish network of isotopes in precipitation. In: international atomic energy agency— isotopic composition of precipitation in the Mediterranean Basin in relation to air circulation patterns and climate. *Int At Energy Agency* v. 1453, n.1, p.173-190, 2005.

BARROS, J.F.; ALMEIDA, J.B.; SILVA, C.M.S.V.; MENDES FILHO, J. Caracterização isotópica (^{18}O , D) e hidroquímica das águas da bacia do rio da Prata de São Luís/MA e vizinhança. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 2, p. 404-410, 2015.

BINET, S.; JOIGNEAUX, E.; PAUWELS, H.; ALBERIC, P.; FLEHOC, C.;
BRUAND, A. Water exchange, mixing and transient storage between a saturated karstic conduit and the surrounding aquifer: Groundwater flow modeling and inputs from stable water isotopes. *Journal of Hydrology*, v. 544, p. 278-289, 2017.

BRAND, W.A.; AVAK, H.; SEEDORF, R.; HOFMANN, D.; CONRADI, T. New Methods for Fully Automated Isotope Ratio Determination from Hydrogen at the Natural Abundance Level. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 32, n. 2-3, p. 263-273, 1996.

BRASIL. Projeto RADAMBRASIL. Brasilia, Brasil, 1981.

CHEMSEDDINE, F.; DALILA, B.; FETHI, B. Characterization of the main karst aquifers of the Tez bent Plateau, Tebessa Region, Northeast of Algeria, based on hydrogeochemical and isotopic data. *Environmental Earth Sciences*, v. 74, n. 1, p. 241-250, 2015.

CAO, X.; WU, P.; HAN, Z.; TU, H.; ZHANG, S. Factors controlling the isotope composition of dissolved inorganic carbon in a karst-dominated wetland catchment, Guizhou Province, Southwest China. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 14, p. 1103-1115, 2016.

CLARK, I. & FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology* Lewis. 1997.

CRAIG, H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 12, n. 1-2, p. 133-149, 1957.

DELBART, C.; BARBECOT, F.; VALDES, D.; TOGNETTI, A.; FOURRE, E.;
PURTSCHERT, R.; COUCHOUX, L.; JEAN-BAPTISTE, P. Investigation of young water inflow in karst aquifers using SF₆-CFC-3H/He-85Kr-39Ar and stable isotope components. *Applied Geochemistry*, v. 50, p. 164-176, 2014.

DIAS, A. C. DE A. Analysis and identification of the source of contamination of water resources in the municipality of Salvaterra de Magos, 2016. 93 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Aplicada) - Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa.

EL-HAKIM, M. & BAKALOWICZ, M. Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in the Middle East. Implication on karst aquifer classification. *Journal of Hydrology*, v. 333, n. 2, p. 329-339, 2007.

EPSTEIN, S. & MAYEDA, T. Variation of O18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 4, n. 5, p. 213-224, 1953.

FUNCEME. Qualigraf: Programa para Análise da Qualidade da Água. Disponível em: <http://www.funceme.br/qualigraf>. Acesso em: 25 outubro de 2016.

GAT, J. R. Comments on the Stable Isotope Method in Regional Groundwater Investigations. *Water Resources Research*, v. 7, n. 4, p. 980-993, 1971.

GUO, F.; WANG, W.; JIANG, G.; HUANG, S. Distribution and stable isotopic compositions of organic carbon in surface sediments in hyporheic zone of karst springs. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 10, p. 850, 2016.

HAUSMAN, A. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul, RS. *Estudos Tecnológicos: Acta Geológica Leopoldensia, Série Mapas*, v. 2, n. 18-20, p.1-127, 1995.

HONÓRIO, B.A.; HORBE, A.M.C.; SEYLER, P. Chemical composition of rainwater in western Amazonia — Brazil. *Atmospheric Research*, v. 98, n. 2-4, p. 416-425, 2010.

IAEA. Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.

IBGE. Lagoa da Confusão Basic Data. Disponível em: www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=171190#. Acessado em: 22dez2017.

MANČE, D.; HUNJAK, T.; LENAC, D.; RUBINIĆ, J.; ROLLER-LUTZ, Z. Stable isotope analysis of the karst hydrological systems in the Bay of Kvarner (Croatia). *Applied Radiation and Isotopes*, v. 90, p. 23-34, 2014.

MARTINS, A.K.E.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SILVA, E.; SOARES, V.P.; CORRÊA, G.R.; MENDONÇA, B.A.F de. Relações solo-geoambiente em áreas de ocorrências de Ipucas na planície do Médio Araguaia - Estado de Tocantins. *Revista Árvore*, v. 30, n. 2, p. 297-310, 2006.

MARTINS, I.C. DE M. Avaliação Qualitativa de Impactos Ambientais Decorrentes de Agricultura Irrigada em Regiões de Ipucas no Estado do Tocantins, 2005. Viçosa, 2005. 305 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa.

MELO, D.D.C.D.; CABRERA, M.C.M.; WENDLAND, E. Water balance and computational modeling aiming to estimate underground recharge. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 1, p. 66, 2017.

MORAIS, F. Classificação morfológica das dolinas da região de Lagoa da Confusão-TO. In: 34º Congresso Brasileiro de Espeleologia, 2017, Ouro Preto. ANAIS do 34º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2017. v. 1. p. 283-287.

NOLETO JUNIOR, S. Avaliação ambiental estratégica do conjunto de projetos hidroagrícolas localizados na planície do Araguaia, Estado do Tocantins. Palmas, 2005. 159 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente), Universidade Federal do Tocantins.

NOSSA, T.C.B. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análise hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP. Salvador, 2011. 226 p. Tese (doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.

OLIVEIRA, K. B. M. Studies of water flows in the surrounds of Lagoa da Confusão-TO. Palmas, 2014. 195 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente), Universidade Federal do Tocantins.

OLIVEIRA, K.B.M.; MORAIS, F de; BACELLAR, L. de A.P. Distribuição de parâmetros hidroquímicos das águas subterrâneas na região da Lagoa da Confusão - TO - Brasil. *Ambiência*, v. 10, n. 1, p. 281-302, 2014.

OZYURT, N.N.; LUTZ, H.O.; HUNJAK, T.; MANCE, D.; ROLLER-LUTZ, Z. Characterization of the Gacka River basin karst aquifer (Croatia): Hydrochemistry, stable isotopes and tritium-based mean residence times. *Science of The Total Environment*, v. 487, p. 245-254, 2014.

PACHECO, W.L. Águas subterrâneas do Distrito Federal: efeito de sazonalidade e características associadas aos isótopos de deutério, oxigênio e carbono. Brasília, 2012. 129 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

PEREIRA, G.C. & MORAIS, F de. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão-TO. *Geonorte*, v. 2, n. 4, p. 1475-1483, 2012.

PONTALTI, N.L.S. Evolução Espeleogenética da Gruta Casa de Pedra, Lagoa da Confusão-TO. Porto Nacional, 2010. 74 p. Monografia (Graduação em Geografia). Universidade Federal do Tocantins.

PU, J.; CAO, M.; ZHANG, Y.; YUAN, D.; ZHAO, H. Hydrochemical indications of human impact on karst groundwater in a subtropical karst area, Chongqing, China. *Environmental Earth Sciences*, v. 72, n. 5, p. 1683–1695, 2014.

QIBO, H.; XIAOQUN, Q.; QIYONG, Y.; PENGYU, L.; JINSONG, Z. Identification of dissolved sulfate sources and the role of sulfuric acid in carbonate weathering using $\delta^{13}\text{CDIC}$ and $\delta^{34}\text{S}$ in karst area, northern China. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 1, p. 51, 2016.

QINGYU, Z.; BIN, L.; FENGRUI, Q.; JIANWEN, C.; YONG, D.; JINGRUI, L. Environmental and geochemical significance of carbon and oxygen isotopes of Ordovician carbonate paleokarst in Lunnan, Tarim Basin. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 14, p. 1074, 2016.

SIMON, M.F. & PENNINGTON, T. Evidence for Adaptation to Fire Regimes in the Tropical Savannas of the Brazilian Cerrado. *International Journal of Plant Sciences*, v. 173, n. 6, p. 711–723, 2012.

ZHANG, L.; YANG, D.; LIU, Y.; CHE, Y.; QIN, D. Impact of impoundment on groundwater seepage in the Three Gorges Dam in China based on CFCs and stable isotopes. *Environmental Earth Sciences*, v. 72, n. 11, p. 4491–4500, 2014.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS

A região da Lagoa da Confusão apresenta em seu entorno, uma área com desenvolvimento de intensas atividades agrícolas que avança do Cerrado em direção ao bioma amazônico.

Nesta região há ocorrência de aquíferos cársticos, localizados na formação Couto Magalhães, resultados da corrosão de rochas carbonáticas pela ação da água que circula por fendas, fraturas e forma condutos subterrâneos que tornam os fluxos hídricos rápidos e pode facilitar a difusão de poluentes pela área.

As análises físico-químicas indicaram que as águas subterrâneas que circulam por esses aquíferos estão em conformidade com a legislação brasileira de qualidade de água para consumo humano, exceto para dois pontos analisados, que apresentaram concentrações de ferro superiores ao máximo permitido pelo padrão brasileiro. Para a utilização da água desses poços é indicado a instalação de um sistema de tratamento de água para remoção do ferro e posterior desinfecção.

A maior parte das águas coletadas apresentam características bicarbonatadas cálcicas, sendo também encontradas águas magnesianas, cuja concentração de íons está fortemente relacionada ao arcabouço químico-mineralógico do aquífero. Nas análises de cátions, foi verificado a predominância de águas cálcicas, mistas e magnesianas. O estudo da hidroquímica permitiu identificar a dominâncias das espécies iônicas de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

Pela análise do diagrama de Schoeller, por meio da avaliação dos grupos de amostras de cátions e ânions, verificou-se a existência de um comportamento hidroquímico aproximado com pequenas variações das concentrações de cálcio, magnésio, sódio e potássio e podem ser explicadas pelas diferentes características de entrada de água no aquífero.

Verificou-se por meio do cálculo das razões iônicas ou índices hidrogeoquímicos que existe uma forte ligação entre as litologias constituintes do aquífero e a água. Constatou-se uma diminuição da razão $\text{rMg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ no período chuvoso em alguns pontos analisados, indicando um aumento da dissolução de calcita e consequente fenômeno de carstificação ocorrentes nesta área.

Os resultados dos índices de saturação de calcita, dolomita e aragomita obtidos para as duas campanhas, mostraram que as águas se apresentam em soluções insaturadas

em relação aos minerais dissolvidos, tendo as mesmas, propriedades de realizar a corrosão das rochas do aquífero, fato esse intensificado na estação chuvosa.

De forma geral, os resultados do estudo da hidroquímica demonstram que as águas analisadas são marcadas por assinaturas químicas que representam o processo de dissolução das rochas da área.

As análises isotópicas permitiram identificar no aquífero águas com pouco tempo de confinamento e composição isotópica intimamente relacionada às características ambientais e geológicas da área. As análises dos isótopos confirmaram as evidências da existência do sistema cárstico que favorece uma rápida circulação dos fluxos hídricos e as características de recarga do aquífero.

Os resultados das análises isotópicas mostraram que a recarga de água do aquífero é homogênea, e que as mesmas estão armazenadas em um único aquífero. Essa homogeneidade indica que a área é susceptível a contaminação hídrica difusa, pois há ligação entre as águas do aquífero.

Por estar exposta a ação da evaporação, os valores isotópicos obtidos para as águas superficiais foram superiores aos das águas subterrâneas, no entanto, os resultados evidenciam que existe uma interação entre as águas superficiais e subterrâneas na área, sendo as águas do rio Urubu e da Lagoa da Confusão alimentadas pelas águas subterrâneas no período seco, fato esse também evidenciado por meio das análises físico-químicas.

A interpolação das retas de Honório (2010) e Pacheco (2012) permitiu o estabelecimento da reta meteórica local, a qual tem uma tendência de acompanhamento da Linha meteórica Global de Craig (1967), permitindo assim entender as fontes de recarga da área estudada, que tem origem em precipitações formadas por vapores de água atmosférico que não sofreram sucessivos processos de evaporação.

Os valores da razão isotópica de carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) foram predominantemente negativos e indicam uma maior contribuição de processos de dissolução de carbonatos por H_2CO_3 , evidenciado também o processo de carstificação na área, caracterizado principalmente pela dissolução de minerais carbonáticos como a calcita e dolomita.

Os resultados do estudo evidenciam que toda área do entorno da Lagoa da Confusão é vulnerável a contaminação hídrica, pois as águas superficiais e subterrâneas são submetidas a contato e recarga de águas que escoam superficialmente por áreas potencialmente poluidoras e as características hidrogeológicas contribuem para uma

rápida percolação e transporte de poluentes por todo o aquífero podendo também contaminar as águas superficiais.

A avaliação da hidroquímica e composição isotópica das águas superficiais e subterrâneas do entorno da Lagoa da Confusão, mostrou que as características das águas são determinadas pelas características geológicas e pelo uso e ocupação dos solos, sendo o estudo da hidroquímica uma importante ferramenta para conhecimento e monitoramento dos recursos hídricos da região.

Desta forma, sugere-se as seguintes recomendações:

- A realização de análises que envolva um maior número de poços e de pontos de coleta de águas superficiais;
- Realização de campanhas de amostragem por períodos mais longos a fim de se obter maiores informações em relação às variações sazonais da composição físico-química das águas;
- Realização de análises isotópicas das águas das chuvas para a determinação da reta meteórica local e entendimento preciso das fontes de recarga dos aquíferos da área;
- Avaliação das características isotópicas em uma maior extensão a fim de delimitar o aquífero e determinar outras fontes de recarga;
- Determinação do tempo de renovação das águas (datação) por meio de análises isotópicas de trítio;
- A aplicação de metodologias específicas para ambientes cársticos e estudo de vulnerabilidade de aquíferos cársticos;
- Realização de estudo para a criação de áreas de proteção de zonas vulneráveis a contaminação das águas superficiais e subterrâneas

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, A. Qualidade da água de microbacias com diferentes usos do solo na região de Cunha. **Scientia Forestalis**, v. 56, p. 125-134, 1999.

AZEVEDO, J. H. **Avaliação dos mecanismos de recarga natural e estabilidade hidroquímica em aquíferos rasos, Sul do Estado de Tocantins**. 2012. 83 f.

Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília.

BATISTA, M. H. S. **Interação entre águas minerais de Itaparica e o aquífero Periférico**. 2007. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal da Bahia, Salvador.

BARBOSA, I. S. **Análise dos parâmetros físico-químicos e metais presentes nas nascentes do Rio Meia Ponte**. 2015. 72 f. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável, Goiânia.

BEDMAR, A. P.; SILVA, A. B. Utilização dos isótopos ambientais na pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no karst da região de Jaíba, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 10, n. 4, p. 147-168 1980.

BOLLMAN, H. A. **Relação da densidade populacional sobre variáveis de qualidade físicoquímico das águas superficiais em Microbacias hidrográficas urbanas sem cobertura sanitária em Porto Alegre- RS**. 2003. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre.

BORTOLIN, T. A. **Padrões hidroquímicos e isotópicos do sistema aquífero Serra Geral no município de Carlos Barbosa, Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, Porto Alegre.

CAJAZEIRAS, CCA. **Qualidade e uso das águas subterrâneas e a relação com doenças de veiculação hídrica, Região de CRAJUBAR–CE.** 2007. 131 f.

Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geologia, Fortaleza.

CARVALHO, L. L.; LACERDA, C. F.; ANDRADE, E. M. Variabilidade espacial e temporal da qualidade da água de poços no perímetro irrigado do Baixo Acaraú - CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 2, p. 1348-1357, 2017.

CAMPOS, JOSÉ E. G.; SOUZA, MICHELLE M. Alternativa para determinação de sobreexploração de aquíferos. **Revista Geociências**, v. 36, n. 2, p. 339-346, 2017.

CASALI, C. A. **Qualidade da Água para Consumo Humano Ofertada em Escolas e Comunidades Rurais da Região Central do Rio Grande do Sul.** 2008. 173 f.

Dissertação. (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Químicos e Ciclagem de Elementos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS.

CAXITO, F. A.; SILVA, A. V. Isótopos Estáveis: fundamentos e técnicas aplicadas à caracterização e proveniência geográfica de produtos alimentícios. **Revista Geonomos**, v. 23, n. 1. P. 10-17, 2015.

CENTENO, L. N.; CECCONELLO, S. T. Análise da qualidade da água: um estudo de caso do Arroio Bolacha - RS. **Revista de Ciências e Inovação**, v. 2, n. 2, p. 105-113, 2017.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Avaliação da qualidade das águas de São Paulo.** São Paulo: Diretoria de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia, 1995.

CHAFOUQ, D.; EL MANDOUR, A.; ELGETTAFI, M.; HIMI, M.; CHOUIKRI, I.; CASAS, A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-

Nekor plain (northern Morocco). **Journal of African Earth Sciences**, v. 139, p. 1-13, 2018.

CLARK, I. e Fritz, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. New York, CRC Press. 1997.

CRAIG, H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water. **Science**, v. 133, p. 1833-1834. 1961.

CRESPI, A. M. **Aplicação de isótopos de estrôncio, oxigênio e hidrogênio como traçadores de anomalias hidrogeoquímicas de bário no Sistema Aquífero Bauru no município Galia**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DELBART, C.; BARBECOT, F.; VALDES, D.; TOGNETTI, A.; FOURRE, E.; PURTSCHERT, R.; COUCHOUX, L.; JEAN-BAPTISTE, P. Investigation of young water inflow in karst aquifers using SF₆-CFC-3H/He-85Kr-39Ar and stable isotope components. **Applied Geochemistry**, v. 50, n. 66, p. 164-176, 2014.

DIAS, A. C. DE A. **Analysis and identification of the source of contamination of water resources in the municipality of Salvaterra de Magos**, 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Aplicada) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa.

EINSIEDL, F.; MALOSZEWSKI, P.; STICHLER, W. Multiple isotope approach to the determination of the natural attenuation potential of a high-alpine karst system. **Journal of Hydrology**, v. 365, n. 1-2, p. 113-121, 2009.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS**. 1. ed, 112 p. Brasília, 2014.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Coordenadores). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM - LABHID, 3 Ed, 812p, 2008.

GASSER, R. S.; CRUZ, M. J. M.; GONÇALVES, M. V. P. Avaliação da vulnerabilidade intrínseca a contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, Bahia. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 70-78, 2018.

HE, Z.; MA, C.; ZHOU, A.; QI, HUIHUI; LUI, CUNFU; CAI, HESHENG; ZHU, HUICHAO. Using hydrochemical and stable isotopic ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{11}\text{B}$, and $\delta^{37}\text{Cl}$) data to understand groundwater evolution in an unconsolidated aquifer system in the southern coastal area of Laizhou Bay, China. **Applied Geochemistry**, v. 90, p. 129–141, 2018.

HOSONO, T.; WANG, C. H.; UMEZAWA, Y.; NAKANO, T.; ONODERA, S.; NAGATA, T.; YOSHIMIZU, C. Multiple isotope (H, O, N, S and Sr) approach elucidates complex pollution causes in the shallow groundwater's of the Taipei urban area. **Journal of Hydrology**, v. 397, p 23-36.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2008.

KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de São Paulo**. 1994. 228 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo.

KEMERICH, P. D. C.; SILVA, J. L. S.; BARROS, G. Caracterização química da água subterrânea em área ocupada por cemitério: uso da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDXRF). **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 7, n. 3, p. 166–182, 2012.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. B.; LUCHESE, B. **Introdução à química da água: ciência, vida e sobrevivência**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LUNA SILVA DE CARVALHO, L.; FEITOSA DE LACERDA, C.; MAIA DE ANDRADE, E.; et al. Variabilidade espacial e temporal da qualidade da água de poços no perímetro irrigado do Baixo Acaraú - CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 2, p. 1348-1357, 2017.

MANČE, D.; HUNJAK, T.; LENAC, D.; RUBINIĆ, J.; ROLLER-LUTZ, Z. Stable isotope analysis of the karst hydrological systems in the Bay of Kvarner (Croatia). **Applied Radiation and Isotopes**, v. 90, p. 23-34, 2014.

MARTINS, B. N.; MENDES, J. J.; PEREIRA, R. C. DE C. **Problematização dos recursos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do Rio Aurá e subterrâneos da bacia hidrográfica do Rio Bacanga - Maranhão – Brasil**. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento. p.171–182, 2017

MILANOVIĆ, P.T. **Karst Hydrogeology**: Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1981.

MINARDI, P. S. P.; BOMTEMPO, V. L. Traçadores e técnicas isotópicas em hidrologia subterrânea: A experiência do CDTN/CNEN, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, Suplemento, v. 1, p.1-17, 2000.

MINARDI, P. S. P.; VELÁSQUEZ, L. N. M. BOMTEMPO, V. L.; COTA, S. D. S.; RODRIGUES, P. C. H. Técnicas isotópicas em estudos hidrológicos no município de Araguari. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008, Natal. **Anais...** Natal: CBAS, 2008. p. 1-11.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Águas subterrâneas um recurso a ser conhecido e protegido**. 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2018.

MIRANDA, L. A. S. **Sistemas e processos de tratamento de águas de abastecimento**. Porto Alegre, 2007.

MIZUNO, M. G. M. **Hidroquímica das águas subterrâneas do Distrito Federal.**

2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MONTALVÁN, F. J.; HEREDIA, J.; RUIZ, J. M.; PARDO-IGÚZQUIA, E.; GARCIA DE DOMINGO, A.; ELORZA, F. J. Hydrochemical and isotopes studies in a hypersaline wetland to define the hydrogeological conceptual model: Fuente de Piedra Lake (Malaga, Spain). **Science of The Total Environment**, v. 576, p. 335-346, 2017.

MOHAMMADI, F.; EHTESHAMI, M.; MIRBAGHERI, S. A.; TAVASSOLI, S.

Monitoring Groundwater and Its Suitability for Drinking and Irrigation Purposes in the Sharif Abad Basin, Central Iran. **World Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 3, p. 487-506, 2017.

OLIVEIRA, K. B. M. **Estudo dos fluxos hídricos do entorno da Lagoa da Confusão.**

2014, 195 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas.

OZYURT, N.N.; LUTZ, H.O.; HUNJAK, T.; MANCE, D.; ROLLER-LUTZ, Z.

Characterization of the Gacka River basin karst aquifer (Croatia): Hydrochemistry, stable isotopes and tritium-based mean residence times. **Science of The Total Environment**, v. 487, p. 245-254, 2014.

PARALTA, E. A. R. R. **Utilização de modelos de recarga e técnicas isotópicas na avaliação do impacte da agricultura na qualidade da água subterrânea de zonas agrícolas: caso de estudo no Aquífero dos Gabros de Beja.**

2009. 271 f. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa.

PALMIER, L. R. Mananciais Subterrâneos: aspectos quantitativos. In: HELLER, L.;

PÁDUA, V. L. (Org.). **Abastecimento de água para consumo humano**, Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 1, p. 271-298, 2010.

PINTO, N. L. S. Águas Subterrâneas. In: PINTO, N. L. S.; HOLTZ, C. S. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. 10. ed. São Paulo: Edgard Blucher, p. 67-91, 2007.

PU, J.; CAO, M.; ZHANG, Y.; YUAN, D.; ZHAO, H. Hydrochemical indications of human impact on karst groundwater in a subtropical karst area, Chongqing, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, n. 5, p. 1683-1695, 2014.

QIN, D.; YU QIAN, Y.; HAN, L.; WANG, Z.; LI, C.; ZHAO, Z. Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. **Journal of hydrology**, v. 405, n. 1-2, p. 194-208, 2011.

RAVBAR, N. The protection of karst waters: a comprehensive Slovene approach to vulnerability and contamination risk mapping. **Karst Research Institute ZRC-SAZU**: Postojna/ Ljubljana, 2007.

RAVE, J. C. G. **Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: Acuífero costero del municipio de Turbo**. 2009. 296 f. Dissertação (Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos) – Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas Doces no Brasil**. São Paulo: Escrituras, 2006.

REBOUÇAS, J. A. Isótopos estáveis da água e o balanço hídrico em açudes. **Revista Principia** - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, v. 1, n. 28, p. 59, 2015.

RAMAGE, L. **Hidrogeoquímica do sistema aquífero granular cenozoico do município de Porto Alegre, RS**. 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT S.; SCHNEIDER, V. E.; Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, v. 27 n. 1 p. 67-78, 2013.

RIFFEL, E. S.; SILVA, J. L. S. Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos no município de Santa Rosa – RS. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 22, p. 3-28, 2011.

RIQUELME, P. A. C. **Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de la cuenca del río itata**. 2009. 66 f. Proyecto De Memoria (Curso De Ingenieria Agricola) - Universidad De Concepción, Chillan-Chile.

SACCHI, E.; RE, V.; SETTI, M.; THIN, M. M.; DI SIPIO, E. Hydrochemical and Isotopic Features of the Khaung Daing Hot Spring (Inle lake, Southern Shan State, Myanmar). **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 17, p. 750–753, 2017.

SANTIAGO, M. F. et al. **Métodos isotópicos. In: Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações**, 3ª Ed. Fortaleza, 2008.

SANTIAGO, M. F. et al. The recharge mechanisms in an aluvial aquifer zone in Northeast Brazil. **Ground Water**, v. 39, n.1, p.18-23. 2001.

SANTOS, L. L.; CABRAL, J.; PAIVA, A.; DO ROSÁRIO ZUCCHI, M. Utilização de isótopos estáveis para análise da interação da água superficial e água subterrânea num estudo de filtração em margens. In: XVI Congresso Brasileiro de águas Subterrâneas, 2010, São Luiz. **Anais...** São Luiz: FENÁGUA, 2010. p. 1-14.

SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M.; NASCIMENTO, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Cadernos de Geociências**, n. 7, p. 54-62, 2010.

SANTOS, L. L.; CABRAL, J.; PAIVA, A.; DO ROSÁRIO ZUCCHI, M. Utilização de isótopos estáveis para análise da interação da água superficial e água subterrânea num

estudo de filtração em margens. In: XVI Congresso Brasileiro de águas Subterrâneas, 2010, São Luiz. **Anais...** São Luiz: FENÁGUA, 2010. p. 1-14.

SILVA, A. M. **Remoção do manganês e do sulfato de água de mina.** 2012. 110 f. Tese (Doutorado em engenharia de materiais) - Processos de fabricação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

SILVA, J. J. F.; MIGLIORINI, R.B. Caracterização das águas subterrâneas do aquífero Furnas na região Sul do Estado de Mato Grosso. São Paulo, Unesp, **Geociências**, v. 33, n. 2, p. 261-277, 2014.

SILVA, P. S. **Avaliação de viabilidade de aplicação de técnicas de recarga artificial em aquíferos salinizados, fraturados, Petrolina - PE.** 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.

SILVEIRA, C. S.; SILVA, G. C. J. O Uso de Isótopos Ambientais em Estudos Hidrogeológicos no Brasil: Uma Resenha Crítica. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ.** v. 26. p. 25-43. Rio de Janeiro. 2002.

SPERLING, M. Von. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

STALLARD, R. F.; EDMOND, J. M. Geochemistry of the Amazon basin. The influence of the geology and weathering environment on the dissolved load. **Jornal of Geophysical Research.** Serie C, Washington, DC, v. 88, p. 9671-9688, 1983.

TAVARES, T.; VARNIER, C.; BEVILACQUA, R.; Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do sistema aquífero Bauru no município de Bastos (SP). **Revista Águas Subterrâneas**, v. 2, p. 1-20, 2017.

TELES, R.; BRANDAO, F. G. ; PINTO, M. C. F. ; MOURAO, M. A. A. . Estudo Comparativo de Modelos de Determinação de Alcalinidade em Amostras de Água

Subterrânea. In: XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2014, Belo Horizonte. **Anais...** CBAS, 2014. p. 1-20.

TERRA, L. G.; BORBA, W. F.; FERNANDES, G.; TROMBETA, H. W.; SILVA, J. L. S. Caracterização hidroquímica e vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas no município de Ametista do Sul- RS. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas**, v. 15, n.1, p.94-104, 2016.

TRAVASSOS, L. E. P. **Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil**. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010.

VARGAS, T. **Aplicação da geoquímica multielementar e isotópica para gestão das bacias de captação utilizadas no abastecimento público do Município de Caxias do Sul, RS**. 2016. 105 f. Tese (Doutorado) - UFRGS. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre.

VILLANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B.; ZUCCHI, M. R. Caracterização hidroquímica e hidrogeológica do aquífero Cárstico salitre na região de Irecê, Bahia. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 83-96, 2014.

VILLANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B.; ZUCCHI, M. R.; AZEVEDO, A. E. G.; MIRANDA, J. G. V.; VILLANUEVA, P. R. Avaliação isotópica e hidroquímica do aquífero cárstico salitre na região de Irecê, Bahia. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 2, p. 82-94, 2014.

WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. London: John Wiley & Sons Ltd., 2007.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking - water quality**, 3rd ed. Geneva: WHO, 2004.