



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID30701>



Integração de análise hidroquímica à geofísica aérea para entendimento da hidrodinâmica no entorno da Lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil

Integration of hydrochemical analysis with aerial geophysics to understand the hydrodynamics around Lagoa da Confusão, Tocantins, Brazil

Fernando de Morais¹; Erlan Silva de Sousa²; Luis de Almeida Prado Bacellar³; Luiz Henrique Cardoso⁴

¹ Universidade Federal do Tocantins / Programa de Pós-graduação em Geografia, Porto Nacional / Tocantins, Brasil. Email: morais@uft.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0311-3823>

² Universidade Federal do Tocantins / Programa de Mestrado em Ciências do Ambiente, Palmas / Tocantins, Brasil. Email: erlan.mat@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9827-9959>

³ Universidade Federal de Ouro Preto / Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto / Minas Gerais, Brasil. Email: bacellar@ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1670-9471>

⁴ Universidade Federal de Ouro Preto / Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto / Minas Gerais, Brasil. Email: luiz.cardoso@ufop.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1445-1665>

Resumo: Geofísica aérea regional, 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 – Estado do Tocantins, Brasil, com o objetivo de contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos da área pressuposta como um carste encoberto e subsidiar ações de proteção ao meio ambiente. Dados geofísicos aéreos, evidenciaram três tipologias: rochas carbonáticas, rochas metassedimentares diversas e lateritas. Foram identificados inúmeros lineamentos paralelos, incluindo falhas de grande extensão, nas direções preferenciais N-S e E-W e, subordinadamente, 45°NE e 45°NW, que mostram forte controle na rede de drenagem superficial. Interpreta-se que a Lagoa da Confusão está assentada sobre substrato carbonático. As 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 (ipucas).

Palavras-chave: Carste; Isótopos estáveis; Geofísica.

Abstract: Aerial geophysics, stable isotopes and hydrochemical data analysis were used to understand the dynamics of water flows and the characteristics of surface and groundwater in the surroundings of Lagoa da Confusão - State of Tocantins, Brazil, in order to contribute for a better management of water resources in the area assumed to be an overgrown karst and to subsidize actions to protect the environment. Aerial geophysical data showed three typologies: carbonate rocks, diverse metasedimentary rocks and laterites. Numerous parallel lineaments were identified, including large faults, in the preferential N-S and E-W directions and, subordinately, 45°NE and 45°NW, which show strong control in the surface drainage network. It is interpreted that the Lagoa da Confusão is located on a carbonate substrate. The isotopic and hydrochemical analyzes indicate the occurrence of the karstification process in the study area, in which the chemical and isotopic composition of water is altered by the water-rock interaction and dissolution of carbonate rocks, which is further evidenced by the occurrence of caves and sinkholes (ipucas).

Keywords: Karst; Stable isotopes; Geophysics.

Recebido: 27/10/2022; Aceito: 12/04/2024; Publicado: 13/03/2024.

1. 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), sendo o gerenciamento dos recursos hídricos (superficiais e/ou subterrâneos) um dos principais desafios da sociedade atual (BORBA *et al.*, 2021).

Nesse contexto, no norte do Brasil, uma área com solos férteis e água em abundância, ocorre uma série de lagoas associadas ao sistema fluvial da planície do médio curso do rio Araguaia (PEREIRA; MORAIS, 2012), no município de Lagoa da Confusão no Estado do Tocantins, uma das regiões agrícolas mais produtivas do mundo e caracterizadas por conflitos pelos diversos usos da água.

O desenvolvimento das atividades agrícolas tem aumentado a demanda de água para atender às necessidades de irrigação e conseqüentemente desencadeiam diversos problemas ambientais podem deteriorar a qualidade dos recursos hídricos da região. Pois, 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).

Uma característica peculiar 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 Morais (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.

Diante disso, 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 além de evidências de dissolução/erosão do calcário (OLIVEIRA, 2014), sendo a Lagoa da Confusão e diversas dolinas (ipucas) da região feições oriundas da dissolução da rocha calcária

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). 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).

Como na área os afloramentos rochosos são escassos devido à espessa cobertura de sedimentos, uma alternativa para avaliar o substrato rochoso é a utilização de Geofísica. Trata-se de uma área das Geociências onde se estuda a Terra indiretamente, a partir da medida de suas propriedades físicas (e.g. magnetismo, densidade, propriedades elétricas), sua distribuição, e dos campos físicos naturais ou induzidos (KEAREY *et al.*, 2002). Tem mostrado bons resultados em regiões similares (e.g. CARNEIRO; BARBOSA, 2008; REIS *et al.*, 2012; CARDOSO *et al.*, 2018).

Nesse sentido, 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).

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 objetiva integrar análises geofísicas e hidroquímicas para o entendimento da hidrodinâmica no entorno da Lagoa da Confusão por meio do processamento e interpretação de dados geofísicos aéreos visando uma análise regional e a utilização de análises hidroquímicas e isotópicas para entender a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas a fim de contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos.

2. Metodologia

2.1. 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° 48' 08" de latitude sul e 49° 3' 59" de longitude oeste. O município possui uma área de 10.564,66 km² e população estimada de 15.228 habitantes (IBGE, 2022).

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, no Brasil.

A geologia da área é composta por embasamento neoproterozoico do Supergrupo Baixo Araguaia composto por metacalcários, filitos, ardósia, metargilito, metarenito e quartzitos subordinados (PEREIRA; MORAIS, 2012) da Formação Couto Magalhães, Grupo Tocantins. Que se encontram cobertos por camadas decamétricas de sedimentos quaternários. No entorno da Lagoa da Confusão estão presentes três morrotes de calcário alinhados na direção SW-NE, destacados topograficamente na planície quaternária circundante.

A 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 represa a água do rio e eleva o lençol freático da área produtiva (NOLÊTO JÚNIOR, 2005; OLIVEIRA, 2014).

A Lagoa da Confusão está localizada em uma área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, apresentando principalmente fitofisionomias do Cerrado, com rica biodiversidade e forte grau de endemismo (SIMON; PENNINGTON, 2012).

2.2. Procedimentos metodológicos

Para avaliar o substrato rochoso foram utilizados os métodos geofísicos de magnetometria e radiometria. A magnetometria investiga as variações do campo magnético terrestre, em consequência da distribuição heterogênea das rochas magnetizadas. A radiometria investiga os contrastes laterais, em superfície, de rochas distintas pela variação de isótopos de acordo com suas emissões de raios Gama (e.g. urânio ²³⁸U; tório ²³²Th e potássio ⁴⁰K) (e.g. TELFORD *et al.*, 1990).

Os dados geofísicos foram obtidos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e compõem o banco do Projeto Conceição do Araguaia (LASA, 2012). Na Magnetometria, aplicaram-se as correções referentes ao International Geomagnetic Reference Field (IGRF) e à variação diurna, e os dados foram processados no domínio da frequência. Na Radiometria, os dados foram corrigidos da radiação cósmica de fundo e foram gerados mapas separados por canal de radioelementos. O software geofísico e de geração de rosetas de lineamentos foram Oasis Montaj 9.8.1 (GEOSOFT/ SEEQUENT, 2020) e GeoRose 0.3.0 (YOUNG TECHNOLOGY INC., 2020), respectivamente.

Foram coletadas amostras de águas subterrâneas em poços de exploração (P1 a P5 e P9) e águas superficiais da Lagoa da Confusão (P6), além de dois pontos do Rio Urubu (P7 e P8), totalizando 9 locais amostrados (Fig. 1). 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.

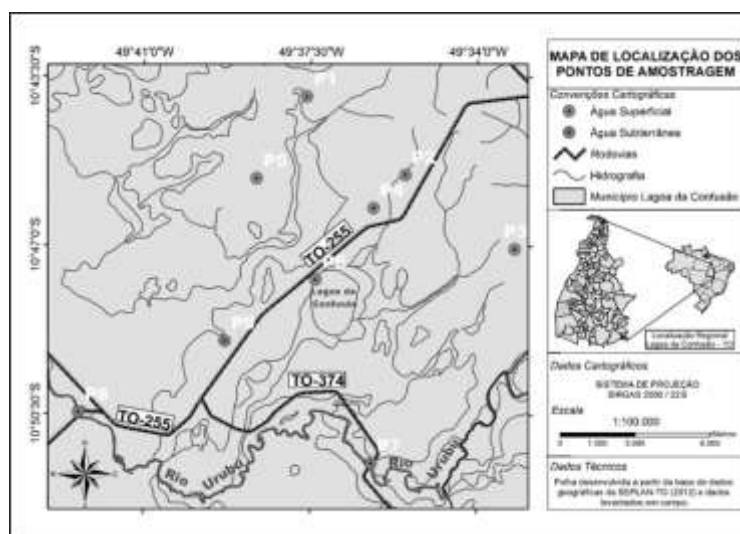


Figura 1 – Localização dos pontos de coleta no entorno da Lagoa da Confusão.
Fonte: Autor (2021).

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 de 2016), quando não há conexão direta das águas superficiais com as subterrâneas por dolinas, em função das inundações sazonais na área estudada.

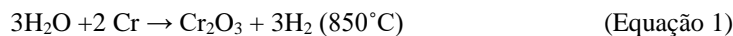
Em campo foram medidas a temperatura, condutividade, sólidos totais dissolvidos (STD) e pH. Em laboratório mediu-se a turbidez, cor, concentração de cloretos, carbonatos, nitritos, nitratos, cálcio, magnésio, manganês, ferro, dureza total, dureza cálcica, dureza do magnésio e alcalinidade, potássio,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

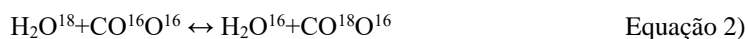
A amostragem para as análises isotópicas de oxigênio-18, deutério e carbono inorgânico dissolvido nas águas superficiais e subterrâneas foi realizada utilizando os procedimentos preconizados pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002). As amostras foram coletadas em recipientes de vidro 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., 1996); Razão O^{18}/O^{16} (Epstein; Mayeda, 1953); Razão C^{13}/C^{12} do Carbono inorgânico dissolvido - DIC (Craig, 1957).

As análises de isótopos de hidrogênio seguiram o método proposto por Brand (1996), com a obtenção do hidrogênio que constitui a água, em uma reação da água com cromo metálico a $850^{\circ}C$, a vácuo, gerando gás H_2 . Na determinação da razão deutério-hidrogênio, alíquotas de $1,0 \mu l$ foram injetadas em um reator, na qual ocorre a reação de oxidação do cromo e liberação do H_2 . A reação de oxidação pode ser visualizada na Equação 1:



Após a reação, o H_2 foi inserido no espectrômetro de massa e analisado para determinação das razões isotópicas H/D e referenciado a um gás padrão do próprio H_2 . Para determinar a razão O^{18}/O^{16} utilizou-se a técnica de equilíbrio da reação CO_2-H_2O , 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 (IAEA, 2002).

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 (‰), como visto na Equação 3.

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

Para interpretação do comportamento da composição isotópica das águas superficiais e subterrâneas, foi obtida a curva local e comparada com as curvas obtidas de Brasília (LOUSADA *et al.*, 2011), Amazônia (SOUZA *et al.*, 2015) e Linha meteórica Global (Craig, 1957).

Para determinação da razão isotópica do carbono inorgânico dissolvido $\delta^{13}\text{CCID}$, 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 em sistema cromatográfico composto, no qual o gás é introduzido no espectrômetro de massa para determinação da razão isotópica $\delta^{13}\text{CCID}$ em relação ao padrão de referência internacional V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

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

$$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = \frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{amostra}} - {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{padrão}}}{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{padrão}}} \times 10^3 \quad (\text{Equação 4})$$

3. Resultados e discussão

3.1. Geofísica

No mapa Campo Total (Fig. 2-a) observa-se uma feição orientada E-NE, que passa pela Lagoa da Confusão, e feições nas direções N-S, SW-NE e SE-NW. Nos mapas dy e dx (Figs. 2-b e 2-c) há várias feições paralelas na direção E-W e N-S, respectivamente, bem como, feições orientadas SW-NE. No mapa dz (Fig. 2-d) aparece todo o arcabouço estrutural abordado, em nível crustal raso. No mapa ASA (Fig. 2-e) são discriminadas falhas direcionais e são delineadas três magnetofácies distintas, M1, M2 e M3, relacionadas às respectivas faixas de magnetização, em nT/m: entre 1,85 e 6,66; 6,66 e 14,82; e 9,36 e 19,91. Além disso, são observadas zonas que indicam mudanças abruptas e bem definidas de uma magnetofácies para outra.

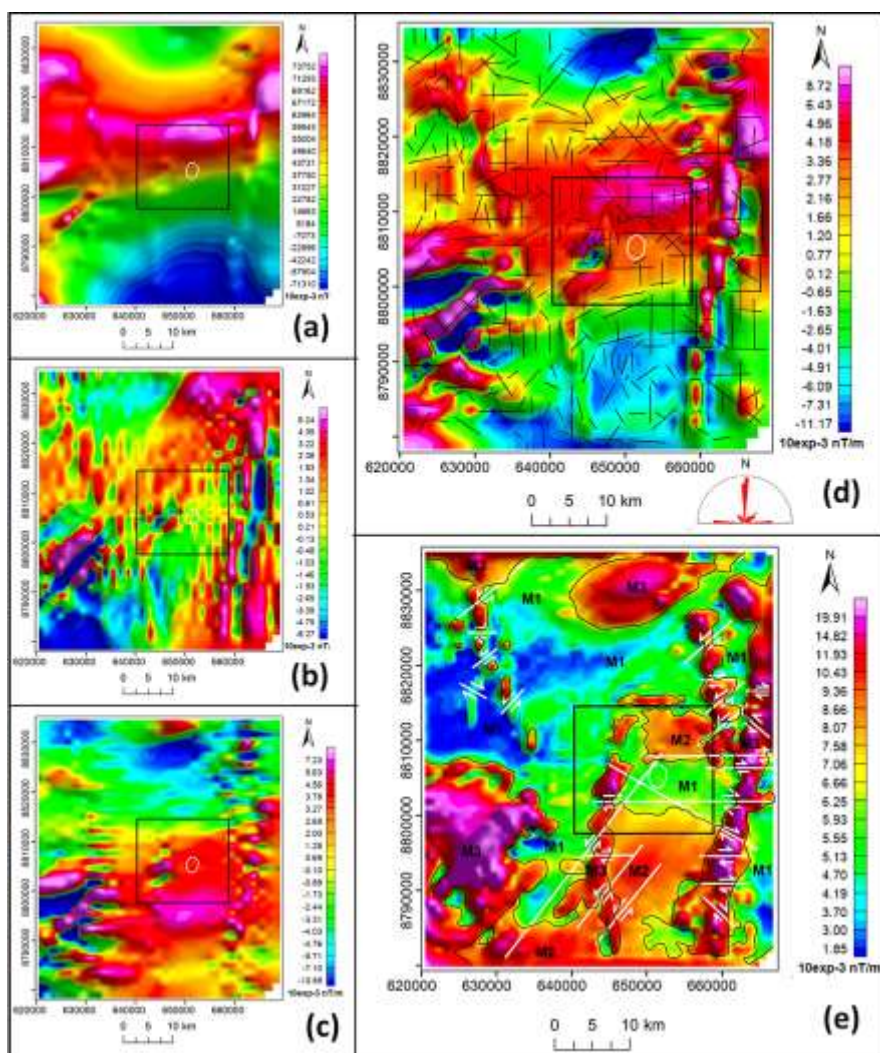


Figura 2 – Mapas magnéticos com a discriminação da área em estudo (retângulo preto) e da Lagoa da Confusão (delineamento branco): a) Campo Total; b) Gradiente Horizontal dx; c) Gradiente Horizontal dy; d) Gradiente Vertical dz com a sobreposição dos lineamentos magnéticos gerais interpretados; e) ASA com a sobreposição das magnetofácies M1, M2 e M3, e das falhas interpretadas.

Fonte: Autor (2021).

Nos mapas dos canais ^{238}U (Fig. 3-a) e ^{232}Th (Fig. 3-b) é possível discriminar a variação de radiação gama em áreas bem definidas possibilitando o delineamento de cinco radiofácies distintas (R1, R2, R3, R4 e R5). O mapa canal ^{40}K é apresentado na Fig. 3-c e o quantitativo dos radioelementos em cada radiofácies é apresentado na Tab. 1.

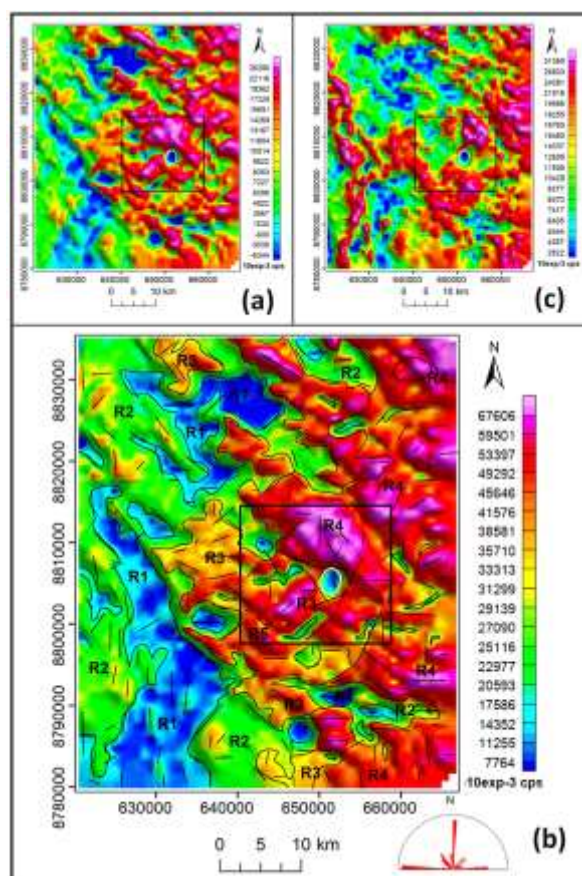


Figura 3 – Mapas radiométricos: a) Canal ^{238}U ; b) Canal ^{232}Th com sobreposição das radiofácies e dos lineamentos radiométricos interpretados; c) Canal ^{40}K .

Fonte: Autor (2021).

Tabela 1 – Quantitativo dos radioelementos em cada radiofácies.

Radiofácies	Conteúdo de Radioelementos em cps		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
R1	>-6344 e <1630	>7764 e <17586	>2522 e <31369
R2	>1630 e <8353	>17586 e <29139	>7417 e <11506
R3	>8353 e <26286	>29139 e <67606	>11506 e <31369
R4	>15691 e <26286	>45646 e <67606	>7417 e <31369
R5	>15691 e <26286	>45646 e <67606	>24381 e <31369

Fonte: Autor (2022).

As rosetas de lineamentos magnéticos e radiométricos apresentam distribuição similar das principais direções de lineamentos: N-S, E-W, N45°E e N45°W. Isso implica que o arcabouço estrutural de subsuperfície no substrato rochoso interpretado por meio da magnetometria, exibe continuidade em superfície conforme a interpretação dos mapas radiométricos. A Fig. 4 confronta as interpretações geofísicas do substrato rochoso com a distribuição dos pontos investigados e com a distribuição regional das ipucas.

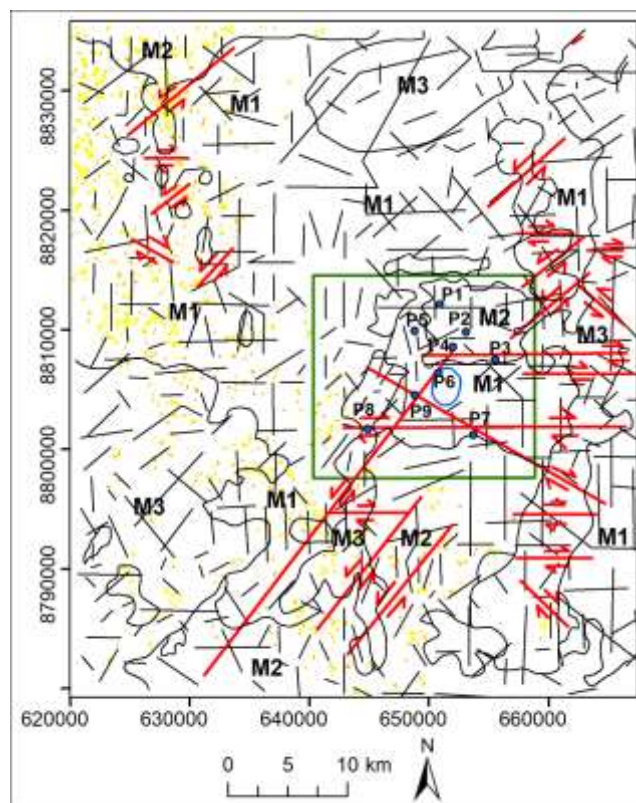


Figura 4 – Mapa com a distribuição de: lineamentos magnéticos gerais (traços pretos); magnetofácies (delineamentos pretos); falhas interpretadas (em vermelho); ipucas (distribuição regional – pontos amarelos); pontos investigados para aquisição dos dados isotópicos (pontos azuis), e Lagoa da Confusão (delineamento em azul).

Fonte da localização das ipucas: <https://oscarepaezm.github.io/morfometria/>.

Com base no mapa geológico da Folha Santa Terezinha, e em dados de poços em perfis litológicos do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), as magnetofácies são interpretadas da seguinte forma:

- i. M1: Rochas com os menores valores de magnetização, relacionáveis às rochas carbonáticas da Fm. Couto Magalhães;
- ii. M2: Rochas com valores intermediários a altos, relacionáveis às rochas metassedimentares, incluindo carbonatos, com conteúdo variável de ferro da Fm. Couto Magalhães;
- iii. M3: Responde aos maiores valores de magnetização, relacionáveis às coberturas lateríticas ferríferas.

Com base na Folha Santa Terezinha e com os dados de Martins *et al.* (2005), a respeito da constituição litológica superficial da área em estudo, segue a interpretação das radiofácies:

- i. R1: Depósitos aluvionares. Por vezes, são observadas feições lineares (Fig. 5) em que a anomalia mais baixa (em azul) está circundada por outra mais alta (em verde) sendo interpretadas como cursos de rios e planície aluvial ao entorno.
- ii. R2: Fm. Araguaia (fáceis terraços aluvionares).
- iii. R3: Fm. Araguaia (fáceis terraços aluvionares) com acumulação de sedimentos com maior conteúdo de ^{232}Th , indicativo de terem sido gerados pela Fm. Couto Magalhães nos afloramentos da porção nordeste e sudeste dos mapas.
- iv. R4: Fm. Couto Magalhães. Trata-se da resposta da argilosidade das rochas metassedimentares que captura ^{232}Th , e também dos clastos de minerais de ^{232}Th que compõem as rochas.
- v. R5: Laterita, sendo justificada pela composição de detritos de minerais de ^{232}Th .

As zonas que indicam mudanças abruptas nas magnetofácies (Fig. 2-e) podem ser interpretadas como zonas de cisalhamento. A Lagoa da Confusão está situada no domínio delas e de M1, em um baixo estrutural. O domínio de R3 na faixa orientada E-W onde se encontra a lagoa, implica em cobertura por sedimentos provenientes da Fm. Couto Magalhães.

Os afloramentos da Fm. Couto Magalhães, sobretudo, do domínio M2, a norte da lagoa, têm seus limites coincidindo com os das zonas de cisalhamento, implicando na formação dos altos estruturais da área. Em outras porções do mapa as coberturas das rochas encontram-se laterizadas, relacionável à resposta de M3, que contribui também em modelar os altos do relevo.

Na Fig. 4 observa-se que os pontos P1, P2, P3 e P4 estão no domínio M2 que, devido à diversidade litológica, exibem variação do conteúdo de ferro (Tab. 2) e, inclusive, constata-se os maiores valores de todos os pontos investigados, com destaque para P2. P8 também apresenta alta concentração de ferro, o que responde à transição do domínio M2 para M3, registrando o processo de laterização e consequente concentração relativa e progressiva do ferro. Nos demais pontos, as concentrações são mais baixas, porque se encontram no domínio M1, e o ferro relaciona-se à mobilização pelo arcabouço estrutural.

As concentrações de HCO_3^- e de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Tab. 2) variam em virtude da proporção da mistura das águas subterrâneas com as superficiais. Falhas de grande extensão (Fig.2) passam pela maioria dos pontos investigados (P3, P4, P6, P7, P8 e P9) e isto implica na alta contribuição de águas subterrâneas que circulam pelo substrato rochoso carbonático e que percolam essas estruturas. Porém, P4 e P9 apresentam as menores concentrações, devido à maior proporção de águas superficiais. P2 tem a maior concentração de HCO_3^- , pois a proporção de águas superficiais é mínima e o prolongamento de uma falha de grande extensão orientada SW-NE passa por esse ponto mobilizando águas subterrâneas altamente concentradas, e considera-se também a contribuição da parte carbonática do domínio M2, o que acontece com os outros pontos deste domínio que apresentam valores médios (P1 e P3) a altos (P7, que está na transição entre M1 e M2). Os pontos P5 (que apresenta o segundo maior valor) e P6 estão situados em M1, em que são justificadas as médias a altas concentrações, pela contribuição do próprio substrato carbonático e das estruturas.

Em relação às ipucas, na Fig. 2, observa-se que a maior densidade está situada no domínio de M1 e que, inclusive, segue os mesmos trends 30°NW e N-S, partindo da extremidade noroeste até a porção centro-sul do mapa, se encaixando nos baixos estruturais nas zonas de cisalhamento. Subordinadamente, algumas encontram-se no domínio de M2. Logo, como ambos os domínios incluem rochas carbonáticas, implica-se que o controle na gênese e evolução das ipucas é relacionável ao substrato rochoso, podendo impor maior controle que as coberturas de sedimentos nas quais elas estão assentadas. Além disso, o arcabouço estrutural exerce forte controle na distribuição regional das ipucas.

3.2. Hidroquímica

Os resultados das análises hidroquímicas e isotópicas das amostras coletadas no entorno da Lagoa da Confusão podem ser visualizados nas Tabelas 2.

Tabela 2 – Parâmetros físico-químicos e análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$, δD , d e $\delta^{13}\text{CCID}$ das águas subterrâneas (P1-P5 e P9) e superficiais (P6 a P8) no entorno da Lagoa da Confusão.

Pontos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
pH	7.13	8.1	7.45	5.97	7.12	7.08	7.46	7.18	5.93
Cor (UH)	3.7	1.4	0.8	0.2	1.7	4.3	4.7	6.9	0.2
Turbidez (UNT)	5.42	2.31	2.05	2.1	4.36	3.42	5.49	1.35	1.88
STD (mg/L)	31	141	60	9	81	7	34	6	3
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	113.2	275	126.6	20.6	252	27.9	71.4	14.4	7.9
Dureza Total (mg/L de CaCO_3)	17	80	28	20	81.3	10	10	10	12
Ca^{2+} (mg/L)	5.88	24.28	9.6	2.8	27.2	2.02	1.84	1.04	1.6
Mg^{2+} (mg/L)	2.7	13.54	4.47	4.18	13.15	1.94	1.98	2.18	2.53
K^+ (mg/L)	0.86	2.07	1.58	0.33	0.87	0.76	1.04	0.74	0.47
Na^+ (mg/L)	1.16	4.46	6.11	0.46	2.72	1.05	2.01	1.09	0.46
HCO_3^- (mg/L)	34.6	165.4	68	14	94	46	38.6	5.4	2
Cl^- (mg/L)	2.62	3.83	1.55	3.47	3.62	1.17	1.28	1.06	2.13
SO_4^{2-} (mg/L)	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
NO_3^- (mg/L)	0.5	0.2	0.1	0.5	0.1	0.4	0.1	0.1	0.2
Fe (mg/L)	0.04	0.6	0.2	<0.01	<0.01	0.05	0.01	0.18	<0.01

$\delta^{18}\text{O}$	-3	-3.7	-3.98	-3.51	-3.75	5.33	0.16	0.5	-3.09
δD	-14.6	-19.4	-21.2	-18.3	-19.3	27.5	0.3	2.1	-16.1
d	9.4	10.2	10.6	9.8	10.7	-15.1	-1	-1.9	8.6
$\delta^{13}\text{C}_{\text{TD}}$	-15.55	-13.7	-18.85	-16.69	-13.45	-18.22	-12.52	-20.55	-18.69

Fonte: Autor (2021).

A condutividade elétrica apresentou uma média de 101,0 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}$, variando de 7,90 a 275,0 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}$. 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 pH, 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.

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 composto nas águas amostradas 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.

Verificou-se ainda em relação as características hidroquímicas por meio do diagrama de Piper (Fig. 5) a predominância de águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas. 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.

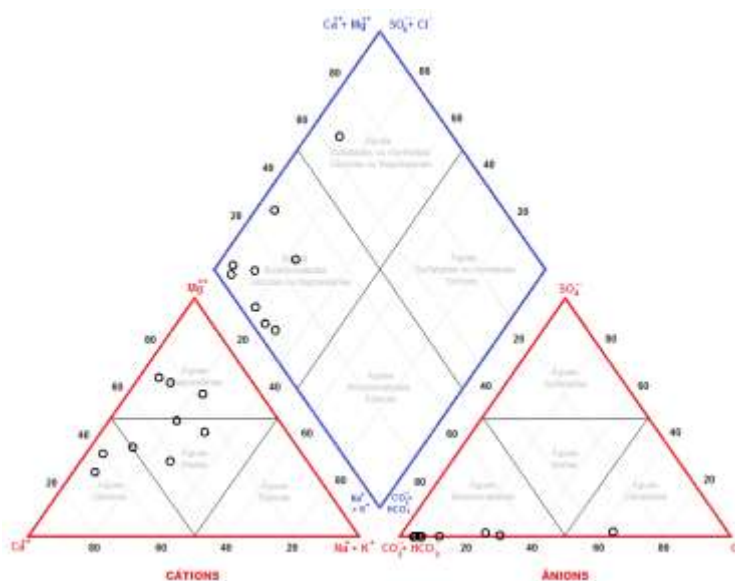


Figura 5 – Classificação das águas amostradas estudadas com Diagrama de Piper.

Fonte: Autor (2021).

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). A partir da análise dos resultados de δD e $\delta^{18}\text{O}$, pode-se elaborar a linha de tendência dos resultados isotópicos da área (Fig. 6).

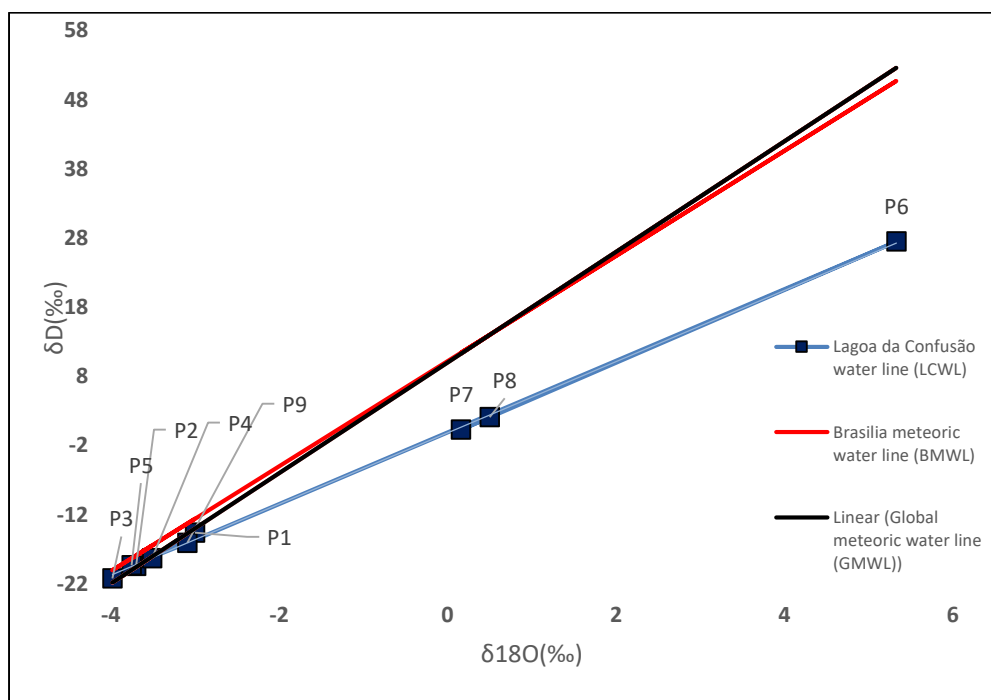


Figura 6 – Variação do sinal isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ e δD no entorno da Lagoa da Confusão. A Linha de Água Local (LCWL) em comparação com a Linha de Água Meteorológica Global (GMWL) e Linha Meteorológica Global de Brasília – BMWL.

Fonte: Autor (2021).

O coeficiente angular da linha de tendência isotópica do entorno da Lagoa da Confusão foi de 5,15, que indica que as águas subterrâneas não sofreram evaporação significativa durante o processo de infiltração, sendo estas originadas da infiltração da precipitação nas áreas de recarga. A composição isotópica das águas superficiais coletadas no rio Urubu (P7 e P8) e, especialmente, na Lagoa da Confusão (P6) evidenciam evaporação significativa, como esperado.

A correlação entre $\delta^{18}\text{O}$ 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 TEJJEIRO 2005; AL-CHARIDEH 2012; QIBO et al. 2016).

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 (P7) e de 0,5‰ $\delta^{18}\text{O}$ e 2,21‰ δD (P8). Na Lagoa da Confusão (P6), obteve-se valores de 5,33‰ $\delta^{18}\text{O}$ e 27,5‰ δD .

Os valores de excesso de deutério (Tab. 2) 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.

Os valores da razão isotópica de carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{CCID}$) 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 .

4. Considerações finais

Com o auxílio da geofísica, pode-se comprovar que a Lagoa da Confusão está assentada sobre substrato carbonático. Em adição, os inúmeros lineamentos, que incluem falhamentos de grande extensão, a posição da lagoa em zona de cisalhamento e a inflexão em seu contorno implicam que a gênese da lagoa esteja relacionada à ação combinada das

estruturas que passam pelo substrato rochoso com o processo de carstificação. Essa ação também é interpretada na distribuição regional das ipucas.

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 CO₂ presente nos solos das áreas de recarga ou nas águas da chuva, sendo constatada a dominância de espécies iônicas de HCO₃⁻, Ca²⁺ e Mg²⁺.

O estudo dos isótopos estáveis permitiu identificar as características cársticas pressupostas 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 ($\delta^{13}\text{CCID}$) foram predominantemente negativos e indicam uma maior contribuição de processos de dissolução de carbonatos por H₂CO₃.

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.

No entanto, sugere-se levantar seções geofísicas locais ortogonais às direções principais dos lineamentos aqui interpretados, para entender, em detalhe, o arcabouço estrutural ao entorno da lagoa e assim, juntamente, a outros dados (e.g. de sondagem, de poço), será possível discutir, com profundidade, seu modelo evolutivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Tocantins, através do Programa de Pesquisa em Recursos Hídricos, processo nº 2014.20300.000009. Agradecem também ao Laboratório de Saneamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Paraíso, à Sequeent, à Universidade Federal de Ouro Preto e à CPRM pelo apoio.

Referências

- AL-CHARIDEH, A. Recharge rate estimation in the Mountain karst aquifer system of Figehe spring, Syria. *Environmental Earth Sciences*, v. 65, n. 4, p. 1169-1178, 2012.
- APHA, *American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st. Centennial Edition, Washington, 2005.
- ARAGUAS, L. J.; DIAZ TEIJEIRO, 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.
- 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.
- BORBA, W. F.; SILVERIO, J. L.; KEMERICH, P. D.; SOUZA, E.; FERNANDES, G.; CARVALHO, I.; MORANDI, L. Análise da qualidade da água de poços de monitoramento em área de disposição de resíduos sólidos urbanos. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 7, n. 2, 307–316, 2021.
- 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*. Brasília, Brasil, 1981.

- CARDOSO, L. H.; BACELLAR, L. A. P.; BARBOSA, M. S. C.; LIMA, H. M. Geophysical analysis of natural caves in iron lithotypes in the region of Mariana, Southeastern Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *International Engineering Journal*, v. 71, n. 4, p. 561-570, 2018.
- CARNEIRO, M. A.; BARBOSA, M. S. C. Implicações geológicas e tectônicas da interpretação magnetométrica da região de Oliveira, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 1, p. 87-98, 2008.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Guia Nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas*. São Paulo, SP: CETESB; ANA, 2011.
- Chartzoulakis, K. & M. Bertaki, 2006: Water use in agriculture on Mediterranean islands: present situation and future perspective. In: Koundouri, P. et al. (eds.) *Water management in Arid and Semi-Arid Regions*. Edward Elgar, pp. 136-157, Cheltenham.
- CHEMSEDDINE, F.; DALILA, B.; FETHI, B. Characterization of the main karst aquifers of the Tezben Plateau, Tebessa Region, Northeast of Algeria, based on hydrogeochemical and isotopic data. *Environmental Earth Sciences*, v. 74, n. 1, p. 241-250, 2015.
- 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.; TOGNELLI, 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. 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.
- 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.
- 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.
- GEOSOFT / SEEQUENT, software Oasis Montaj. Versão 9.8.1. 2020.
- 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.
- 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: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/lagoa-da-confusao/panorama>. Acesso em: 16/11/2023
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Publishing, 2002. 262 p.
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S.A. *Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. Projeto Aerogeofísico Conceição do Araguaia, Serviço Geológico do

- Brasil/ Ministério de Minas e Energia/ Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2012. v. 1, 296 p.
- LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Estudos isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídios ao modelo conceitual de fluxo. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, v. 41, n. 2, p. 355-365, 2011.
- MARTINS, A. K. E.; SILVA, E.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SOARES, V. P. Mapeamento de unidades geomorfológicas na Fazenda Lago Verde, planície do Araguaia, município de Lagoa da Confusão, estado do Tocantins. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 1831-1838.
- 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.
- 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, 159f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente). Universidade Federal do Tocantins, Palmas - TO, 2005.
- 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.
- PEREIRA, G.C.; MORAIS, F. Geofísica aplicada ao estudo dos fluxos subsuperficiais no entorno da Lagoa da Confusão - TO. *Geonorte*, v. 2, n. 4, p. 1475-1483, 2012.
- 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.
- REIS, H. L. S.; BARBOSA, M. S. C.; ALKMIM, F. F.; PEDROSA-SOARES, A. C. Magnetometric and gamma spectrometric expression of southwestern São Francisco basin, Serra Selada Quadrangle (1:100.000) Minas Gerais State. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 30, p. 445-458, 2012. DOI: 10.22564/rbgf.v30i4.232
- SOUZA, E. L.; GALVÃO, P.; ALMEIDA, R.; PINHEIRO, C.; BAESSA, M.; CABRAL, M. Stable Isotopes Studies in the Urucu Oil Province, Amazon Region, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 7, n. 3, 131-142, 2015.
- 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.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Applied Geophysics*. Second ed. New York: Cambridge University Press, 1990. 774p.
- TOCANTINS, Instituto Natureza do Tocantins-Naturatins. Portaria Nº. 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. 225-280.

YONG TECHNOLOGY INC., software GeoRose. Versão 0.3.0. 2020.

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.